



Animation phénoménologique de la mer — une approche énactive —

Marc Parenthoën

► To cite this version:

Marc Parenthoën. Animation phénoménologique de la mer — une approche énactive —. Modélisation et simulation. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2004. Français. NNT: . tel-00007695v2

HAL Id: tel-00007695

<https://theses.hal.science/tel-00007695v2>

Submitted on 22 Dec 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mémoire de thèse

École Doctorale SMIS, spécialité : Informatique

Animation Phénoménologique de la Mer
— une approche énactive —

Mots clés : modélisation, autonomisation, énaction, simulation, réalité virtuelle, systèmes complexes, psychologie écologique, épistémo-praxéologie.

Marc PARENTHOËN

Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (*LISyC, EA 3883*)
marc.parenthoen@cerv.fr

— soutenance : lundi 6 décembre 2004, 14h00 —

CENTRE EUROPÉEN DE RÉALITÉ VIRTUELLE (*CERV*)

25 rue Claude Chappe, BP 38, F-29280 Plouzané, France

Alain	COLIN DE VERDIÈRE	(Examinateur)
Frédéric	DIAS	(Examinateur)
Pascal	GUITTON	(Rapporteur)
Marcel	LE FLOC'H	(Examinateur)
Fabrice	NEYRET	(Rapporteur)
Jacques	TISSEAU	(Directeur)

Sommaire

Sommaire	3
Liste des figures	9
Remerciements	13
Prologue	15
1 Introduction	17
1.1 Positionnement de la thèse	17
1.2 Organisation du mémoire	19
Références	21
I Les états de mer	23
2 La mer des marins	27
2.1 Introduction	27
2.2 Mer hétérogène : notion de plan d'eau	28
2.3 Langage maritime des états de mer	30
2.3.1 Météorologie et micro-météorologie : les vents	30
2.3.2 Houle	33
2.3.3 Mer de vent	34
2.3.4 Hydrographie	36
2.4 Conclusion	39
Références	40

3 La mer des océanographes	41
3.1 Introduction	41
3.2 Equations de la dynamique des fluides	42
3.2.1 Modélisation physique	42
3.2.2 Résolution mathématique	46
3.3 Phénoménologie physique des états de mer	48
3.3.1 Groupes de vagues	49
3.3.2 Naissance et propagation des vagues d'origine éolienne	53
3.3.3 Interactions avec le courant et la bathymétrie	56
3.3.4 Le bout du rouleau	60
3.4 Conclusion	64
Références	66
4 La mer des infographistes	71
4.1 Introduction	71
4.2 Approche particulière	72
4.3 Approche spectrale	74
4.4 Modèles récents	76
4.5 Conclusion	78
Références	78
II La méthode de modélisation énactive	83
5 Fondements conceptuels	87
5.1 Introduction	87
5.2 Psychologie écologique	88
5.2.1 Perception directe des affordances	89
5.2.2 Perception active	90
5.2.3 Principes écologiques de la modélisation	92
5.3 Système complexe énactif	95
5.3.1 Principe d'autonomisation	95
5.3.2 Principe d'énaaction	97
5.3.3 Principe de clôture sous causalité efficiente	99
5.4 Hypothèse énactive	100
5.4.1 Pourquoi l'entité perçoit le monde?	102

5.4.2	Pourquoi l'entité agit sur le monde ?	102
5.4.3	Pourquoi l'entité s'adapte au monde ?	103
5.4.4	Présentation conceptuelle de l'hypothèse énactive	104
5.5	Conclusion	107
	Références	108
6	Formalisation d'un modèle énactif	115
6.1	Introduction	115
6.2	Modélisation informatique	116
6.2.1	Formalisation théorique	117
6.2.2	Formalisation pragmatique	118
6.3	Objets actifs	119
6.3.1	Structure paramétrique	120
6.3.2	Structure des savoir-faire	120
6.3.3	Structure des activités	121
6.3.4	Briques élémentaires du modèle formel	123
6.4	Trois types d'objets actifs	124
6.4.1	Champ expérimental, milieux et phénomènes	124
6.4.2	Aisthesis, praxis et poiesis	130
6.4.3	Objets actifs <i>prédiction, action et adaptation</i>	135
6.5	Organisation énactive	142
6.5.1	Modèle d'entité autonome	142
6.5.2	Interactions entre entités	150
6.5.3	Entités du second ordre	153
6.6	Vers une méthodologie	154
6.6.1	Méthodologie expérimentale	154
6.6.2	Briques formelles	154
6.6.3	Autonomisation des modèles	155
6.6.4	Modèles autonomes en énaction	157
6.7	Conclusion	157
	Références	158
7	Du modèle formel aux entités virtuelles	163
7.1	Introduction	163
7.2	Représentation des entités virtuelles	164

7.2.1	Objets actifs et activités	165
7.2.2	Vers un langage orienté entités énactives	167
7.3	Itérations asynchrones et chaotiques	169
7.3.1	Simulation de l'autonomie temporelle	170
7.3.2	Rôle du chaos	171
7.4	Interactions entité-entité	172
7.4.1	L'objet actif <i>médiateur des interactions</i>	172
7.4.2	Entités du second ordre et complexité des interactions	176
7.5	Conclusion	179
	Références	180
III	Le modèle IPAS	183
8	Entités physiques du modèle IPAS	187
8.1	Introduction	187
8.2	Groupe de vagues	188
8.2.1	Train d'ondes contrôlant le groupe	189
8.2.2	Perturbations en phase et en amplitude	192
8.2.3	Autres paramètres et savoir-faire internes du groupe	196
8.2.4	Propriétés expérimentables et praxis du groupe	198
8.3	Déferlement	202
8.3.1	Structure des données	202
8.3.2	Front actif d'un déferlement	203
8.3.3	Phase passive et mort d'un déferlement	204
8.3.4	Aspects graphiques et sonores d'un déferlement	205
8.4	Vents, courants et bathymétrie	206
8.4.1	Vents	206
8.4.2	Courants et bathymétrie	207
8.5	Conclusion	208
	Références	209
9	Interactions phénoménologiques d'IPAS	211
9.1	Introduction	211
9.2	Interactions entités physiques → déferlement	213
9.2.1	Création d'un déferlement par les groupes	213

9.2.2 Propagation d'un front actif et absorption	214
9.2.3 Transport d'un déferlement par le courant et les vents	216
9.3 Interactions entités physiques → groupe	217
9.3.1 Balises enregistrées et vie du groupe	217
9.3.2 Interaction bathymétrie → groupe	219
9.3.3 Interaction courant → groupe	222
9.3.4 Interaction vents → groupe	224
9.3.5 Interaction déferlement → groupe	226
9.3.6 Interaction groupes → groupe	229
9.4 Epiphénomène visualisation	230
9.4.1 L'entité visualisateur	230
9.4.2 Révélation de la mer	232
9.5 Conclusion	233
Références	233
10 Conclusion	237
10.1 Bilan	237
10.1.1 Les affordances de la mer	237
10.1.2 La méthode de modélisation énactive	238
10.1.3 Les entités énactives de la mer	239
10.2 Perspectives	240
10.2.1 Vers la formation maritime en environnement virtuel	240
10.2.2 Vers l'acceptation d'un modèle physique	240
10.2.3 Vers une méthodologie de modélisation	241
Références	241
Glossaire	243
Références	245
Résumé étendu, abstract et résumé	261

Liste des figures

2.1	Un exemple de plan d'eau hétérogène	28
2.2	Différents comportements de l'eau repérés en navigation	29
2.3	Vent synoptique généré par les systèmes météorologiques	30
2.4	Variation normale du vent dans un nuage à développement vertical [Mayençon 92]	32
2.5	Organisation des cellules convectives en rues ou en anneaux	32
2.6	Aspect de la mer associé à une vitesse moyenne du vent : l'échelle Beaufort	35
2.7	Hauteurs significatives des vagues de la mer de vent	36
2.8	Vagues et courant contraires provoquant d'intenses déferlements	37
2.9	Différents types de hauts-fonds et leurs effets sur les vagues (photos extraites de [Robin 89])	39
2.10	Vocabulaire marin des états de mer et phénomènes correspondants	40
3.1	Résolution numérique directe des équations de la dynamique des fluides	48
3.2	Groupes de vagues vus par satellite	49
3.3	Groupes de vagues mesurés par une bouée ASIS et décomposition en ondelettes	52
3.4	Ondelette mère de Morlet 2D	53
3.5	Couplage de la mer et du vent	54
3.6	Mer jeune intensément forcée par le vent avec déferlements fréquents	55
3.7	Réfraction de la houle dans la baie de Douarnenez	57
3.8	Compression des groupes s'opposant au courant dans le passage du Fromveur	58
3.9	Dissipation non-linéaire de l'énergie des vagues par déferlement en un courant de dérive	60
3.10	Prototype de bulbe de mousse active et similarité géométrique	61
3.11	Cavitation, gazéification et décollement : trois causes possibles du déferlement précosse	62
3.12	Couverture de la mer par la mousse résultante des déferlements	63
3.13	Modélisation océanographique des phénomènes observés par les marins	65

4.1	Trochoïde comme forme primitive de vague et influence de la profondeur	72
4.2	Résultats des pioniers de l'approche particulière en infographie, il y a vingt ans	73
4.3	Effet de texture par bruit de Perlin	73
4.4	Filtrage du spectre d'un bruit blanc par un modèle océanographique	75
4.5	Animations temps réel de la mer par une approche spectrale	75
4.6	Résolution adaptative du maillage pour la visualisation d'une “tempête”	76
4.7	Notion de plan d'eau dans le jeu vidéo <i>Virtual Skipper</i>	77
5.1	Les deux modalités de contrôle du mouvement par le cerveau [Droulez et Berthoz 88] . . .	91
5.2	Principe d'éaction : l'exemple de la cosmologie des aborigènes australiens	98
5.3	Clôture sous causalité efficiente en biologie relationnelle	100
5.4	Clôture sous causalité efficiente dans notre modèle d'animation phénoménologique	101
5.5	Organisation d'entités autonomes selon l'hypothèse énactive	105
6.1	Objet actif : brique élémentaire de modélisation	120
6.2	Représentation interne comme 3 modes cognitifs asynchrones en parallèle	138
6.3	Structure formelle d'entité et relation au milieu expérimental	144
6.4	Le sablier des horloges des entités en interaction	150
7.1	Activité et Objets : <i>ARéVi</i> un langage orienté <i>objets actifs</i>	166
7.2	Vers un langage orienté <i>entités énactives</i> pour l'animation des modèles énactifs	168
7.3	Déclenchement périodique d'activités quasi-asynchrones	170
7.4	Pseudo-code du rôle d'initialisation des protocoles par le <i>Médiateur des interactions</i> . . .	173
7.5	Pseudo-code du rôle de simplification topologique par le <i>Médiateur des interactions</i> . . .	173
7.6	Décomposition des points de la géométrie en “quad-tree”	174
7.7	Pseudo-code du rôle de remise en cause des protocoles par le <i>Médiateur des interactions</i> .	174
7.8	Pseudo-code du rôle de réalisation d'une expérience par le <i>Médiateur des interactions</i> .	175
8.1	Plan d'eau hétérogène peuplé d'entités physiques en énaction	188
8.2	L'ondelette de Morlet, réifiée en un train d'onde, contrôle le groupe de vagues	190
8.3	Profil longitudinal des crêtes des vagues du train d'ondes	191
8.4	Interpolations non-linéaires et leurs effets sur la forme des vagues	193
8.5	Correction appliquée au calcul de $\frac{d\phi}{d\xi}$	194
8.6	Coupe longitudinale d'un groupe de 5 vagues avec ses perturbations de phase	195
8.7	Position et vitesse orbitales déterminées par un groupe de vagues	200
8.8	Forme de la surface et normales analytiques dues à la praxis d'un groupe de vagues . . .	201

8.9	Agent vent synoptique	206
9.1	Création de la structure spatio-temporelle du milieu par les entités énactives	212
9.2	Interactions physiques modélisées dans IPAS	213
9.3	L'aisthesis de propagation des fronts actifs des déferlements créés par les groupes	215
9.4	Pseudo-code de l'absorption d'un déferlement par un front actif	216
9.5	Pseudo-code du transfert d'un point entre deux représentants d'un déferlement	216
9.6	Exploration aléatoire par un groupe de vagues de son environnement	218
9.7	Balises générées dynamiquement par l'aisthesis des groupes de vagues	219
9.8	Détermination dynamique de la direction de réfraction du groupe	220
9.9	Influence du courant : réfraction et divergence d'un groupe	223
9.10	Animation de la géométrie de l'aisthesis de l'entité visualisateur	231
9.11	Révélation de la mer <i>via</i> les observations de l'entité visualisateur	232

Remerciements

Tout d'abord, un énorme coup de chapeau à ma femme Alexandra, pour m'avoir encouragé dans la rédaction de ce mémoire en prenant en charge nos deux adorables enfants Loup et Iouri, agés respectivement de 5 ans et 2 ans, auprès desquels je m'excuse d'avoir passé beaucoup plus de temps sur ma thèse qu'à les aider à inventer leur monde.

J'ai été recruté en septembre 1996, comme PRAG à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) pour être intégré dans le Laboratoire d'Ingénierie Informatique (LI2), maintenant situé au Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV) et faisant partie de l'EA 3883, qui devrait se nommer Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (LISyC). J'en remercie tous les protagonistes, notamment mes collègues de l'ENIB et du CERV et les secrétaires du CERV, de l'ENIB et de l'UBO dont le travail d'organisation administrative est si précieux.

Un grand merci à Jacques Tisseau (LI2/CERV), directeur de cette thèse, pour son investissement personnel dans la réalisation d'un environnement de travail d'une qualité rare pour la recherche, tant du point de vue des relations humaines au sein du LI2, du point de vue des conditions matérielles à disposition des chercheurs, que du point de vue de la pertinence toujours constructive de ses remarques sur le travail de ses collègues, et dont j'ai bénéficié plus particulièrement en tant que thésard ; j'ai éprouvé un grand plaisir à faire une thèse dans ces conditions.

Merci aux autres membres du jury — Alain Colin de Verdière (LPO/UBO-Brest), Frédéric Dias (CMLA/ENS-Cachan), Marcel Le Floc'h (UBO-Brest, directeur de l'ED-SMIV) (*Examinateurs*) — et notamment aux rapporteurs — Pascal Guittot (LabRI-Bordeaux) et Fabrice Neyret (GRAVIR/IMAG-Grenoble) — qui ont eu la patience de lire ce mémoire, notamment le chapitre 6 relativement indigeste sur la formalisation des entités énactives.

Merci à Thierry Morineau pour m'avoir initié à la psychologie écologique et à son importance pour la réalité virtuelle. Merci à Bernard Simon et Jean-Yves Guinard pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux alors balbutiants et pour les discussions sur les *affordances* utilisées en voile lors de la lecture d'un plan d'eau ou au niveau sensori-moteur pour barrer un voilier de compétition.

Merci aux athlètes Jean François Cuzon, Michel Desjoyaux, Sébastien Josse et Vincent Riou pour les entretiens ayant permis de décider d'une expertise élégante sur le pilotage de leurs engins de compétition et la confiance qu'ils ont su témoigner malgré les difficultés opérationnelles d'implémentation du barreur virtuel comme pilote automatique.

Merci à Bertrand Chapron, Jérôme Gourrion et Nicolas Reul de m'avoir initié à l'océanographie physique en répondant à toutes mes questions et en me fournissant les références bibliographiques associées à chaque problème identifié lors de la modélisation des phénomènes océanographiques.

Merci à Isabelle Autissier qui m'a prêté son matériel électronique et à mes parents qui m'ont soutenu moralement et financièrement, afin de réaliser une campagne de mesures sur mon comportement de barreur lors de la mini-transat'97 : course transatlantique en solitaire d'octobre à novembre 1997,

sur des voiliers high-tech surpuissants de 6,50 mètres. Merci au directeur de l'ENIB, François Ropars, qui a signé l'ordre de mission sans frais pour cette campagne de mesures, et à tous les collègues qui m'ont permis d'organiser mon emploi du temps afin de participer à cette *Mini-transat'97*.

Merci à tous ceux qui ont participé au développement de la librairie ARéVi, et plus particulièrement à Fabrice Harrouet, dont le travail sur la simulation des objets actifs s'est avéré indispensable à la réussite de l'instrumentation de notre modèle à bases d'entités $\text{\textcircled{C}}$ nactives.

Merci à Thomas Jourdan qui a su, d'une part relever, en 2003, le pari d'un sujet de DEA sur l'animation de la mer par un système multi-agents basé sur des groupes de vagues et des déferlements ; puis d'autre part, en tant qu'ingénieur de recherche au CERV, il a su identifier des problèmes d'implémentation et trouver des solutions appropriées pour permettre l'instrumentation logicielle faisant vivre les modèles de la mer virtuelle IPAS.

Merci à tous les gens que j'ai pu rencontrer dans les groupes de travail (GT-AS, GT-EA2215, GT-rendu, GT-RV, JICD, Psy-Ergo-Hainaut) ou les conférences (AFIG, EURO, FUZZ-IEEE, ICVS, ISOPE, ISRA, LFA, SAB, SCI, SMC, VRIC, 3IA) et qui m'ont permis, entre autre, d'identifier les points clés dans la présentation de mes idées.

Merci au Ministère de la Recherche pour son aide financière dans l'*Action Concerté Incitative, Cognitique 2000*, sur le projet *Contribution à la modélisation des contrôles cognitifs dans l'activité de déplacement d'un mobile au sein d'un environnement virtuel*, thème nouvelle technologie et cognition, et merci aux sociétés *Mer agitée* et *Micrel-NKE* pour leur soutien financier sur le projet *barreur virtuel*.

Prologue

Les mondes virtuels, même en s'en tenant à l'immédiateté de leur apparence sensible, appartiennent pleinement à l'ordre du signe. Si l'on peut transmettre directement des expériences sensorimotrices de mondes virtuels, il n'est pas possible de communiquer sans intermédiaire, sans traduction des expériences réelles du monde réel. Pour transmettre des intentions, des pensées, des images subjectives, on est toujours obligé de traduire en signe [Peeters 98].

Hugues Peeters, *Fiche de lecture sur L'idéographie dynamique [Lévy 91]*.

Ce mémoire est un acte de communication scientifique. Il traduit un ensemble d'intuitions issues de mon expérience personnelle. En tant qu'individu intrigué par les mécanismes de la connaissance, j'ai eu la chance de suivre le DEA de sciences cognitives enseigné à Grenoble, en 1993. En tant qu'individu pris par la mer, j'ai pu participer à la minitransat de 1997, course en solitaire sur des voiliers surpuissants de 20 pieds de long. En tant qu'individu immergé dans le laboratoire d'ingénierie informatique (LI2) de Brest depuis septembre 1996, j'ai été imprégné de l'approche individu centrée et de l'autonomisation des modèles pour leur instrumentation en réalité virtuelle. J'ai pu vivre au jour le jour l'émergence de la reconnaissance des travaux réalisés dans ce laboratoire, sous la forme de la construction du centre européen de réalité virtuelle (CERV), où les relations humaines sont, au jour d'aujourd'hui, d'une qualité rare.

Ce mémoire est une application de la démarche scientifique à la modélisation des phénomènes naturels en réalité virtuelle. Il peut se voir comme une présentation de la démarche associée à la majeure partie des travaux du CERV, que ce soit pour la modélisation de la coagulation sanguine, du système immunitaire humain, de la sécurité des systèmes informatiques, du comportement d'acteurs virtuels, des bancs de poissons, des environnements virtuels de formation, des utilisateurs de téléphones portables, d'interfaces adaptées à des déficiences sensorimotrices ou d'une bibliothèque de simulation d'entités autonomes et de rendu 3D... En cela, j'espère que la méthode présentée sera utile au moins pour fixer les idées sur une démarche possible pour l'appréhension des systèmes complexes.

Ce mémoire contient certainement de nombreuses maladresses ; je m'excuse auprès de gens qui se sentirait offensés par mes propos. Dans le chapitre 6, j'ai eu l'impression d'écrire de nombreuses tautologies épistémologiques ; j'espère que vous ne vous ennuierez pas trop. Une partie des idées présentées ici sont, pour moi, encore à peine sorties du stade intuitif, ce manque de recul peut expliquer la lourdeur probable de certaines phrases.

En une phrase, j'ai appliqué ce que j'ai compris de la psychologie écologique à l'ergonomie de l'activité de modélisation d'un environnement naturel, pour en déduire comment instrumenter un système de réalité virtuelle et faciliter le travail du modélisateur en lui fournissant une méthode de modélisation avec un outil de simulation interactif ; nous avons essayé cette méthode pour la mer.

Bonne lecture...

Chapitre 1

Introduction

Le terme énaction vise à souligner la conviction croissante selon laquelle la cognition, loin d'être la représentation d'un monde prédominant, est l'avènement conjoint d'un monde et d'un esprit à partir de l'histoire des diverses actions qu'accomplit un être dans le monde [Maturana et Varela 80].

Humberto Maturana et Francisco Varela, *Autopoiesis and cognition : the realization of the living.*

1.1 Positionnement de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la modélisation des phénomènes naturels pour une instrumentation en un système de réalité virtuelle. Un tel système est *par essence* un univers de modèles, incluant l'homme dans la boucle. Les modèles sont des idées humaines sur les phénomènes naturels ; les modèles ne sont pas et ne peuvent pas être les phénomènes naturels eux-mêmes. L'utilisateur d'un système de réalité virtuelle, immergé en temps réel dans cet espace par la triple médiation des sens (perception), de l'action (expérimentation) et de l'esprit (modélisation) peut être spectateur, acteur et/ou créateur [Fuchs et al. 03]. Ainsi, la participation active de l'utilisateur à cet univers de modèles place la réalité virtuelle comme un outil de simulation pour la cybernétique moderne qui inclut l'*humain dans la boucle* [Segal 01], permettant de mieux appréhender la complexité de ces modèles.

« *La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs* » [Fuchs et al. 03].

Dans ce cadre, nous cherchons à définir une modélisation d'un environnement naturel permettant à l'utilisateur humain d'y retrouver une projection de son *éaction* naturelle [Maturana et Varela 80], *i.e.* ses expériences sensibles du monde réel. Nous nous limitons à la simulation des modèles des phénomènes naturels et n'aborderons pas le problème matériel des interfaces immersives, qu'elles soient multi-sensorielles [Burdea et Coiffet 93], instrumentales [Cadoz 94] ou comportementales [Fuchs 96]. L'être humain observe, utilise et crée [Boden 94] l'environnement de réalité virtuelle, c'est à dire l'interaction entre l'individu et les modèles des phénomènes naturels. Le système de réalité virtuelle doit donc tenir compte à la fois des aspects humains, physiques et informatiques.

L'axe humain. Une expertise de l'inscription de l'individu dans son environnement naturel fournit les phénomènes qu'il faut modéliser pour un système de réalité virtuelle permettant l'immersion d'un utilisateur.

L'axe physique. La modélisation des phénomènes naturels demande de respecter les principes physiques d'interaction entre ces phénomènes, comme, par exemple, la conservation de l'énergie, de la masse ou de la quantité de mouvement.

L'axe informatique. L'instrumentation informatique du modèle permet d'expérimenter le modèle, c'est à dire de réaliser des expériences en réalité virtuelle en fonction de la technologie disponible et de la complexité numérique de la simulation.

Cette expérimentation *in virtuo* [Tisseau 01] peut alors être à l'origine d'une modification du modèle selon les trois axes : humain, physique ou informatique.

Une étude des *affordances* [Gibson 77] de l'activité de modélisation d'un système complexe multi-modèles [Morin 90], va nous conduire à proposer une méthode de modélisation consistant à autonomiser les modèles des phénomènes en des entités autonomes interagissant selon ce que nous appelons l'*hypothèse énactive*. Cette thèse s'appuie sur trois idées fortes :

1. La modélisation est une activité humaine qui traduit implicitement [Vallée 97], et doit traduire explicitement [Gibson 79], une certaine praxis humaine.
2. Les phénomènes naturels sont modélisés *en tant qu'entités autonomes* [Varela 79], et ceci demande d'autonomiser les modèles associés [Tisseau et Harrouet 03].
3. Les interactions entre entités autonomes passent par la médiation d'un milieu structuré par les entités elles-mêmes : selon les principes de *perception active* [Berthoz 97] et d'*énaction* [Maturana et Varela 80].

Premièrement, l'individu humain est abordé par l'éclairage de l'ergonomie cognitive [Gibson 79]. L'approche écologique en psychologie — ou ergonomie cognitive — propose d'observer ce sur quoi s'appuie et émerge l'adaptation d'un être vivant en analysant l'interaction entre l'individu et son environnement, avant de formuler des modèles scientifiques (donc hypothétiques) sur comment l'information est intégrée par l'individu [Vicente et Wang 98]. En cela, elle s'inspire du courant phénoménologique de la philosophie présupposant une relation perceptive originelle à toute construction scientifique [Merleau-Ponty 45]. Les recherches de cette branche de la psychologie ont pour but d'utiliser cette connaissance particulière du sujet humain pour améliorer la situation ou l'outil de travail [Tricot et al. 03].

Dans ce cadre, il est nécessaire de présenter à l'utilisateur du système de réalité virtuelle, ses *affordances* naturelles, afin d'améliorer l'efficacité de son activité. Ces *affordances*, vues comme des interactions entre l'environnement et l'acteur, vont définir explicitement les phénomènes naturels qu'il faut modéliser. En ce qui concerne l'activité de modélisation elle-même, l'objet de cette thèse est de fournir une méthode établie d'après ces notions psychologiques d'*affordances*, illustrant un exemple pragmatique d' « *épistémo-praxéologie* » [Vallée 97] pour la modélisation interactive des systèmes complexes *via* le système de réalité virtuelle.

Deuxièmement, les phénomènes naturels sont modélisés *en tant qu'entités autonomes* [Varela 79]. L'autonomisation d'un modèle, consiste à lui donner des capacités de perception, d'action et d'adaptation ; la raison d'être de l'autonomisation n'est pas conceptuelle, mais pragmatique en vue de l'instrumentation [Tisseau et Harrouet 03]. L'autonomisation d'un modèle apparaît comme une contrainte nécessaire pour la modélisation interactive d'un système complexe, *via* sa simulation informatique. En effet, le travail effectué pour décrire un phénomène par un modèle autonomisé n'a pas à être remis en cause lors de l'introduction d'un nouveau phénomène dans le système. Cela facilite la construction itérative du système multi-modèles en offrant la possibilité de ne travailler que sur l'un des modèles à la fois sans s'occuper des autres, ou d'introduire à tout moment un nouveau modèle. Autonomiser le modèle ne demande pas de considérer le phénomène naturel comme ayant ces capacités. Le phénomène réel est naturellement inscrit dans un monde physique contrignant son évolution et il n'y a pas de raison nécessaire à supposer, par exemple, qu'un phénomène physique perçoive quoi que ce soit, ce serait lui donner des intentions anthropomorphiques qui n'ont pas lieu d'être dans le cas d'un phénomène physique. Par contre, en réalité virtuelle, le modèle d'un tel phénomène n'est pas inscrit dans un monde physique [Longo 03] et il faut reconstituer le monde physique virtuel dont à besoin le modèle du phénomène pour agir dans le système.

Troisièmement, les interactions entre ces entités sont basées sur un principe de *perception active* [Berthoz 97], principe selon lequel les entités autonomes ont une démarche active dans la perception de leur environnement ; ce sont ces actes de perception qui vont créer les expériences à partir desquelles des interactions peuvent avoir lieu. L'organisation énactive résultante de la modélisation est alors composée d'entités autonomes en interaction *via* le milieu qu'elles créent et façonnent elles-mêmes [Maturana et Varela 80]. En déléguant aux modèles la fabrication du milieu dont ils ont besoin pour déterminer leurs interactions, nous pouvons simuler dans un même environnement virtuel des modèles

liés à des échelles phénoménologiques très différentes les unes des autres, sans passer par un maillage *a priori* de l'espace-temps, et tout en respectant, par exemple, les lois de conservation en physique.

Ces hypothèses conceptuelles sont traduites en un modèle formel pragmatique, dans lequel nous formalisons les notions d'objet actif, d'entité autonome et d'organisation énactive. La formalisation fournit une méthode de modélisation des phénomènes naturels et d'instrumentation de ces modèles permettant au concepteur de simuler en réalité virtuelle le système multi-modèles à tout moment de la création.

Nous appliquons cette méthode pour réaliser une animation interactive de la surface de la mer. Le système de réalité virtuelle, générant les états de mer, doit pouvoir être utilisable par des marins et être crédible aux yeux des océanographes. Le modèle obtenu se nomme IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) et permet l'animation interactive d'un plan d'eau hétérogène de plusieurs kilomètres carrés. IPAS intègre, d'une part les notions marines de groupe de vagues, de déferlement, de vents synoptique et local, de courant et de bathymétrie, d'autre part les notions physiques de conservation de l'action, de stress du vent et de réfraction des vagues de gravité lors des interactions vagues/déferlements/vents/courant/bathymétrie. Les simulations interactives ont lieu en temps réel et ne nécessitent aucun pré-calcul.

Ainsi, notre contribution consiste à définir une nouvelle approche pour la modélisation des phénomènes naturels, en vue de leur simulation en un système de réalité virtuelle. Selon cette approche, les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes interagissant par la médiation d'un milieu qu'elles structurent et façonnent elles-mêmes. Nous appelons cette nouvelle approche incluant l'Homme dans la boucle : la méthode de modélisation énactive. Cette méthode participative de modélisation (partie II) est conceptualisée (chapitre 5), formalisée (chapitre 6), instrumentée (chapitre 7) et appliquée (parties I et III) dans le cas de l'animation de la mer au voisinage de la surface pour des marins et des océanographes.

1.2 Organisation du mémoire

Ce document s'organise autour de trois grandes parties : les *affordances* de la mer selon les axes humain, physique et informatique (partie I), la *méthode* de modélisation des phénomènes naturels selon l'*hypothèse énactive* (partie II), puis une *application* de cette méthode à l'animation phénoménologique interactive de la mer (partie III).

1. La partie I : **les états de mer**, caractérise la manière dont l'état de mer est abordé par le **marin** (Ch.2), l'**océanographe** (Ch.3) et l'**infographiste** (Ch.4) ; c'est une sorte d'état de l'art dans chacun des trois domaines — humain, physique, informatique — correspondants aux phénomènes caractéristiques des états de mer.

La mer des marins (Ch.2). Il s'agit d'une expertise de la lecture d'un plan d'eau hétérogène d'après la forme et l'évolution des groupes de vagues et des déferlements, selon les conditions météorologiques et hydrographiques. Ces phénomènes sont localisés sur le plan d'eau et servent de points de repère pour décider des trajectoires à faire suivre au navire ; ils forment les *affordances* du marin. Pour être utilisable par des marins, la mer virtuelle doit présenter ces phénomènes utilisés par les marins pour naviguer, *i.e.* les *affordances maritimes* de la navigation.

La mer des océanographes (Ch.3). L'océanographie physique établit des équations (Navier-Stokes, Euler ou Bernouilli) à partir des lois de conservation appliquées à des volumes infinitésimaux. L'océanographie phénoménologique utilise des propriétés des solutions théoriques et numériques de ces équations, et des résultats empiriques d'après des mesures sur l'océan ou en bassin, pour caractériser la naissance et l'évolution des états de mer. Un état de mer est alors caractérisé par la forme et la distribution des vagues d'origine éolienne, et la répartition des déferlements. Parmis les phénomènes étudiés par l'océanographie, *i.e.* les *affordances océanographiques*, figurent les groupes de vagues, les déferlements, les vents, la bathymétrie et les courants, recouvrant ainsi les *affordances* du marin. Pour être crédible aux yeux des océanographes, la mer virtuelle doit respecter les lois de conservation de la physique et les résultats expérimentaux sur les état de mer ; elle doit aussi permettre

d'expérimenter *in virtuo* des hypothèses pour la modélisation de ces phénomènes.

La mer des infographistes (Ch.4). Pour l'animation d'un plan d'eau étendu sur plusieurs kilomètres de rayon, on trouve principalement deux grandes approches inspirées d'hypothèses océanographiques : l'approche particulière inspirée des études sur le mouvement des particules d'eau dans les vagues [Biesel 52] et l'approche spectrale à partir des spectres des états de mer [Pierson et Moskowitz 64]. 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 : des mouvements orbitaux d'un bouchon posé sur l'eau pour l'approche particulière, et des mouvements verticaux de hauteur d'eau au dessus d'un caillou posé sur le fond pour l'approche spectrale. A ces deux approches s'ajoutent des résolutions numériques directes des équations de Navier-Stokes simplifiées pour représenter ponctuellement des effets très localisés autour d'objets, comme des rochers, des bouées ou des bateaux.

Aucun modèle d'animation temps réel ne tient compte simultanément à l'échelle d'un plan d'eau hétérogène d'une dizaine de kilomètres 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. Si les résultats sont visuellement impressionnant, ils ne correspondent pas aux attentes des marins vis à vis de leur notion de plan d'eau hétérogène. Aussi, les modèles utilisés ne permettent pas aux océanographes de tester des modèles phénoménologiques comme, par exemple, les groupes de vagues ou les déferlements.

2. La partie II : **la méthode de modélisation énactive**, s'articule autour de trois chapitres : les **concepts** qui orientent notre approche et fondent l'*hypothèse énactive* (Ch.5), la **formalisation** pragmatique d'un modèle énactif caractérisant une méthode de modélisation d'un système complexe multi-modèles (Ch.6), son **instrumentation** en un système de réalité virtuelle aide alors le modélisateur dans sa tâche, en faisant vivre ces modèles en interaction (Ch.7).

Fondements conceptuels (Ch.5). L'analyse de la modélisation des systèmes complexes sous l'éclairage de la psychologie écologique, nous conduit à formuler l'*hypothèse énactive*, basée sur les principes d'autonomie, d'enaction et de clôture sous causalité efficiente pour la conception interactive d'un système multi-modèles *via* son instrumentation en un système de réalité virtuelle.

Formalisation d'un modèle énactif (Ch.6). Il s'agit ici de formaliser, pour une instrumentation en un système de réalité virtuelle, les modèles intervenant dans le résultat de la modélisation selon l'*hypothèse énactive*. Cette formalisation est pragmatique dans le sens où elle fournit une méthode : la *modélisation énactive*. Selon cette méthode, les modèles des phénomènes naturels sont autonomisés en des entités autonomes interagissant *via* un milieu qu'elles structurent et façonnent elles-mêmes.

Du modèle formel aux entités virtuelles (Ch.7). L'instrumentation pour la simulation d'une organisation énactive d'entités autonomes doit contraindre le programmeur à respecter le modèle formel par la médiation d'un langage dont l'ergonomie facilite la construction de telles entités. Aussi, faire vivre les entités en énaction demande d'une part, de simuler leur autonomie temporelle, d'autre part, de résoudre les problèmes topologiques de leurs interactions.

Cette méthode, dite *modélisation énactive*, correspond explicitement à la démarche mise en œuvre implicitement pour la plupart des travaux réalisés au CERV depuis une dizaine d'années.

3. La partie III : **le modèle IPAS**, est une application de la *modélisation énactive* pour obtenir une animation phénoménologique interactive de la mer. Les **entités physiques** représentent des modèles des *affordances* maritimes et océanographiques présentées dans la première partie (Ch.8). Leurs **interactions** asynchrones passent par la médiation d'un milieu marin sans utiliser de maillage *a priori* du plan d'eau (Ch.9).

Entités physiques d'IPAS (Ch.8). Les phénomènes naturels modélisés en tant qu'entités autonomes sont les groupes de vagues, les déferlements, les vents synoptique et locaux, les courants et la bathymétrie. L'action de ces entités autonomes est caractérisée par les propriétés qu'elles donnent au milieu dans leurs voisinages d'influence, en fonction des éléments de leurs ensembles de paramètres du type *phénomène*.

Interactions phénoménologiques dans IPAS (Ch.9). Les interactions entre les modèles sont

étudiées océanographiquement pour les groupes de vagues et les déferlements. En fonction des propriétés du milieu perçues par leurs perception-active, ces deux types d'entités adaptent leur comportement afin de respecter les notions physiques de conservation de l'action, de stress du vent et de réfraction des vagues de gravité lors des interactions vagues/déferlements/vents/courant/bathymétrie. La visualisation de la mer est un épiphénomène traduisant l'interaction avec le modèle d'animation, où l'observateur est au même niveau conceptuel que les phénomènes physiques modélisés en tant qu'entités en énaction.

Le modèle obtenu se nomme IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) et permet l'animation d'un plan d'eau hétérogène de plusieurs kilomètres carrés. Les simulations interactives ont lieu en temps réel et ne nécessitent aucun pré-calcul. Cette nouvelle approche pour l'animation de la mer intéresse déjà le monde de la compétition à voile et de la sécurité maritime pour la formation en environnement virtuel, le monde de l'offshore pour l'étude en réalité virtuelle du comportement d'infrastructures en fonction des états de mer et le monde de l'océanographie physique pour tester des hypothèses phénoménologiques sur les états de mer.

Enfin, le chapitre de **conclusion** (Ch.10) dresse un bilan du travail effectué et ouvre des voies de recherche en guise de perspectives.

Un **glossaire** situé vers la fin du mémoire, reprend les définitions des principaux termes utilisés par notre méthode de modélisation énactive.

En plus d'une référence bibliographique d'ensemble située à la fin du document, chaque chapitre se termine par sa propre liste de références, les labels restant compatibles entre les bibliographies partielles et la bibliographie globale.

Les dernières pages de ce mémoire comprennent un **résumé étendu** en trois pages, un résumé d'une page en anglais (**abstract**) sur la troisième de couverture et un **résumé** d'une page sur la quatrième de couverture.

Références

- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Biesel 52] Biesel, F. (1952). *Gravity waves*, volume 521, chapitre Study of wave propagation in water of gradually varying depth, pages 243–253. National Bureau of Standards Circular.
- [Boden 94] Boden, M. (1994). Precis of the creative mind : myths and mechanisms. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(3) :519–570.
- [Burdea et Coiffet 93] Burdea, G. et Coiffet, P. (1993). *La réalité virtuelle*. Hermès, Paris.
- [Cadoz 94] Cadoz, C. (1994). Le geste, canal de communication homme/machine : la communication instrumentale. *Technique et Science Informatiques*, 13(1) :31–61.
- [Fuchs 96] Fuchs, P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. Presses de l'Ecole des Mines, Paris, AJIIMD édition.
- [Fuchs et al. 03] Fuchs, P., Arnaldi, B., et Tisseau, J. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1, chapitre La réalité virtuelle et ses applications. Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- [Gibson 77] Gibson, J. (1977). The theory of affordances. In Shaw, R. et Bransford, J., éditeurs, *Perceiving, acting and knowing - toward an ecological psychology*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Gibson 79] Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Longo 03] Longo, G. (2003). Computer modelling and natural phenomena. *SIGSOFT Software Engineering Notes*, 28(5) :1–5.
- [Maturana et Varela 80] Maturana, H. et Varela, F. (1980). *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*. Reidel, D., Boston.

- [Merleau-Ponty 45] Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard, Paris.
- [Morin 90] Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. ESF Editeur, Paris.
- [Pierson et Moskowitz 64] Pierson, W. et Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69 :5181.
- [Segal 01] Segal, L. (2001). *The dream of reality : Heinz Von Foerster's constructivism*. Springer.
- [Tisseau 01] Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle : autonomie in virtuo. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), document de synthèse, Université de Rennes 1. <http://www.enib.fr/~tisseau/>.
- [Tisseau et Harrouet 03] Tisseau, J. et Harrouet, F. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 2, chapitre Autonomie des entités virtuelles. Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- [Tricot et al. 03] Tricot, A., Détienne, F., et Bastien, C. (2003). Recherches en psychologie ergonomique – introduction. *Psychologie Française*, 48(2) :1–8.
- [Vallée 97] Vallée, R. (1997). Théorisation de la perception-action et autonomie de Vendryès. *Revue Internationale de Systémique*, 11(5) :445–454.
- [Varela 79] Varela, F. (1979). *Principles of biological autonomy*. Elsevier, New York.
- [Vicente et Wang 98] Vicente, K. et Wang, J. (1998). An ecological theory of expertise effects in memory recall. *Psychological Review*, 105 :33–57.

Première Partie

Les états de mer

Introduction à la partie I

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 où, par exemple, des marins virtuels vont improviser avec des opérateurs humains, nous décrivons les principaux repères utilisés par les marins pour "lire" un plan d'eau hétérogène et décider des stratégies de navigation à suivre à partir de ces *affordances maritimes*. Nous réalisons ensuite une description océanographique de ces phénomènes et nous présentons les lois de conservation physiques établissant les équations de la dynamique des fluides ; ces phénomènes et ces lois de conservation constituent les *affordances océanographiques*. Appliquées au niveau des phénomènes eux-mêmes, plutôt qu'à des volumes infinitésimaux, ces lois de conservation doivent être vérifiées pour que la mer virtuelle soit utile aux océanographes, lors de la modélisation phénoménologique des états de mer. Enfin, nous montrons en quoi les principaux modèles actuels d'animation de la mer sont insuffisants pour les marins et les océanographes.

Dans le chapitre 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 ce chapitre dans le tableau de la figure 2.10, page 40. Nous présentons dans le chapitre 3 les modèles physiques des phénomènes océanographiques décrivant théoriquement et 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. Cette bibliographie océanographique est résumée dans le tableau de la figure 3.13, page 65. Puis le chapitre 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 hétérogène dans la plupart des simulateurs actuels.

Nous conclurons cette partie sur l'importance du développement d'une animation phénoménologique de la mer tel que l'environnement virtuel de simulation puisse présenter à la fois les *affordances maritimes* et *océanographiques*.

La publication [Parenthoën et al. 03] correspond à la présentation d'un résumé partiel de cette partie I pour la communauté de l'informatique graphique en décembre 2003 (AFIG'03).

Chapitre 2

La mer des marins

Il faut entendre avant tout, surtout par nuit noire, lorsque la vue doit se mettre au repos ou plutôt en veilleuse [...] Lorsque l'ouïe fatiguée se met à son tour en veilleuse, c'est le touché qui prendra le quart : touché du vent, des embruns et de la pluie sur la joue ou sur la nuque, qui fera part des moindres variations de cap [...] Le sens tactile, lui aussi, est un précieux auxiliaire du solitaire. Il saura noter une modification anormale des mouvements du bateau, un petit coup de roulis d'apparence anodine mais pas comme il devrait être. J'attribue même au sens tactile la détection de la proximité d'un grain [pendant le sommeil ...] : les grains nocturnes m'avaient toujours trouvé sur le pont bien avant leur visite, avec tout le temps nécessaire pour rouler de la toile ou l'amener en vrac [Moitessier 71].

Bernard Moitessier, *La longue route*

2.1 Introduction

Ce chapitre aborde la perception de la mer par les 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, comme le précise la citation placée en exergue de ce chapitre. Dans ce chapitre, nous présentons la notion de plan d'eau telle qu'elle est perçue par les marins, puis nous spécifions un langage de haut niveau en termes métier pour la description de la mer.

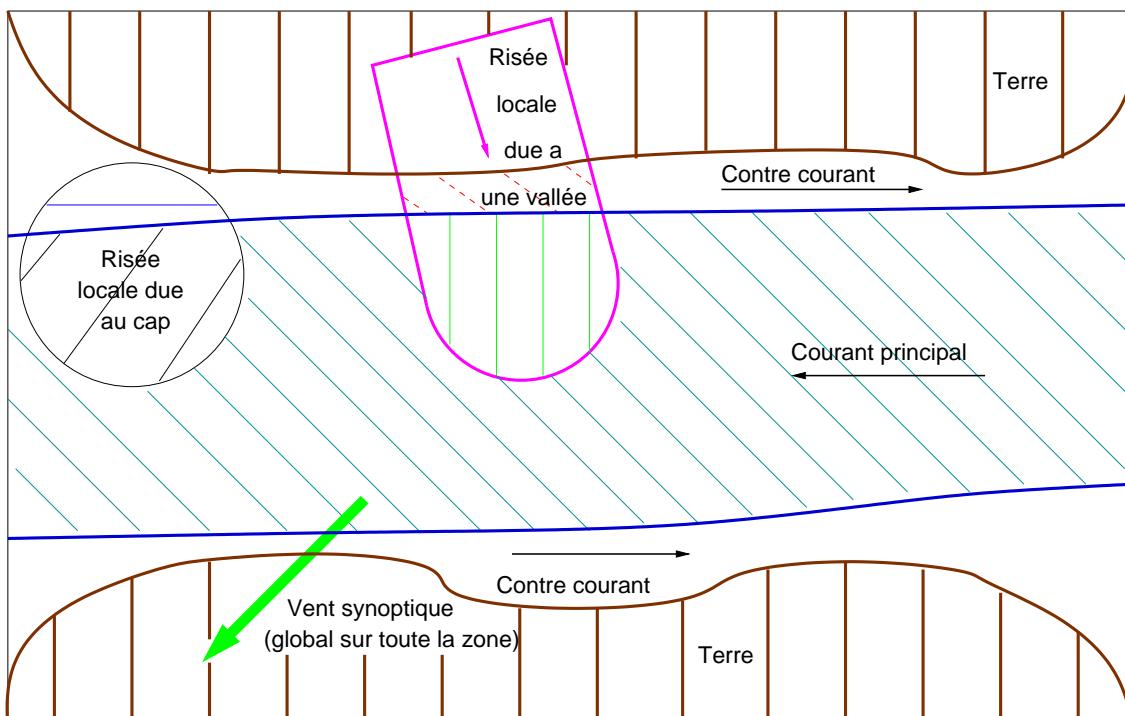
En premier lieu, nous présentons les concepts nécessaires à la spécification d'une mer crédible : le comportement de la mer virtuelle doit présenter les phénomènes utilisés par les marins pour naviguer, *i.e.* les *affordances maritimes* de la navigation. Ces *affordances*¹ sont principalement déduites de l'observation de phénomènes localisés sur le plan d'eau et liés au comportement des vagues en fonction du vent, de la bathymétrie et des courants. L'ensemble de ces phénomènes constitue la notion de plan d'eau hétérogène et ce plan d'eau est décrit par un vocabulaire métier spécifique.

Dans la section 2.2, 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 décrit dans la section 2.3, puis résumé dans la section de conclusion 2.4 à la fin de ce chapitre dans le tableau de la figure 2.10, page 40.

¹ Dans le chapitre 5, la section 5.2, page 88, revient sur cette notion d'*affordance*, terme provenant de la psychologie écologique.

2.2 Mer hétérogène : notion de plan d'eau

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 2.1). Les choix de stratégies de navigation sont guidés par les affordances 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 cette lecture d'un plan d'eau est primordiale dans la formation des skippers au choix des stratégies de navigation [Saury et al. 97].



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.

FIGURE 2.1 : 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 [Moitessier 71, Stoffregen et Bardy 01]. Le modèle pour générer une mer réaliste doit ensuite respecter des contraintes physiques des phénomènes représentés. Par exemple, les vagues ne sont qu'exceptionnellement solitaires (on parle alors de soliton) : elles se déplacent en groupe. Un train d'onde (ou groupe de vagues) est une unité physique transportant de l'énergie (due à l'action du vent ou d'un bateau) sur l'eau. Il est formé d'un groupe de vagues se déplaçant sur la surface de l'eau. Les vagues d'un groupe sont d'une longueur d'onde de l'ordre du mètre (en dessous du mètre, la formation de groupes stables n'a pas lieu) à la centaine de mètres (lors des plus grosses tempêtes) ; elles se déplacent de l'arrière vers l'avant du groupe et sont plus grosses vers le centre du groupe. 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 (*fetch*), modifier lentement leur forme (*cambrure*, *longueur d'onde*, *avance des crêtes*), ou faire apparaître des irrigations 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. La figure 2.2 montre ces différents effets par des photos réelles.



Les risées, les courants, la présence de hauts-fonds sont identifiables par le comportement de la mer. En (a), les risées locales apparaissent comme des zones plus sombres, dues à la présence d'un plus grand nombre de vagues capillaires. On remarque aussi l'effet d'un navire sur la mer qui génère un sillage. Lors d'un départ de régate à la voile en (b), le grand nombre de sillages crée un bouillonnement qu'il vaut mieux anticiper. En (c), un voilier évite par temps calme une zone de courant intense repérable par les nombreuses vaguelettes qui moutonnent ; si une grosse houle venait à la rencontre d'un tel courant, les vagues se transformeraient localement en d'énormes déferlantes. Lorsque les vagues passent au dessus de hauts-fonds en (d), elles se cambrent et peuvent même déferler si le fond devient trop faible.

FIGURE 2.2 : Différents comportements de l'eau repérés en navigation

L'observation de la densité de moutons (le nombre de moutonnements) est un indicateur de la vitesse du vent. Lorsque le vent souffle à moins de $4ms^{-1}$, il n'y a pas de moutons. Entre $4.5ms^{-1}$ et $6ms^{-1}$, les moutons sont éparses. Entre $6.5ms^{-1}$ et $8ms^{-1}$ ils sont assez nombreux. Entre $8.5ms^{-1}$ et $10.5ms^{-1}$, ils sont très nombreux. Au dessus de $11ms^{-1}$, les vagues s'organisent (la longueur des crêtes augmente) et certaines crêtes déferlent en laissant des traînées d'écume. Par vent calme, la présence de petits déferlements est toujours associée à la présence d'un courant intense et l'apparition soudaine d'une vague de fond déferlante est toujours associée à la présence d'un haut-fond. Les grosses déferlantes sont redoutées des marins, et certains endroits sont réputés pour leurs barres destructrices, dûes à la présence de forts courants (comme au large de Brest, pour le passage du Fromveur entre Molène et Ouessant, au Sud-Est lors du flot, et au Nord-Ouest lors du jusant) pouvant se combiner avec un haut-fond (comme pour les embouchures de rivière, par exemple la barre d'Etel près de Lorient), une barre étant une crête déferlant en permanence sur une grande longueur. Lorsqu'un gros déferlement vient d'avoir lieu, les tourbillons occasionnés par la mousse passive derrière la vague (la mousse active étant en avant de la vague) retardent momentanément le risque d'un nouveau déferlement en absorbant les vagues de courte longueur d'onde devant l'étendue du déferlement.

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 la prochaine section (figure 2.10 page 40) afin de bien définir quels sont les phénomènes qui doivent être représentés dans un simulateur de mer utilisable par des marins.

2.3 Langage maritime des états de mer

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* [Iachkine 00]. Nous précisons maintenant comment sont caractérisés les vents, les vagues, 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 2.10, page 40. Les descriptions et les formules présentées ci-après sont adaptées du site internet de l'Organisation Météorologique Mondiale² et du livre de météorologie marine [Mayençon 92].

2.3.1 Météorologie et micro-météorologie : les vents

Le vent est responsable de la formation des vagues d'origine éolienne (les autres étant dues par exemple aux tremblements de terre ou aux sillages des bateaux). 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.

2.3.1.1 Echelle météorologique : vent synoptique

Le vent synoptique est généré par un phénomène météorologique très étendu (plusieurs centaines de kilomètres de rayon) comme un anticyclone ou une dépression (figure 2.3). Ses caractéristiques dépendent des champs de pression et des fronts nuageux.

- Les champs de pression définissent des formes (à la manière des altitudes) dont les plus remarquables sont les centres dépressionnaires ou anticycloniques, les gradients, les vallées (talwegs) et les dorsales. Ces formes s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres.
- Les fronts nuageux marquent des changements brutaux dans la direction et la vitesse des vents, selon que de l'air froid vient remplacer de l'air chaud (front froid) ou le contraire (front chaud). Ils s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres, mais leur largeur est beaucoup mieux localisée (quelques dizaines de kilomètres). De part et d'autre d'un front, les vents peuvent énormément varier, éventuellement en vitesse, mais toujours en direction. Ce phénomène s'appelle une bascule du vent de telle direction vers telle autre direction avec ou sans renforcement de sa vitesse.



Un système météorologique s'étend sur quelques milliers de kilomètres et génère un champ rotationnel de vents autour de ses centres dépressionnaires ou de ses anticyclones. Ici, un cyclone s'étant des antilles au Nord de la Floride et génère de puissants vents tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Vu depuis un bateau, le vent du au système météorologique paraît constant jusqu'à l'horizon et à cette échelle de l'ordre de la dizaine de kilomètres de rayon, ce vent s'appelle le vent synoptique. La structure du vent synoptique associé au système météorologique est caractéristique des états de mer générés par le synoptique et permet au marin de se situer par rapport au système global par la lecture des vagues environnant le bateau. Le synoptique est modifié localement par des turbulences dues par exemple à des nuages et ces variations temporelles n'influencent l'état de mer que sur de très courtes distances.

FIGURE 2.3 : Vent synoptique généré par les systèmes météorologiques

² OMM : <http://www.wmo.ch/index-fr.html>

Le vent synoptique évolue au cours du temps en présentant des oscillations lentes (de l'ordre de la dizaine de minutes) autour d'une direction et d'une vitesse moyenne. Selon le phénomène météorologique, le vent peut également tourner ou changer globalement sa vitesse. On dit que le vent tourne “à droite” (resp. “à gauche”) en s’imaginant être une particule d’air en mouvement tournant à droite ou *veering* (resp. à gauche ou *backing*).

Aussi, selon le sens du gradient thermique vertical, l’air est stable (la température diminue en fonction de l’altitude), s’écoule de manière laminaire et les nuages s’ils existent sont très lisses (lenticulaires), ou instable (la température augmente en fonction de l’altitude) : des cellules convectives s’installent localement et les nuages apparaissant dans ces cellules convectives présentent des protubérances (cumulus, cumulonimbus).

2.3.1.2 Echelle micro-météorologique : risées ou rafales

Le nom change selon la vitesse du vent, mais c'est le même phénomène ; c'est une modification locale et temporaire du vent synoptique. On parle alors de vents à l'échelle micro-météorologique. Les trois principaux effets micro-météorologiques sont ceux du relief environnant le plan d'eau, des nuages et des brises thermiques. Tous ces effets sont très complexes et nous ne donnerons ici que les traits généraux de chacun d'entre eux.

Côte et relief

Le frottement du vent sur le sol fait que le vent ralentit en s’approchant du sol. Le frottement est d'autant plus fort que le sol est plus rugueux (forêt, habitat, relief) et que l'air est plus stable (température basse). En général, le frottement du vent est donc plus important sur terre que sur mer (sauf si le sol est beaucoup plus chaud que la mer) et le vent s’oriente parallèlement aux vallées en s'y renforçant (effet Venturi).

Sous le vent d'un relief situé à gauche du vent (en se mettant vent dans le dos), si l'air est stable, le vent est faible près de la côte (sous l'éventuel lenticulaire), puis fort “à droite” (entre deux éventuels lenticulaires), puis relativement faible “à gauche”, etc (les directions sont à inverser si le relief est à droite et c'est indépendant de l'hémisphère) ; si l'air est instable, le vent est très irrégulier surtout sous les éventuels cumulus. Il reprend la direction du synoptique à une distance équivalente à environ 7 fois la hauteur du relief ayant généré la perturbation.

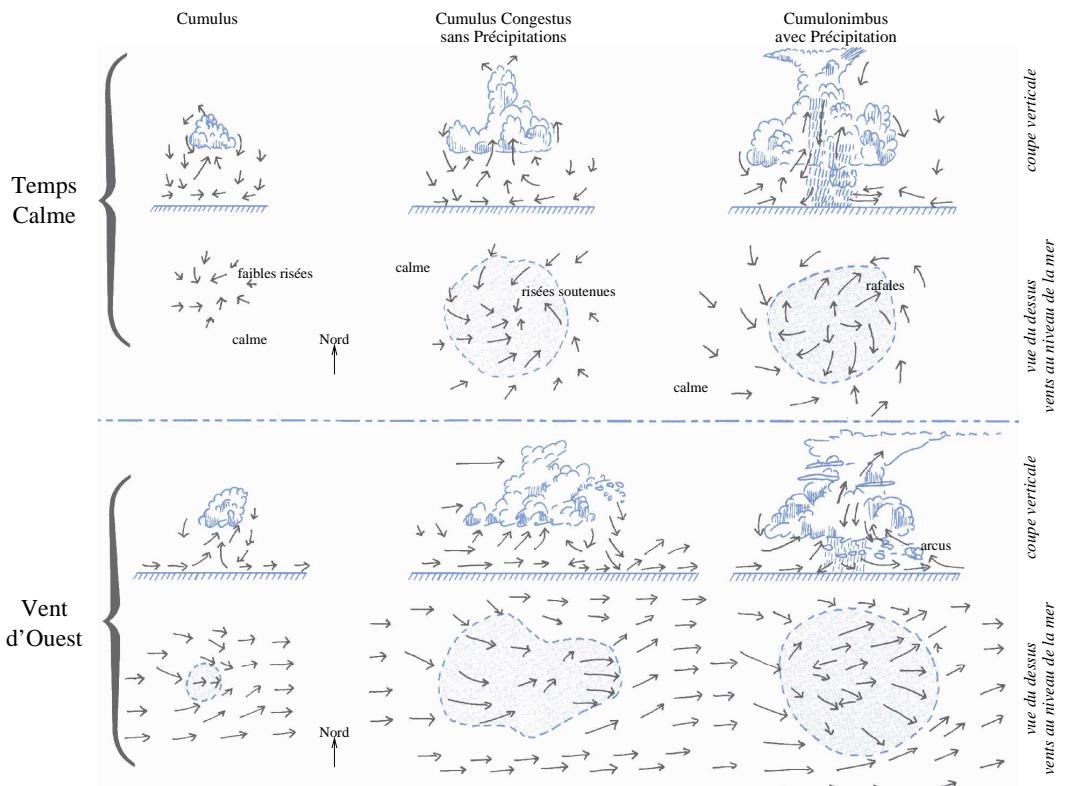
Nuages

C'est lorsque des nuages de type cumulus sont présents que les variations du vent sont les plus sensibles. Chaque nuage du type cumulus correspond à l'existence d'une cellule convective générant sur la mer relativement au nuage des vents tournant (dans l'hémisphère Nord) dans le sens trigonométrique dans les zones de vent ascendant et dans le sens des aiguilles d'une montre sous les averses (les sens sont inversés dans l'hémisphère Sud). Le vent sous un nuage résulte alors de la somme vectorielle du vent synoptique avec le vent convectif comme illustré sur la figure 2.4.

Si l'air est instable mais trop sec, les cellules existent malgré l'absence de nuage. Le passage de ces cellules convectives se traduit en un point donné selon une périodicité plus ou moins nette de l'ordre de quelques minutes, par une succession de *veering* avec renforcement et de *backing* avec affaiblissement. La position de ces cellules n'est alors observable à l'avance que par la modification de l'aspect de la mer. Ces cellules convectives peuvent s'organiser par exemple en *rues* ou en *anneaux* illustrées par la figure 2.5. Bien négociées, ces organisations de cellules convectives permettent aux voiliers d'optimiser les trajectoires.

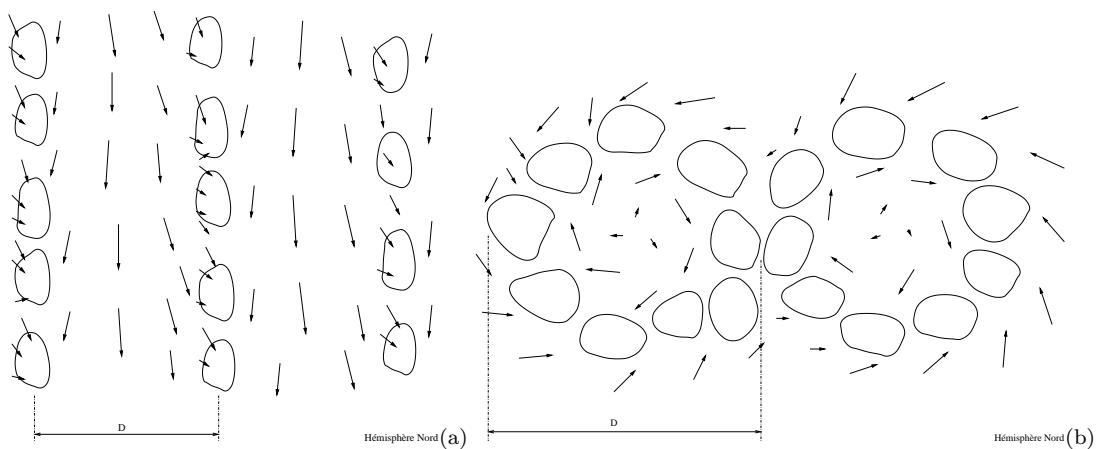
Brises thermiques

Les brises thermiques sont dues à l'effet du soleil et à la différence de capacité calorifique entre la mer et la terre. Une journée bien ensoleillée va rapidement réchauffer la terre, mais peu la mer. L'air souffle alors de la mer vers la terre. Lors de la nuit suivante, la terre devient plus froide que la mer et le phénomène s'inverse : le vent souffle de terre vers la mer. La force et la localisation d'une brise thermique est prévisible en observant les cumulus qui apparaissent le jour au-dessus de la terre, et la nuit au-dessus de la mer. Le thermique de nuit (par vent synoptique nul) est plus faible que celui de jour, car l'air froid sur la mer est plus stable et le vent en est d'autant plus ralenti.



Les nuages traduisent la présence de courants verticaux brassant de l'air instable. Parfois, l'air se précipite jusqu'au sol en ayant grossièrement gardé ses direction et vitesse initiales. En règle générale, lorsque le vent synoptique n'est pas nul, cette direction fait un angle supérieur de 10 à 20° dans le sens des aiguilles d'une montre (hémisphère Nord) à celui du vent soufflant normalement près du sol; quand à la vitesse, elle est de 30 à 40% supérieure. Classiquement, la partie ascendante est à l'avant du cumulus, et la partie descendante à l'arrière, mais il arrive que des courants descendants se trouvent à l'avant pour les nuages suffisamment développés; on voit alors l'avant du nuage s'effilocher, se déchiqueter et s'évaporer en basculant; un rapide courant d'air froid descendant se forme et va taper le sol en engendrant de fortes rafales. Pour un cumulonimbus, le courant descendant peut être dû à une averse; l'eau en s'évaporant accentue le phénomène et les rafales peuvent être extrêmement violentes. L'arrivée de ces rafales est marquée par un bourrelet nuageux très sombre appelé *arcus*.

FIGURE 2.4 : Variation normale du vent dans un nuage à développement vertical [Mayençon 92]



A gauche, en (a), les *rues de nuages* résultent d'un alignement de cumulus en longues bandes parallèles s'étirant de 50 à 500 km, espacées de $D = 3$ à 20 km et orientées dans le sens du vent synoptique. L'écartement D des bandes est de 2 à 3 fois la hauteur de la couche convective. Le vent est alors plus fort en *veering* entre deux rues de nuages et plus faible en *backing* sous les nuages dans l'hémisphère Nord (les directions s'inversent dans l'hémisphère Sud). A droite, en (b), les nuages se regroupent en *anneaux* d'un diamètre D de 10 à 20 km (~ 5 fois la hauteur convective) qui peuvent persister pendant plusieurs heures; ils s'observent principalement au-dessus des zones tropicales par vent calme.

FIGURE 2.5 : Organisation des cellules convectives en rues ou en anneaux

Ainsi, les vents soufflant sur un plan d'eau proviennent d'effets météorologiques de l'échelle du millier de kilomètres pour le vent synoptique à la centaine de mètres pour les phénomènes micro-

météorologiques du relief ou des cellules convectives. Si le vent synoptique varie lentement au cours du temps et est homogène à l'échelle de la dizaine de kilomètres sur tout le plan d'eau, les risées ou rafales sont localisées et se déplacent dynamiquement sur le plan d'eau.

2.3.2 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 parcoururent. Le nombre de vagues par groupe varie de 2 à 20 vagues, classiquement entre 5 et 15.

Tant qu'elle reste en eau profonde, la houle se propage en se transformant très lentement : elle perd de son amplitude, augmente sa longueur d'onde et sa période. Il faut parcourir plusieurs dizaines de kilomètres en suivant la houle pour pouvoir observer ce phénomène. Les vagues deviennent alors peu cambrées et bien organisées (le nombre de vagues par groupe et la longueur des crêtes augmentent). Plusieurs houles peuvent se croiser et chacune d'entre elles possède une direction, une période, une longueur d'onde, une hauteur et une cambrure qui dépendent du vent qui les a générées.

Lorsque plusieurs houles se superposent, il est difficile d'attribuer aux vagues de l'une et de l'autre leurs hauteurs significatives respectives. La précision des observations dépend de l'observateur et du bateau sur lequel il se trouve : sur un voilier de 10 mètres, les petites vagues de 1,50 m de creux et de courte période de 5 secondes (donc d'une longueur d'onde de l'ordre de 20 mètres) feront "bouchonner" le voilier (il va buter dans les vagues) et seront parfaitement perçues, alors qu'une grande houle d'1,5 m de creux mais d'une période de 16 secondes pourra passer inaperçue, car il est impossible de déceler une dénivellation de 1,5 m sur une longueur de 200 mètres (demie longueur d'onde d'une houle de 16 secondes). En revanche, un pétrolier de 200 mètres de long ressentira fortement cette grande houle qui provoquera roulis, tangage et pilonnement, alors que les vagues courtes n'auront aucun effet sur lui et sont de plus difficilement estimables depuis une passerelle située à 20 mètres d'altitude. L'observation de la période des vagues est encore moins précise que celle des hauteurs car les longues périodes sont masquées par les plus courtes. Il existe en permanence un grand nombre de houles distinctes sur la mer, la plupart étant de grande longueur d'onde ($L > 250$ m) et de très faible amplitude ($H < 10$ cm). Dans la pratique, un marin utilise rarement plus de trois houles distinctes pour spécifier ses stratégies de navigation.

Pour un marin, une 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.

Direction θ

C'est la direction d'où vient la houle afin d'indiquer la direction du phénomène qui l'a générée. Par exemple, une houle d'Ouest désigne des vagues se propageant de l'Ouest vers l'Est. La houle lors de sa création prend la direction du vent qui souffle au niveau de la mer. Une fois créée, seuls des courants ou la proximité de la côte peuvent modifier la direction de propagation de la houle, mais pas directement le vent.

Période T

C'est le temps moyen entre deux crêtes. Plus le vent a soufflé fort et/ou sur une grande étendue d'eau libre (fetch), plus cette période est grande. La présence de la côte limite le fetch dans le cas d'un vent soufflant de la terre vers la mer. Au large, le fetch est généralement déterminé par la taille du phénomène météorologique qui produit le vent, et du temps pendant lequel le vent souffle de façon continue à une force donnée. Ainsi, pour une vitesse de vent donnée, il faudra un certain temps pour que les ondes créées atteignent un état statistiquement stationnaire. Ensuite, même si le vent continue à souffler dans cette direction, la houle ne grossit plus et se propage de manière autonome.

Longueur d'onde L

C'est la distance moyenne entre deux crêtes. En eau profonde, $L \approx 3T^2$ et de même que pour la période, plus le vent a soufflé fort et/ou plus le fetch est important, plus cette longueur d'onde est

grande. Les marins savent d'expérience que tant que le fond est à plus d'une demi longueur d'onde, l'effet du fond est négligeable sur la houle.

Hauteur H

C'est la différence moyenne d'altitude entre les sommets et les creux des vagues. Dans la pratique, on utilise la hauteur significative, c'est à dire la hauteur moyenne des vagues *les mieux formées*. Pour lever la part de subjectivité, on définit $H_{\frac{1}{n}}$, qui signifie la hauteur moyenne de la plus grosse vague sur n vagues observées. Par exemple, si l'on observe 100 vagues, et que l'on considère la moyenne des hauteurs des 33 vagues les mieux formées, on obtient $H_{\frac{1}{3}}$.

Cambrure δ

Elle caractérise l'aspect général des crêtes; c'est le quotient de la hauteur d'une vague par sa longueur d'onde $\frac{H}{L}$. Plus la cambrure est faible, plus la vague est ronde et plus la cambrure est importante et plus la crête est anguleuse et la vague aggressive. Quand $\frac{H}{L}$ approche de sa valeur limite qui est théoriquement $\frac{1}{7}$ en eau profonde, la vague vue dans un plan orthogonal aux crêtes est une sorte de trochoïde qui présente sur la crête un angle de 120° . Les particules d'eau au sommet de la crête se déplacent alors à la même vitesse que la vague; elles sont à la limite du déferlement. La forme des crêtes n'est pas uniquement caractérisée par la cambrure car la contribution du vent soufflant sur les crêtes vient déformer les vagues.

Nombre de vagues N

C'est le nombre moyen de vagues entre deux plus grosses vagues. Il correspond grossièrement au nombre moyen de vagues par groupe. Plus la houle est jeune et plus ce nombre est petit et nettement identifiable; au contraire, plus la houle vient de loin et plus la hauteur des vagues est homogène et le nombre de vagues par groupe important.

Etendue des crêtes l

C'est la largeur moyenne des crêtes des vagues. Plus la houle est ancienne et plus cette largeur est grande, tandis que si la houle est récente, les crêtes s'étendent sur de plus petites distances.

Ainsi, la houle est constituée de groupes de vagues bien organisés. Les caractéristiques spécifiant une houle correspondent à des moyennes effectuées sur les groupes de vagues formant cette houle. L'attention qu'un marin porte à une houle dépend du bateau sur lequel il navigue, et il utilise rarement plus de trois houles distinctes pour choisir ses stratégies de navigation.

2.3.3 Mer de vent

En soufflant sur la surface de la mer, le vent génère localement un état de mer, dit *mer de vent*. Les caractéristiques des groupes de vagues de la mer de vent dépendent de la vitesse et direction du vent, de la durée d'action du vent et des dimensions de la zone (*fetch*) sur laquelle souffle un vent d'une vitesse et d'une direction données :

Direction et phénomènes observables de la mer de vent

Globalement, les crêtes des rides, des vaguelettes, des vagues et des lames s'orientent orthogonalement à la direction du vent et se propagent dans le même sens que le vent. Les marins nomment tant pour le vent que pour les vagues la direction d'où ils viennent; un vent d'Ouest signifie un vent qui souffle de l'Ouest vers l'Est, une mer de vent d'Ouest se déplace de l'Ouest vers l'Est. Plus la mer est *jeune* et plus le vent est irrégulier en direction, plus la dispersion autour de cette direction globale est importante.

Même sans anémomètre, instrument mesurant la vitesse du vent, les marins savent très bien estimer la force du vent simplement en observant l'aspect de la mer grâce à l'échelle Beaufort : les différents phénomènes permettant cette estimation sont décrits dans la figure 2.6.

Durée d'action

C'est l'*âge* de la mer de vent. La mer est *jeune* quand le vent vient de commencer à souffler, *vieille* lorsqu'elle s'est entièrement développée. Les diverses périodes des vagues se répartissent autour d'une période principale dominante. Cette dominante est approximativement égale au dixième de la vitesse

Echelle Beaufort	phénomène observé sur la mer	Vitesse du vent
0	comme un miroir	$\leq 1,0 \text{ ms}^{-1}$
1	rides, ressemblant à des écailles de poisson, sans aucune écume	1,5 à $2,5 \text{ ms}^{-1}$
2	vaguelettes courtes, ne déferlant pas	3,0 à $4,0 \text{ ms}^{-1}$
3	très petites vagues ; les crêtes commencent à déferler ; parfois, moutons épars	4,5 à $6,0 \text{ ms}^{-1}$
4	petites vagues ; moutons assez nombreux	6,5 à $8,0 \text{ ms}^{-1}$
5	vagues modérées, nettement allongées ; nombreux moutons, embruns possibles	8,5 à $10,5 \text{ ms}^{-1}$
6	lames se formant ; crêtes d'écume blanche partout plus étendues ; mousse persistante	11,0 à $13,0 \text{ ms}^{-1}$
7	écume blanche des lames déferlantes soufflée en traînées qui s'orientent dans le lit du vent	13,5 à $15,5 \text{ ms}^{-1}$
8	bord supérieur des crêtes se détache en tourbillons d'embruns ; nettes traînées d'écumes orientées dans le lit du vent	16,0 à $18,5 \text{ ms}^{-1}$
9	grosses lames commençant à déferler en rouleaux ; épaisse traînée d'écume	19,0 à $21,5 \text{ ms}^{-1}$
10	déferlements intenses et brutaux, visibilité réduite due aux embruns permanents, surface blanche dans son ensemble	22,0 à $25,0 \text{ ms}^{-1}$
11	mer complètement recouverte de bancs d'écume blanche, lames exceptionnellement hautes, visibilité très réduite	25,5 à $28,5 \text{ ms}^{-1}$
12	air plein d'écume et d'embruns ; bancs d'écume dérivante, visibilité quasiment nulle	$\geq 29 \text{ ms}^{-1}$

Echelle Beaufort proposée par l'OMM en 1994. L'observation d'un phénomène sur la mer se traduit en une vitesse probable du vent générant cet état de mer. Les vitesses correspondant à chaque force Beaufort sont des vitesses moyennes sur au moins dix minutes du vent soufflant à 20 ± 5 mètres au-dessus du niveau de la mer. Des risées ou des rafales de quelques secondes peuvent faire apparaître des phénomènes de manière éphémère, mais pas l'ensemble des caractéristiques décrivant l'aspect de la mer associé à une force de vent donnée.

FIGURE 2.6 : Aspect de la mer associé à une vitesse moyenne du vent : l'échelle Beaufort

du vent s'il souffle depuis peu de temps (1 ou 2 heures), au huitième dans des conditions moyennes et, à la limite, au septième s'il souffle depuis très longtemps et a la place de suivre les vagues (très rarement lors des tempêtes) ; ensuite, même si le vent continue de souffler (avec les mêmes caractéristiques), les vagues n'augmentent plus. Lorsque la mer est jeune, les vagues sont irrégulières en direction, cambrées et peu étendues latéralement ; plus elle vieillit et plus les vagues s'organisent, s'arrondissent et leurs crêtes s'étendent orthogonalement au lit du vent. Au large, c'est principalement la durée du phénomène météorologique qui détermine l'âge de la mer, mais près des côtes ou si les vents sont forts, il faut tenir compte de la taille de la zone d'interaction entre un vent donné et la mer.

Fetch

C'est la distance d'eau libre sur laquelle souffle un vent donné, à 20° et à 2 ms^{-1} près. Plus un vent est fort, plus les vagues qu'il génère se déplacent rapidement, donc plus il a besoin d'une grande étendue d'eau libre pour développer une mer vieille. 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 2.7 ; diagramme obtenu d'après les excellents travaux océanographiques de [Sverdrup et Munk 47], réalisés pour le débarquement lors de la seconde guerre mondiale. Par exemple, un vent de 20 ms^{-1} soufflant sur plusieurs centaines de milles depuis 12 heures génère des vagues d'une période de 8 à 13 secondes avec une période dominante de 10 secondes et des creux de 5-6 mètres ; alors qu'à un mille au large d'une côte, ce même vent (venant de terre) ne lève que des vagues d'une période principale de trois secondes et d'un mètre de creux.

Ainsi, la mer de vent correspond à l'action locale du vent sur la mer. Elle est constituée de vagues très groupées dépendant de la vitesse du vent, de sa durée d'action et du fetch disponible. Des mesures empiriques d'excellente qualité (figure 2.7) permettent de connaître les caractéristiques dominantes des groupes de vagues d'une mer de vent donnée en fonction de la durée d'action, du fetch et de la vitesse du vent.

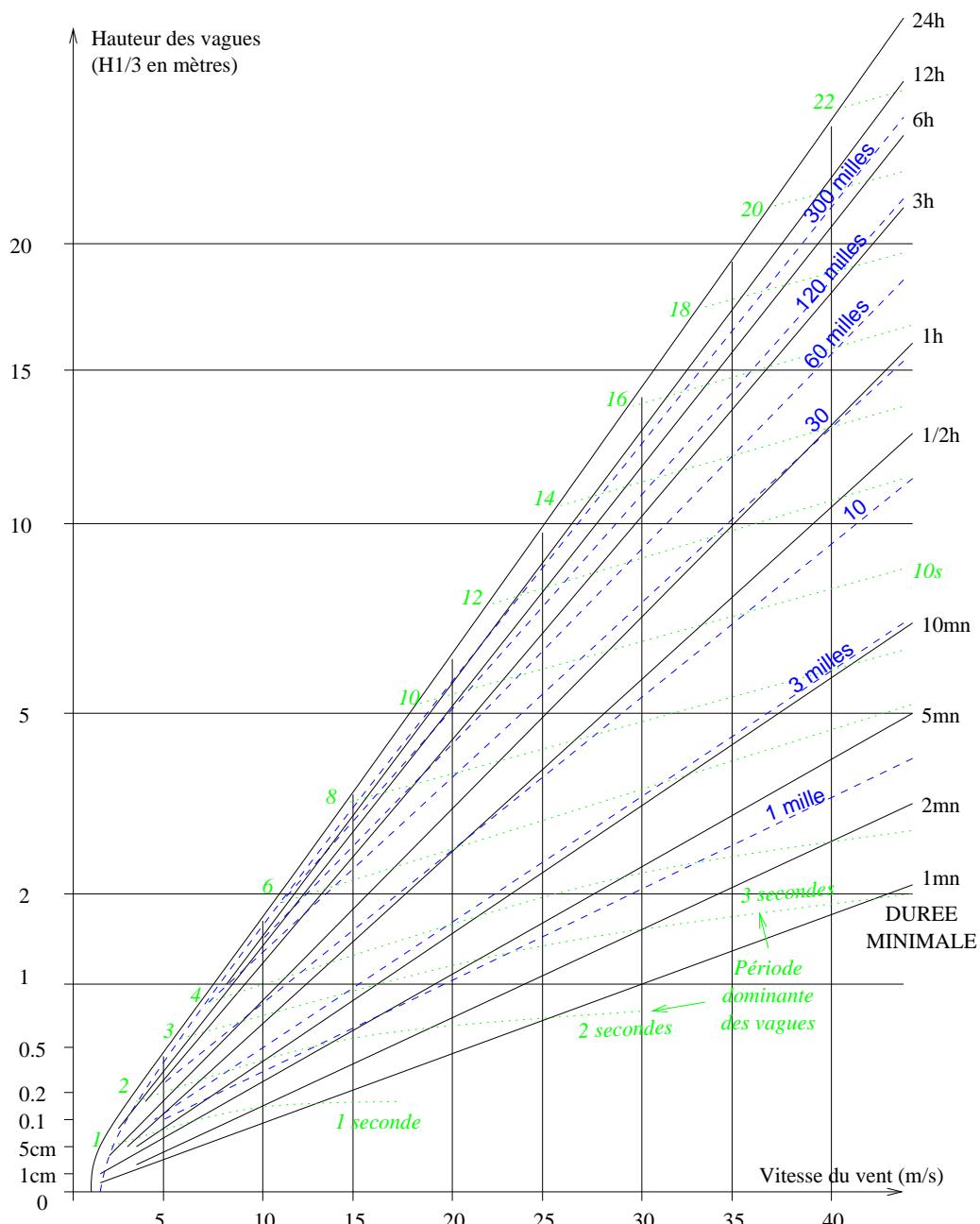


Diagramme obtenu selon [Sverdrup et Munk 47] permettant de connaître la hauteur significative et la période dominante des vagues de la mer de vent en fonction de la vitesse du vent. Prenons par exemple un voilier situé à 3 milles de la côte (1 mille est la longueur d'un arc de grand cercle sur la surface de la terre d'une minute d'angle : 1 mille \approx 1875 mètres), surpris par un coup de vent soufflant à 25 ms^{-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 !

FIGURE 2.7 : Hauteurs significatives des vagues de la mer de vent

2.3.4 Hydrographie

L'hydrographie est la connaissance des champs de courants et de la profondeur (ou bathymétrie). Des modifications du courant ou de la bathymétrie se traduisent par des changements du comportement des vagues utilisés par les marins pour lire le plan d'eau. Nous précisons tout d'abord les principaux types de courant, puis ceux de bathymétrie.

2.3.4.1 Courants

Lorqu'un courant recontre 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 des sens opposées, le courant et les vagues vont dans le même sens, les vagues s'aplatissent, leurs longueurs d'onde et leurs périodes augmentent. On distingue trois grands types de courant à la surface de la mer : les grands courants océaniques, les courants de dérive et les courants de marée.

Une bonne lecture des courants permet d'éviter de gros ennuis et d'aller plus vite : les courants se concentrent au dessus des vallées sous-marines ou sur les caps en faisant apparaître de courtes vaguelettes moutonnantes ; un rocher même immergé génère une vague d'étrave et des remous dans son sillage, tout comme une bouée accrochée au fond. Lorsqu'un courant principal longe une côte, un contre-courant se forme à l'arrière d'un cap ou d'un rocher émergeant. Il peut être utilisé avec précaution pour remonter contre le courant principal. Tous ces courants locaux ne figurent pas sur les cartes et seule l'expérience maritime permet de reconnaître les indices principalement visuels sur le plan d'eau indiquant des lignes de courants et les zones de contre-courant.

Les grand courants océaniques

Ces courants comme le Gulf Stream participent au brassage des océans à l'échelle planétaire, associés aux régimes des vents dominants. Leurs vitesses restent généralement faibles, mais sur des traversées de plusieurs jours, il vaut mieux en tenir compte.

Les courants de dérive

Ils sont dûs aux vents synoptiques. En surface, pour un vent synoptique donné, le courant de dérive est dirigé à $\sim 45^\circ$ de la direction du vent par grande profondeur (vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud), ou dans le même sens que le vent par faible profondeur. Sa vitesse est localement proportionnelle à la vitesse du vent. Ces courants de dérive atteignent rarement 1 ms^{-1} .

Les courants de marée

Ils sont d'origine astronomique (principalement l'interaction Lune-Terre) et sont liés à la variation de la hauteur d'eau attirée par les astres, en présentant des périodes d'environ $25\text{ h }44\text{ mn}$ modulées par un cycle principal de $\sim 28\text{ j }01\text{ h }50\text{ mn}$ (effet du Soleil sur l'interaction Lune-Terre) déterminant le coefficient de la marée. En fonction de la configuration géographique entraînant des phénomènes de résonance, la période de $\sim 25\text{ h }44\text{ mn}$ peut être divisée par 2 (marées diurnes) ou 4 (marées semi-diurnes). Ces courants s'observent exclusivement près des côtes. La précision des phénomènes astronomiques fait que les horaires et l'intensité des courants sont en général très bien connus. Les courants sont présentés sous forme d'un champ de vitesses en fonction du temps écoulé depuis l'heure de la pleine mer ou de la basse mer et du coefficient de marée. Cependant, les phénomènes météorologiques peuvent décaler de quelques minutes l'apparition locale d'un courant de marée et en modifier la force. Il peuvent atteindre 5 ms^{-1} (au Raz Blanchard au large de Cherbourg ou dans le passage du Fromveur au



Lorsqu'une houle recontre un courant contraire, le courant provoque une accumulation d'énergie se dissipant par des déferlements intenses générant de violentes projections d'eau horizontalement en avant de la crête des vagues, pouvant mettre à mal les bateaux dont la quantité de mouvement (le produit $\text{masse} \times \text{vitesse}$) est équivalente à celle de l'eau projetée en avant de la vague par le déferlement.

FIGURE 2.8 : Vagues et courant contraires provoquant d'intenses déferlements

large de Brest par exemple) et transforme alors n'importe quelle houle, même petite, en des montagnes d'eau déferlantes (figure 2.8).

2.3.4.2 Bathymétrie

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. Le plateau continental qui présente une brusque remontée à la centaine de mètres est donc le premier haut-fond rencontré par les longues houles venant du large de période supérieure à 10 secondes.

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 illustré sur la figure 2.9. Ces formes sont les dorsales (cap), les gradients divergeants (baie), les vallées (embouchures) et les sommets (réefs, bancs).

Les dorsales

Les caps qui se prolongent sous la surface de la mer en formant des *dorsales* sous-marines concentrent les vagues. En effet, les vagues s'orientent parallèlement aux isobathes et les gradients de profondeur, orthogonaux aux isobathes et orientés dans le sens de la profondeur décroissante, convergent vers ces dorsales. Le cap Horn, entre l'Antarctique et l'Amérique du Sud est certainement le plus renommé de ces caps pour ces mers particulièrement dangereuses.

Les baies

Elles sont associées à des *gradients divergeants* de profondeur qui dispersent les vagues en les étaillant. Au contraire des caps, les baies sont souvent considérées par les marins comme des abris potentiels.

Les vallées

Les embouchures de rivière font apparaître des *vallées* sous-marines où les vagues déferlent moins et permettent aux bateaux de rentrer à bon port si la rivière n'est pas fermé par une moraine (banc de sable, de vase ou de galets), en restant prudent quant aux effets du courant lors du jusant (marée descendante).

Les hauts-fonds

Les récifs ou des bancs de sables isolés sont des *sommets* du relief sous-marin où de redoutables lames de fond apparaissent subitement, alors qu'elles étaient à peine perceptibles avant d'arriver. Plus la différence de profondeur est brutale, plus soudain et violent est le phénomène comme l'illustre la figure 2.9(b).

Ce n'est qu'au dernier moment et en urgence qu'un marin utilise l'information visuelle des hauts-fonds (par transparence), car c'est d'abord le comportement des vagues qui permettent l'anticipation de sa présence. En effet, la réfraction est d'autant plus faible que l'angle de vue est fermé. A moins de monter en haut du mât, le bateau est quasiment au-dessus du haut-fond lorsque ce dernier est enfin visible au niveau du pont. Si l'on est bien abrité de la houle, dans un lagon par exemple, et que l'on ne dispose plus de l'information sur la profondeur d'après les vagues car ces dernières ont été arrêtées par la barrière de corail, on peut effectivement monter au mât et indiquer des directions à suivre au barreur pour éviter les patates de corail qui se détachent à une ou deux longueurs de bateau en bleu très clair, et encore, à condition de ne pas être ébloui par les reflets du soleil.

Certaines régions comme l'embouchure du Saint Laurent au Canada ou la Mer de la Manche entre le Cotentin et la Cornouaille où les marées sont énormément amplifiées par des effets de résonances voient la hauteur d'eau varier de plus de dix mètres en moins de 4 heures. En fonction de l'heure, un même endroit se comportera ou non en haut-fond vis à vis des vagues passant au-dessus.

Ainsi, simplement en lisant la forme et le comportement des vagues (évolution de cambrure, déferlements...), un marin peut en déduire la nature des courants et de la bathymétrie sur le plan d'eau l'environnant. D'autres informations comme la présence d'algues sur les remontées de courants

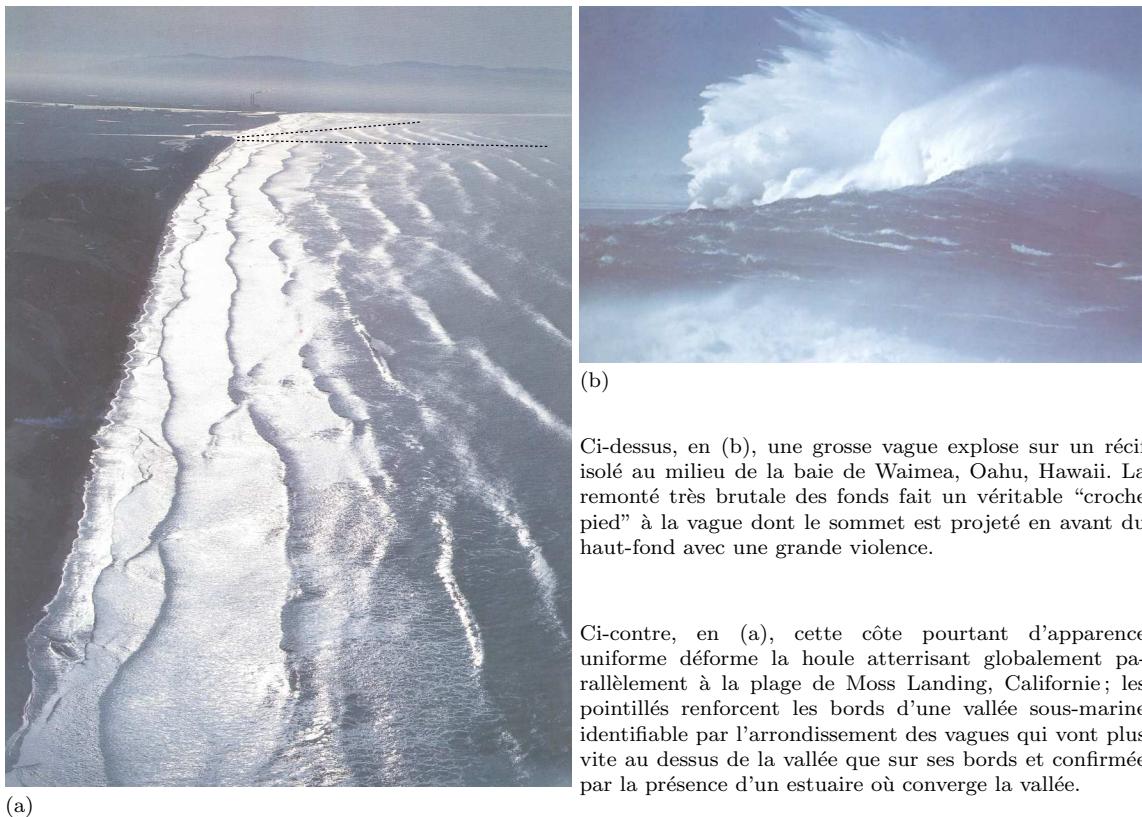


FIGURE 2.9 : Différents types de hauts-fonds et leurs effets sur les vagues (photos extraites de [Robin 89])

(*upwelling*) en interaction avec la profondeur, lui permettent de confirmer ses hypothèses. A partir de ces observations, il trouvera un chemin à prendre en fonction des buts qu'il poursuit.

Les marins utilisent alors un vocabulaire spécifique pour décrire un état de mer hétérogène. Ce vocabulaire correspond à l'observation par les marins de phénomènes localisés leur permettant véritablement de "lire" un plan d'eau hétérogène. Les phénomènes météorologiques et micro-météorologique décrivent le vent synoptique et les risées ou rafales, les houles et les mers de vents permettent de décrire les vagues, enfin, les courants et la bathymétrie sont lus par des modifications spécifiques du comportement des vagues. Cette mer des marins est résumée dans le tableau de la figure 2.10.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'importance de la notion de plan d'eau hétérogène pour les marins et le vocabulaire utilisé pour décrire phénoménologiquement un tel plan d'eau. A partir des phénomènes observés notamment sur les groupes de vagues, les marins 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 et qui leur permettent en temps réel de choisir des stratégies de navigation afin de définir les trajectoires à faire suivre au bateau, 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 2.10.

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". Dans notre modèle d'animation phénoménologique IPAS (en anglais, "Interactive Phenomenological Animation of the Sea" : animation phénoménologique interactive de la mer), présenté dans la partie III, nous nous

terme marin	phénomènes observables	caractéristiques
météorologie	vent synoptique, fronts, lecture visuelle de la force du vent : échelle Beaufort (figure 2.6).	direction, vitesse, oscillations.
micro-météorologie	risée ou rafale (cellule convective, relief), état de mer local (irrisation, moutonnement, déferlement, embruns).	localisation, direction, vitesse, durée.
houle	groupes de vagues bien organisés, 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.
mer de vent	groupes de vagues jeunes, développement de l'état de mer, cambrure des vagues selon la durée d'action du vent et du fetch (figure 2.7).	âge des groupes, direction, longueur d'onde, 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, 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.

FIGURE 2.10 : Vocabulaire marin des états de mer et phénomènes correspondants

attacherons à prendre en compte l'ensemble de ces phénomènes nécessaires aux marins, les marins virtuels comme les marins réels, qui seront immergés dans l'environnement.

Le prochain chapitre résume la physique de ces phénomènes, en décrivant la manière dont les océanographes expliquent les états de mer.

Références

- [Iachkine 00] Iachkine, P. (2000). Étude du plan d'eau de Sydney : identification des courants de marées et des effets du relief dans la baie de Sydney. Rapport technique, Ecole Française de Voile (ENV).
- [Mayençon 92] Mayençon, R. (1992). *Météorologie marine*. EMOM, Edilarge.
- [Moitessier 71] Moitessier, B. (1971). *La longue route*. Arthaud.
- [Robin 89] Robin, P. (1989). *Vagues, l'énergie magnifique*. AGEF.
- [Saury et al. 97] Saury, J., Durand, M., et Theureau, J. (1997). 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.
- [Stoffregen et Bardy 01] Stoffregen, T. et Bardy, B. (2001). On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1) :195–261.
- [Sverdrup et Munk 47] Sverdrup, H. et Munk, W. (1947). Wind, sea, and swell : theory of relations for forecasting. Rapport Technique H.O. Pub. 601, U.S. Navy Hydrographic Office.

Chapitre 3

La mer des océanographes

De leur côté, les océanographes espèrent mettre au point un modèle de mer qui inclurait la dissipation par déferlement. A défaut de pouvoir décrire le phénomène dans ses moindres détails, [...] l'approche la plus prometteuse consiste à rechercher une description phénoménologique du déferlement, c'est à dire à imaginer un modèle qui ne repose pas sur les équations de la mécanique des fluides, mais qui reproduit la réalité dans ses grandes lignes [Dias 03].

Frédéric Dias, *Le déferlement*

3.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'étudier comment la Physique explique les phénomènes observés par les marins (figure 2.10). L'océanographie est la partie de la Physique qui étudie les états de mer, c'est à dire l'interface du système atmosphère/océan, vue du côté de l'eau : principalement les vagues et les déferlements. La démarche consiste à inventer une théorie expliquant qualitativement et quantitativement les phénomènes observés en mer ou en bassin artificiel. Les grands principes de la Physique permettent d'obtenir les équations de la dynamique des fluides qui, en théorie, sont sensées décrire les états de mer et leurs évolutions. Malheureusement, résoudre ces systèmes d'équations non-linéaires aux dérivées partielles constituent un véritable défi aux Mathématiques d'aujourd'hui, comme le précise la citation placée en exergue de ce chapitre. Non seulement, il n'existe pas de solution analytique dans le cas général, mais encore, la complexité algorithmique des méthodes de résolution numérique ne permet pas de simuler les cas d'intérêt pratique. Aussi, l'océanographie décrit des modèles plus phénoménologiques, désignant explicitement les groupes de vagues et les déferlements, et leurs interactions entre eux, avec le vent, les courants et la bathymétrie ; leur justification comprend à la fois des résultats théoriques obtenus par simplification des équations de Navier-Stokes et des résultats empiriques.

La prochaine section présente une introduction sommaire aux équations de la dynamique des fluides et à leur résolution. La section 3.3 décrit les déferlements, les groupes de vagues et leur interaction avec le vent, le courant et la bathymétrie. Ce chapitre se conclut par la présentation d'un tableau récapitulant l'expertise physique du comportement d'un groupe de vagues et d'un déferlement en interaction avec son environnement (figure 3.13, page 65) devant être utilisée dans un modèle interactif d'animation phénoménologique de la mer.

3.2 Equations de la dynamique des fluides

La dynamique des fluides est l'étude des mouvements des liquides et des gaz. Un problème de dynamique des fluides concerne la détermination de certaines propriétés du fluide, comme sa vitesse, sa pression, sa densité ou sa température par des fonctions de l'espace et du temps. Les grandes lois physiques comme la conservation de la masse, la relation fondamentale de la dynamique ou la conservation de l'énergie permettent d'établir des équations que doivent respecter des propriétés d'un fluide en faisant un bilan global sur un certain volume de fluide [Guyon et al. 91]. L'hypothèse de continuité sur le temps et sur les propriétés d'un fluide – l'aspect moléculaire du fluide est ignoré – permet d'obtenir une forme différentielle pour ces équations, dites alors *équations locales*. La résolution d'un tel système d'équations aux dérivées partielles fournit alors une solution au problème. Cependant, leur résolution dans le cas général reste inaccessible aux Mathématiques et constitue un véritable défi pour l'analyse numérique assistée par ordinateur [Shaw 92].

Nous présentons tout d'abord comment la Physique permet d'obtenir les équations les plus classiques de la dynamique des fluides et les choix spécifiques à la modélisation de la mer, puis nous discuterons des problèmes relatifs à leur résolution.

3.2.1 Modélisation physique

Nous présentons successivement l'*équation de continuité* basée sur la loi de conservation de la masse, les *équations de Navier-Stokes et d'Euler* basées sur la relation fondamentale de la dynamique, puis l'*équation de Bernoulli* basée sur la conservation de l'énergie. Enfin, nous introduisons les hypothèses spécifiques à la modélisation de la mer par un système d'équations aux dérivées partielles.

3.2.1.1 Conservation de la masse

Considérons un volume \mathcal{V} fixe par rapport au référentiel utilisé pour décrire l'écoulement du fluide, et limité par une surface fermée \mathcal{S} . A chaque instant, du fluide entre et sort de ce volume ; en supposant qu'il n'y ait pas de terme *source* comme une réaction chimique en phase gazeuse non équimolaire ou en présence d'une phase solide, la variation de masse totale m qu'il contient est égale à l'opposée du flux sortant à travers la surface :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{\mathcal{V}} \rho \, dv = - \iint_{\mathcal{S}} \rho \vec{u} \cdot \vec{n} \, ds \quad (3.1)$$

où le vecteur unitaire \vec{n} normal à la surface \mathcal{S} est orienté vers l'extérieur du volume \mathcal{V} . En permenant la dérivée temporelle avec l'intégration sur le volume fixe \mathcal{V} et en appliquant le théorème d'Ostrogradski au second membre de l'équation précédente, on obtient :

$$\iiint_{\mathcal{V}} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{u} \right) \, dv = 0 \quad (3.2)$$

L'hypothèse de continuité permet alors, en faisant tendre le volume \mathcal{V} vers 0, d'obtenir l'équation dite *équation de continuité* sous sa forme eulérienne :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{u} = 0 \quad (3.3)$$

Aussi, $\operatorname{div} \rho \vec{u} = \rho \operatorname{div} \vec{u} + \vec{u} \cdot \vec{\operatorname{grad}} \rho$, et l'équation 3.3 peut se mettre sous la forme :

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\operatorname{grad}} \rho \right) + \rho \operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (3.4)$$

ce qui correspond à la forme lagragienne de l'*équation de continuité* :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (3.5)$$

Pour un fluide incompressible, c'est à dire tel que la masse volumique de chaque élément de fluide reste constante au cours du mouvement l'*équation de continuité* se simplifie en :

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (3.6)$$

3.2.1.2 Relation fondamentale de la dynamique

Considérons un volume \mathcal{V} suivant le déplacement d'une certaine quantité de fluide. La relation fondamentale de la dynamique appliquée à \mathcal{V} donne une égalité entre la variation temporelle de sa quantité de mouvement et l'ensemble des forces (de volume et de surface) exercées sur \mathcal{V} :

$$\frac{d}{dt} \left[\iiint_{\mathcal{V}} \rho \vec{u} dv \right] = \iiint_{\mathcal{V}} \rho \vec{f} dv + \iint_{\mathcal{S}} [\sigma] \cdot \vec{n} ds \quad (3.7)$$

Dans cette relation sous forme intégrale, dv représente le volume des éléments matériels de fluide et ds est un élément de la surface fermée \mathcal{S} limitant le volume \mathcal{V} ; ρdv représente la masse d'un élément de fluide $[\sigma]$ est le tenseur (dim. 3×3) de l'ensemble des forces de surface (pression et viscosité) s'exerçant sur l'élément ds . La force en volume par unité de masse \vec{f} appliquée à l'unité de masse du fluide peut être la pesanteur ou la force de Coriolis dans le cas de la dynamique du système océan/atmosphère exprimée dans le référentiel terrestre.

Le terme de gauche de cette équation est une dérivée au sens lagrangien, calculée dans un référentiel qui suit le mouvement du fluide. Dans un tel référentiel, la masse ρdv d'un élément de fluide est une constante. On peut donc, en permutant l'intégration et la dérivation lagrangienne, n'appliquer la dérivation lagrangienne qu'au seul facteur \vec{u} :

$$\frac{d}{dt} \left[\iiint_{\mathcal{V}} \rho \vec{u} dv \right] = \iiint_{\mathcal{V}} \rho \frac{d\vec{u}}{dt} dv \quad (3.8)$$

D'autre part, on peut transformer l'intégrale de surface du terme de droite de l'équation 3.7 par des applications du théorème d'Ostrogradski sur les trois composantes de $[\sigma] \cdot \vec{n}$:

$$\iint_{\mathcal{S}} [\sigma] \cdot \vec{n} ds = \iiint_{\mathcal{V}} \operatorname{div}[\sigma] dv \quad (3.9)$$

où $\operatorname{div}[\sigma]$ est une notation désignant le vecteur de composantes $\partial \sigma_{ij} / \partial x_j$.

Avec l'hypothèse de continuité, on fait tendre le volume \mathcal{V} vers 0 dans l'équation 3.7, modifié par les deux remarques précédentes. On obtient l'équation locale du mouvement d'une particule de fluide :

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{f} + \operatorname{div}[\sigma] \quad (3.10)$$

On distingue, dans le tenseur des contraintes $[\sigma]$ la partie due à la pression de la partie due à la viscosité : $\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - p \delta_{ij}$ où p est la pression et δ_{ij} le symbole de Kronecker valant 1 si $i = j$ et 0 sinon, σ'_{ij} étant l'élément général du tenseur des contraintes de viscosité. On met alors, dans l'équation 3.10, $d\vec{u}/dt$ sous sa forme eulerienne pour obtenir l'*équation de Navier-Stokes* :

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \operatorname{grad}) \vec{u} = \rho \vec{f} - \operatorname{grad} p + \operatorname{div}[\sigma'] \quad (3.11)$$

où :

- le premier terme du membre de gauche représente l'accélération d'une particule de fluide due à la variation temporelle de sa vitesse dans un repère eulérien fixe;
- le second terme correspond à la variation de vitesse associé à l'exploration du champ de vitesse par la particule de fluide au cours de son mouvement;
- le premier terme du membre de droite est l'ensemble des forces volumiques appliquées au fluide;
- le deuxième terme correspond aux forces de pression traduisant des contraintes normales à la surface;

- le dernier terme représente des forces de viscosité dues à la déformation du fluide. Il contient à la fois des contraintes tangentielles et des contraintes normales dans le cas par exemple du mouvement d'un fluide compressible ou viscoélastique.

Lorsque l'on fait l'hypothèse que le fluide est incompressible et parfait (pas d'effet de viscosité), l'équation de Navier-Stokes 3.11 se simplifie en l'équation suivante dite *équation d'Euler* :

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \vec{\text{grad}})\vec{u} = \rho \vec{f} - \vec{\text{grad}}p \quad (3.12)$$

3.2.1.3 Conservation de l'énergie cinétique

On exprime la conservation de l'énergie cinétique pour les fluides parfaits, incompressibles et lorsque les forces en volume \vec{f} dérivent d'un potentiel ϕ :

$$\vec{f} = -\vec{\text{grad}}\phi \quad (3.13)$$

Nous supposons de plus que l'écoulement est irrotationnel. Nous obtiendrons alors une relation dite *équation de Bernoulli* en intégrant l'équation d'Euler 3.12.

Le champ de vitesse \vec{u} est irrotationnel, donc dérive d'un potentiel Φ tel que :

$$\vec{u} = \vec{\text{grad}}\Phi \quad (3.14)$$

L'équation d'Euler 3.12 s'écrit alors :

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \rho \frac{\partial(\vec{\text{grad}}\Phi)}{\partial t} = \vec{\text{grad}} \left(\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = -\rho(\vec{u} \cdot \vec{\text{grad}})\vec{u} - \vec{\text{grad}}p - \vec{\text{grad}}(\rho\phi) \quad (3.15)$$

Or $(\vec{u} \cdot \vec{\text{grad}})\vec{u} = \vec{\text{grad}}\frac{u^2}{2} - \vec{u} \wedge \vec{\text{rot}}\vec{u}$, et $\vec{\text{rot}}\vec{u} = \vec{\text{rot}}(\vec{\text{grad}}\Phi) = \vec{0}$, donc :

$$\vec{\text{grad}} \left(\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = -\vec{\text{grad}} \left(\rho \frac{u^2}{2} \right) - \vec{\text{grad}}p - \vec{\text{grad}}(\rho\phi) \quad (3.16)$$

soit, après intégration :

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho \frac{u^2}{2} + p + \rho\phi = C^{\text{te}} \quad (3.17)$$

où la constante est valable dans tout le volume de l'écoulement. Si l'on ne fait pas l'hypothèse d'un écoulement irrotationnel, on obtient une relation identique, mais la constante n'est valable que le long d'une ligne de courant, et pas dans tout le volume de l'écoulement.

3.2.1.4 Quelles équations pour les états de mer ?

Le système océan/atmosphère est un système complexe principalement constitué de deux fluides de deux densités très différentes : l'eau et l'air. Un état de mer est caractérisé par la géométrie dynamique de l'interface entre l'air et l'eau qui prend usuellement la forme de vagues, d'écume et d'embruns. Même en ignorant les phénomènes biologiques, biochimiques, chimiques et les phénomènes de changement de phase (glace, pluie, évaporation, dissolution), il n'en demeure pas moins que pour déterminer l'évolution d'un tel système, nous sommes amenés avec une approche par équations différentielles à résoudre les équations de Navier-Stokes pour un fluide à deux couches ; et encore, la caractérisation de la couche limite entre l'air et l'eau n'est pas forcément très nette par vent fort où il y a beaucoup d'air dans l'eau et réciproquement. Cependant, aucune méthode, ni analytique ni numérique, ne permet de résoudre ces équations directement dans les cas qui peuvent avoir un intérêt pour expliquer l'évolution d'un état de mer forcé par du vent. Il faut donc utiliser des hypothèses supplémentaires sur la nature des fluides et de leurs écoulements [Komen et al. 94].

Le rapport des densités entre l'eau et l'air étant de l'ordre de mille ; une première approximation consiste à négliger l'air en décrivant la dynamique des états de mer par les équations de Navier-Stokes pour un fluide à une seule couche (l'eau) dans un champ gravitationnel et l'on supposera que cette couche limite définit une surface connexe.

La force de Coriolis est souvent négligée, car le paramètre inverse de Coriolis est bien plus grand que la période d'une vague. Cependant, il faudra en tenir compte si l'on veut expliquer certains phénomènes d'ordre supérieur comme le courant de dérive (*Stokes drift*).

Au premier ordre, les vagues sont libres, c'est à dire que la dissipation et le forçage par l'environnement peuvent être négligés. Pour les vagues de gravité (dont la longueur d'onde excède le mètre), la viscosité et les tensions de surface sont aussi négligeables, de tel sorte qu'il est suffisant, en première approximation, d'utiliser l'équation d'Euler 3.12 pour un fluide à une couche. Cependant, cette hypothèse ne permet pas d'étudier l'évolution d'un état de mer forcé par le vent.

Une autre simplification est réalisée en supposant que l'eau est incompressible et que la dynamique due aux vagues est irrotationnelle. Le champ de vitesse peut alors dériver d'un potentiel : $\vec{u} = \vec{\text{grad}}\Phi$. On peut donc utiliser l'équation de continuité 3.6 et la relation de Bernoulli 3.17. Cependant, l'hypothèse d'irrotationnalité n'est pas vérifiée expérimentalement dans le cas des vagues cambrées et notamment pour une mer de vent lors des déferlements qui engendrent des tourbillons dont les effets sont importants pendant deux à trois fois la période de la vague qui a généré ce déferlement [Chang et Liu 98].

Nous supposons de plus qu'il existe une interface entre l'air et l'eau : $z = \eta(x, y, t)$; ce qui est valable en l'absence de déferlement, d'écume ou d'embrun. En notant g l'accélération due à la gravité, les équations d'incompressibilité 3.6, d'Euler 3.12, de Bernoulli 3.17 et la définition de l'interface nous donnent le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad z < \eta(x, y, t) \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \end{array} \right\} \quad z = \eta(x, y, t) \quad (3.18)$$

A ces équations doivent être ajoutées des conditions aux limites [Liakos 99]. Pour la mer, on suppose généralement que la surface est infinie, et l'on distingue deux cas, selon que l'on est en eau profonde ou non.

– En eau profonde, on suppose que les vitesses tendent vers 0 avec la profondeur :

$$\vec{\text{grad}}\Phi \rightarrow 0, \text{ lorsque } z \rightarrow -\infty \quad (3.19)$$

– En eau peu profonde, lorsque le fond à $z = -h$ est plat, la composante verticale de la vitesse doit s'annuler sur le fond :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \text{ lorsque } z = -h \quad (3.20)$$

Ainsi, nous avons présenté comment les grands principes de conservation de la Physique permettent d'obtenir, avec l'hypothèse de continuité, un système d'équations aux dérivées partielles dont les solutions décrivent les dynamiques du fluide. Des conditions aux limites doivent être ajoutées pour décrire l'environnement du fluide. Eventuellement, ces équations doivent être complétées par des termes sources ou puissances lorsque d'autres phénomènes interviennent dans la dynamique du fluide, comme par exemple des changements de phase, de température ou des réactions chimiques. Plusieurs hypothèses sur la nature du fluide permettent de simplifier ces équations, comme l'incompressibilité, l'inviscidité ou l'irrotationnalité. Nous avons également précisé les équations utilisées en première approximation dans le cas de la modélisation de la mer.

La prochaine section examine dans ses grandes lignes le problème de la résolution de ces systèmes d'équations.

3.2.2 Résolution mathématique

Maintenant que les équations sont posées, il reste les résoudre. Nous allons tout d'abord étudier s'il existe des solutions analytiques, quitte à faire des hypothèses simplificatrices ; la théorie linéaire permet d'obtenir comme solutions des ondes élémentaires libres [Komen et Hasselmann 94]. Cette théorie linéaire, si elle ne permet pas d'expliquer les phénomènes de forçage par le vent ou les déferlements, incite à étudier les états mer *via* l'analyse de Fourier. Aussi, pour étudier la dynamique non-linéaire des états de mer, on peut se rabattre vers des méthodes numériques. L'analyse numérique fournit des méthodes permettant d'utiliser les ordinateurs pour analyser des problèmes en dynamique des fluides ; c'est le domaine de la C.F.D (*Computational Fluid Dynamics*) [Hafez et Oshima 98].

3.2.2.1 Méthode analytique

Il n'existe pas de solution analytique aux équations non-linéaires présentées précédemment, même dans le cas d'un fluide à une seule couche, incompressible, invisible et en écoulement irrotationnel. Pour trouver des solutions approchées, on procède par linéarisation : on ne garde que les termes linéaires dans les équations et l'on développe les arguments dépendant de l'altitude de la surface libre η en ne conservant que les termes linéaires en la cambrure des vagues. La cambrure peut être définie en considérant que la surface libre η est caractérisé par des échelles de longueur verticale et horizontale : la cambrure est le rapport de la hauteur sur la longueur de vagues. On supposera que cette cambrure est proche de zéro pour justifier l'utilisation les équations linéarisées.

Le système non-linéaire 3.18 modélisant la dynamique des vagues libres se linéarise comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0, \quad z < 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta = 0 \end{array} \right. \quad z = 0 \quad (3.21)$$

Le système étant linéaire, on peut superposer les solutions, et l'on cherche les solutions dites du mode normal, qui sont des ondes sinusoïdales la forme :

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\eta} \\ \tilde{\Phi} \end{pmatrix} e^{i\vec{k} \cdot (\vec{x} + \vec{y})} + \text{conjugué complexe (c.c.)} \quad (3.22)$$

On remplace alors η et Φ dans 3.21 et l'on cherche, en utilisant les conditions aux limites, à éliminer l'une où l'autre des variables pour déterminer les solutions du mode normal.

– En profondeur infinie (condition 3.19), on trouve :

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \Phi \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 \\ -i\omega_{\pm} \frac{e^{kz}}{k} \end{pmatrix} e^{i\vec{k} \cdot (\vec{x} + \vec{y}) - \omega_{\pm} t} + \text{c.c.} \quad (3.23)$$

$$\text{avec } \omega_{\pm} = \pm\sigma(k), \quad \text{où } \sigma(k) = \sqrt{gk} \quad (3.24)$$

avec a une constante, correspondant à l'amplitude de l'onde normale. Pour chaque nombre d'onde \vec{k} , il existe deux solutions en mode normal ; l'équation 3.24 reliant le nombre d'onde k avec la fréquence ω s'appelle la relation de dispersion en profondeur infinie.

– En eau peu profonde (condition 3.20), le mode normal devient :

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \Phi \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} 1 \\ -i\omega_{\pm} \frac{\cosh k(z+h)}{k \sinh kh} \end{pmatrix} e^{i\vec{k} \cdot (\vec{x} + \vec{y}) - \omega_{\pm} t} + \text{c.c.} \quad (3.25)$$

$$\text{avec } \omega_{\pm} = \pm\sigma(k, h), \quad \text{où } \sigma(k) = \sqrt{gk \tanh kh} \quad (3.26)$$

avec a une constante, correspondant à l'amplitude de l'onde normale. La relation de dispersion en eau peu profonde 3.26 caractérise une dépendance à la profondeur dans la relation entre la longueur d'onde et la période de la vague.

La superposition linéaire de ces solutions du mode normal correspond alors à une représentation de la dynamique de la mer dans le cas des mers faiblement cambrées et pour un bassin de profondeur constante :

$$\eta = \sum_n \eta_{\vec{k}_n} \text{ ou bien } \eta = \int_{\mathbb{R}^2} \eta(\vec{k}) d\vec{k} \quad (3.27)$$

la somme étant discrète dans le cas d'un bassin de surface finie (les \vec{k}_n étant alors les fréquences possibles dans le bassin selon ses dimensions), ou continue dans le cas d'une surface infinie où tous les modes sont permis.

Si ces solutions analytiques dans le cas linéaire, à base d'ondes libres (les modes normaux), ne sont qu'une grossière approximation de la dynamique de la mer, elles justifient cependant l'utilisation de la représentation de Fourier pour caractériser sa description statistique dans les cas non-linéaires.

Ainsi, la linéarisation des équations de la dynamique des fluides permet d'obtenir des solutions analytiques. Ces solutions, en théorie linéaire, sont la superposition de modes normaux, chaque mode étant une onde libre. Cette théorie linéaire, si elle ne peut expliquer les transferts d'énergie entre différents modes (chaque mode étant indépendant), définit cependant les bases physiques nécessaires à l'utilisation de l'analyse de Fourier comme outil mathématique pour l'étude statistique des états de mer.

3.2.2.2 Méthode numérique

Etant donné qu'il n'existe pas de solution analytique aux équations non-linéaires de la dynamique des fluides dans le cas général, on peut vouloir mettre en œuvre une méthode numérique, donnant accès à des simulations par ordinateur [Dautray et Lions 87]. La méthode usuelle consiste à discréteriser le volume de fluide et le temps en de petites cellules qui vont former un maillage spatio-temporel, et d'appliquer une méthode itérative pour résoudre les équations de Navier-Stokes sur ce maillage. A partir d'une valeur approchée initiale des propriétés recherchées en les points du maillage (fournie par exemple par la théorie linéaire et/ou un ensemble de mesures), la méthode itérative assure la convergence des approximations successives vers une solution exacte en les points du maillage. Des polynomes d'interpolation permettent alors d'estimer la solution en dehors des points du maillage.

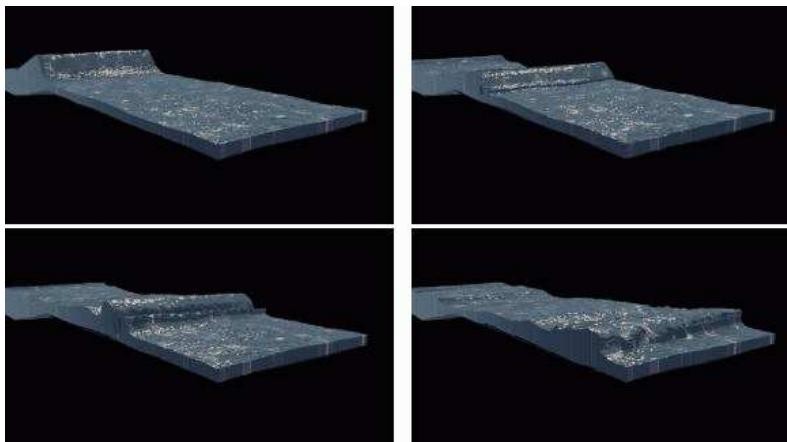
Les itérations sont synchrones et demandent d'avoir un état initial du fluide. Lors d'une itération synchronie, pour le passage de l'instant t_n à t_{n+1} , l'ensemble des équations est appliqué simultanément à l'état du fluide de l'instant t_n . Un état initial correspond à la donnée des propriétés du fluide partout dans l'espace au même instant. Dans la pratique, il est impossible de synchroniser parfaitement un ensemble de mesures partout dans l'espace, surtout lorsque le domaine étudié est vaste comme c'est le cas pour un plan d'eau d'environ 10 km^2 ; se pose alors le problème de la détermination d'un état initial. Cette difficulté est d'autant plus critique que les solutions des équations gouvernant la dynamique des fluides sont asymptotiquement instables. A partir de deux états initiaux très voisins, les deux solutions correspondantes divergent l'une de l'autre. Cette instabilité est connue sous le nom d'*effet papillon*; c'est une instabilité dont la cause est numérique, et non pas physique.

Le maillage doit être adapté à la simulation réalisée. Passer du système d'équations aux dérivées partielles à sa forme discréte est un problème qui combine les aspects physique avec l'analyse numérique; par exemple, il faut absolument pouvoir conserver la masse dans l'ensemble du volume étudié, et ce malgré les erreurs inhérentes à tout calcul numérique. A chaque nœud du maillage, un vecteur de 3 à 20 variables doit être évalué : la pression, les trois composantes de la vitesse, la densité, la température ... Les maillages couramment utilisés ont de vingt mille à deux millions de points, ce qui mène à des systèmes linéaires atteignant les quarante millions d'inconnues. Pour assimiler des phénomènes physiques importants comme la turbulence il faut utiliser des maillages d'une extraordinaire finesse dans ces zones turbulentes; ceci limite grandement la taille des domaines simulables, surtout lorsqu'aucune hypothèse ne permet de confiner les phénomènes turbulents à des zones statiques, comme c'est le cas pour la mer [Chen et al. 99]. Certaines méthodes modifient dynamiquement le maillage au cours de la simulation, afin d'adapter le maillage aux endroits

susceptibles d'être turbulents ; ces méthodes adaptatives sont souvent très compliquées et n'apportent pas toujours un gain significatif en complexité numérique dans le cas de la mer des marins [Carey 97].

La méthode numérique mise en œuvre pour résoudre le système discréteisé d'équations non-linéaires est généralement du type Newton, ce qui demande de résoudre un énorme système linéaire à chaque pas. Heureusement, la matrice associée au système contient principalement des zéros ; son stockage en mémoire et sa manipulation sont alors optimisés. La résolution de ces systèmes est une partie des plus gourmandes en temps, et c'est souvent elle qui limite la taille du problème simulable. Aussi, préconditionner le système est souvent nécessaire pour garantir une convergence raisonnable de la méthode.

Même en utilisant des clusters, c'est à dire des regroupements de machine faisant les calculs en parallèle, chaque machine s'occupant d'une partie du domaine total étudié, on ne peut utiliser les méthodes numériques du type C.F.D pour simuler en temps réel une mer de vent sur un plan d'eau d'environ 10 km^2 . A titre d'exemple, la figure 3.1, illustre une simulation temps réel obtenue en 2002 par résolution numérique directe des équations d'Euler pour un bassin de la taille d'une piscine olympique.



Une vague se cambre lorsque les fonds remontent et finit par déferler. Cette simulation est calculée en temps réel par une résolution directe des équations d'Euler [Enright et al. 02]. La complexité numérique en $\mathcal{O}(n^3)$, où n est le nombre de points d'une grille statique et régulière ne permet pas de résoudre les équations d'Euler pour un grand volume d'eau, même avec l'hypothèse d'irrotationalité. La complexité de la résolution des équations de Navier-Stokes est encore plus grande : de l'ordre de $\mathcal{O}(n^4)$.

FIGURE 3.1 : Résolution numérique directe des équations de la dynamique des fluides

Ainsi, nous avons présenté comment l'on peut obtenir un système d'équations aux dérivées partielles traduisant la dynamique d'un fluide, à partir des grands principes de la Physique et de l'hypothèse de continuité. Malgré des hypothèses supplémentaires permettant de simplifier ces équations non-linéaires, leur résolution directe ou numérique reste un problème très difficile et ne permet pas de simuler la physique des phénomènes observés par les marins (figure 2.10, page 40), notamment en ce qui concerne l'action du vent sur la croissance des vagues où les déferlements deviennent nombreux ; la définition même de la couche limite entre l'air et l'eau pose alors un problème et les équations d'Euler sont insuffisantes.

La prochaine section examine le point de vue océanographique sur les phénomènes liés au développement d'un état de mer en interaction avec son environnement (vent, courant, bathymétrie).

3.3 Phénoménologie physique des états de mer

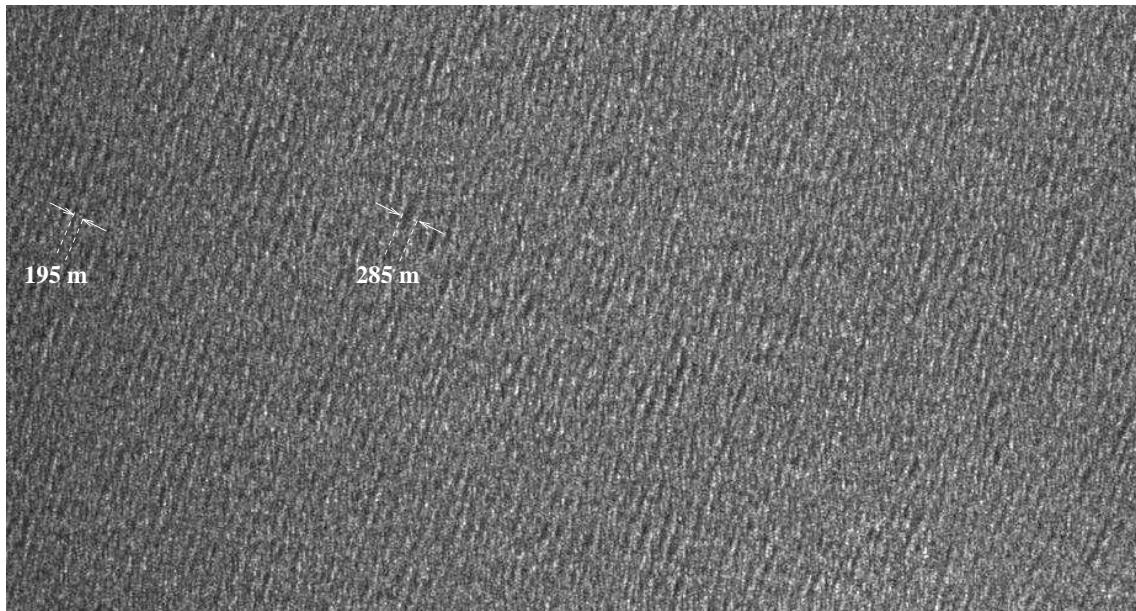
Nous proposons, dans cette section, de décrire physiquement les processus de formation d'un état de mer et la manière dont il se propage, pour modéliser les phénomènes que l'on souhaite réifier. D'abord nous aborderons la propagation des vagues d'origine éolienne en introduisant la notion océanographique 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.

3.3.1 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.

3.3.1.1 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 [Longuet-Higgins 57], ou comme un processus de Markov générant des groupes de vagues [Sawnhey 62]. Les groupes de vagues sont localisés dans le temps et l'espace. Ils sont définis par l'enveloppe des vagues d'une longueur d'onde de l'ordre du mètre à la centaine de mètres lors des plus grosses tempêtes (figure 3.2). Ce sont eux qui transportent une partie de l'énergie qui est passée du vent dans la mer. C'est la vitesse de déplacement des groupes qui doit être utilisée pour prédire l'arrivée d'une houle sur la côte [Robin 89]. Pour des longueurs d'onde inférieures au mètre, il n'y a pas de preuve expérimentale de l'existence même des groupes, leur durée de vie, s'ils existent, étant trop faible.



Détail d'une image SAR du satellite ENVISAT de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) représentant une surface d'environ $20 \times 10 \text{ km}^2$, cliché pris pendant une forte tempête d'Ouest Nord Ouest au large d'Ouessant $\sim 49^\circ N, 6^\circ W$. On voit nettement se détacher des groupes dont les longueurs d'onde moyennes sont entre 195 m et 285 m constituant l'état de mer généré par la tempête.

FIGURE 3.2 : Groupes de vagues vus par satellite

Des mesures effectuées depuis un bateau [Longuet-Higgins 86] 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.

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. La définition usuelle de la vitesse de phase c , correspondant à la vitesse de déplacement des crêtes en tant que forme géométrique (ce n'est pas la vitesse des particules), obtenue pour une onde de pulsation ω et de vecteur d'onde \vec{k} à

partir de : $\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t = \text{Cte}$, pour les vagues de gravité est la suivante :

$$c = \frac{\omega}{k}, \text{ ou sous forme vectorielle : } \vec{c} = \frac{\omega \vec{k}}{k^2} \quad (3.28)$$

Une onde se déplaçant à la surface de la mer, voit ses fréquences spatiale et temporelle reliées par une relation de dispersion, décrite dans le cas de la théorie linéaire par l'équation 3.24. Si l'on tient compte de la viscosité, la pulsation ω est fonction du nombre d'onde k en profondeur infinie selon l'équation approchée à l'ordre 3 en k :

$$\omega^2 = gk(1 + L_T^2 k^2), \text{ avec } L_T \approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.29)$$

Lorsque les longueurs d'onde sont supérieures à trente centimètres, l'effet du terme en k^3 est négligeable et l'on parle de *vagues de gravité* pour lesquelles la relation de dispersion se simplifie en $\omega^2 = gk$; les effets de viscosité sont faibles. Pour les longueurs d'onde inférieures à trois centimètres, c'est le terme en k qui devient négligeable et l'on parle de *vagues capillaires*; elles se dissipent par des effets de viscosité importants, elles ne s'organisent pas en groupes, elles sont très fugitives et leurs formes sont inversées : les creux sont anguleux et les crêtes aplatis. Aussi, avec l'équation de dispersion en profondeur infinie (3.29) simplifiée en $\omega^2 = gk$ pour les vagues de gravité, on peut en déduire que la vitesse de groupe c_g est la moitié de la vitesse de phase c en profondeur infinie selon la formule suivante :

$$c_g = \nabla_k \omega = \frac{g}{2\sqrt{gk}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{gk}}{k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega}{k} = \frac{c}{2} \quad (3.30)$$

Lorsque les groupes se déplacent sur la surface de la planète assimilée à une sphère, en l'absence de courant et par bathymétrie constante ou infinie, ils se propagent le long des géodésiques qui sont les grands cercles. En assimilant localement la surface de la mer à un plan, ces géodésiques se projettent en des droites, et les groupes se déplacent à direction constante.

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.

3.3.1.2 Modèle mathématique et analyse en ondelettes

Tout d'abord mathématiquement, un groupe de vagues est modélisé par un train d'ondes ou paquet d'ondes [Yang 91], *i.e.* une fonction du type [Komen et Hasselmann 94] :

$$\zeta(\vec{x}, t) = a(\vec{x}, t) e^{i\phi(\vec{x}, t)} + \text{c.c. (conjugué complexe)} \quad \text{où} \quad \phi(\vec{x}, t) = \vec{k}(\vec{x}, t) \cdot \vec{x} - \omega t + \phi_{\vec{k}} \quad (3.31)$$

présentant une extention finie, *i.e.* $\zeta(\vec{x}, t) = 0$ ailleurs que dans un domaine $\Gamma(t)$ fini pour tout t . Le groupe a une position moyenne \vec{X} donnée par :

$$\vec{X}(t) = \frac{\int_{\Gamma(t)} \vec{x} a(\vec{x}, t) d\vec{x}}{\int_{\Gamma(t)} a(\vec{x}, t) d\vec{x}} \quad (3.32)$$

et cette position moyenne se déplace avec la vitesse de groupe :

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \nabla_k \Omega(\vec{K}, \vec{U}(\vec{X}, t), h(\vec{X}, t)), \text{ avec } \vec{K} = \vec{k}(\vec{X}, t) \quad (3.33)$$

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 "eikonales" :

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \nabla_k \Omega \quad \text{et} \quad \frac{d\vec{K}}{dt} = -\nabla_x \Omega \quad (3.34)$$

qui correspondent aux équations de Hamilton en mécanique classique [Landau et Lifshitz 60] par le remplacement $(p, q, H) \rightarrow (K, X, \Omega)$. 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 $d\vec{X}/dt = \vec{Cte}$. La forme de l'enveloppe est constante et cette dernière se translate à la vitesse constante $d\vec{X}/dt$.

L'analyse de Fourier, largement utilisée pour analyser les états de mer [Phillips 58, Hasselmann 62, Pierson et Moskowitz 64, Tolman 89], nous enseigne qu'un signal quelconque peut s'écrire comme une somme de sinusoïdes, de fréquences et d'amplitudes variables [Fourier 1822]. Un signal $\zeta(\vec{x}, t)$ est caractérisé à une constante près par l'ensemble des amplitudes complexes des sinusoïdes, qui forment ce que l'on appelle sa transformée de Fourier complexe $\hat{\zeta}(\vec{k})$:

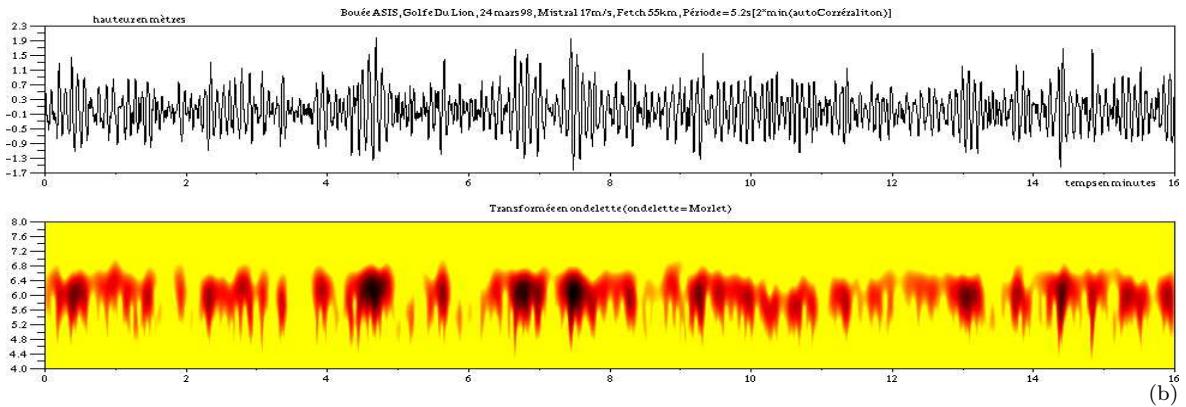
$$\zeta(\vec{x}, t) = \int_{\mathbb{R} \times [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]} \hat{\zeta}(\vec{k}) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)} d\vec{k} + \text{c.c.} \quad \text{et} \quad \hat{\zeta}(\vec{k}) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{\mathbb{R} \times [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]} e^{-i\vec{k} \cdot \vec{x}} \left(\zeta(\vec{x}, 0) + \frac{i}{\omega_{\vec{k}}} \zeta_t(\vec{x}, 0) \right) d\vec{x} \quad (3.35)$$

La transformée de Fourier est porteuse de précieuses informations sur le signal analysé. On sait par exemple que si elle n'a que de faibles valeurs pour des valeurs élevées de la variable de fréquence, ceci signifie que le signal varie lentement. Inversement, si elle prend des valeurs importantes pour les hautes fréquences, le signal contient une quantité non-négligeable de hautes fréquences, et donc varie rapidement, au moins dans certaines zones. Et c'est précisément là que nous touchons du doigt l'une des limitations importante de l'analyse de Fourier usuelle. 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. Par exemple, la transformée de Fourier d'une simple nappe trochoïdale caractéristique des vagues du modèle de Gerstner [Gerstner 1804] donnera un pic d'énergie localisé sur la fréquence de la trochoïde mais aussi de l'énergie dans les fréquences plus basses et plus hautes, le spectre étant d'autant plus large que les vagues sont cambrées. Pourtant, la transformée de Fourier est incapable de localiser l'énergie des hautes fréquences sur les crêtes et celle des basses fréquences dans les creux des vagues. Cette absence de localisation empêche d'utiliser directement la transformée de Fourier pour modéliser des groupes de vagues, d'autant plus lorsque le milieu est hétérogène [Komen et Hasselmann 94].

Un prototype d'analyse par ondelettes avait été proposé au milieu des années 1940 par le physicien D. Gabor. Il suggérait de rendre locale l'analyse de Fourier, en s'aidant de fenêtres : les Gaborettes [Gabor 46]. Une fenêtre est une fonction régulière, lentement variable, et bien localisée (ce qui signifie qu'elle est nulle en dehors d'une certaine zone, son support). En multipliant la fonction étudiée par une fenêtre, on en obtient une version "locale", dont on peut déterminer le contenu fréquentiel par analyse de Fourier classique. L'ensemble de ces transformées de Fourier ainsi localisées forme la transformée de Gabor du signal, et fournit donc une analyse fréquentielle locale. On perd cependant la précision sur la fréquence.

L'analyse par ondelettes améliore la précision position-fréquence, et est basée sur un concept un peu différent du concept de fréquence : le concept d'échelle [Grossmann et Morlet 84]. Au lieu de considérer des fonctions oscillantes placées à l'intérieur d'une fenêtre (les Gaborettes), que l'on corrèle ensuite avec le signal à analyser, les ondelettes sont davantage des copies les unes des autres, à la manière des objets fractals [Mandelbrot 75], copies presque conformes puisqu'elles sont de forme constante et ne diffèrent que par leur taille. La décomposition (continue) en ondelettes est similaire à la décomposition de Gabor : un signal s'écrit sous la forme d'une superposition de telles ondelettes décalées et dilatées. Les poids de ces ondelettes dans la décomposition (appelés les coefficients d'ondelettes) forment la transformée en ondelettes, qui est donc une fonction de deux variables : le temps et l'échelle (ou dilatation).

En une dimension, une famille d'ondelettes $\Psi_{a,b}(x)$ est générée à partir d'une fonction $\Psi(x)$, appelée ondelette mère ou ondelette analysatrice (voir par exemple la figure 3.3(a)), sur laquelle on applique deux opérations : la translation (paramètre b) et le changement d'échelle (paramètre a) : $\Psi_{a,b}(x) = a\Psi(a(x+b))$. Afin qu'une fonction $\Psi(x)$ puisse être une ondelette mère, elle doit vérifier les conditions suivantes : sa transformée de Fourier $\bar{\Psi}(f)$ doit être définie, et la fonction $\Psi(x)$ doit être à énergie finie : $\bar{\Psi}(0) = 0$. La figure 3.3(b) présente la mise en évidence de groupes de vagues par une décomposition en ondelettes¹ sur des signaux réels enregistrés en Mer Méditerranée par une bouée à



Ci-contre, en (a), ondelette analysatrice utilisée pour la décomposition en ondelettes de signaux temporels de hauteurs de vagues en (b). La fréquence de la partie oscillante est obtenue en déterminant le premier minimum de l'auto-corrélation du signal (qui correspond à la demi-période). L'enveloppe d'environ une minute permet d'utiliser une ondelette présentant environ 8 vagues.

Ci-dessous, en (b), le graphe du haut montre les hauteurs des vagues en mètres sur 16 minutes, enregistrées par la bouée ASIS [Drennan et al. 98] pendant la campagne FETCH [Hauser et al. 00]. Le graphe du bas est la décomposition continue en ondelettes de ce signal, avec l'ondelette mère de Morlet du (a). Les coefficients de la transformée en ondelettes sont représentés du jaune pour les plus faibles au noir pour le maximum en échelle logarithmique. Cette décomposition met bien en évidence l'existence de groupes de vagues localisés dans le temps et l'espace.

FIGURE 3.3 : Groupes de vagues mesurés par une bouée ASIS et décomposition en ondelettes

55km au large de Marseille par temps de mistral.

En deux dimensions, la fonction en forme de “chapeau mexicain” et la fonction de Morlet 2D sont des exemples d’ondelettes mères candidates et 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 3.4) permet de mieux approcher les problèmes non isotropes grâce à l’orientation de la nappe sinusoïdale [Arneodo et al. 95]. La transformée en ondelettes a été utilisée pour analyser des signaux de la surface de la mer [Chapron et al. 95, Peng et al. 95] ou pour l’analyse des groupes de vagues générés par le vent [Meyers et al. 93, Donelan et Drennan 96] et l’ondelette mère utilisée était l’ondelette de Morlet 2D. Elle est décrite par l’équation suivante :

$$\Psi(x) = e^{i\vec{k}_0 \cdot \vec{x}} e^{-\vec{x} \cdot A \cdot \vec{x}} + \text{Corr} \quad (3.36)$$

Le paramètre \vec{k}_0 caractérise la fréquence et l’orientation de l’onde sinusoïdale. A est une matrice définie positive qui spécifie la forme elliptique de l’enveloppe gaussienne. Le terme *Corr* permet d’assurer la finitude énergétique de l’ondelette : $\Psi(0) = 0$.

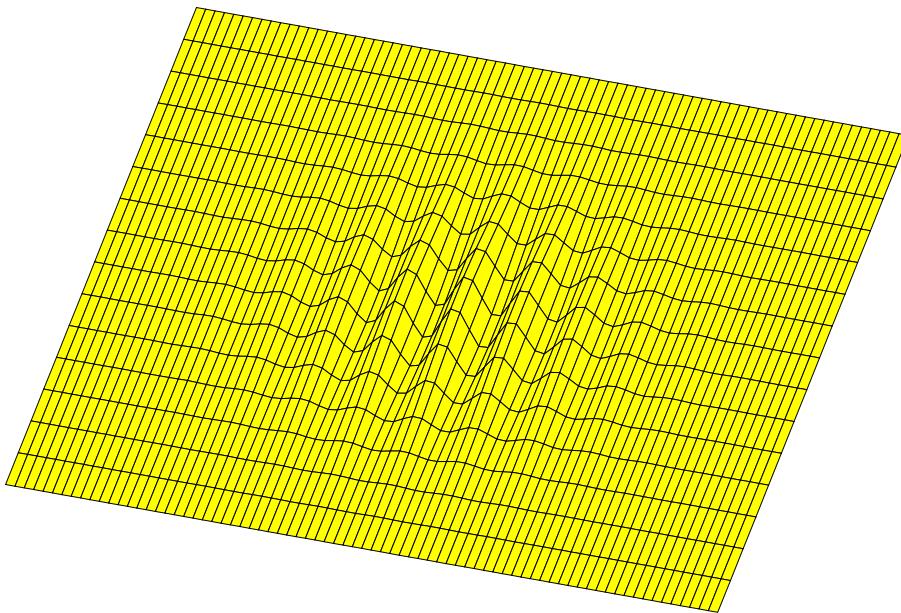
Alors qu’en une dimension, la transformation de l’ondelette mère est une opération de dilatation et de translation, en deux dimensions, une opération de rotation est classiquement ajoutée. La fonction de transformation qui permet de générer la famille d’ondelettes $\Psi_{a,\theta,b}(x)$, agit sur l’ondelette mère en dilatation, en rotation, et en translation selon l’équation suivante :

$$\Psi_{a,\theta,b}(x) = a\Psi(aR_\theta(x + b)) \quad (3.37)$$

où le scalaire a est un paramètre de dilatation des fréquences spatiales à énergie normalisée, R_θ l’opérateur de rotation d’angle θ qui joue à la fois sur les orientations de l’enveloppe gaussienne et de la nappe sinusoïdale de l’ondelette, et b le vecteur translatant l’ondelette en chaque position spatiale.

Ainsi, les groupes de vagues ou trains d’ondes sont des entités physiques transportant l’énergie des vagues, expérimentalement mises en évidence pour les vagues d’une longueur d’onde de l’ordre du mètre à la centaine de mètres 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 est l’un des

¹ Calculs réalisés et graphique obtenu avec la contribution *fraclab* du logiciel **Scilab** développé à l’INRIA de Rocquencourt <http://scilabsoft.inria.fr/>



Graphe de l'ondelette mère de Morlet 2D : une nappe sinusoïdale enveloppée dans une gaussienne. C'est l'ondelette analysatrice utilisée en océanographie pour la décomposition en ondelettes de la surface de la mer. L'aspect non isotrope de cette ondelette permet d'appréhender l'orientation des vagues. Le choix de cette ondelette mère paraît naturellement adaptée à la description des groupes de vagues.

FIGURE 3.4 : Ondelette mère de Morlet 2D

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. Cette analyse utilise l'ondelette mère de Morlet 2D, afin de tenir compte localement de la fréquence spatiale et de l'orientation des groupes de vagues.

Un modèle phénoménologique doit présenter cette notion de groupe de vagues. Dans notre modèle IPAS présenté dans la partie III, l'animation phénoménologique des vagues d'une longueur d'onde de l'ordre du mètre à celle de la centaine de mètres reposera sur cette notion physique de groupe de vagues. L'ondelette de Morlet 2D sera réifiée et passera ainsi du rôle d'outil mathématique à celui d'entité physique dans le cadre d'une modélisation informatique des groupes de vagues.

Nous décrivons dans les sous-sections suivantes les phénomènes physiques déterminant le comportement d'un groupe de vagues expliquant le développement et la dynamique des états de mer. Nous précisons la génèse, la croissance et la propagation des groupes en fonction des interactions avec le vent et les autres groupes. Puis nous détaillons les effets de la bathymétrie et des courants et caractérisons les déferlements.

3.3.2 Naissance et propagation des vagues d'origine éolienne

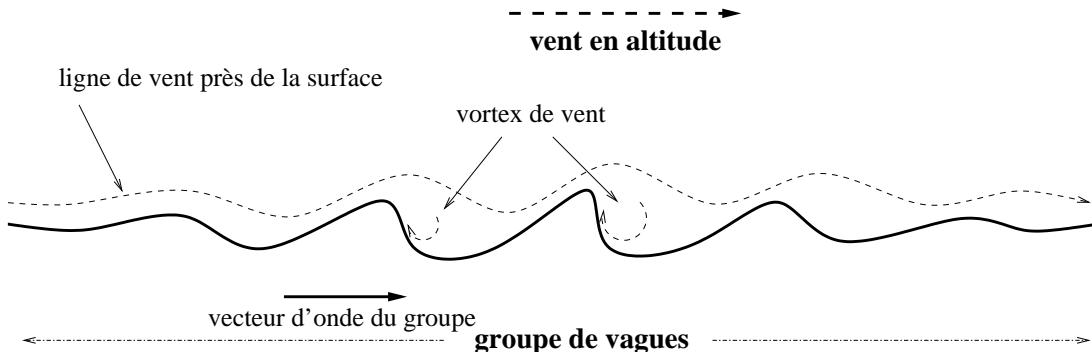
L'analyse des états de mer admet en général la distinction entre deux types de vagues [Komen et al. 94] :

- 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 lois empiriques d'évolution des états de mer [Sverdrup et Munk 47] 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 2.7, page 36). 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 [Mitsuyasu 68, Mitsuyasu 69].

3.3.2.1 Mers jeunes : interactions groupe/vent

Historiquement, les premiers travaux ont cherché à expliquer ce phénomène par un mécanisme linéaire (ou quasi-linéaire) de croissance des vagues par un couplage résonant de la forme de la surface de la mer avec les oscillations induites sur le vent : la croissance des vagues dépend de l'état de mer, car la forme de la surface de la mer affecte le profil du vent qui souffle dessus (figure 3.5). A période constante, lorsque la longueur d'onde $\frac{2\pi}{k}$ augmente, la vitesse de phase augmente également selon (3.28) et donc la vitesse relative du vent avec les crêtes diminue. Si le taux d'amplification des vagues diminue lorsque la longueur d'onde augmente, il est nécessaire d'attendre un temps plus long pour que des vagues plus longues atteignent la même cambrure [Miles 57, Phillips 58]. Cependant, cette théorie linéaire est tombée en désuétude lorsque des mesures du taux d'amplification de ces vagues se sont avérées être d'un ordre de grandeur supérieur aux prédictions des modèles d'amplification par le vent [Snyder et Cox 66, Barnett et Wilkerson 67].



La forme de la surface de la mer parcourue par des groupes de vagues modifie l'écoulement de l'air pour favoriser la croissance des vagues. Si la théorie quasi-linéaire explique qualitativement le phénomène de croissance par un couplage air/eau, ses résultats quantitatifs sur les taux d'amplification sont dix fois plus faibles que les résultats expérimentaux. Dans la théorie quasi-linéaire, on ne garde que les termes linéaires dans les équations de Navier-Stokes, on néglige le stress tangentiel du vent et seules les forces de pression sont prises en compte. Il semble donc que les effets non-linéaires et/ou les forces tangentielles soient prépondérants dans le cas des mers fortement stressées par le vent.

FIGURE 3.5 : Couplage de la mer et du vent

On a pu caractériser empiriquement [Mollo-Christensen et Ramamonjaro 82, Pierson et al. 92] la formation, la propagation ainsi que l'évolution des groupes pour les mers intensément forcées par le vent : des expériences en laboratoire montrent que, pour des fetchs courts *i.e.* : loin d'un éventuel équilibre mer-vent, l'évolution non-linéaire de groupes injectés artificiellement par un batteur est très sensible à de faibles perturbations du vent, et ce à toutes les échelles. Les évolutions sont brutales, apparaissent notamment lorsque les vagues sont très cambrées, et sont associées à des extinctions de certaines fréquences au profit des sous-harmoniques [Drennan et Donelan 96].

Pour les états de mer intensément forcés par le vent, dits *mers jeunes* (figure 3.6), il est possible que le déferlement fréquent des vagues ait un impact important sur leur allongement progressif [Banner et Tian 98]. Un paramètre caractéristique du développement d'un groupe de vagues est bien souvent décrit par l'âge α des vagues, défini par le quotient (sans dimension) :

$$\alpha = \frac{c}{u_*} , \quad u_* = \tau^{1/2} , \quad \text{avec} \quad \tau = v_a \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{(u', v', w')} \quad (3.38)$$

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 (flux de moments de l'air vers la mer), avec v_a la viscosité cinétique 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 ; $\overline{(u', v', w')}$ 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. Typiquement, 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 [Janssen 94] ; pour un vent donné, l'âge d'un groupe de vagues inclut donc à la fois la notion de fetch et celle de durée d'action.



Lorsque la mer est fortement stressée par le vent, de nombreux phénomènes non-linéaires d'interaction vagues-vent-déferlements ont lieu à la surface impliquant pour les vagues un transfert énergétique des hautes fréquences vers les basses fréquences. Ici, une tempête a débuté il y a moins d'une demi-heure et a eu le temps de lever des vagues de 2-3 mètres et de période ~ 6 s. La période, la longueur d'onde et la hauteur des vagues vont progressivement s'accroître et les déferlements deviendront de moins en moins fréquents. L'équilibre ne sera pas atteint avant 24h ; en supposant que le fetch soit suffisant les vagues feront dix mètres de haut et 14 s de période.

FIGURE 3.6 : Mer jeune intensément forcée par le vent avec déferlements fréquents

3.3.2.2 Mers vieilles : interactions groupe/groupe

Il existe deux phénomènes principaux considérés pour l'interaction entre groupes : les résonances et la cinématique.

Résonances de quadruplets

Depuis les travaux d'Hasselmann [Hasselmann 62] et les résultats de la campagne JONSWAP [Hasselmann et al. 73], l'évolution des champs de vagues de gravité au cours de leur propagation est bien souvent expliquée par des interactions non-linéaires de quadruplets² de vagues vérifiant la condition de résonance suivante [Benney et Saffman 66] :

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 = \vec{k}_4 \text{ et } \omega_1 + \omega_2 - \omega_3 = \omega_4 \quad (3.39)$$

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 mécanisme peut être décrit par un flux spectral d'énergie (globalement conservatif) dont le maximum est localisé à des échelles légèrement supérieures à celle des vagues les plus énergétiques [Hasselmann et Hasselmann 85, Hasselmann et al. 85]. Cela a comme conséquences l'allongement progressif de la longueur d'onde dominante et la disparition des petites longueurs d'onde. C'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 [WAMDI-group 88], WAVEWATCH au Centre Météorologique Américain [Tolman 89], CREST pour la Marine Française [Ardhuin 01]). Cependant, l'approximation de faible cambrure réduit le domaine théorique d'applicabilité de ce mécanisme aux états de mer modérément forcés par le vent, ou *mers vieilles*.

Interactions cinématiques

L'autre phénomène physique pour l'interaction groupe/groupe s'explique par des considérations cinématiques [Banner et Phillips 74]. Cette description de l'interaction entre un groupe de grande longueur d'onde et un groupe de petite longueur d'onde se déplaçant grossièrement dans la même direction est valable lorsque le rapport entre ces deux longueurs est supérieur à cinq environ. Les vagues de grande longueur d'onde, en se propageant créent localement une alternance de courants s'étendant légèrement sous la surface et dûs au mouvement des particules. Le rapport d'échelle fait que ces courants de surface sont vus par le petit groupe comme un courant général alternatif. Le petit groupe 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 grandes vagues.

² Les conditions de résonance entre triplets ne sont pas réunies pour les vagues de gravité à cause de la concavité de la courbe de dispersion (formule (3.29)), alors qu'il existe des interactions résonantes non-négligeables entre triplets pour les vagues intermédiaires entre les vagues de gravité et les vagues de capillarité [Komen et al. 94].

Ainsi, la discussion concernant les mécanismes d'évolution des groupes de vagues semble donc ouverte, que ce soit pour les mers jeunes ou pour les mers vieilles. Il apparaît que les mécanismes d'interaction dominants peuvent varier selon le développement du champ de vagues, celui-ci étant bien souvent décrit par l'âge des vagues [équation (3.38)]. Par exemple, 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 probablement plus faible [Donelan et Yuan 94]. Il est donc plausible que les caractéristiques de forme des groupes de vagues varient en fonction de l'âge des vagues considérées [Janssen 03]. Plus le groupe est vieux, plus il se déplace vite, moins il est cambré, moins il interagit avec le vent (interactions linéaires) de par la forme arrondie des crêtes et plus il a tendance à absorber les hautes fréquences au profit des sous-harmoniques. Au contraire, plus le groupe est jeune, moins il va vite, plus il se cambre rapidement, plus il interagit avec le vent (interactions non-linéaires) de par la forme anguleuse des crêtes [Liu et al. 95], et plus il déferle en allongeant sa longueur d'onde.

Malgré la complexité des phénomènes physiques mis en jeu pour la génèse et l'évolution des états de mer, que ce soit par des mécanismes de déferlement ou de couplage résonant, tous les modèles expliquent l'allongement progressif de vagues et l'organisation des groupes en fonction de l'âge de la mer de vent, en accord avec l'observation de la mer par les marins.

Nous verrons dans la prochaine section que les modèles océanographiques de prévision des états de mer fournissant un spectre de la mer sont utilisés directement dans certains modèles graphiques comme [Mastin et al. 87] (*c.f.* 4.3 La mer des infographistes : approche spectrale), mais ils ne sont pas directement adaptés à la représentation d'un plan d'eau hétérogène composé de groupes de vagues et dont le rayon maximum fait 10 kilomètres : ces modèles donnent un spectre homogène sur chaque case d'une grille présentant des pas de 300 kilomètres, ou au mieux 50 kilomètres pour des prévisions régionales.

Pour réaliser un modèle informatique phénoménologique, il faut prendre en compte la notion d'âge d'un état de mer [équation (3.38)] afin de distinguer les houles des mers de vent et proposer un mécanisme pour les effets du vent sur les vagues en accord avec les résultats empiriques de Sverdrup et Munk (figure 2.7 page 36) ; l'allongement des vagues devra traduire les phénomènes de résonance entre groupes [équation (3.39)] et les phénomènes cinématiques liés aux déferlements.

3.3.3 Interactions avec le courant et la bathymétrie

Dans le cas de mers vieilles, le forçage du vent est faible, et le déferlement des vagues ni fréquent ni intense. En négligeant les effets d'atténuation visqueuse et les déferlements, on peut donc étudier l'évolution des caractéristiques d'un groupe de vagues par les mécanismes de propagation d'ondes libres. On focalise ici sur les interactions vagues/courants et vagues/bathymétrie [Willebrand 75].

Considérons le cas général de la propagation d'une onde plane progressive d'amplitude a , de pulsation ω et de vecteur d'onde \vec{k} :

$$\zeta = a(\vec{x}, t) e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)} = a e^{i\chi}, \quad k = \nabla_x \chi, \quad \omega = -\frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (3.40)$$

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 [Phillips 77]. On obtient alors la loi d'évolution des propriétés cinématiques de l'onde appelée aussi loi de conservation des crêtes :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_x n = 0 \quad (3.41)$$

où n est la fréquence apparente d'une vague. Elle permet de déterminer l'ajustement de l'onde à une variation des conditions environnementales.

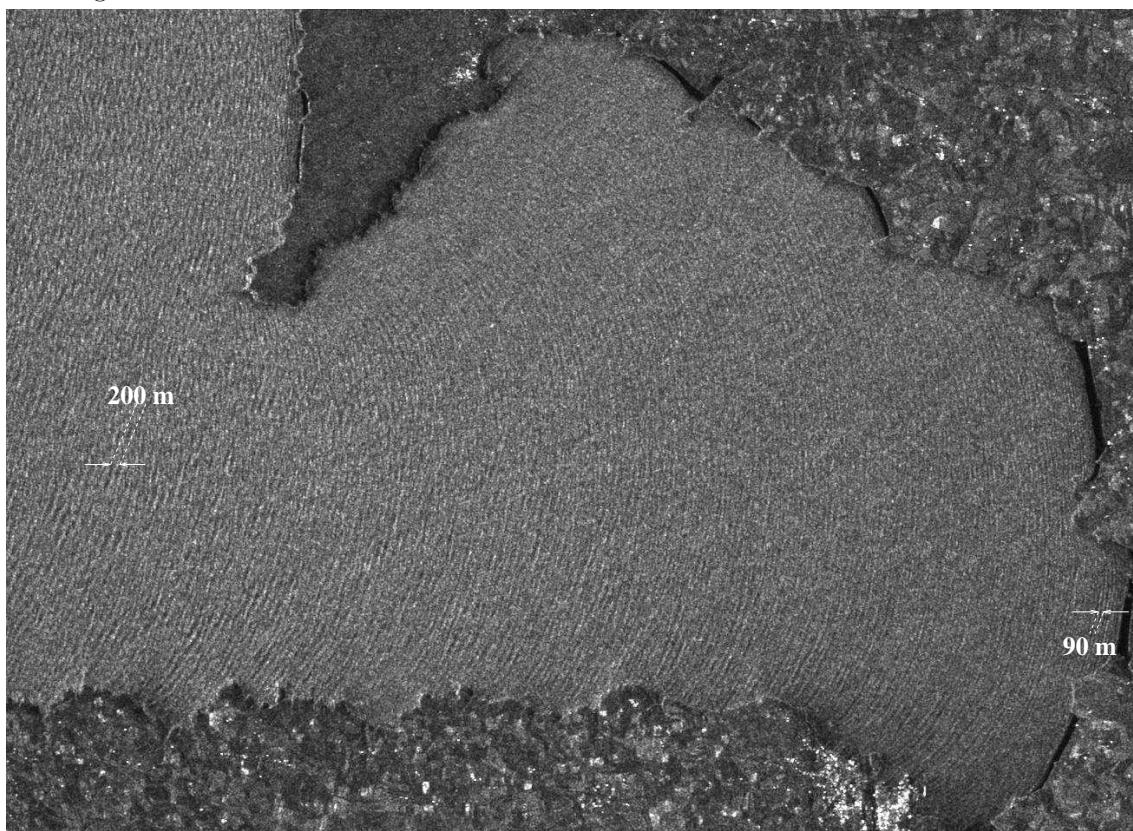
3.3.3.1 Bathymétrie

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 (figure 3.7) : 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 [Komen et al. 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 3.26 de dispersion des ondes de gravité que l'on peut aussi mettre sous la forme :

$$\omega^2 = gk \tanh(kh), \text{ ou encore : } \left(\frac{\partial \chi}{\partial t} \right)^2 - g|\nabla_x \chi| \tanh(|\nabla_x \chi| h) = 0 \quad (3.42)$$

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 [Lamb 32], modèle largement utilisé en informatique graphique pour l'animation de la mer [Fournier et Reeves 86]. S'il n'y a pas de courant, ω est constant et le nombre d'onde k est alors fonction de la profondeur h . Observons qualitativement les phénomènes en l'absence de courant, selon que la profondeur diminue ou augmente au fur et à mesure de la progression d'un groupe :

- La profondeur h diminue : la longueur d'onde diminue (k augmente) et le nombre de vagues dans le groupe est constant. Tant que le groupe ne déferle pas, l'énergie totale du groupe est conservée et doit donc se répartir dans un domaine plus petit. La hauteur des vagues augmente alors, car l'énergie est proportionnelle au carré de la hauteur des vagues.
- La profondeur h augmente : la longueur d'onde augmente (k diminue) pour un nombre de vagues constant et l'énergie se répartit dans un domaine plus grand, donc la hauteur des vagues diminue.



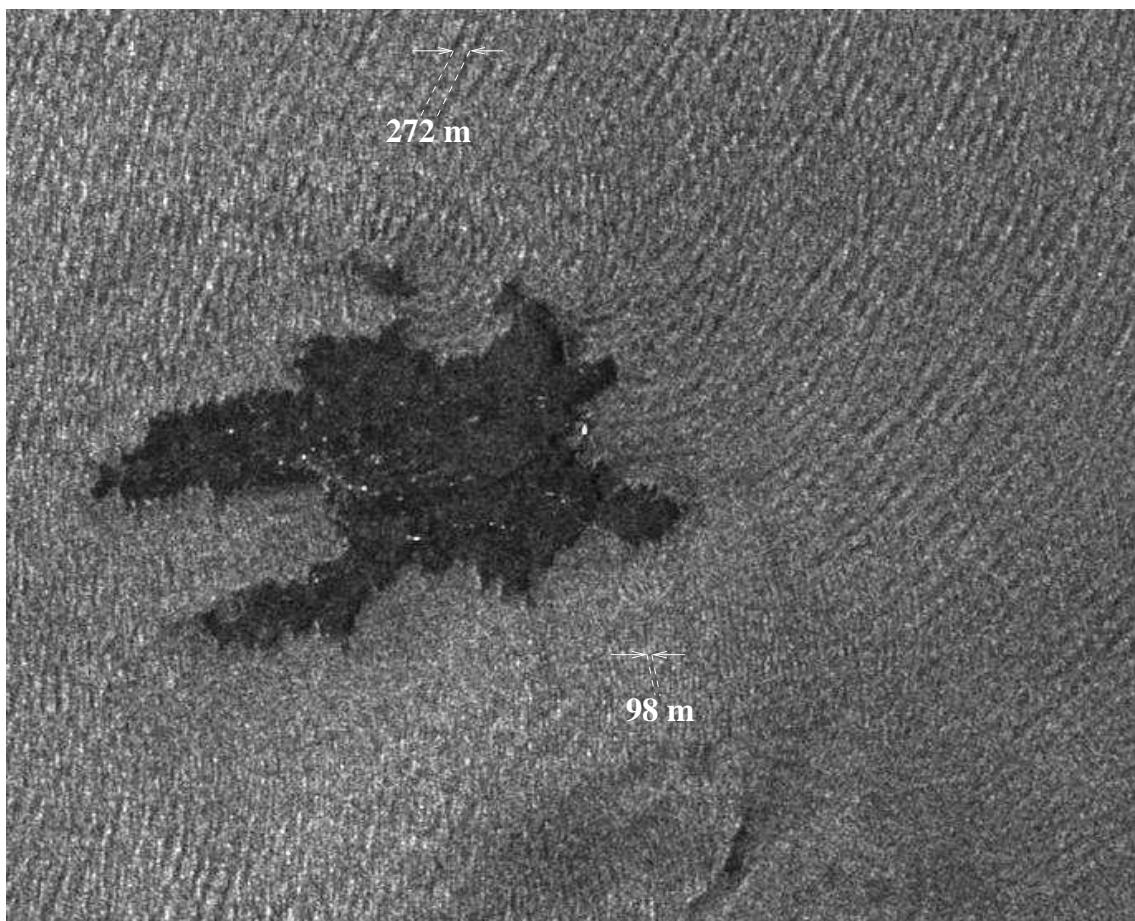
Détail d'une image SAR©ESA. En arrivant dans la baie de Douarnenez caractérisée par une remontée progressive des fonds en pente douce sur 28 km jusqu'à la plage, la houle du large (figure 3.2) d'une longueur d'onde de plus de 200 m à l'entrée de la baie arrive parallèlement à la plage et sa longueur d'onde est fortement diminuée tout au long de sa progression dans la baie pour avoisiner les 90 m aux abords immédiats de la plage.

FIGURE 3.7 : Réfraction de la houle dans la baie de Douarnenez

On retrouve le phénomène décrit par les marins pour positionner un haut-fond à l'aide de l'amplification locale de la cambrure des vagues. Dans un modèle phénoménologique de la mer, il faudra donc respecter le principe de conservation des crêtes [équation (3.41)] et l'équation de dispersion des ondes de gravité (3.42) pour modifier les vecteurs d'onde moyens des groupes de vagues et les relations de conservation de l'énergie en l'absence de courant pour évaluer la phase et l'amplitude des vagues dans les groupes en interaction avec la bathymétrie.

3.3.3.2 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, comme illustré par la figure 3.8. Si le courant n'est pas constant latéralement à un groupe, il peut faire tourner celui-ci ou modifier sa largeur : par exemple, si le courant orienté dans le sens de déplacement du groupe est plus fort à gauche qu'à droite, le groupe tourne à droite ; si les lignes de courant vues par le groupe se ressèment (resp. s'élargissent), le groupe sera comprimé (resp. étiré).



Détail d'une image SAR©ESA. En arrivant dans le passage du Fromveur (le long de la côte Sud-Est de Ouessant, orienté Sud-Ouest/Nord-Est) à marée descendante, les groupes du large d'une longueur d'onde de près de trois cents mètres (figure 3.2) préalablement diffractés par la pointe Sud-Ouest de l'Île d'Ouessant qui les fait se propager vers l'Est, s'opposent à un violent courant contraire allant vers l'Ouest à plus de 4 ms^{-1} qui les compriment : leur longueur d'onde est divisée par près de 3 par le courant, dont ils ressortent avec une longueur d'onde de moins de cent mètres. Ils restent suffisamment rapides pour remonter le courant et interagissent alors avec les groupes du large qui sont passés par le Nord de l'Île d'Ouessant et se déplacent alors orthogonalement au courant qui ne modifie pas leur longueur d'onde.

FIGURE 3.8 : Compression des groupes s'opposant au courant dans le passage du Fromveur

Si le milieu est animé d'un champ de vitesse $\vec{U}(\vec{x}, t)$, la fréquence apparente n d'une vague est modifiée de la façon suivante :

$$n = \omega + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (3.43)$$

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 [Bretherton et Garrett 69]. 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 :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\bar{\mathcal{E}}}{\omega} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\bar{\mathcal{E}}}{\omega} \right) + \nabla_x \cdot \left[(U + c_g) \frac{\bar{\mathcal{E}}}{\omega} \right] = 0, \quad \frac{E}{\omega} = c^{\text{te}} \quad \text{pour un groupe de vagues donné} \quad (3.44)$$

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. Avec une hypothèse d'ajustement instantané de l'onde aux changements de conditions environnementales, il est donc possible, à partir de champs de courants, de déterminer l'évolution des caractéristiques cinématiques et dynamiques du groupe de vagues. Illustrons qualitativement les effets d'un courant selon qu'il est dans le même sens ou de sens opposé aux vagues :

– Courant dans le sens des vagues, $\vec{k} \cdot \vec{U} > 0$:

$$\nabla_x U > 0 \xrightarrow{\text{freq. app.}} \nabla_x n > 0 \xrightarrow{\text{cons. crêtes}} \frac{\partial k}{\partial t} < 0 \xrightarrow{\text{dispersion}} \frac{\partial \omega}{\partial t} < 0 \xrightarrow{\text{cons. action}} \frac{\partial \bar{\mathcal{E}}}{\partial t} < 0 \quad (3.45)$$

– Vagues contre courant, $\vec{k} \cdot \vec{U} < 0$:

$$\nabla_x U < 0 \xrightarrow{\text{freq. app.}} \nabla_x n < 0 \xrightarrow{\text{cons. crêtes}} \frac{\partial k}{\partial t} > 0 \xrightarrow{\text{dispersion}} \frac{\partial \omega}{\partial t} > 0 \xrightarrow{\text{cons. action}} \frac{\partial \bar{\mathcal{E}}}{\partial t} > 0 \quad (3.46)$$

On retrouve le résultat connu des marins qu'un courant dans le sens des vagues aplatis la mer, alors qu'un courant opposé lève dangereusement les vagues. Dans un modèle phénoménologique, il faudra donc utiliser ces principes de conservation des crêtes et de l'action [équations (3.41) et (3.44)] pour modifier les vecteurs d'onde moyens, les pulsations moyennes des groupes et les amplitudes locales des vagues en fonction des courants.

Dans un but de complétude, nous présentons maintenant la *loi de conservation de l'action* [équation (3.44)] écrite dans le cadre de l'analyse de Fourier. Cette conservation de l'action décrit l'évolution du spectre des vagues $F(\vec{k}, \vec{x}, t)$ et est de la plus grande importance pour l'étude spectrale des états de mer, car le spectre caractérise les propriétés statistiques de l'état de mer à la surface en spécifiant la répartition de la densité d'énergie totale (cinétique et potentielle) en fonction du nombre d'onde. Dans le cas général, lorsque la bathymétrie et le courant varient doucement dans l'espace, l'évolution de la densité d'action des vagues $F(\vec{k}, \vec{x}, t)/\sigma(\vec{k}, \vec{x})$, où $\sigma(\vec{k}, \vec{x})$ est la fonction de dispersion, doit vérifier l'équation de conservation de l'action [Komen et Hasselmann 94] :

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + (c_g + U) \cdot \frac{\partial}{\partial x} - (\nabla_x \Omega) \cdot \frac{\partial}{\partial k} \right\} \left(\frac{F}{\sigma} \right) = \sum_l S'_l(F; w) \quad (3.47)$$

où la somme a lieu sur l'ensemble de toutes les perturbations ($S' = S/\sigma$) et w est un vecteur de paramètres environnementaux comme le vecteur vent de surface. c_g est le vecteur vitesse de groupe, U le vecteur vitesse du courant à la surface et $\Omega(k, x) = \sigma(k, x) + \vec{k} \cdot \vec{U}$. La somme des perturbations inclut les termes sources comme le transfert d'action du vent vers les vagues, la dissipation par déferlement ou par frottements sur le fond et les interactions non-linéaires entre les vagues.

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. Le nombre de vagues, lui demeure inchangé. Dans un modèle d'animation phénoménologique, l'expertise physique du comportement d'un groupe de vagues illustrée par les équations (3.45) et (3.46) sera simplifiée pour permettre ces calculs en temps réel tout en conservant une représentation graphique et physique satisfaisante de ces phénomènes.

3.3.4 Le bout du rouleau

La dissipation des vagues par le déferlement est l'un des processus les moins bien compris en physique, de par sa nature fortement intermittente [Donelan et Yuan 94] et de par l'importance prédominante des termes non-linéaires dans les équations de Navier-Stokes 3.11, même simplifiées en les équations d'Euler 3.12 en négligeant la viscosité et les générations de vortex [Grilli et al. 01]. 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% [Rapp et Melville 90] : 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 (figure 3.9), un transfert d'action systématique s'effectue du vent vers les courants, par la médiation des vagues. La contribution de chaque déferlement est très faible, mais leur somme génère les grands courants océaniques de surface comme par exemple le Gulf Stream ou El Niño, en partie responsables de la modulation du climat à l'échelle planétaire. C'est important pour les océanographes, mais l'estimation empirique du courant de dérive dû au vent synoptique sera suffisante pour notre modélisation graphique IPAS.



Photo prise par N. Reul depuis le pont d'un petit voilier (altitude 2.5 m) par mer agitée au large de Marseille en Mer Méditerranée avec un Mistral modéré (force 6 beaufort), mettant en évidence un front actif de déferlement d'une largeur d'une dizaine de mètres. L'énergie du vent s'accumule rapidement à la surface de la mer dans les vagues en pleine formation et n'a pas le temps d'être dissipée par le bas vers les grandes profondeurs ; les particules d'eau subissent alors de fortes accélérations au voisinage des crêtes dues à des phénomènes non linéaires de modulation de la phase ayant comme conséquences d'expulser ces particules en avant des crêtes, ce qui provoque des déferlements. Le surplus d'énergie qui ne peut être contenu dans les vagues est alors dissipé dans les turbulences visqueuses générées par le déferlement, à l'arrière du front actif : c'est la phase passive du déferlement qui va modifier les vagues passant dans ces turbulences temporaires. Les particules d'eau étant systématiquement projeté en avant des vagues, une partie de l'action est transformée à l'issu du processus turbulent de la phase passive en un courant de surface local se dirigeant grossièrement dans le sens du vent $\pm 45^\circ$ selon l'hémisphère et la profondeur, et la somme de ces courants locaux contribue au *courant de dérive*, qui sont à l'origine des grands courants océaniques comme le *gulf stream* ou *el niño*.

FIGURE 3.9 : Dissipation non-linéaire de l'énergie des vagues par déferlement en un courant de dérive

Un déferlement provient de l'écoulement 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.

3.3.4.1 Déferlements actifs

Dans le cas de vagues jeunes forcées par le vent et/ou susceptibles de déferler, 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 (3.44) en conséquence : même lors

des déferlements l'action totale est toujours conservée [Whitham 74], comme le précise l'équation de conservation de l'action 3.47 sous sa forme spectrale, mais une partie de l'action est prise par le déferlement :

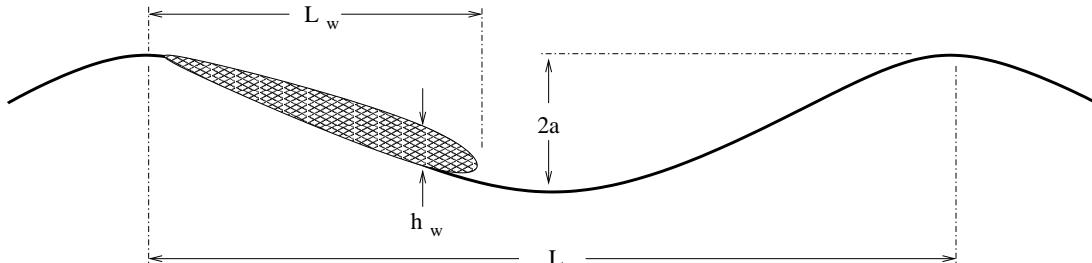
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{E}{\omega} \right) = \mathcal{S}_V + \mathcal{S}_{déf} + \mathcal{S}_{NL} + \mathcal{S}_{etc} \quad (3.48)$$

où \mathcal{S}_V est le taux d'apport d'action par l'écoulement d'air, $\mathcal{S}_{déf}$ le taux de perte d'action par déferlement, \mathcal{S}_{NL} le taux d'échange d'action entre groupes par interactions non-linéaires et \mathcal{S}_{etc} représente les autres mécanismes non explicitement spécifiés, *i.e.* atténuation visqueuse, interaction avec la topographie...

Il existe principalement deux critères phénoménologiques de déferlement [Donelan et Yuan 94] :

- l'un basé sur la comparaison entre la vitesse de phase d'un groupe et la vitesse de la particule,
- l'autre basé sur un principe d'accélération maximale des particules de la crête.

Lorsqu'une vague se propage avec une augmentation de son action (par effet de groupe, effet du vent, ...), la vitesse horizontale des particules d'eau à la crête croît ; si celle-ci vient à excéder la vitesse de phase de la vague (ou la vitesse locale de déplacement de la crête), la particule d'eau se détache de la crête, la vague commence à déferler. La vague se met à perdre de l'action qui va dans le déferlement, et le moment où cette perte d'action va compenser l'apport (par le groupe et/ou le vent, ...) détermine la durée de l'évènement déferlant, son intensité et la quantité totale d'action de la vague dissipée. Ces paramètres permettent de décrire l'évolution énergétique de la vague mais aussi de caractériser la mousse créée à l'avant des crêtes de vagues pendant cette phase *active* du déferlement. Les travaux expérimentaux de [Duncan 81] sur des fronts déferlants stationnaires en bassin artificiel fournissent des caractéristiques géométriques du bulbe de mousse en fonction des caractéristiques géométriques de la vague et peuvent être utilisées pour la description de cette phase active du déferlement (figure 3.10). On trouvera également pour la description géométrique des déferlements, une approche fractale dans [Longuet-Higgins 94] et une excellente étude des dissymétries de cambrure de part et d'autre de la crête dans [Bonmarin 89].



La forme du bulbe de mousse active est appréhendée mathématiquement par des transformations de similarité selon les dimensions de la vague à partir d'un bulbe primitif : $L_w/L = \text{Cte}$ et $h_w/a = \text{Cte}$. L'énergie globale du groupe au cours du temps pendant un déferlement varie alors linéairement à la fois en densité spectrale et en fréquence, selon l'équation [Donelan et Yuan 94] :

$$\frac{dE}{dt} \sim -\omega E \quad (3.49)$$

Cette hypothèse de similarité fractale linéaire n'est cependant pas respectée en mer (contrairement aux expériences en bassins de carènes de [Duncan 81]) où la phase passive du déferlement modifie sensiblement la répartition des nouveaux fronts déferlants.

FIGURE 3.10 : Prototype de bulbe de mousse active et similarité géométrique

L'autre critère principal de déferlement est basé sur le critère limitant de Stokes disant qu'une vague va déferler si l'accélération vers le bas des crêtes dépasse $g/2$ [Longuet-Higgins 69] :

$$a_b \omega^2 = \frac{g}{2} \quad \text{ou} \quad a_b = a \left(\frac{\frac{1}{2}g}{a\omega^2} \right) \quad (3.50)$$

où a_b est l'amplitude au-dessus de laquelle la vague déferle. En faisant l'hypothèse qu'un déferlement réduit l'amplitude $a > a_b$ d'une vague à une amplitude $a = a_b$ exactement, l'énergie perdue par cycle de vague s'écrit [Longuet-Higgins 69] :

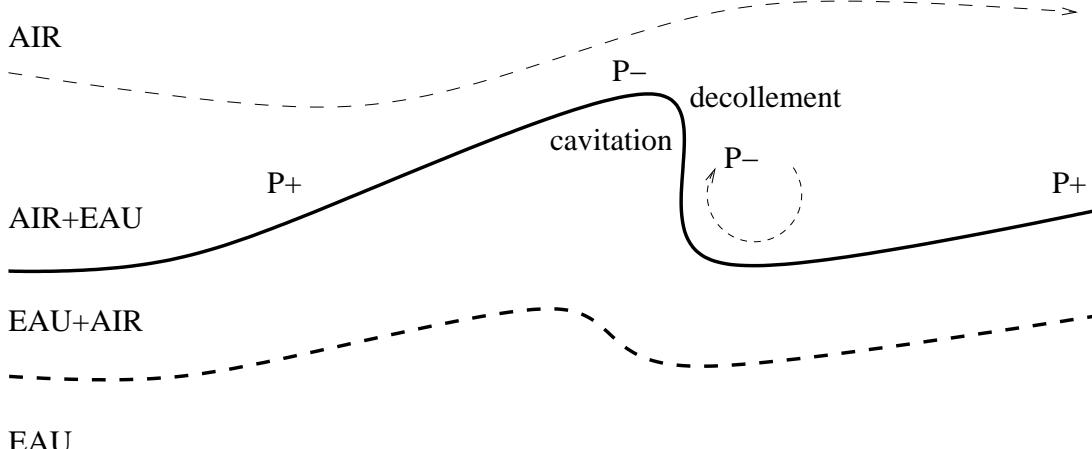
$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho_w g \int_{a_b}^{\infty} (a^2 - a_b^2) p(a) da \quad (3.51)$$

où $p(a)$ est la fonction de densité de probabilité des hauteurs des vagues. Avec l'hypothèse d'une mer gaussienne à bande étroite, la perte d'énergie devient selon [Longuet-Higgins 69] :

$$\frac{\Delta E}{E} = e^{-g^2/8\bar{\omega}^4 m_0}, \text{ avec } m_0 = \int_0^\infty F(\omega) d\omega = \langle \zeta^2 \rangle \text{ et } \bar{\omega} = \left(\frac{\int_0^\infty \omega^2 F(\omega) d\omega}{m_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.52)$$

où m_0 est la variance des amplitudes et $\bar{\omega}$ la fréquence moyenne des vagues utilisée dans l'équation (3.50).

Ces critères de déferlement doivent certainement être modulés par le stress du vent et la géométrie de la vague, car il semblerait que des phénomènes de cavitation dans l'eau, de gazéification de l'eau fortement stressée par le vent et de décollement de l'air puissent favoriser l'apparition précoce des déferlements dans les vagues très cambrées (figure 3.11).



Lorsqu'une vague est très cambrée, trois phénomènes peuvent expliquer son déferlement :

1. Sa géométrie favorise un décollement de l'air en avant de la crête créant ainsi une dépression beaucoup plus importante que le simple effet de pression dynamique. Cela aura tendance à tirer le sommet de la crête vers l'avant et favorise ainsi le déferlement ; oui, mais le rapport des densités de l'air et de l'eau ne permet pas d'attribuer un effet significatif à ce phénomène de décollement.
2. Des mesures en canal artificiel montrent que lorsqu'une vague s'apprête à déferler, il existe dans l'eau au voisinage de la crête un point d'arrêt pour les lignes de courant. Ce point d'arrêt serait à l'origine d'un phénomène de cavitation pulvérisant la crête de la vague qui se met alors à déferler.
3. Lorsque le vent est fort, la surface de la mer ne sépare pas de l'air et de l'eau, mais plutôt deux mélanges : de l'air avec des embruns, et de l'eau avec des bulles d'air. Aussi, il est envisageable que qualitativement, dans les zones de plus grande pression la mer absorbe plus de bulles d'air, tandis qu'au voisinage de la crête, la dépression locale fasse grossir ces bulles rendant la crête plus instable. Le rapport des densités de ces deux mélanges air/eau éclaire d'un nouveau regard l'hypothèse d'un effet significatif du phénomène de décollement par rapport à la cavitation dans le déferlement.

Si les deux premiers phénomènes ont été abordés en océanographie, très rares sont les études de ces phénomènes sous la lumière d'un mélange air/eau pour la surface de la mer lorsqu'elle est fortement stressée par le vent.

FIGURE 3.11 : Cavitation, gazéification et décollement : trois causes possibles du déferlement précoce

Ainsi, dans un modèle d'animation phénoménologique, les deux critères de déferlement peuvent être utilisés selon que l'on dispose précisément de la vitesse des particules ou non. La quantification de l'énergie à fournir au système de particules modélisant la phase active du déferlement sera réalisée en s'inspirant des équations de transfert d'action du groupe de vague vers le déferlement [équations (3.48) et (3.49) ou (3.52)] .

3.3.4.2 Déferlements passifs

A l'arrière de la crête déferlante, une zone de turbulence apparaît accompagnée d'un résidu de mousse non emporté par la crête. Cette mousse va disparaître progressivement par un phénomène de relaxation selon une exponentielle décroissante [Sharkov 95], c'est la phase de déferlement *passif* (figure 3.12). Les déferlements passifs des grosses vagues créent une atténuation rapide des vagues courtes

arrivant dans ces turbulences [Banner et al. 89]. 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 [Reul et Chapron 04]. Evidemment, si le déferlement est dû à la présence d'un haut fond, d'un courant ou à une synchronisation exceptionnelle entre plusieurs groupes, la concentration d'action est telle que la vague suivante déferlera malgré tout.

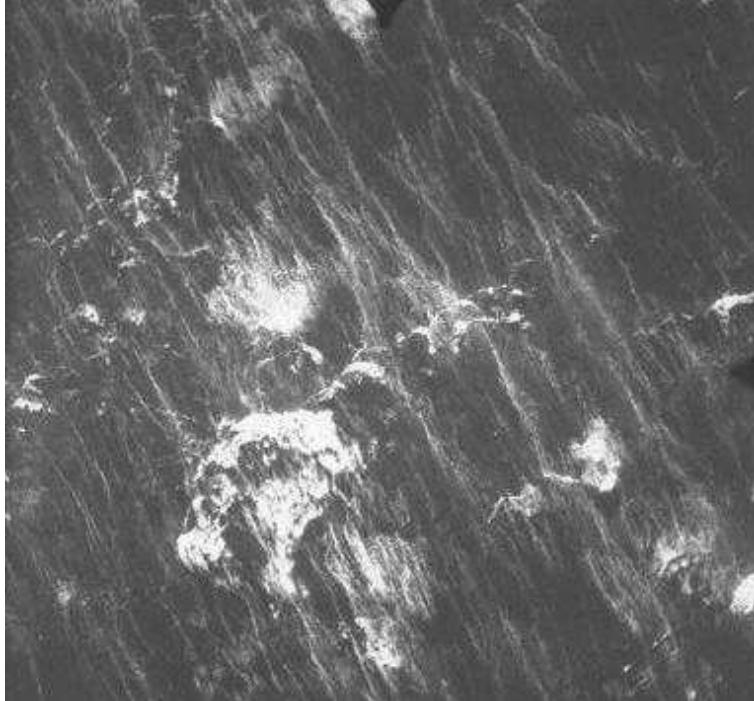


Photo prise d'avion à 400 m d'altitude d'une coup de vent force 8, caractérisé par de nombreux embruns (apparaissant comme de fines lignes blanches) et de l'écume qui ne s'oriente pas dans le lit du vent (l'orientation en traînées d'écume est caractéristique des tempêtes, pas des coups de vent). La phase active des déferlements génère de la mousse et des turbulences qui recouvrent une partie de la surface de la mer par une peau dont la profondeur dépend de l'intensité des déferlements. Tout en se relaxant, ces turbulences absorbent une partie de l'énergie des vagues se propageant à la surface, cette perte d'énergie est assimilée à un puis dans les hautes fréquences d'un spectre de mer complètement développée.

FIGURE 3.12 : Couverture de la mer par la mousse résultante des déferlements

Pour caractériser la représentation de cette mousse au cours d'un déferlement et ses effets sur les groupes, nous devons quantifier son étendue en surface pour connaître la zone d'influence du déferlement, et en profondeur pour déterminer d'une part le taux de transparence de cette mousse et d'autre part quelles vagues seront dissipées par les turbulences.

étendue en surface des déferlements

Les critères du déferlement actif permettent de déterminer de manière procédurale la longueur et la durée des fronts déferlants, donc d'en déduire l'étendue du déferlement passif, à condition de pouvoir calculer ces critères. Sinon, on utilise un modèle empirico-statistique du déferlement suivant les équations :

$$L = \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \Lambda(\vec{c}) d\vec{c}, \quad R = \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} c \Lambda(\vec{c}) d\vec{c}, \quad \text{avec } \Lambda(c) = \left(\frac{U_{10}}{10} \right)^3 \times 3.3 \times 10^{-4} e^{-0.64c} \quad (3.53)$$

où $\Lambda(\vec{c}) [m^{-2} \cdot s]$ est la distribution de la largeur des fronts déferlants par unité de surface et par unité d'intervalle de vitesse, introduite par [Phillips 85] et déterminée empiriquement par [Melville et Matusov 02], telle que $\Lambda(\vec{c}) d\vec{c}$ représente la longueur totale moyenne par unité de surface des fronts déferlants dont la vitesse est comprise entre \vec{c} et $\vec{c} + d\vec{c}$, U_{10} la vitesse du vent dix mètres au-dessus de la mer, L la longueur totale des fronts déferlants par unité de surface et R le nombre total de vagues déferlantes toutes échelles confondues passant un point donné par unité de temps, $c \Lambda(\vec{c}) d\vec{c}$ étant la distribution du nombre de fronts déferlants par unité de temps passant ce point avec une vitesse entre \vec{c} et $\vec{c} + d\vec{c}$.

épaisseur des déferlements

L'épaisseur moyenne $\bar{\delta}(\lambda, t)$ d'un déferlement passif n'est pas une fonction constante comme peut l'être celle d'un déferlement actif (proportionnel à la longueur d'onde λ de la vague selon l'hypothèse de similarité de [Duncan 81]) : elle grandit pendant la phase active proportionnellement à la durée du déferlement puis se relaxe selon une exponentielle décroissante. Ce phénomène peut être modélisé

avec des considérations empiriques et théoriques selon les équations suivantes [Reul et Chapron 04] :

$$\bar{\delta}(\lambda, t) = \beta(\lambda)t, \text{ pour } 0 \leq t < \tau_* \quad (3.54)$$

$$\bar{\delta}(\lambda, t) = \bar{\delta}_{\max}(\lambda)e^{-\frac{t-\tau_*}{\tau'}}, \text{ pour } t \geq \tau_* \quad (3.55)$$

$$\text{avec } \beta(\lambda) \approx 9.9 \times 10^{-2} \lambda^{\frac{1}{2}}, \tau_* = 5(c/g) \text{ et } \tau' \approx 3.8s \quad (3.56)$$

où $\beta(\lambda)$ est le taux d'accroissement de l'épaisseur de mousse durant la phase active, τ_* sa durée moyenne en pleine mer, c la vitesse du front déferlent, et τ' la durée de vie nominale des bulles sur la mer (voir [Monahan et Zietlow 69] pour plus d'informations sur la durée de vie des bulles).

effet des turbulences

Dans un spectre continu, l'atténuation locale des vagues courtes peut se représenter par une source de dissipation dépendant de la fréquence relative au pic de déferlement des grosses vagues [Donelan et Yuan 94]. Avec l'hypothèse de similarité du bulbe de mousse active (équation (3.49)), l'ensemble étant sensible au taux de couverture de la mer par des déferlements estimé par la cambrure moyenne de l'état de mer, on obtient la fonction de dissipation suivante :

$$S = -C \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^m \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}} \right)^n \omega F(\vec{k}), \text{ où } \hat{\alpha} = m_0 \bar{\omega}^4 / g^2 \quad (3.57)$$

C, m, n étant des paramètres de réglage, $\bar{\omega}$ la fréquence moyenne du pic de déferlement et $\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}}$ une mesure de la cambrure globale du champ de vagues. Cette équation est utilisée comme source de dissipation due aux déferlements dans le modèle WAM avec $n = 1$ [WAMDI-group 88].

Ainsi, à partir d'une description initiale phénoménologique (vitesse ou accélération critiques de particules, limitation d'amplitude de la vague déferlante), 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. Aussi, pour la haute mer, avec des hypothèses de répartition statistique des déferlements (similarité fractale, répartition gaussienne), les modèles océanographiques intègrent des effets des déferlements sur les spectres énergétiques des états de mer en introduisant une source dissipative centrée sur le pic de fréquence des plus grosses vagues déferlantes.

Dans un modèle d'animation phénoménologique, l'expertise physique du déferlement actif permet de générer des systèmes de particules réalistes et de modifier les vagues déferlantes selon les équations (3.48) et (3.49). Aussi, la phase passive du déferlement pourra utiliser les équations (3.53), (3.54) et (3.55) selon l'information disponible, et modifiera localement le comportement des groupes de vagues en s'inspirant de l'équation de dissipation (3.57).

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une expertise physique de la mer vue par les océanographes, dans le but de modéliser de manière crédible les phénomènes observés par les marins (figure 2.10, page 40) dans un modèle interactif d'animation phénoménologique de la mer. Les grands principes de la Physique (conservation de la masse, du moment, de l'énergie) et l'hypothèse de continuité permettent de modéliser les états de mer par un système d'équations aux dérivées partielles, mais la difficulté de leur résolution directe demande de considérer une approche plus phénoménologique pour simuler les états de mer, notamment pour les mers jeunes intensément forcées par le vent.

En dehors du vent, des courants et de la bathymétrie 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 et les déferlements.

- Les groupes de vagues, stables, se propagent sur de grandes distances en interaction avec leur environnement.
- Les déferlements, instables et quasi-immobiles relativement à l'eau, se dissipent rapidement vers de très faibles courants de surface, après une courte période transitoire très turbulente générant des embruns et de l'écume.

phénomène modélisé	modèles physiques	paramètres
groupe de vagues	Ondes localisées par une enveloppe d'extention finie se propageant le long de rais [équations (3.31), (3.32), (3.33) et (3.34)]. Analyse par ondelettes avec analysatrice de Morlet 2D [équations (3.36) et (3.37)].	âge, spectre, nombre de vagues principales, vecteur d'onde moyen, position moyenne, vitesse de groupe, enveloppe.
déferlement	Déferlement actif : critères de déferlement (vitesse des particules, accélération [équation (3.50)]), activité du déferlement [équation (3.53)]. Déferlement passif : disparition progressive des turbulences et de la mousse par relaxation [équations (3.54) et (3.55)].	largeur des fronts déferlants, durée de phase active, quantité d'action, profondeur de mousse, durée de relaxation
interactions groupe/groupe	Cinématique : interaction par courants locaux et déferlements. Résonance : interaction de quadruplets [équation (3.39)].	vecteurs d'onde, pulsations et amplitudes des groupes en interaction.
interactions groupe/déferlement	Transferts d'action [équation (3.48)] et dissipation des vagues courtes par la mousse passive [équation (3.57)]. Allongement des crêtes [Banner et Tian 98], augmentation du nombre de vagues [Donelan et Yuan 94].	cambrure des vagues, vitesse des particules sur la crête des vagues, amplitude maximale critique, profondeur de mousse, longueurs d'onde dissipées.
interactions groupe/vent	Âge d'un état de mer : vitesse de friction [équation (3.38)], transfert d'énergie vers la mer localisé sur les crêtes et résultats empiriques (figure 2.7).	champ de vecteurs "vent en altitude", vecteurs d'onde, cambrure, taux d'avance de crête d'une vague.
interactions groupe/courant	Principe de conservation des crêtes et de l'action [équations (3.41) et (3.44)]. Réfraction et élargissement des groupes par les gradients de courant.	champ de vecteurs "courant de surface", vecteurs d'onde moyens, pulsations moyennes des groupes, amplitudes et phases locales des vagues.
interactions groupe/profondeur	Principe de conservation des crêtes et de l'énergie [équation (3.41)]. Réfraction dispersive [équation (3.42)] et élargissement des groupes.	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 expertisé physiquement et le modèle physique dépend de paramètres.

FIGURE 3.13 : Modélisation océanographique des phénomènes observés par les marins

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'énergie entre les groupes, le vent, la bathymétrie, les courants et les déferlements, ou plus précisément les échanges 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 océanographique des états de mer est la superposition de plusieurs modèles physiques de phénomènes considérés indépendamment les uns des autres, comme le fait apparaître l'équation de la conservation d'action (3.47 ou 3.48) pour les effets du vent, des déferlements, des résonances, de viscosité, de bathymétrie, de courant ... Les différents phénomènes modélisés par cette expertise physique des états de mer sont résumés dans le tableau de la figure 3.13.

Ainsi, pour assurer une crédibilité physique dans un modèle phénoménologique d'animation de la mer, le modèle informatique doit respecter cette expertise océanographique, dans les contraintes du temps réel.

Le chapitre suivant 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 temps réel et interactifs d'animation de la mer.

Références

- [Ardhuin 01] Arduhin, F. (2001). *Swell across the continental shelf*. Mémoire de Thèse, Naval Post-graduate School, Monterey, CA. http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/vagues/MODELES/crest.f.html.
- [Arneodo et al. 95] Arneodo, A., Argoul, F., Bracy, E., Elezgaray, J., et Muzy, J. (1995). *Ondelettes, multifractales et turbulences*. Diderot, Art et Sciences, Paris.
- [Banner et al. 89] Banner, M., Jones, I., et Trinder, J. (1989). Wavenumber spectra of short gravity waves. *Fluid. Mech.*, 198 :321–344.
- [Banner et Phillips 74] Banner, M. et Phillips, O. (1974). On the incipient breaking of small scale waves. *Fluid. Mech.*, 65 :647–656.
- [Banner et Tian 98] Banner, M. et Tian, X. (1998). On the determination of the onset of breaking for modulating surface gravity water waves. *Fluid. Mech.*, 367 :107–137.
- [Barnett et Wilkerson 67] Barnett, T. et Wilkerson, J. (1967). On the generation of ocean wind waves as inferred from airborne radar measurements of fetch-limited spectra. *Marine Res.*, 25(3) :292–328.
- [Benney et Saffman 66] Benney, D. et Saffman, P. (1966). Nonlinear interactions of random waves in a dispersive medium. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 289 :301–380.
- [Bonmarin 89] Bonmarin, P. (1989). Geometric properties of deep water breaking waves. *J. Fluid Mech.*, 209 :405–433.
- [Brettherton et Garrett 69] Brettherton, F. et Garrett, C. (1969). Wave trains in inhomogeneous moving media. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 302 :529–554.
- [Carey 97] Carey, G. F. (1997). *Computational Grids : Generation, Adaption, and Solution*. Taylor & Francis.
- [Chang et Liu 98] Chang, K.-A. et Liu, P. (1998). Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave. *Phys. Fluid.*, 10(1) :327–329.
- [Chapron et al. 95] Chapron, B., Liu, A., Peng, C., et Mollo-Christiensen, E. (1995). Higher order spectral and scale analysis of surface height fluctuations. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :151–173.
- [Chen et al. 99] Chen, G., Kharif, C., Zaleski, S., et Li, J. (1999). Two-dimensional Navier-Stokes simulation of breaking waves. *Physic of Fluids*, 11(1) :121–134.
- [Dautray et Lions 87] Dautray, R. et Lions, J. (1987). *Analyse mathématique et calcul numérique pour les sciences et les techniques*. Masson, Paris.
- [Dias 03] Dias, F. (2003). Le déferlement. *Pour la Science*, 303.
- [Donelan et Drennan 96] Donelan, M. et Drennan, W. (1996). Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves. *Journal of Physical Oceanography*, 26(9) :1901–1914.
- [Donelan et Yuan 94] Donelan, M. et Yuan, Y. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre Physical description of wave evolution ; wave dissipation by surface processes, pages 143–155. Cambridge University Press.
- [Drennan et Donelan 96] Drennan, W. et Donelan, M. (1996). Nonlinear coalescing wave groups. In Donelan, M., Hui, W., et Plant, W., éditeurs, *Symposium on The Air Sea Interface*, pages 127–132.
- [Drennan et al. 98] Drennan, W., Graber, H., Donelan, M., et Terray, E. (1998). Directional wave measurements from the ASIS (Air-Sea Interaction Spar) buoy. In *Oceans*, pages 414–418.
- [Duncan 81] Duncan, J. (1981). An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil. *Proc. Roy. Soc. London*, 337 :331–348.
- [Enright et al. 02] Enright, D., Marschner, S., et Fedkiw, R. (2002). Animation and rendering of complex water surfaces. *ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH 2002 Proceedings)*, 21 :736–744.
- [Fourier 1822] Fourier, J. (1822). *Théorie analytique de la chaleur*. Firmin Didot, Père et Fils, Paris.
- [Fournier et Reeves 86] Fournier, A. et Reeves, W. (1986). A simple model of ocean wave. *Computer Graphics*, 13 :75–84.

- [Gabor 46] Gabor, D. (1946). Theory of communication. *Inst. Electr. Engeg.*, 93(3) :429–457.
- [Gerstner 1804] Gerstner, F. (1804). *Theorie der wellen*. Abhandlungen der koniglichen bominschen. Gesellschaft der Wissenschaften, Prague.
- [Grilli et al. 01] Grilli, S., Guyenne, P., et Dias, F. (2001). A fully non-linear model for the three-dimensional overtuning waves over arbitrary bottom. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 35 :829–867.
- [Grossmann et Morlet 84] Grossmann, A. et Morlet, J. (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, 15(4) :723–736.
- [Guyon et al. 91] Guyon, E., Hulin, J., et Petit, L. (1991). *Hydrodynamique physique*. InterEditions/Editions du CNRS.
- [Hafez et Oshima 98] Hafez, M. M. et Oshima, K., éditeurs (1998). *Computational Fluid Dynamics Review 1998*. World Scientific Pub Co.
- [Hasselmann 62] Hasselmann, K. (1962). On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1 : general theory. *Fluid. Mech.*, 12 :481–501.
- [Hasselmann et al. 73] Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., et Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, A8(12) :1–95.
- [Hasselmann et Hasselmann 85] Hasselmann, S. et Hasselmann, K. (1985). 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.
- [Hasselmann et al. 85] Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., et Barnett, T. (1985). 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.
- [Hauser et al. 00] Hauser, D., Dupuis, H., Durrieu De Madron, X., Estournel, C., Flamant, C., Pelon, J., Queffeulou, P., et Lefèvre, J. (2000). La campagne FETCH : étude des échanges océan/atmosphère dans les conditions côtières du Golfe du Lion. *La Météorologie*, 8(29) :14–31.
- [Janssen 94] Janssen, P. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre Physical description of wave evolution ; wave growth by wind, pages 71–112. Cambridge University Press.
- [Janssen 03] Janssen, P. (2003). Nonlinear four wave interactions and freak waves. In Abstract, G. R., éditeur, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, volume 5, page 02768, Nice, France.
- [Komen et al. 94] Komen, G., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., et Janssen, P. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press.
- [Komen et Hasselmann 94] Komen, G. et Hasselmann, K. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre The action balance equation and the statistical description of wave evolution, pages 5–48. Cambridge University Press.
- [Lamb 32] Lamb, H. (1932). *Hydrodynamics*, volume 6. Dover, New York.
- [Landau et Lifshitz 60] Landau, L. et Lifshitz, E. (1960). *Mechanics*. Pergamon Press, Addison-Wesley édition.
- [Liakos 99] Liakos, T. (1999). *Weak imposition of boundary conditions in the Stokes problem*. Mémoire de Thèse, University of Pittsburg, PA.
- [Liu et al. 95] Liu, A., Peng, C., Chapron, B., et Mollo-Christiensen, E. (1995). Direction and magnitude of wind stress over wave groups observed during SWADE. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :175–194.
- [Longuet-Higgins 57] Longuet-Higgins, M. (1957). 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.
- [Longuet-Higgins 69] Longuet-Higgins, M. (1969). On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves. *Proc. Roy. Soc. London*, A310 :151–159.

- [Longuet-Higgins 86] Longuet-Higgins, M. (1986). Wave group statistics. In Monahan, E. et Mac Nio- caill, G., éditeurs, *Oceanic Whitecaps*, pages 15–35. Reidel, D. Publishing Compagny.
- [Longuet-Higgins 94] Longuet-Higgins, M. (1994). A fractal approach to breaking waves. *Journal of Physical Oceanography*, 24 :1834–1838.
- [Mandelbrot 75] Mandelbrot, B. (1975). *Les objets fractals - forme, hasard et dimension*. Flammarion, Paris.
- [Mastin et al. 87] Mastin, G., Watterger, P., et Mareda, J. (1987). Fourier synthesis of ocean scenes. *Computer Graphics*, 14 :16–23.
- [Melville et Matusov 02] Melville, W. et Matusov, P. (2002). Distribution of breaking waves at the ocean surface. *Nature*, 417 :58–63.
- [Meyers et al. 93] Meyers, S., Kelly, B., et O'Brien, J. (1993). An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology : with application to the dispersion of Yanai waves. *Monthly Weather Review*, 121(10) :28–58.
- [Miles 57] Miles, J. (1957). On the generation of surface waves by shear flows. *Fluid Mechanics*, 3 :185–204.
- [Mitsuyasu 68] Mitsuyasu, H. (1968). On the growth of the spectrum of wind-generated waves. 1. *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, 16 :251–264.
- [Mitsuyasu 69] Mitsuyasu, H. (1969). On the growth of the spectrum of wind-generated waves. 2. *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, 17 :235–243.
- [Mollo-Christensen et Ramamonjariisoa 82] Mollo-Christensen, E. et Ramamonjariisoa, A. (1982). Subharmonic transitions and group formation in a wind wave field. *Journal of Geophysical Research*, 87(C8) :5699–5717.
- [Monahan et Zietlow 69] Monahan, E. et Zietlow, C. (1969). Laboratory comparisons of fresh-water and salt-water whitecaps. *Geophys. Res.*, 74 :6961–6966.
- [Peng et al. 95] Peng, C., Liu, A., Chapron, B., et Mollo-Christiensen, E. (1995). Wavelet analysis of sea surface flux and wave by swell. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :195–208.
- [Phillips 58] Phillips, O. (1958). The equilibrium range in the spectrum of wind-generated water waves. *Fluid Mechanics*, 4 :426–434.
- [Phillips 77] Phillips, O. (1977). *The dynamics of the upper ocean*. Cambridge University Press.
- [Phillips 85] Phillips, O. (1985). Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. *Fluid Mechanics*, 156 :505–531.
- [Pierson et al. 92] Pierson, W., Donelan, M., et Hui, W. (1992). Linear and nonlinear propagation of water wave groups. *Journal of Geophysical Research*, 97(C4) :5607–5621.
- [Pierson et Moskowitz 64] Pierson, W. et Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69 :5181.
- [Rapp et Melville 90] Rapp, R. et Melville, W. (1990). Laboratory measurements of deep water breaking waves. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A331 :735–780.
- [Reul et Chapron 04] Reul, N. et Chapron, B. (2004). A model of sea-foam thickness distribution for passive microwave remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.
- [Robin 89] Robin, P. (1989). *Vagues, l'énergie magnifique*. AGEP.
- [Sawnhey 62] Sawnhey, M. (1962). A study of ocean wave amplitudes in terms of the theory of runs of a Markov train process. Rapport technique, New York University.
- [Sharkov 95] Sharkov, Y. (1995). Expérimental investigations of the lifetime for breaking wave dispersive zone. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 30 :808–811.
- [Shaw 92] Shaw, C. (1992). *Using computational fluid dynamics*. Prentice Hall.
- [Snyder et Cox 66] Snyder, R. et Cox, C. (1966). A field study of the wind generation of ocean waves. *Mar. Res.*, 24(2) :141–178.
- [Sverdrup et Munk 47] Sverdrup, H. et Munk, W. (1947). Wind, sea, and swell : theory of relations for forecasting. Rapport Technique H.O. Pub. 601, U.S. Navy Hydrographic Office.

- [Tolman 89] Tolman, H. (1989). The numerical model WAVEWATCH : a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Rapport Technique DUT-CHGE-89-2, ISSN 0169-6548, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft Univ. of Techn.
- [WAMDI-group 88] WAMDI-group : Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P., Komen, G., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V., Greenwood, J., Reistad, M., Zambresky, L., et Ewing, J. (1988). The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *Phys. Oceanogr.*, 18 :1775–1810.
- [Whitham 74] Whitham, G. (1974). *Linear and nonlinear waves*. Wiley, New York.
- [Willebrand 75] Willebrand, J. (1975). Energy transport in a nonlinear and inhomogeneous random gravity wave field. *J. Fluid Mech.*, 22 :113–126.
- [Yang 91] Yang, H. (1991). *Wave Packets and Their Bifurcations in Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York, USA.

Chapitre 4

La mer des infographistes

Si vous voulez savoir l'âge de la terre, regardez la mer en furie. Son immensité grise, les lames où le vent creuse de longs sillons, les larges traînées d'écume, agitées, emportées, comme des boucles blanches emmêlées, donnent à la mer l'apparence d'un âge innombrable, sans lustre et sans reflet, comme si elle avait été créée avant la lumière elle-même [Conrad 06].

Joseph Conrad, *Le miroir de la mer*

4.1 Introduction

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 [Adabala et Manohar 02]. 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 (voir chapitre 3, section 3.2.2) et le but des algorithmes de résolution numérique des équations différentielles n'est pas l'interactivité : il faut prédefinir les conditions aux limites avant d'exécuter les calculs [Temam 84, Liakos 99]. 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 [Gerstner 1804] et [Biesel 52],
- l'approche spectrale à partir des travaux de [Hasselmann 62] et [Pierson et Moskowitz 64].

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 4.2 et 4.3. Récemment, ces deux approches ont été combinées avec des résolutions numériques locales directes des équations de Navier-Stokes [Jensen et Golias 01] et la grille géométrique s'adapte aux niveaux de détails selon le point de vue [Hinsinger et al. 02]. Exceptionnellement, des travaux combinent l'animation en haute mer avec des effets précalculés de la bathymétrie près des côtes [Cieutat et al. 01] et seul le studio de développement de jeux Nadéo¹ aborde la notion de plan d'eau avec son jeu *Virtual Skipper*² en y représentant des vents locaux précalculés par application de texture (la forme des vagues n'y est modifiée ni par la bathymétrie ni par la vitesse du vent). L'interactivité temps réel avec les modèles est limitée à la position de la caméra (sauf pour la texture du sillage des voiliers dans *Virtual Skipper*), mais ne permet ni la modification participative

¹ Nadéo : <http://www.nadeo.com>

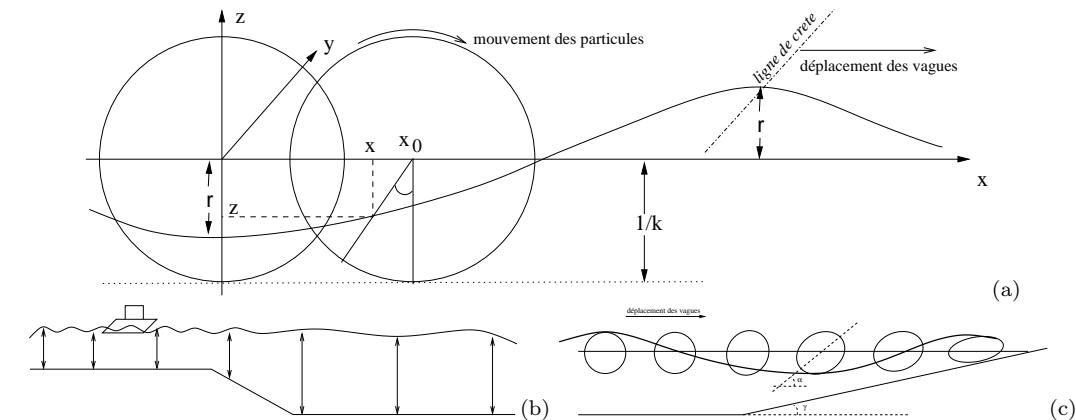
² Virtual Skipper 3 : <http://www.virtualskipper3.com/index.html>

de l'ensemble des phénomènes agissant sur le plan d'eau tels (figure 2.10), ni la simulation physique des modèles de ces phénomènes (figure 3.13). Ces approches récentes sont décrites dans la sous-section 4.4.

4.2 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 [Fournier et Reeves 86, Peachey 86]. 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. Sous certaines hypothèses aux bornes du domaine (infini et plan), en considérant l'eau comme un fluide incompressible et en négligeant la viscosité dans les équations de la dynamique des fluides (chapitre 3, section 3.2), une



Un bouchon posé sur l'eau (a) se déplacerait le long d'un cercle suivant l'équation de mouvement suivante :

$$\phi = kx_0 - \omega t, \quad x = x_0 + r \sin \phi \quad \text{et} \quad z = z_0 - r \cos \phi \quad (4.1)$$

où (x_0, z_0) est sa position au repos, ϕ la phase, k le nombre d'onde, ω la pulsation et r le rayon du cercle. A chaque instant, la forme de la surface est alors une nappe trochoïdale. C'est une solution exacte aux équations d'Euler en profondeur infinie. La hauteur des vagues est $H = 2r$, la longueur $L = \frac{2\pi}{k}$, la période $T = \frac{2\pi}{\omega}$. La cambrure vaut $\frac{H}{L} = \frac{kr}{\pi}$. Pour $kr = 1$, la courbe est une cycloïde (utilisée par [Peachey 86]) : la crête de la vague présente un point de rebroussement à tangente verticale, et pour $kr > 1$, le sommet se replie sur lui-même, ce qui n'est pas physiquement acceptable. L'interaction du vent sur la vague peut être traduit selon [Fournier et Reeves 86] par la modification de la phase avec une deuxième passe dans (4.1) avec :

$$\phi = kx_0 - \omega t - \lambda \Delta z \Delta t \quad (4.2)$$

où Δt traduit le temps pendant lequel souffle le vent et $\Delta z = z - z_0$, avec le z de la première passe dans (4.1), crée une avance des crêtes et un retard des creux.

Lorsqu'une houle évolue par profondeur non négligeable (b) et (c), les orbites des particules et le nombre d'onde sont modifiées, mais pas la période. Une approximation de la relation de dispersion (3.42) permet de modifier dans (4.1) le nombre d'onde et la phase comme suit :

$$k = \frac{k_\infty}{\sqrt{\tanh(k_\infty h)}} \quad \text{et} \quad \phi = -\omega t + \int_0^{x_0} k(x) dx \quad (4.3)$$

où k_∞ est le nombre d'onde en profondeur infinie. Lorsque la profondeur h diminue, la longueur d'onde $\frac{2\pi}{k}$ raccourcit et les vagues ralentissent : le ϕ modifié par (4.3) est en retard sur le ϕ de (4.1). L'orbite des particules n'est plus circulaire, mais elliptique tendant à devenir parallèle à la pente du rivage. Cet effet est introduit en modifiant 4.1 :

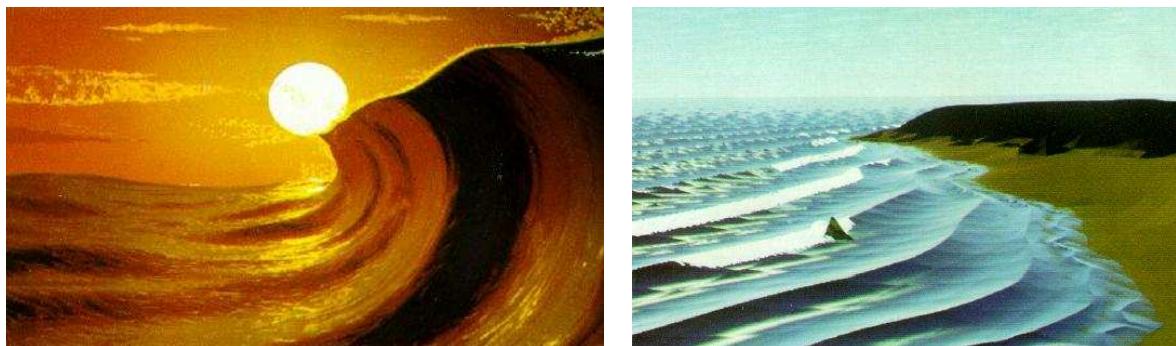
$$x = x_0 + r S_x \cos \alpha \cdot \sin \phi + r S_z \sin \alpha \cos \phi \quad , \quad S_x = 1/(1 - e^{-k_x h}), \quad S_z = S_x (1 - e^{-k_z h}) \quad (4.4)$$

avec le ϕ de (4.3) et $\alpha = \gamma e^{-k_0 h}$ orientant l'ellipse parallèlement à la pente γ . S_x et S_z sont les demi-axes de l'ellipse, les termes k_0 , k_x et k_z sont des constantes de mise à l'échelle.

FIGURE 4.1 : Trochoides comme forme primitive de vague et influence de la profondeur

approche lagrandienne permet d'obtenir comme solution, un mouvement des particules d'eau selon des orbites circulaires parcourues à vitesse constante. Cela définit la surface comme une nappe trochoïdale dans un plan vertical tangent à l'onde, illustrée sur la figure 4.1(a). Cette solution est alors modifiée qualitativement 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 [Biesel 52] : par faible profondeur, un phénomène de réfraction raccourcit la longueur d'onde (figure 4.1(b)) et les orbites circulaires deviennent progressivement elliptiques avec un grand axe tendant à s'orienter parallèlement au sol (figure 4.1(c)).

Ces nappes trochoïdales ne se superposent que dans le cas linéaire des faibles cambrures, et 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 [Lombardo et Puech 95, Gareau 97]. La complexité numérique du calcul des effets de bathymétrie sur tout le plan d'eau à partir d'une simplification des équations de Stokes 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 [Peachey 86]. Afin de rompre cette monotonie des crêtes, [Fournier et Reeves 86] a introduit la notion de train d'ondes dans son modèle caractérisé par un modèle descriptif de son enveloppe et de sa vitesse de groupe (figure 4.2).

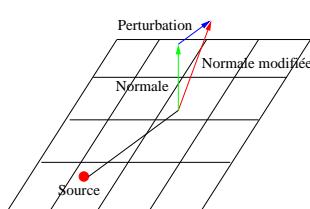


[Fournier et Reeves 86] à gauche, [Peachey 86] à droite ont obtenu ce type d'image il y a une vingtaine d'années, à partir d'un modèle d'inspiration particulière. Les effets du vent, de la bathymétrie et des déferlements sont pris en compte qualitativement pour des effets de rendu dans des modèles descriptifs, mais ne sont pas crédibles aux yeux des océanographes ou des marins.

FIGURE 4.2 : Résultats des pioniers de l'approche particulière en infographie, il y a vingt ans

Quelques modèles comme [Ts'o et Barsky 87] 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 [Gonzato et Saëc 00, Jeschke et al. 03].

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 [Perlin 85] (figure 4.3).



Les projections de texture selon les lois de l'optique (réflexion, réfraction) dépendent de la normale à la surface. Une perturbation appliquée à une normale modifie en conséquence les effets d'optique locaux de cette surface ; la position des points n'étant elle, pas modifiée, les calculs sont plus rapides. Pour appliquer ce principe de modification des normales à la surface de la mer, des sources aléatoires de vagues cycloïdales sont générées et les normales de ces vagues sont ajoutées sous forme d'une perturbation aux normales déjà attribuées aux points de la surface. Les calculs de ces perturbations dépendent du temps et de la distance à la source, sans aucun effet de courant ou de bathymétrie et de manière homogène sur toute la surface. Cette technique seule donne l'illusion d'une géométrie dynamique permettant l'animation d'une mer homogène vue de loin.

FIGURE 4.3 : Effet de texture par bruit de Perlin

Ainsi, ces travaux inspirés de l'approche particulaire 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 [Cieutat et al. 03]. Les modèles graphiques particulaires 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 locaux du vent, des courants et des déferlements.

Lorsque la cambrure est faible ($kr \ll 1$), les trochoïdes peuvent être approchées par des sinusoïdes, qui sont les primitives de l'approche spectrale.

4.3 Approche spectrale

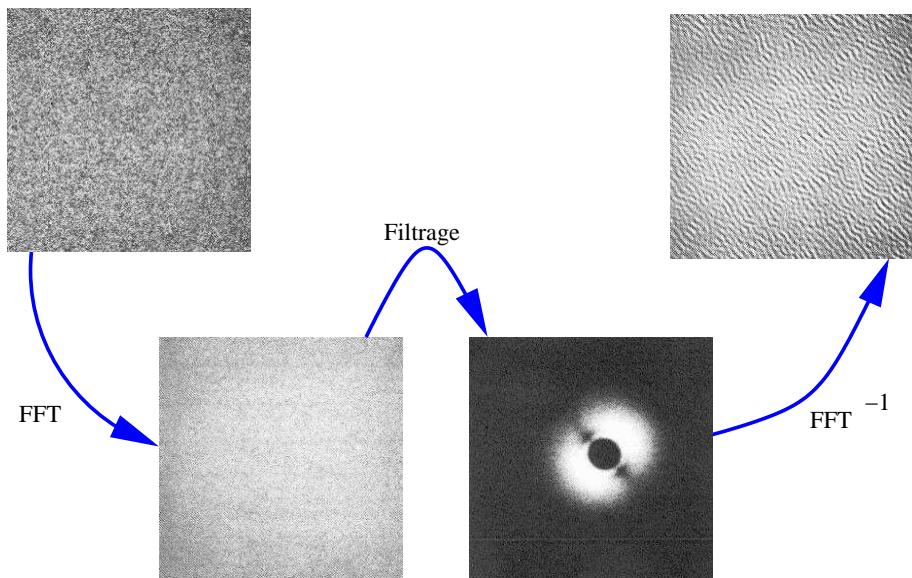
L'approche spectrale considère les points de la grille géométrique comme des hauteurs d'eau au-dessus de positions au sol. Le mouvement de chaque point correspond aux variations verticales de la quantité d'eau au dessus d'un caillou posé sur le fond ayant les coordonnées de ce point.

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 linéarisées (équation 3.21, page 46, chapitre 3) admettant comme solution générale une nappe sinusoïdale : $z = W(x, y, t)$, 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 :

$$z = f(x, y, t) = \sum_{j=1}^n a_j W_j(x, y, t), \text{ où } W_j(x, y, t) = e^{i(\vec{k}_j \cdot \vec{u}_{(x,y)} - \omega_j t + \phi_j)} \quad (4.5)$$

où \vec{k}_j sont les nombres d'onde orientés dans les directions de propagation, ω_j les pulsations, a_j les demi-hauteurs ou amplitudes et ϕ_j les phases des ondes. Cette technique à base de cartes altimétriques permet d'animer une mer calme [Max 81], en considérant les vagues comme une superposition de plusieurs sinusoïdes de faible amplitude. Chaque nappe sinusoïdale 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 $1/f$ [Mandelbrot 67], [Mastin et al. 87] 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 [Hasselmann 62]. L'idée ici est de projeter une image de bruit blanc dans l'espace des fréquences par transformée de Fourier rapide (*FFT*), lui appliquer le filtre défini par l'équation (4.6) modélisant le spectre des fréquences d'un état de mer complètement développée [Pierson et Moskowitz 64], puis obtenir l'image résultante par transformée de Fourier inverse (FFT^{-1}) comme l'illustre la figure 4.4. 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. Cependant, cette méthode n'est valable que pour les mers relativement calmes sans déferlements, répondant à l'hypothèse de faible cambrure des vagues. Un avantage de cette approche spectrale est la périodicité : en choisissant correctement les longueurs d'ondes multiples d'une même fondamentale elle-même sous-multiple de la longueur de la grille à animer, le motif obtenu sur un morceau de grille associé à cette fondamentale peut être recopié en translation sur toute grille. L'animation de la mer reste un problème délicat. C'est en discrétilisant, tout en gardant les propriétés de



La surface de la mer (en haut à droite) est obtenue à partir d'une image de bruit blanc (en haut à gauche) selon trois processus consécutifs. Tout d'abord une transformée de Fourier est appliquée au bruit blanc (résultat en bas à gauche). Ensuite, le filtre issu d'un modèle océanographique de la mer complètement développée est appliqué :

$$F(f, \theta) = F_{PM}(f)D(f, \theta), \text{ avec } F_{PM}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-\frac{5}{4}(\frac{f_m}{f})^4}, \text{ et } D(f, \theta) = N_p^{-1} \cos^{2p}(\frac{\theta}{2}) \quad (4.6)$$

où $F_{PM}(f)$ est le spectre des énergies des vagues à la fréquence f , $D(f, \theta)$ est le facteur caractérisant la répartition azimutale d'énergie suivant la direction du vent qui pondère le spectre F_{PM} , f_m la fréquence maximale en Hz, $\alpha \approx 0.0081$ la constante de Phillips et $g \approx 9.81$ la constante de gravité. Le pic de fréquence dans ce spectre gaussien est donné par la relation $f_m = 0.13g/u_{10}$, avec u_{10} la vitesse du vent à une altitude de 10m au dessus de la mer. $N_p = 2^{1-2p} \pi \frac{\Gamma(2p+1)}{\Gamma^2(p+1)}$ est la constante de normalisation définie telle que $\int_{-\pi}^{\pi} D d\theta = 1$, où $p = 9.77(\frac{f}{f_m})^\mu$, avec $\mu = 4.06$ si $f < f_m$, $\mu = -2.34$ si $f > f_m$.

Enfin, le spectre filtré (en bas à droite) génère alors une surface de la mer dont le spectre spatial est en accord avec le modèle océanographique utilisé.

FIGURE 4.4 : Filtrage du spectre d'un bruit blanc par un modèle océanographique

périodicité, la relation de dispersion (3.29) également valable dans le cas des sinusoïdes et en modifiant les phases lors de la transformation inverse de Fourier que la propagation des vagues est modélisée [Premož et Ashikmin 01]. On peut aussi modifier le filtre [Tessendorf 01] ou ajouter un déplacement horizontal [Jensen et Golias 01] afin d'obtenir des vagues un peu plus cambrées s'approchant des trochoïdes et animant une mer réaliste pas trop calme (figure 4.5). 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'approche spectrale permet l'animation temps réel d'une mer virtuelle relativement calme et homogène. Ci-dessus, les travaux de [Tessendorf 01] et ci-contre les travaux de [Premož et Ashikmin 01].

FIGURE 4.5 : Animations temps réel de la mer par une approche spectrale

l'étendue de la simulation et l'approximation de faible cambrure ne permet pas de modéliser des états de mer modérés à forts.

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 dans ces modèles jusqu'à encore très récemment.

4.4 Modèles récents

Chacun des modèles précédents 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 [Loviscach 03].

Certains modèles récents combinent les deux approches. Par exemple, l'animation de la mer par grande profondeur peut être abordée en utilisant la distribution spectrale des vecteurs d'onde construite selon un filtre océanographique similaire à (4.6). Mais, au lieu d'animer l'altitude des points par une somme de sinusoïdes, le mouvement des points est réalisé selon les orbites circulaires associées aux trochoïdes pour les plus grandes longueurs d'onde et par un bruit de Perlin pour les plus courtes [Thon et al. 00]. Cela ne reste valable cependant que pour les faibles cambrures des trochoïdes principales, et le plan d'eau est toujours homogène du point de vue d'un marin. L'animation temps réel d'un modèle du même genre est grandement améliorée en adaptant dynamiquement la résolution de la grille et le choix des longueurs d'ondes représentés géométriquement en fonction du point de vue [Hinsinger et al. 02]. L'interactivité est au niveau de la position de la caméra et permet par exemple la simulation d'un vol d'avion ou d'hélicoptère au-dessus de grandes étendues de mer sans l'inconvénient de la périodicité observable habituellement dans l'approche spectrale. Mais les primitives restant des nappes trochoïdales infinies, la mer représentée, aussi réaliste semble-t-elle, est trop homogène pour le point de vue du marin (figure 4.6). Précisons également qu'en passant à des trochoïdes très cambrées et en gardant le même spectre pour les vecteurs d'onde, le spectre des hauteurs n'est plus compatible avec le modèle physique, car les crêtes très cambrées font dériver le spectre des hauteurs vers un plus grand nombre de hautes fréquences.



FIGURE 4.6 : Résolution adaptative du maillage pour la visualisation d'une "tempête"

En adaptant dynamiquement la résolution de la grille et le choix des longueurs d'ondes représentés géométriquement en fonction du point de vue, et en choisissant de représenter les basses fréquences par des trochoïdes, il devient possible d'animer un état de mer relativement agitée en temps réel [Hinsinger et al. 02]. Cependant, les déferlements, s'il sont décrits statistiquement dans le spectre océanographique par un puits fréquentiel, ne peuvent pas être attachés à une localisation particulière du plan d'eau.

De rares modèles font cohabiter en temps réel dans un même environnement virtuel l'animation de la mer par grande profondeur avec celle de la mer au-dessus des haut-fonds à l'aide de précalculs des

effets de la bathymétrie près des côtes [Gonzato et Saëc 00], dans le but de réaliser un environnement virtuel de formation à la navigation maritime utilisable sur un ordinateur personnel. Les contraintes de temps réel et l'interactivité nécessaire pour un environnement virtuel de formation font que, malgré les précalculs des effets bathymétriques, le formateur ne peut définir que les caractéristiques d'une houle unique modélisée par une nappe trochoïdale (infinie au large) qui va se réfracter sur le relief sous-marin. Simultanément, un bateau évolue sur le plan d'eau en interaction avec la houle qui le fait tanguer et rouler selon des hypothèses mécaniques [Cieutat et al. 01], mais le bateau ne génère pas de sillage. Les vents locaux et les courants locaux, lorsqu'ils existent, ne sont pas pris en compte sur la mer. Très récemment, [Cieutat et al. 03] ont proposé d'appliquer l'approche spectrale en tenant compte de la bathymétrie et du courant. Ils utilisent le modèle des vagues de Biesel et considèrent les points de la transformée de Fourier discrète comme étant les nombres d'ondes après avoir tenu compte des effets de la bathymétrie et des courants sur un spectre océanographique donné en haute mer et en l'absence de courant, puis en calculant la hauteur des vagues de chaque longueur d'onde afin de conserver l'action. Cette méthode permet de générer une surface de mer incluant les effets du courant et de la profondeur ; la mer ainsi créée est alors homogène sur toute la surface obtenue par transformée de Fourier inverse. A cette surface peut être ajoutée une "houle" de vecteur d'onde unique dont l'interaction avec la bathymétrie est précalculée.

D'autres approches pour l'animation temps réel de la mer combinent l'approche spectrale pour la représentation les 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 [Kass et Miller 90, Chen et Da Vitoria Lobo 95, Gomez 00] (voir [Adabala et Manohar 02] 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 [Jensen et Golias 01]. Un bateau peut alors interagir dynamiquement avec la mer en y apportant localement son sillage [Hinsinger et al. 02]. Cependant, le sillage n'est modélisé qu'auprès du navire et ne va pas s'étendre sur tout le plan d'eau.

Exceptionnellement, la notion de plan d'eau hétérogène est abordée dans le jeu vidéo *Virtual Skipper* dédié à la pratique virtuelle de la régate en voilier, en y représentant le vent par des effets de texture et la bathymétrie par des effets de transparence (figure 4.7). 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 [Jensen et Golias 01], n'ont pas fait l'objet de publications scientifiques.



Dans ce jeu vidéo interactif, un énorme travail a été réalisé sur la texturation du plan d'eau et l'interactivité pour le pilotage des voiliers. La visualisation des risées, et des hauts-fonds par réfraction de la lumière est particulièrement bien soignée. Cependant, la géométrie des vagues reste minimaliste et les déferlements sont obtenus par une astuce de texture, basée sur le réglage du niveau de transparence d'une texture de déferlement fonction de la hauteur des vagues. Le sillage est localisé au voisinage du voilier.

FIGURE 4.7 : Notion de plan d'eau dans le jeu vidéo *Virtual Skipper*

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 la présentation d'un plan d'eau incluant

simultanément les effets géométriques et/ou texturés locaux du vent, de la profondeur et des courants. La difficulté de ces modèles à rendre compte de l'hétérogénéité tient principalement des primitives utilisées qui sont des fonctions non localisées dans l'espace comme les nappes infinies trochoïdales ou sinusoïdales.

4.5 Conclusion

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 sinusoïdales 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 kilomètres carrés 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 de l'état de mer ait du sens pour les marins.

Références

- [Adabala et Manohar 02] Adabala, N. et Manohar, S. (2002). Techniques for realistic visualisation of fluids : a survey. *Computer Graphics*, 21(1) :65–81.
- [Biesel 52] Biesel, F. (1952). *Gravity waves*, volume 521, chapitre Study of wave propagation in water of gradually varying depth, pages 243–253. National Bureau of Standards Circular.
- [Chen et Da Vitoria Lobo 95] Chen, J. et Da Vitoria Lobo, N. (1995). Toward interactive rate simulation of fluids with moving obstacles using Navier-Stokes equations. *Graphical Models and Image Processing*, 57(2) :107–116.
- [Cieutat et al. 01] Cieutat, J., Gonzato, J., et Guitton, P. (2001). A new efficient wave model for maritime training simulator. *Computer Graphics*, 17 :202–210.
- [Cieutat et al. 03] Cieutat, J., Gonzato, J., et Guitton, P. (2003). A general ocean waves model for ship design. In *Virtual Concept*, pages 187–194, Biarritz, France. ESTIA.
- [Conrad 06] Conrad, J. (1906). *Le Miroir de la mer*. Gallimard.
- [Fournier et Reeves 86] Fournier, A. et Reeves, W. (1986). A simple model of ocean wave. *Computer Graphics*, 13 :75–84.
- [Gareau 97] Gareau, A. (1997). *Utilisation des systèmes de particules pour la simulation de phénomènes naturels, présentation d'une architecture permettant l'intégration de systèmes animés hétérogènes*. Mémoire de Thèse, Université de Lyon 1.
- [Gerstner 1804] Gerstner, F. (1804). *Theorie der wellen*. Abhandlungen der koniglichen bominschen. Gesellschaft der Wissenschaften, Prague.
- [Gomez 00] Gomez, M. (2000). Interactive simulation of water surfaces. In *Games Programming Gems*, pages 185–193. Charles River Media.
- [Gonzato et Saëc 00] Gonzato, J. et Saëc, B. (2000). On modelling and rendering ocean scenes. *Computeur Animation*, 11(1) :27–37.
- [Hasselmann 62] Hasselmann, K. (1962). On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1 : general theory. *Fluid. Mech.*, 12 :481–501.
- [Hinsinger et al. 02] Hinsinger, D., Neyret, F., et Cani, M.-P. (2002). Interactive animation of ocean waves. In *Symposium on Computer Animation (SCA)*, pages 161–166.

- [Jensen et Golias 01] Jensen, L. et Golias, R. (2001). Deep-water animation and rendering. In *Game Developer's Conference (Gamasutra)*.
- [Jeschke et al. 03] Jeschke, S., Birkholz, H., et Schmann, H. (2003). A procedural model for interactive animation of breaking ocean waves. *Computer Graphics Posters Proceedings*.
- [Kass et Miller 90] Kass, M. et Miller, G. (1990). Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics. *Computer Graphics*, 24(4) :49–57.
- [Liakos 99] Liakos, T. (1999). *Weak imposition of boundary conditions in the Stokes problem*. Mémoire de Thèse, University of Pittsburgh, PA.
- [Lombardo et Puech 95] Lombardo, J. et Puech, C. (1995). Modélisation d'objets déformables avec un système de particules orientées. *Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 10(4) :337–354.
- [Loviscach 03] Loviscach, J. (2003). Complex water effects at interactive frame rates. *Computer Graphics (WSCG)*, 11(1).
- [Mandelbrot 67] Mandelbrot, B. (1967). Some noises with 1/f spectrum, a bridge between direct current and white noise. *IEEE Transactions on Information Theory*, 13 :289–298.
- [Mastin et al. 87] Mastin, G., Watterger, P., et Mareda, J. (1987). Fourier synthesis of ocean scenes. *Computer Graphics*, 14 :16–23.
- [Max 81] Max, N. (1981). Vectorized procedural models for natural terrain : waves and islands in the sunset. *Computer Graphics*, 8 :317–324.
- [Peachey 86] Peachey, D. (1986). Modeling waves and surf. *Computer Graphics*, 20(4) :65–74.
- [Perlin 85] Perlin, K. (1985). An image synthesizer. *Computer Graphics*, 12 :287–296.
- [Pierson et Moskowitz 64] Pierson, W. et Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69 :5181.
- [Premož et Ashikmin 01] Premož, S. et Ashikmin, M. (2001). Rendering natural waters. *Computer Graphics*, 20(4) :189–199.
- [Temam 84] Temam, R. (1984). *Navier-Stokes equations : theory and numerical analysis*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam.
- [Tessendorf 01] Tessendorf, J. (2001). Simulating ocean water. In *SIGGRAPH, Courses Notes*, pages 3–1–3–18, 45–62.
- [Thon et al. 00] Thon, S., Dischler, J., et Ghazanfarpour, D. (2000). Ocean waves synthesis using a spectrum-based turbulence function. In *IEEE-Computer Graphics International (CGI)*, pages 65–74, Suisse. IEEE Computer Society.
- [Ts'o et Barsky 87] Ts'o, P. et Barsky, B. (1987). Modeling and rendering waves : wave-tracing using beta-splines and reflective and refractive texture mapping. *Computer Graphics*, 6(3) :191–214.

Conclusion de la partie I

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 respectant les principes océanographiques basés sur les lois de conservation de la physique.

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 et les déferlements, 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 2.10, page 40.

La bibliographie 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. Si les équations de Navier-Stokes décrivent théoriquement les états de mer, elles ne permettent pas de simuler en temps réel une mer jeune présentant de nombreux déferlements. A partir d'une approche plus phénoménologique, nous avons 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'action, car c'est l'action qui est conservée dans ces mécanismes d'interaction. 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. Les différents phénomènes modélisés par cette expertise physique des états de mer ont été résumés dans le tableau de la figure 3.13, page 65.

Les modèles graphiques pour l'animation interactive de la mer se déclinent principalement en une approche particulaire 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 mécaniques, visuels et sonores associés.

Si la deuxième partie prend du recul par rapport à la mer en étudiant une ergonomie de l'activité de modélisation des phénomènes naturels en général pour leur instrumentation en un système de réalité virtuelle ; la troisième partie sera consacrée à la présentation d'un nouveau type d'animation temps réel et interactif de la mer à partir d'entités autonomes, incluant des groupes de vagues, des déferlements, des vents, des courants, de la bathymétrie et dont les interactions respectent les principes océanographiques.

Deuxième Partie

La méthode de modélisation énactive

Introduction à la partie II

Nous décrivons, dans cette partie, notre approche énactive pour la modélisation dynamique d'un environnement naturel par la médiation de son instrumentation, permettant d'expérimenter le modèle d'environnement, tout au long de sa création, par sa simulation en un système de réalité virtuelle. Cette approche énactive est spécifiée pragmatiquement *en tant que* méthode pour la modélisation des systèmes complexes, où de nombreux phénomènes interagissent de nombreuses façons. Nous ne possédons pas un modèle global d'un environnement naturel, un tel modèle serait trop simplifiant, *a fortiori* lorsque des êtres humains participent activement au modèle, que ce soit au sein de l'environnement virtuel résultant de la simulation d'un modèle ou que ce soit pour la création même du modèle. La complexité d'un tel système nous constraint à une approche locale des phénomènes, afin de garantir l'ouverture nécessaire à la modélisation des systèmes complexes. Chaque individu (les personnes comme toute autre entité vivante) ne connaît qu'une portion de l'ensemble des connaissances ; c'est la cohabitation des individus, apportant chacun ses connaissances locales, qui fait du monde ce qu'il est dans sa globalité. Ainsi, en est-il dans un système de réalité virtuelle où les entités en interaction sont des individus, des machines informatiques et des modèles simulés par ces machines.

Cette partie s'articule autour de trois chapitres : les **concepts** qui orientent notre approche et fondent l'*hypothèse énactive*, la **formalisation** pragmatique d'un modèle énactif caractérisant une méthode de modélisation d'un système complexe ; son **instrumentation** en un système de réalité virtuelle aide alors le modélisateur dans sa tâche, en faisant vivre ces modèles.

La modélisation d'une animation phénoménologique est une activité humaine. En tant que telle, la modélisation est forcément attachée à des intentions de la part du modélisateur et l'on ne peut faire l'impasse sur une étude psychologique de l'inscription de l'homme dans son environnement pour établir les fondements des causes finales du modèle. En nous plaçant dans le cadre de l'ergonomie cognitive, l'animation d'un environnement naturel en réalité virtuelle ne peut être pensée indépendamment des acteurs qui vont y interagir et dont les actions se basent sur les *affordances* présentées par le modèle d'environnement : une *affordance* étant définie comme une interaction entre l'environnement et l'individu. L'analyse de la modélisation des systèmes complexes sous l'éclairage de la psychologie écologique, nous conduit à formuler l'*hypothèse énactive*, basée sur les principes d'autonomie, d'enaction et de clôture sous causalité efficiente pour la conception interactive d'un système multi-modèles *via* son instrumentation en un système de réalité virtuelle (chapitre 5).

L'*hypothèse énactive* conceptuellement présentée au chapitre précédent est alors formalisée pour les modèles intervenant dans le résultat de la modélisation selon cette hypothèse, toujours dans le but pragmatique d'une instrumentation en un système de réalité virtuelle. Cette formalisation de la notion d'entité autonome virtuelle est pragmatique dans le sens où elle fournit une méthode pour la modélisation des systèmes complexes que nous appelons la *modélisation énactive*. Selon cette méthode, les modèles des phénomènes naturels sont autonomisés en des entités autonomes interagissant *via* un milieu qu'elles structurent et façonnent elles-mêmes. Cela correspond à une généralisation de la notion de *perception-active* pour les entités autonomes faisant vivre les modèles des phénomènes choisis dans l'environnement naturel (chapitre 6).

L'instrumentation pour la simulation d'une organisation énactive d'entités autonomes doit contraindre le programmeur à respecter le modèle formel par la médiation d'un langage dont l'ergonomie facilite la construction de telles entités. Aussi, faire vivre les entités en énaction demande d'une part, de simuler leur autonomie temporelle, d'autre part, de résoudre les problèmes topologiques de leurs interactions (chapitre 7).

Les publications [Parenthoën et al. 04c] et [Tisseau et al. 04b] correspondent à un aperçu de la notion de *modélisation énactive* pour les groupes de travail sur le rendu et la visualisation (GT-rendu'04), respectivement sur l'animation et la simulation (GTAS'04).

Chapitre 5

Fondements conceptuels

Il faudra dissiper deux illusions qui détournent les esprits du problème de la pensée complexe. La première est de croire que la complexité conduit à l'élimination de la simplicité. La complexité apparaît certes là où la pensée simplifiante défaillit, mais elle intègre en elle tout ce qui met de l'ordre, de la clarté, de la distinction, de la précision dans la connaissance. Alors que la pensée simplifiante désintègre la complexité du réel, la pensée complexe intègre le plus possible les modes simplifiants de penser, mais refuse les conséquences mutilantes, réductrices, unidimensionnalisantes et finalement aveuglantes d'une simplification qui se prend pour le reflet de ce qu'il y a de réel dans la réalité. La seconde illusion est de confondre complexité et complétude. Certes, l'ambition de la pensée complexe est de rendre compte des articulations entre des domaines disciplinaires qui sont brisés par la pensée disjonctive (qui est un des aspects majeurs de la pensée simplifiante) ; celle-ci isole ce qu'elle sépare, et occulte tout ce qui relie, interagit, interfère. Dans ce sens la pensée complexe aspire à la connaissance multidimensionnelle. Mais elle sait au départ que la connaissance complète est impossible : un des axiomes de la complexité est l'impossibilité, même en théorie, d'une omniscience [Morin 90].

Edgar Morin, *Introduction à la pensée complexe*

5.1 Introduction

Nous étudions dans ce chapitre, les concepts qui guident notre approche de la modélisation d'un environnement naturel en vue de son instrumentation en un système de réalité virtuelle. La modélisation d'une animation phénoménologique est une activité humaine. En tant que telle, la modélisation est forcément attachée à des intentions de la part du modélisateur et l'on ne peut faire l'impasse sur une étude psychologique de l'inscription de l'homme dans son environnement pour établir les fondements des causes finales du modèle.

Nous ne possédons pas un modèle global d'un environnement naturel, un tel modèle serait trop simplifiant, *a fortiori* lorsque des êtres humains participent activement au modèle, que ce soit au sein de l'environnement virtuel résultant de la simulation d'un modèle ou que ce soit pour la création même du modèle. La complexité d'un tel système nous contraint à une approche locale des phénomènes, afin de garantir l'ouverture nécessaire à la modélisation des systèmes complexes telle qu'elle est évoquée par Edgar Morin dans la citation placée en exergue de ce chapitre. Chaque individu (les personnes comme toute autre entité vivante) ne connaît qu'une portion de l'ensemble des connaissances [Maturana 87] ; c'est la cohabitation des individus, apportant chacun ses connaissances locales, qui fait du monde ce qu'il est dans sa globalité.

Ainsi, en est-il dans un système de réalité virtuelle où les entités en interaction sont des individus, des machines informatiques et des modèles simulés par ces machines.

« *Les univers virtuels, bien que de plus en plus réalistes, manqueront de crédibilité tant qu'ils ne seront pas peuplés d'entités autonomes* » [Tisseur et Harrouet 03].

Dans ce cadre, nous localisons la connaissance des phénomènes constitutifs de l'environnement naturel

au niveau d'entités autonomes en interaction.

Nous proposons une approche de la modélisation des phénomènes naturels inspirée de la notion d'enaction introduite en biologie par Maturana et Varela [Maturana et Varela 80]. Elle repose sur l'autonomisation des modèles générant un couplage structurel des modèles autonomes avec le monde qu'ils créent et façonnent par leurs propres activités : ce que nous appelons l'*hypothèse énactive*. Notre choix conceptuel consiste à considérer que l'univers virtuel n'existe que par les entités autonomes qui le peuplent : ce sont elles qui structurent la géométrie de l'espace-temps et qui créent les points en lesquels il se passe quelque-chose. Cette approche locale est articulée autour de trois principes : l'autonomie des entités constitutives de l'environnement dont l'opérateur humain, l'enaction permettant aux entités de construire le monde dans lequel elles interagissent, la causalité circulaire réalisant la clôture opérationnelle du système participatif de réalité virtuelle. La démarche scientifique mise en œuvre par le modélisateur peut alors être vue par la même approche conceptuelle.

Dans la prochaine section, nous présentons les fondements humains de nos intuitions sur la modélisation d'un environnement naturel ; ils proviennent de la branche écologique de la psychologie expérimentale, qui propose une internalisation de l'environnement définie à partir de l'interaction d'un individu avec son environnement (section 5.2). Nous introduisons ensuite les principes d'autonomisation, d'enaction et de clôture sous causalité efficiente (ou principe de participation) qui fondent notre approche de la modélisation d'un environnement naturel comme un système complexe énactif (section 5.3). Nous décrivons alors les finalités de l'hypothèse énactive pour la création interactive d'un modèle d'animation phénoménologique instrumenté en un système de réalité virtuelle où l'être humain est au même niveau conceptuel que les phénomènes modélisés (section 5.4). Enfin, nous concluons cette présentation des fondements conceptuels de notre approche dans la section 5.5.

5.2 Psychologie écologique

La psychologie écologique, ou l'*ergonomie cognitive*, s'inscrit dans le champ des sciences cognitives [Gardner 85] et bénéficie des interactions entre leurs disciplines : en particulier l'informatique, l'intelligence artificielle, l'automatique et la linguistique. Les recherches de cette branche de la psychologie étudient le sujet humain (qui perçoit, parle, pense, apprend, a des émotions...) qui réalise des tâches dans une situation de travail et qui utilise des outils pour réaliser ces tâches. Ces recherches ont pour but d'utiliser cette connaissance particulière du sujet humain pour améliorer la situation ou l'outil de travail [Tricot et al. 03].

L'approche écologique en psychologie [Gibson 79] propose d'observer ce sur quoi s'appuie et émerge l'adaptation d'un être vivant en analysant l'interaction entre l'individu et son environnement, avant de formuler des modèles scientifiques (donc hypothétiques) sur comment l'information est intégrée par l'individu [Vicente et Wang 98]. En cela, elle s'inspire du courant phénoménologique de la philosophie, qui remet en cause le dualisme cartésien classique d'un esprit conceptuel dirigeant le corps : *cogito ergo sum*. Le phénoménologiste français Maurice Merleau-Ponty a fortement rejeté le cartésianisme et l'idéalisme et a radicalement ré-interprété le *cogito ergo sum* de Descartes pour mieux pouvoir expliquer le caractère non-conceptuel ou intuitionnel de nos rencontres avec le monde et les autres personnes. Il favorisait plutôt un *cogito tactile* ou *préréflexif* : la connexion de la pensée conceptuelle et du monde n'est pas effectuée par la déduction, comme disait ceux de la tradition classique, mais plutôt par l'expérience perceptive. Son *milieu perceptif* exprimait une relation perceptive originelle au monde qui est présupposée à toute construction scientifique [Merleau-Ponty 45].

La psychologie écologique considère en effet qu'un individu perçoit directement des invariants dans l'environnement, dits *affordances*, qui vont guider son activité sans nécessiter de traitements symboliques [Gibson 58]. Ces invariants, propres à chaque individu, sont des combinaisons stables de plusieurs propriétés élémentaires provenant de l'environnement ambiant et de l'individu couplé à cet environnement par l'histoire de leurs interactions. Aussi, la perception de ces invariants est une action de la part de l'individu dite *perception active*, plaçant ainsi la perception et l'action au centre de la boucle de coordination sensorimotrice, plutôt qu'à ses extrémités [Dewey 1896].

On peut distinguer deux courants conceptuels en psychologie écologique : les courants de la

perception directe (section 5.2.1) et celui de la *perception active* (section 5.2.2). Dans chaque cas, nous présentons rapidement les applications de ces concepts à la modélisation d'entités autonomes. Nous examinons alors, notre problème de la modélisation d'un environnement naturel, sous cet éclairage écologique (section 5.2.3).

5.2.1 Perception directe des affordances

Initialisé par les travaux de James J. Gibson, le courant *perception directe* de l'approche écologique prône que les sens repèrent directement dans l'environnement les informations nécessaires à la survie. L'information est disponible dans le monde et il suffit de la saisir [Gibson 79].

L'individu ne perçoit pas son environnement ambiant comme un ensemble de variables physiques exprimées scientifiquement comme par exemple des ondes acoustiques, lumineuses ou vibratoires, venant stimuler des capteurs auditifs, visuels ou tactiles. Ces propriétés physiques n'ont en elles-mêmes pas de signification pour l'adaptation de l'individu [Gibson 77]. Au contraire, tout individu perçoit des caractéristiques d'ordre plus élevé, des invariants dans l'environnement qui lui permettent d'estimer des transformations engendrées par l'environnement ou par le comportement de l'individu. Ces invariants sont des propriétés d'ordre supérieur dans le sens où il s'agit d'une combinaison stable de plusieurs propriétés élémentaires provenant de l'environnement ambiant et de l'individu. Il n'est pas nécessaire d'avoir des schémas d'interprétation demandant de réaliser des inférences sur des représentations symboliques [Gibson 58]. Une réinterprétation récente d'expériences basées sur des comportements résultant d'occultation sensorielle partielle, prouvent que la spécification dans la zone globale (perception directe [Stoffregen et Bardy 01]) est plus pertinente que la classique séparation des sens (théorie basée sur des inférences [Pylyshyn 99]) pour expliquer les comportements observés.

En niant la nécessité des représentations, les Gibsoniens s'opposaient radicalement à l'idéalisme et au cartésianisme dominant les sciences cognitives des années 70. L'approche représentationaliste considère, en effet, qu'il n'y a pas suffisamment d'informations dans les stimuli sensoriels et que des mécanismes d'inférences sont nécessaires pour réaliser la perception [Marr 79] : un principe empirique d'émergence (*bottom-up*) permet de construire des formes complexes à partir de parties élémentaires, tandis qu'un principe inverse (*top-down*) permet de reconnaître les formes globales par la médiation des connaissances *a priori* ou des croyances.

On retrouve l'opposition épistémologique classique en sciences cognitives : les dualismes cartésien [Fodor 75] ou épiphénoménologique [McCulloch 65] considèrent le rapport au monde d'un individu comme représentable indépendamment de l'individu et de son environnement, alors que la phénoménologie refuse l'idée d'une représentation indépendante de l'interaction de l'individu avec son environnement.

L'approche écologique cherche ainsi, à découvrir les *lois naturelles* permettant de rendre compte de l'appréhension de l'environnement par un organisme et de la façon dont celui-ci contrôle son activité par rapport à cet environnement [Turvey et al. 81]. Cette recherche privilégie les *lois naturelles* des relations organisme-environnement, plus que les *lois cognitives* qui agissent sur des représentations mentales [Shaw 03].

Chez l'être humain, il a pu être montré expérimentalement, par exemple, qu'un individu pouvait estimer à la seule vue d'un passage étroit, s'il pouvait ou non le traverser sans tourner les épaules [Warren et Whang 87]. Aussi, on a montré que, pour estimer le moment de contact avec un obstacle, l'animal va se fonder sur un *invariant qui définit le temps avant collision comme une valeur inversement proportionnelle à la vitesse de dilatation de l'image de l'obstacle sur la rétine de l'animal* [Andersen et al. 99]. Selon que cette relation invariante entre l'obstacle et la perception de l'animal génère un *obstacle franchissable ou non (affordance)*, l'animal sautera ou contournera l'obstacle, et cela sans engager un traitement symbolique de prise de décision, mais sur la base d'une perception directe du caractère franchissable ou non de l'obstacle.

Ainsi, la conception d'une situation de travail ou d'un outil passe par la spécification des *affordances* — en tant qu'éléments ayant une capacité suggestive directe d'action — qui vont structurer le comportement de l'opérateur [Lahliou 00, Lenay et Sebbah 01] et augmenter ainsi l'efficacité du travail [Christoffersen et al. 98]. Concevoir un ensemble structuré de telles *affordances*, c'est concevoir

une interface écologique. En réalité virtuelle, par exemple dans le projet *Jack* [Badler et al. 93], un acteur virtuel montre les *affordances* dans un poste de travail, en interaction avec un utilisateur du système de réalité virtuelle. La théorie des *affordances* est également utilisée pour concevoir des interfaces homme-machine multi-modales [Albrechtsen et al. 01] ou immersives [Tyndiuk et al. 03].

Applications à la modélisation d'entités autonomes

Ce concept d'*affordance*, comme perception directe de l'environnement, est utilisé en réalité virtuelle pour la modélisation du comportement décisionnel d'acteurs virtuels autonomes et perceptifs [Cornwell et al. 03] lors de la sélection de l'action [Cooper et Shallice 00], soit sous la forme d'un marquage des objets de l'environnement spécifiques à chaque acteur et l'on parle d'*environnements informés* [Thomas et Donikian 00, Devillers et al. 02, Doyle 02] ou de « *smart environments* » [Doyle et Hayes-Roth 97], soit comme des concepts sensorimoteurs d'un graphe cognitif flou résultant d'une expertise de l'activité considérée [Parenthoën et al. 02b]. Dans le cadre du théâtre virtuel [Hayes-Roth et Van Gent 96], à la suite du projet *Oz* [Bates 92], une expertise des *affordances* du metteur en scène de théâtre est à base de l'ordonnanceur des unités d'actions (*Facade* [Mateas 02]). L'utilisation des *affordances* (perception directe) est aussi appliquée en robotique pour la conception et l'implémentation d'un mécanisme de sélection de l'action [Andronache et Scheutz 02].

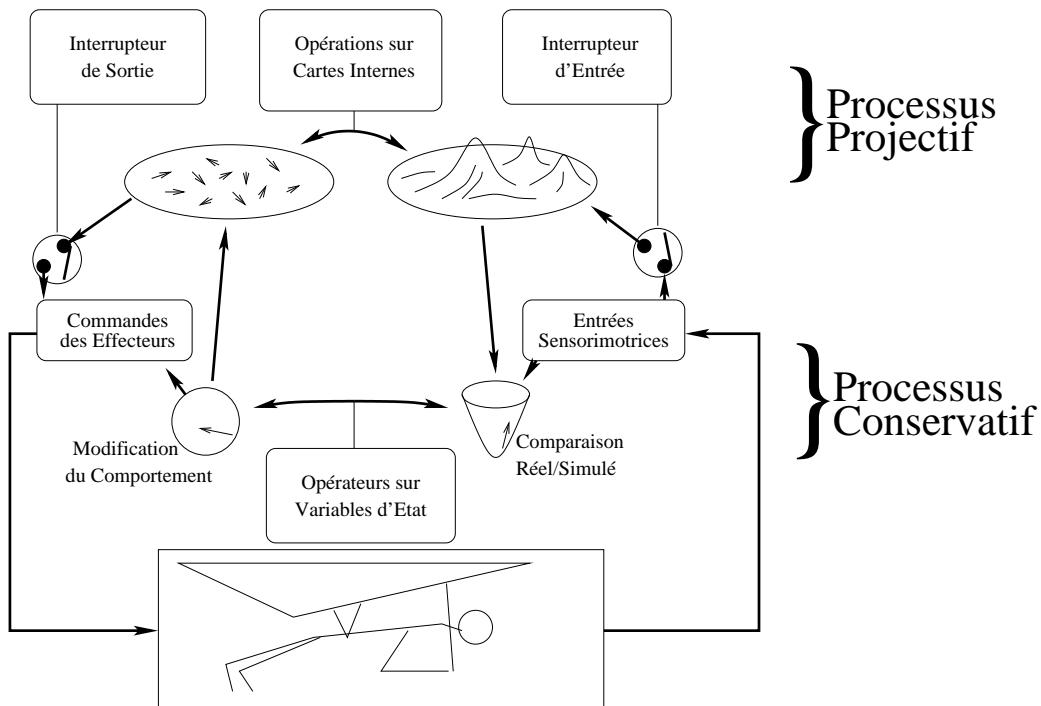
5.2.2 Perception active

En psychologie, plutôt que de considérer la perception et l'action comme deux éléments distincts placés aux extrémités d'une boucle de coordination [Fechner 1860], les stimuli et les réponses peuvent être placés au centre de la boucle de coordination en un concept couplé, définissant la réalité d'une expérience relativement aux intentions et aux possibilités d'action de l'acteur [Dewey 1896]. Cette boucle sensorimotrice, prise comme une entité physiologiquement indissociable, explique la forte inscription de l'individu dans son environnement [Bernstein 67]. Les contraintes posées par cette boucle peuvent servir de base pour expliquer le fonctionnement de mécanismes supérieurs s'inscrivant dans l'espace représentatif, permettant à un individu d'imaginer le monde réel à partir de la simulation de perceptions et d'actions [Craik 43]. Ainsi, voir un verre d'eau lorsqu'on a soif, c'est déjà simuler les mouvements qu'il faut réaliser pour le boire.

La sensation du mouvement correspond ainsi à une fusion multi-capteurs de différentes informations sensorielles. Mais ces informations multisensorielles sont elles-mêmes combinées à des signaux en provenance du cerveau qui contrôle la commande motrice des muscles [Paillard 86]. Selon Alain Berthoz, neurophysiologiste, la perception n'est pas seulement une interprétation des messages sensoriels : elle est également simulation interne de l'action et anticipation des conséquences de cette action simulée [Berthoz 97]. C'est le cas du pilote d'un deltaplane qui s'envole (figure 5.1) : le pilote déroule mentalement, de façon prédictive, l'envol en même temps qu'il s'envole et vérifie de temps en temps, par intermittence, l'état de certains de ses capteurs.

Cette capacité de simulation interne du mouvement a des fondements neurophysiologiques aujourd'hui bien établis. Un individu imagine ces prédictions non pas, par un raisonnement logique sur des symboles abstraits, représentants du monde réel, mais par une simulation biologique où, grâce à des mécanismes inhibiteurs, *tout se passe comme si* l'individu agissait réellement [Berthoz 97]. Par exemple, pour la vision, le cerveau dispose d'une possibilité d'imaginer des déplacements du regard sans les exécuter grâce à l'action de neurones inhibiteurs qui ferment le circuit de commande des muscles oculaires : en fixant un point devant soi, et en déplaçant son attention, sorte de *regard intérieur*, on a effectivement la sensation d'un déplacement du regard d'un point à l'autre de la pièce. Ce déplacement virtuel du regard a été simulé par le cerveau en activant les mêmes neurones, seule l'action des neurones moteurs a été inhibée.

L'anticipation du mouvement est bien illustrée par l'illusion de Kohnstamm, du nom du physiologiste qui a étudié pour la première fois ce phénomène. Lorsqu'on maintient en équilibre un plateau chargé d'une bouteille, le cerveau s'adapte à cette situation dans laquelle l'immobilité du bras est obtenue grâce à un effort musculaire constant. Si on enlève soudainement la bouteille, le plateau se soulève *tout seul*. En fait, le cerveau continue à appliquer cette force jusqu'au moment où les capteurs des muscles signalent un mouvement d'élévation. Si le porteur enlève lui-même la bouteille, le plateau



Lors d'une action, le cerveau utilise neurophysiologiquement deux modes en parallèle. L'un prédictif ou projectif simule le mouvement sans l'exécuter pour en prédire ses conséquences, choisir la meilleure stratégie et sélectionner épisodiquement certaines variables sensorimotrices. L'autre réactif ou conservatif fonctionne en continu comme un système asservi, utilise des primitives motrices et maintient les variables sélectionnées dans des bornes définies par les intentions d'action. Le cerveau perdrat trop de temps à vérifier en permanence l'état de tous les capteurs.

FIGURE 5.1 : Les deux modalités de contrôle du mouvement par le cerveau [Droulez et Berthoz 88]

ne bouge pas : le cerveau a anticipé et a provoqué un relâchement musculaire adapté à la variation du poids du plateau.

Ces processus de synchronisation neurophysiologique entre l'anticipation et la réalisation effective du mouvement ont été largement étudiés et mettent en cause l'hippocampe comme lieu privilégié de la synchronisation [Buzsaki et al. 92] ; ce processus serait à la base d'un mécanisme neurophysiologique d'apprentissage [Lisman et Idiart 95], qui trouverait ses origines dans une oscillation de la concentration d'un neuromédiateur synaptique au niveau de neurones impliqués dans le contrôle de la synchronisation, ce neuromédiateur inhibant l'apprentissage au fur et à mesure que le temps passe après la synchronisation des informations sensorielles avec l'anticipation d'action [Kesner et Rolls 01].

Le principe de *perception active* résume la manière dont la perception et l'action sont intimement liés en une même entité [Paillard 90]. Le cerveau peut ainsi être considéré comme un simulateur biologique qui prédit en utilisant sa mémoire et en faisant des hypothèses sur le modèle interne du phénomène.

Dans cette optique, les *affordances* constituent des contraintes directes sur le système moteur, plus que des éléments propres à la perception [Brunia 99]. L'espace des affordances fournit ainsi un cadre pour penser l'action et les contraintes qui déterminent ce qui peut et ce qui doit être fait [Flach et Holden 98]. Si l'affordance permet d'anticiper un comportement, la véritable information est dans le feed-back de l'action effective, comme une sorte de réponse à une question qui est posée à l'environnement par le système moteur durant son activité.

Dans certains contextes, comme celui d'une exploration d'un environnement aux propriétés nouvelles, un individu adulte peut se laisser guider par les *affordances* directement perceptibles sans extraire la structure conceptuelle du problème pourtant résolvable par des enfants, dès l'âge de 7 ans [Morineau 00], tandis que dans d'autres contextes (environnement naturel), cette structure est extraite sans difficulté. Ceci met en relief le fait que l'*affordance* est avant tout un support apportant plus ou moins de degrés de liberté au champ d'action d'un individu. L'information véritablement signifiante pour l'individu relève des rétroactions générées par l'action sur ce support.

Ainsi, la création d'une nouvelle interface écologique relève, non pas d'informations présentées de manière ergonomique, mais de l'affichage d'un champ d'action plus ou moins riche à la disposition de l'utilisateur et renvoyant des feed-back adaptés aux buts de l'utilisateur [Morineau et Parenthoën 03].

Applications à la modélisation d'entités autonomes

Cette notion d'*affordance* a alors pris une place importante dans le domaine de la robotique [Duchon et Warren 94]. La modélisation de la perception est décrite en termes de schémas orientés action [Arbib 72] et l'architecture à inhibitions est présentée comme une solution au problème de la robotique temps-réel [Brooks 91]. Aujourd'hui, de petits robots évitent des obstacles et poursuivent des cibles en mouvement selon un modèle écologique du flux optique [Duchon et al. 98]. L'état de l'environnement, comme précondition nécessaire à une procédure, est explicité en termes d'*affordances* [StAmant 99]. Un principe de simulation dans la simulation a été implémenté chez des acteur virtuels autonomes, prenant leurs décisions selon des simulation internes de leur propre modèle de comportement, dans le cas d'un chien de berger [Maffre et al. 01] et d'un barreur virtuel [Parenthoën et al. 02c] ; ce principe est à la base d'un mécanisme d'apprentissage par imitation chez ces acteurs virtuels autonomes [Parenthoën et al. 02a]. On retrouve aussi une certaine notion d'*affordance* — limitée à la seule perception du flux optique pour modéliser un comportement [Widyanto et al. 91] — dans les cartes de saillances étudiées en neuro-cognition [Ballaz et al. 01], et utilisées en robotique [Machrouh et al. 01] ou pour la modélisation d'acteurs virtuels [Courty et al. 03]. Certains auteurs, dont le but est la création d'une cognition artificielle au sein de robots ou d'acteurs virtuels autonomes, proposent que le principe d'anticipation — *perception-active* — soit la base nécessaire à d'autres processus cognitifs comme l'attention, la préparation, l'intention, la motivation et les émotions [Butz et Hoffmann 03].

5.2.3 Principes écologiques de la modélisation

L'animation d'un environnement naturel en réalité virtuelle ne peut être pensée indépendamment des utilisateurs qui vont y interagir [Mestre 02]. Il convient alors de concevoir le modèle d'animation en fonction des phénomènes que l'on veut pouvoir observer [Cozot 96]. Le cadre de la psychologie écologique propose de tenir compte d'un modèle de perception humaine pour spécifier les phénomènes qui doivent être modélisés dans un système de réalité virtuelle pour rendre compte de l'expérience humaine d'un environnement naturel. Typiquement, l'être humain observe certains phénomènes à partir desquels il détermine ses actions : les *affordances*. Ces éléments psychologiques servent alors de causalité finale vis à vis de notre modèle d'environnement et initialisent la méthode de construction du modèle en déterminant les phénomènes qui doivent être présentés pour réaliser l'immersion de l'homme dans l'environnement.

Les *affordances* modélisées dans un environnement virtuel peuvent se concevoir sur une étude écologique d'un acteur dans son environnement naturel, afin de lui offrir en environnement virtuel un champ d'action renvoyant des feed-back adaptés aux buts fixés par les causes finales du système de réalité virtuelle, comme, par exemple, la réalisation d'un environnement virtuel de formation, ou la simulation d'un problème d'ingénierie pour dimensionner une structure mise à mal par des phénomènes naturels, ou encore la modélisation de phénomènes naturels.

- Dans le premier cas les *affordances* sont celles du formateur dans son environnement naturel et il devient créateur d'environnement virtuel en organisant les modèles des phénomènes caractéristiques de ces *affordances* dans le système de réalité virtuelle pour mettre l'élève en situation d'apprentissage de stratégies d'actions liées au contexte caractérisé par cette organisation d'*affordances*.
- Dans le deuxième cas, les *affordances* sont celles d'un expert caractérisant les phénomènes naturels importants pour la structure étudiée ; l'ingénieur utilise l'environnement virtuel pour générer la simulation de situations critiques caractérisées par une certaine organisation de ces phénomènes afin d'étudier les efforts s'exerçant sur la structure virtuelle et en déduire un dimensionnement.
- Dans le troisième cas, les *affordances* sont les intuitions du modélisateur sur une représentation du phénomène naturel par un modèle, et le modélisateur utilise le système de réalité virtuelle pour réaliser des vérifications expérimentales sur ses propres intuitions.

Le comportement de l'utilisateur paraît alors étroitement liée à la structure de l'espace et du temps dans lesquel il est immergé [Colby et al. 96]. Cependant, la plus grande partie des modèles développés pour l'animation des phénomènes naturels font l'hypothèse d'un espace-temps cartésien absolu où les éléments sont gouvernés par des systèmes d'équations différentielles et se basent sur un maillage *a priori* de cet espace sur lequel ces équations doivent être résolues par diverses méthodes numériques approchées [Guilbaud 02]. Ces méthodes numériques classiques atteignent aujourd'hui leurs limites, lorsqu'il est question de simuler un système complexe multi-modèles et multi-échelles.

Pourtant, le point de vue en physique théorique a beaucoup évolué depuis près d'un siècle. En effet, la représentation classique associée à la causalité physique est fondamentalement asymétrique : une cause originelle produit un effet consécutif [Bailly et Longo 04a]. L'expression : $F = ma$, considère la force F comme cause originelle de l'accélération a du corps de masse m . Dès la théorie de la relativité, cette représentation est remise en cause au profit d'une représentation plus interactive entre la géométrie d'un espace-temps et la distribution d'énergie-impulsion qui se déterminent l'une l'autre :

« les causes deviennent des interactions et ces interactions elles-mêmes constituent le tissu de l'univers [...] : qu'on déforme ce tissu et les interactions semblent se modifier, qu'on intervienne sur les interactions et c'est le tissu qui se déforme » [Bailly 03].

En physique moderne, par exemple, la structure de l'espace suit deux principes fondamentaux [Smolin 04] :

1. « *La géométrie de l'espace-temps n'est pas fixe ; il s'agit, au contraire, d'une quantité dynamique en perpétuelle évolution.* »
2. « *Un point de l'espace-temps n'est défini que par les événements qui s'y déroulent.* »

Le statut même du modèle a changé depuis que la physique aborde des phénomènes déroutants pour notre rapport usuel à l'espace : le modèle n'est pas le phénomène [Bohr 22] ; il n'est qu'une vue de l'esprit s'appuyant forcément sur des principes traduisant nos choix philosophiques de notre relation au monde. Si la physique en arrive à ces hypothèses, c'est que la place de l'homme dans l'univers a été fortement reconsidérée, et ce, tout au long du XX^{e} siècle. Ces changements conceptuels sont notamment révélés à travers l'émergence des sciences cognitives [Gardner 85], avec pour conséquences une modification de la culture scientifique ambiante. Cependant cette dernière reste très entachée du dualisme cartésien classique et il n'est pas d'usage dans la communauté scientifique, surtout celle des sciences dites "dures", d'indiquer les processus cognitifs permettant la génèse d'un nouveau point de vue, voire d'une théorie. Ce n'est que très récemment, par exemple, que ce problème est abordé en tant que tel par les mathématiques en analysant la géométrie comme résultant d'une activité cognitive humaine [Longo 97, Bailly et Longo 04b], et non pas comme la découverte d'un univers idéal préexistant.

En ce qui concerne la simulation des phénomènes physiques dans un environnement naturel, nous pensons qu'il n'est pas nécessaire de passer par des volumes et des pas de temps infinitésimaux pour respecter les lois de conservation. Prenons le cas de la mer du point de vue des océanographes. Les océanographes distinguent des phénomènes comme, par exemple, des groupes de vagues ou des déferlements. Ces phénomènes sont des *affordances* pour les océanographes au sens où leur étude guide l'action scientifique de l'océanographe qui cherche à définir des modèles de ces phénomènes, en accord avec les résultats expérimentaux. La plupart des simulations numériques de ces phénomènes passent par une résolution des équations de Navier-Stokes (équation 3.11, page 43), or l'étude des déferlements par ces méthodes numériques demande des grilles si fines et des pas de temps si courts pour correctement évaluer les bilans physiques caractérisés par ces équations que la simulation d'un unique déferlement demande plus d'une semaine sur de gros calculateurs [Lubin et al. 03]. Pour simuler un plan d'eau à l'échelle de plusieurs kilomètres carrés présentant de nombreux déferlements, les bilans sont irréalisables par l'approche différentielle de Navier-Stokes, mais, si l'on revient au niveau des *affordances* des océanographes, les bilans peuvent être fait, par exemple, sur des groupes de vagues de plusieurs centaines de mètres d'envergure ou sur des déferlements dont les fronts actifs font plusieurs mètres de longueur. Ce qui est important, c'est de pouvoir effectuer ces bilans simultanément à toutes ces échelles, dans la même simulation. Le support matériel informatique est le même pour les deux approches et le nombre de calculs réalisables est identique, mais en proposant une instrumentation

informatique permettant de simuler directement les modèles des *affordances* océanographiques plutôt que des volumes élémentaires, la simulation pourrait couvrir une surface d'intérêt pragmatique pour les océanographes, où jusqu'à aujourd'hui, les phénomènes n'ont été étudiés, la plupart du temps, que par une approche statistique.

Ainsi, la simulation comme outil de travail pour l'océanographe éclairé par la psychologie écologique, caractérise les phénomènes naturels étudiés par le domaine de l'océanographie comme les *affordances*, et il reste à concevoir une ergonomie facilitant l'utilisation de l'ordinateur pour la simulation des modèles océanographiques de ces *affordances*. Il n'est absolument pas question de nier l'intérêt de l'approche numérique classique, dont les *affordances* sont les équations de Naviers-Stokes, mais plutôt d'offrir un point de vue plus marin sur la simulation de la mer en ayant explicitement choisi des *affordances* communes aux marins (figure 2.10) et aux océanographes (figure 3.13).

Plus généralement, la notion de représentation mentale ou de mémoire sémantique, prend dans l'approche écologique un enracinement dans les capacités élémentaires d'adaptation par l'action d'un individu : une représentation mentale traduit la notion « rendre présent par l'action » [Havelange et al. 02]. Les connaissances profondes, par exemple selon lesquelles un individu comprend le langage, ne sont pas descriptives et abstraites à la base et construites à partir d'une analyse lexicale de relations arbitraires entre signifiant et signifié (sémantique lexical) ou bien à partir d'une analyse de l'articulation des signifiants entre eux (sémantique grammaticale). Ces connaissances sont plutôt fondées sur une évocation des propriétés des objets dont un individu peut faire l'expérience [Morineau 04]. Le système de réalité virtuelle peut être considéré comme un outil pour la modélisation, et les phénomènes naturels étudiés seront les *affordances* du travail du modélisateur. Le système de réalité virtuelle permet alors d'expérimenter les modèles de ces phénomènes. Une instrumentation écologique du système de réalité virtuelle doit donc pouvoir afficher un champ d'action le plus riche et le plus ouvert possible à la disposition de l'utilisateur du système, qu'il soit observateur des modèles, acteur parmi les modèles ou créateur des modèles et renvoyant des feed-back adaptés aux buts de l'utilisateur. Dans le cas de la modélisation, le but de l'instrumentation écologique est de réaliser une interface pour la simulation d'un système multi-modèles, qui auront été pensés comme pouvant prédire un résultat expérimental.

En conclusion de cette présentation de la psychologie écologique pour l'animation phénoménologique, notre intuition pour l'instrumentation écologique d'un système de réalité virtuelle consiste à considérer une collection de modèles multi-échelles comme notre *affordance* pour la simulation de la modélisation d'un environnement naturel. Pour cela, nous proposons de modéliser un environnement naturel, comme un *système complexe enactif* incluant l'homme dans la boucle, l'homme étant considéré au même niveau conceptuel que les entités qui réalisent l'environnement. Ainsi, l'environnement naturel est considéré comme une collection de phénomènes en interaction, modélisés *en tant qu'entités autonomes* [Varela 79].

1. La présentation des *affordances* [Gibson 79], vues comme des interactions entre l'environnement et ses acteurs, va structurer la topologie de l'espace-temps et la sémantique associée. Elle définit la nature des entités autonomes qui vont construire le monde.
2. Les interactions entre ces entités sont basées sur un principe de *perception active* [Berthoz 97], principe selon lequel les entités autonomes ont une démarche active dans la perception de leur environnement ; ce sont ces actes de perception qui vont créer les points de la topologie où des interactions peuvent avoir lieu.

Ces deux principes, en relation de simple analogie conceptuelle avec les deux hypothèses de la physique moderne préalablement exposés, vont nous servir de fil conducteur pour l'animation phénoménologique en réalité virtuelle d'un environnement naturel *en tant que* système complexe enactif.

5.3 Système complexe énactif

L'organisation d'un environnement naturel est complexe. Un système est dit complexe si : « *un grand nombre d'entités indépendantes interagissent de nombreuses façons* » [Waldrop 92].

On peut distinguer deux types de complexité : la complexité locale et la complexité globale [Bailly et Longo 03].

1. La complexité **locale** est celle de la description de l'organisation d'un système en terme de relations internes définissant localement le système. Cela peut comprendre sa structure topologique organisée en superposition et réseaux de topologies, ses particularités (paramètres et équations à vérifier), la nature de ses processus dynamiques, ou les structures de ses relations avec l'environnement pouvant dépendre de paramètres internes.
2. La complexité **globale** est celle de la description du comportement résultant de la dynamique globale d'un système. Cela peut être par exemple le graphe représentatif d'un processus, la classification selon le contexte, les fonctions physiologiques et relationnelles, ou la modélisation mathématique des invariants principaux.

Nous devons alors déterminer un modèle dont la complexité locale est la plus simple possible, tout en présentant une complexité globale s'approchant de celle du système naturel modélisé.

Les sciences abordent généralement les systèmes complexes en modélisant chaque phénomène séparément puis en superposant les différents modèles en une organisation multi-modèles, *comme si* chaque phénomène modélisé était indépendant des autres. Nous proposons d'utiliser le *principe d'autonomie* (section 5.3.1) pour faire cohabiter ces différents modèles selon le *principe d'énaction* (section 5.3.2) en une organisation dont la complexité locale soit la plus simple possible. Nous verrons ensuite comment le *principe de causalité circulaire* (section 5.3.3) peut permettre de modéliser cette organisation en fonction des rôles respectifs de chaque type de phénomène. Enfin, nous récapitulons nos hypothèses conceptuelles où l'animation phénoménologique en réalité virtuelle est modélisée comme un système complexe énactif (section 5.4).

5.3.1 Principe d'autonomisation

L'autonomisation d'un modèle consiste à le doter de moyens de perception et d'action au sein de son environnement, ainsi que d'un module de décision lui permettant d'adapter ses réactions aux stimuli tant externes qu'internes. En ce qui concerne la modélisation des phénomènes naturels, autonomiser le modèle en lui donnant des capacités de perception et d'adaptation ne demande pas de considérer le phénomène réel comme ayant ces capacités. Le phénomène réel est naturellement inscrit dans un monde physique alors qu'en réalité virtuelle, il faut reconstituer virtuellement cette inscription physique naturelle. Trois éléments de réflexion nous guident dans l'autonomisation des modèles : l'autonomie par essence, par nécessité et par ignorance [Tisseau et Harrouet 03].

L'autonomie par essence caractérise les organismes vivants, de la cellule à l'homme [Varela 79]. Les avatars ne sont pas les seuls modèles à percevoir et à agir dans leurs environnements numériques : tout modèle censé représenter un être vivant doit impérativement être doté d'une telle interface sensorimotrice. La notion d'animat, par exemple, concerne les animaux artificiels dont les lois de fonctionnement s'inspirent de celles des animaux [Wilson 85]. Comme un avatar, un animat est situé dans un environnement ; il possède des capteurs pour acquérir des informations sur son environnement et des effecteurs pour agir au sein de cet environnement. A la différence d'un avatar dont le contrôle est assuré par un utilisateur humain, l'animat doit assurer lui-même ce contrôle pour coordonner ses perceptions et ses actions [Meyer et Guillot 91]. Le contrôle peut être inné (préprogrammé) [Beer 90], mais dans l'approche animat, il sera le plus souvent acquis afin de simuler la genèse de comportements adaptés pour survivre dans des environnements changeants. Ainsi, l'étude de l'apprentissage (épigenèse) [Barto et Sutton 81], du développement (ontogenèse) [Kodjabachian et Meyer 98] et de l'évolution (phylogénèse)

[Cliff et al. 93] de l'architecture de contrôle constitue l'essentiel des recherches dans ce domaine très actif [Guillot et Meyer 00]¹. L'animation de créatures virtuelles obtenues par ces différentes approches constitue un exemple très démonstratif de ces comportements adaptatifs [Sims 94], et la modélisation d'acteurs virtuels relèvent de la même démarche [Thalmann 96]. Ainsi, l'autonomisation du modèle associé à un organisme permet de rendre compte plus fidèlement de l'autonomie constatée chez cet organisme.

L'autonomie par nécessité concerne la prise en compte instantanée des changements dans l'environnement, par les organismes comme par les mécanismes. La modélisation physique des mécanismes passe le plus souvent par la résolution de systèmes d'équations différentielles ; comme c'est le cas pour la mer avec les équations de Navier-Stokes (chapitre 3, section 3.2). Cette résolution nécessite la connaissance des conditions aux limites qui contraignent le mouvement [Liakos 99] or, dans la réalité, ces conditions peuvent changer sans arrêt, que les causes en soient connues ou non (interactions, perturbations, modifications de l'environnement). Le modèle doit donc être capable de percevoir ces changements pour adapter son comportement en cours d'exécution. Ceci est d'autant plus vrai quand l'homme est présent dans le système car, par l'intermédiaire de son avatar, il peut provoquer des modifications tout à fait imprévisibles initialement. L'exemple de l'écoulement du sable dans un sablier est à ce titre très instructif. La simulation physique des milieux granulaires repose le plus souvent sur des interactions micromécaniques entre sphères plus ou moins dures. De telles simulations prennent plusieurs heures de calcul pour visualiser des écoulements de l'ordre de la seconde et sont donc inadaptées aux contraintes de la réalité virtuelle [Herrmann et Luding 98]. Une modélisation à plus gros grains (niveau mésoscopique) à base de masses ponctuelles liées entre elles par des interactions appropriées conduit à des visualisations satisfaisantes mais non interactives [Luciani 00]. Une autre approche considère des gros grains de sable autonomes qui, individuellement, détectent les collisions (chocs élastiques) et sont sensibles à la gravité (chute libre). Elle permet de simuler l'écoulement du sable dans le sablier, mais également de s'adapter en temps réel au retournement du sablier ou à la création d'un trou dans le sablier [Harrouet 00]. Ainsi, l'autonomisation d'un modèle quelconque lui permet de réagir à des situations imprévues qui apparaissent en cours d'exécution, et qui sont le fait de modifications dans l'environnement dues à l'activité des autres modèles.

L'autonomie par ignorance révèle notre incapacité actuelle à rendre compte du comportement de systèmes complexes par les méthodes réductionnistes de la démarche analytique. Un système complexe est un système ouvert composé d'un ensemble hétérogène d'entités atomiques ou composites, dont le comportement d'ensemble est le résultat du comportement individuel de ces entités et de leurs interactions variées dans un environnement, lui-même actif. Selon les écoles, le comportement d'ensemble est considéré soit comme organisé en fonction d'un but, et on parle de comportement téléologique [Le Moigne 77], soit comme le produit d'une auto-organisation du système, et on parle alors d'émergence [Morin 77]. L'inexistence de modèles de comportement global pour les systèmes complexes conduit à répartir le contrôle au niveau des composants des systèmes et ainsi à autonomiser les modèles de ces composants. L'évolution simultanée de ces composants permet alors de mieux appréhender le comportement d'ensemble du système global. Ainsi, un ensemble de modèles autonomes en interaction au sein d'un même espace contribue à l'étude des systèmes complexes ainsi qu'à leur expérimentation.

L'autonomisation des modèles, qu'elle soit par essence, par nécessité ou par ignorance, contribue à peupler les environnements virtuels d'une vie artificielle qui renforce l'impression de réalité, tout en facilitant la tâche du modélisateur. L'autonomisation des entités se décline en trois modes : le mode sensorimoteur, le mode décisionnel et le mode opérationnel. Elle repose en effet sur une autonomie sensorimotrice : chaque entité est dotée de capteurs et d'effecteurs lui permettant d'être informée et d'agir sur son environnement. Elle s'appuie également sur une autonomie de décision : chaque entité décide selon sa propre personnalité (son histoire, ses intentions, son état et ses perceptions). Enfin, elle nécessite une autonomie d'exécution : le contrôleur de l'exécution de chaque entité est indépendant des contrôleurs des autres entités.

Nous proposons de considérer un modèle d'animation phénoménologique 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 : le phénomène doit

¹ *From Animals to Animats (Simulation of Adaptive Behavior : www.adaptive-behavior.org/conf)* : conférences bisannuelles depuis 1990

être vu comme une entité autonome, possédant des capacités sensorimotrices et décisionnelles qui lui sont propres [Ferber 95].

Comme toute modélisation, l'approche multi-agents [Ferber 97] simplifie le phénomène étudié. Mais elle permet, en répartissant le contrôle au niveau de chaque agent, de respecter en grande partie sa complexité globale en autorisant une diversité des composants, une diversité des structures et une diversité des interactions mises en jeu, tout en conservant une complexité locale relativement faible.

L'ensemble de ces entités autonomes, dont l'opérateur humain, interagissent alors selon le principe d'énaction.

5.3.2 Principe d'énaction

Dans les sciences cognitives, on peut distinguer trois écoles principales : le cognitivisme, le connexionnisme et l'enactivisme.

1. Le *cognitivisme* [Fodor 75], attaché au dualisme cartésien, considère la cognition comme une manipulation de symboles [Chomsky 65, Newell et Simon 72], à la manière d'un ordinateur [Turing 50].
2. Le *connexionnisme* [McCulloch 65, Dennett 96] s'inspire du dualisme épiphénoménologique reliant l'esprit au corps par l'émergence de configurations comportementales d'un réseau de processus communiquant [Hubel et Wiesel 62, Buser et Imbert 75], à la manière des réseaux de neurones [Hebb 49].
3. L'*énactivisme* [Maturana et Varela 80] est présenté, en sciences cognitives, comme une alternative phénoménologique aux deux écoles dualistes précédentes. Les hypothèses philosophiques de l'*énactivisme* sont associées à la phénoménologie [Husserl 36, Heidegger 64, Merleau-Ponty 45] considérant l'esprit inséparable de l'expérience sensible avec le monde ; notre relation avec le monde n'est pas représentable en termes symboliques, mais présentable à travers des actions.

Le terme *énaction* vise à « *souligner la conviction croissante selon laquelle la cognition, loin d'être la représentation d'un monde prédonné, est l'avènement conjoint d'un monde et d'un esprit à partir de l'histoire des diverses actions qu'accomplit un être dans le monde* » [Maturana et Varela 80].

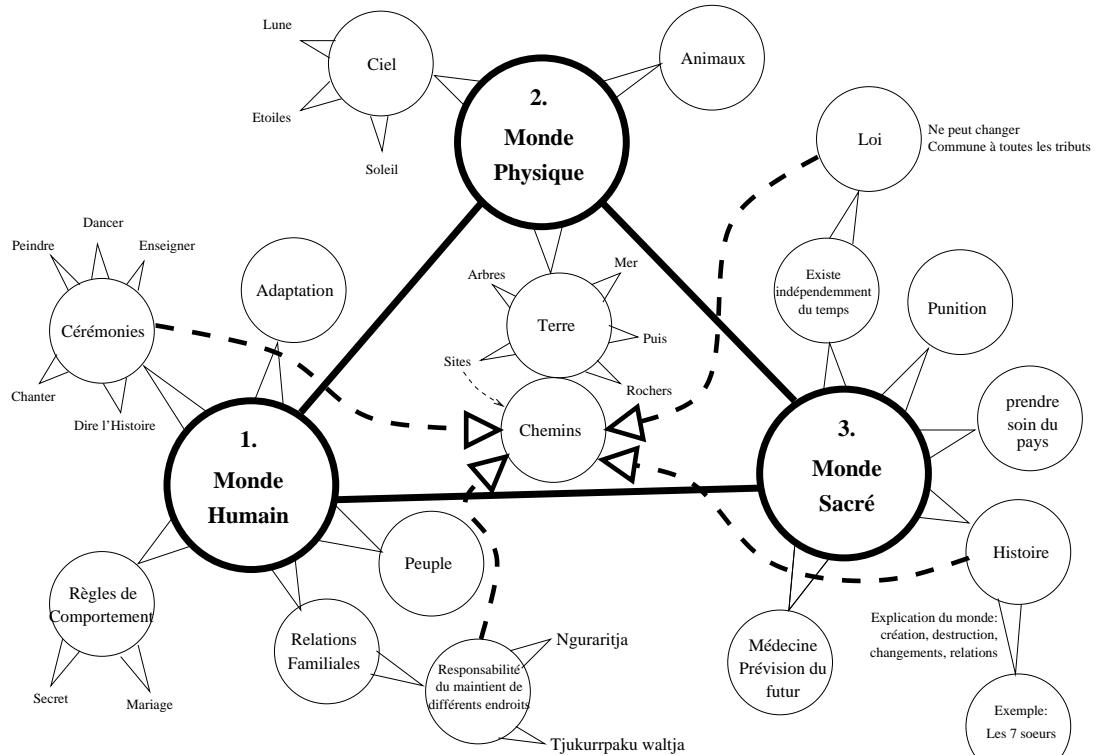
Nous considérons l'ensemble des entités autonomes constitutives du modèle d'environnement comme interagissant en une organisation énactive. Parmi ces entités autonomes figure l'utilisateur du système, qu'il soit observateur, acteur ou créateur/modélisateur. La modélisation scientifique est classiquement considérée comme une représentation formelle du monde. Or, dans le cadre de l'enactivisme, la modélisation doit être vue comme un acte de communication, au sens de [Maturana 87], traduisant la connaissance qu'un individu s'est forgé sur l'histoire de sa propre perception du monde et de son interprétation personnelle des modélisations précédentes. Autrement dit, le langage formel utilisé en sciences n'est qu'un langage parmi les autres permettant d'exprimer des impressions sur le monde ; il n'y a pas de raison de considérer la culture scientifique comme supérieure aux autres, surtout dans le cadre de ce mémoire de thèse, où nous ferons au chapitre 6 un effort de formalisation² d'une organisation énactive. Cette formalisation ne sera que le résultat d'une activité de communication avec la communauté scientifique.

Ce point de vue sur la place de l'homme dans l'environnement avec ses conséquences écologiques sur l'organisation de la société humaine [Ward et Dubos 72] n'est pas nouveau. Par exemple, Les aborigènes australiens possèdent une culture ancestrale profondément énactiviste, qui est loin d'être *animiste* [Sutton 88]. Chez ces aborigènes, la coutume est de considérer que toute chose existante dans le monde est en vie ; les animaux, les arbres, la pluie, le soleil, la lune, certains rochers ou collines, la mer et même l'arc en ciel sont tous des êtres conscients [Hokari 01]. Tous ces êtres ont le même droit d'exister, leurs propres lieux d'existence, leurs propres lois et cultures [Rose 96]. La sagesse pour les

² Il ne faudra pas confondre les phénomènes réels — dont le système de réalité virtuelle incluant l'homme — avec cette formalisation où les phénomènes naturels seront absents : il n'y restera que des modèles idéels de ces phénomènes.

aborigènes, c'est être attentif à tous les systèmes vivants et se comporter de manière responsable vis à vis de tous ces systèmes vivants (figure 5.2). Contrairement à la vision occidentale la plus répandue plaçant l'homme comme entité supérieure, l'homme est ainsi considéré par les cultures des aborigènes d'Australie au même niveau conceptuel que toute autre entité peuplant le monde physique.

De manière analogue, notre modélisation tente de présenter un modèle d'environnement naturel qui donne la même structure conceptuelle à chaque entité autonome peuplant ce monde virtuel multimodèles.



Les aborigènes ont une relation spirituelle à tout ce qui est naturel. Ils voient des parties d'eux-mêmes dans les éléments naturels, qu'il faut donc préserver à travers l'observation de règles de vie spécifiques à chaque région [Davis et al. 87]. La mise à jour de la connaissance est réalisée lors de cérémonies à travers un réseau social interconnecté. *Le monde sacré* est nommé "Dreaming" et désigne les Lois de vie. Le "Dreamtime" est l'explication de la création du monde en tant qu'unité autopoïétique [Varela 79]. Le "Dreamtime" est le début de la connaissance, dont proviennent les lois de l'existence. Il faut respecter ces lois pour survivre. *Le monde physique* (la Terre) est l'endroit où tout a commencé et où la vie se déroule. Certains endroits sont sacrés car réservés à d'autres types d'entités vivantes ; on y accède selon un processus très strict (le chemin), défini par les Lois afin de ne pas déranger ces autres entités. Le monde physique est la nourriture, la maison, la culture, l'esprit et l'identité des aborigènes. *Le monde humain* est caractérisé par l'existence des réseaux sociaux s'étendant à travers toute l'Australie, chaque communauté possédant une culture locale spécifique et non conflictuelle. Les groupes se réunissent pour discuter de l'entretien des Lois reliant l'homme à sa Terre physique et spirituelle.

FIGURE 5.2 : Principe d'éaction : l'exemple de la cosmologie des aborigènes australiens

Les composants d'une organisation énactive « doivent être dynamiquement reliés en un réseau d'interactions continues » [Maturana et Varela 87].

C'est à dire que les composants agissent continuellement l'un sur l'autre tout en maintenant les interactions de sorte que le système continue à exister. L'organisation d'un système énactif est l'ensemble des caractéristiques invariantes sans lesquelles il cesserait d'être ce qu'il est. Ses interactions avec son environnement et avec lui-même ont comme conséquence une modification continue de sa structure, mais pas de son organisation. Il convient de définir une organisation permettant d'adapter la structure du système au milieu, même si ce dernier change. Dans notre problématique, une modification du milieu peut être celui du milieu virtuel modélisé, ou bien le support informatique. Dans le cas du milieu virtuel, il convient de penser le modèle en facilitant l'interactivité au niveau de la conception de nouvelles propriétés du milieu, afin de ne pas avoir à remettre en cause les modèles déjà existants dans la simulation lors de l'introduction d'une nouvelle propriété, ou d'un nouveau modèle venant modifier les propriétés déjà utilisées par les autres modèles.

« *L'organisme donne forme à son environnement en même temps qu'il est façonné par lui [...] Le comportement est la cause première de toutes les stimulations. [...] Les propriétés des objets perçus et les intentions du sujet, non seulement se mélangent mais constituent un tout nouveau. [...] L'organisme, selon la nature propre de ses récepteurs, les seuils de ses centres nerveux et les mouvements de ses organes, choisit dans le monde physique, les stimuli auxquels il sera sensible* » [Varela et al. 91].

Dans ce cadre, la manière dont une entité s'informe du milieu dans lequel elle est immergée provient d'une interaction avec ce milieu ; ce qui implique que la connaissance qu'une entité peut avoir du monde dépend non seulement du milieu, mais aussi des savoir-faire de l'entité, qui doit avoir une démarche active pour percevoir le monde.

Ainsi, une organisation énactive est « *une collection auto-adaptative de structures actives, capable de modeler le milieu situé dans son voisinage en un monde réalisé à travers l'histoire du couplage structurel du système avec le monde ; l'être, l'agir et le savoir d'un système forment le monde dans lequel il vit*

Dans notre modèle d'animation phénoménologique, les interactions entre les entités autonomes sont le résultat d'une démarche active de la part de chaque entité. Pour spécifier l'organisation du modèle, il convient de décrire la manière dont chaque type d'entité réalise ses interactions avec les autres entités. Chaque entité doit pouvoir créer le milieu lui permettant de percevoir son environnement, afin d'adapter son comportement. Le modèle doit alors permettre à chaque entité d'agir sur le milieu ainsi créé au fur et à mesure des interactions entre les entités.

5.3.3 Principe de clôture sous causalité efficiente

Le mot causalité vient du latin *causa* (cause) qui avait initialement une signification surtout juridique (désignant l'objet d'un litige). On s'en est servi depuis l'Antiquité pour traduire le grec *αιτία*, qui s'employait à la fois pour désigner la responsabilité d'une action et pour signifier la raison d'être que nous pouvons assigner à un événement, une forme naturelle ou un énoncé du discours dont nous soutenons la vérité.

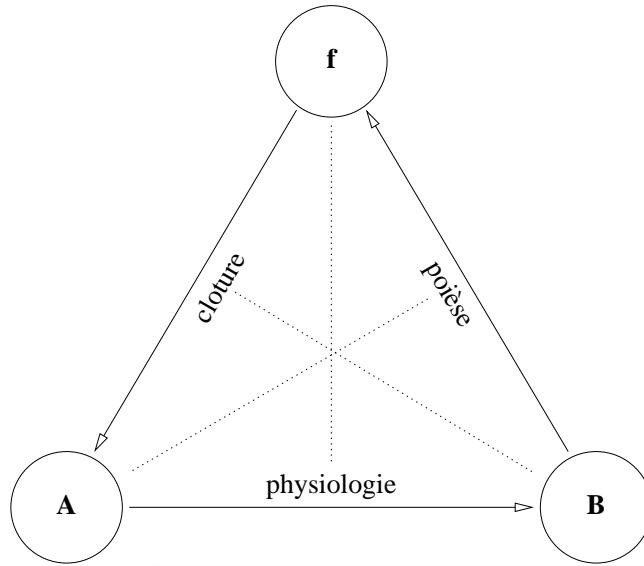
On parle de relation circulaire de causalité, lorsque dans un ensemble d'objets reliés par des liens de causalité, chaque objet est en même temps une cause et une conséquence, comme l'illustre la boucle causale : « Je suis fatigué de travailler car je souhaite rentrer chez moi. » et « Je souhaite rentrer chez moi, car je suis fatigué de travailler. » extraite de *La Société de l'Esprit* [Minsky 85]. Un modèle d'environnement incluant l'homme dans la boucle est régit par ce type de causalité circulaire entre l'homme et le modèle : l'homme-utilisateur est la cause de l'homme-créateur, l'homme-créateur est la cause du modèle, le modèle est la cause de l'homme-utilisateur. En effet, le status même du modélisateur est de générer un modèle, tandis que la participation active de l'homme dans le modèle demande de penser le modèle comme permettant la présence interactive de l'homme dans le modèle, que ce soit pour son utilisation ou sa création [Tisseau et al. 98, Bailly et Longo 04b]. Aussi, le principe de clôture sous causalité efficiente peut être vu comme un principe de participation active de l'utilisateur *en tant que cause du système*.

Quatre types de causalités sont distinguées par le philosophe grec Aristote (384–322 av. J-C) : les causes matérielles (les divers matériaux dont est faite une maison), les causes formelles (le plan de son architecte), les causes efficientes (le travail de ses bâtisseurs) et les causes finales (sa raison d'être). Cette théorie des quatre causes, réinterprétée sans relation d'ordre hiérarchique entre les modalités causales dans le cadre de la biologie relationnelle [Dubos 73] en utilisant le formalisme mathématique des catégories³ [Mac Lane et Birkhoff 67], définit une organisation énactive comme étant un système clos sous causalité efficiente [Rosen 91]. Les éléments d'un système énactif sont des relations du type : $f : A \rightarrow B$, où A et B sont des objets, et f un morphisme de A vers B . Ces éléments sont interprétés comme suit :

- la cause matérielle de B est A ,
- la cause efficiente de B est f ,
- la cause formelle de B est l'application de f à A ,

³ Nous reviendrons sur la théorie mathématique des catégories dans le prochain chapitre 6, section 6.2, page 116.

et A, B, f peuvent jouer tour à tour les rôles d'objet ou de morphisme. Les relations de causalité efficiente forment alors des boucles de causalité au sein du système, comme illustré dans le cas des systèmes vivants par la figure 5.3.



Configuration triangulaire exhibant la propriété de clôture sous causalité efficiente en biologie relationnelle. Selon le type de causalité considéré, matérielle ou efficiente, chaque sommet joue le rôle de matière ou de fonction. L'interprétation sémantique des objets constitutifs de ce diagramme est la suivante : f serait la physiologie formant B à partir de A , c'est à dire la cause efficiente des flux métaboliques incluant le rôle des enzymes et des membranes cellulaires; A serait la poièse formant f à partir de B , c'est à dire l'entretien de la fonction métabolique incluant le rôle des acides nucléiques (ADN, ARNt et ARNm) dans la synthèse des enzymes et des membranes cellulaires; B serait la clôture autopoïétique formant A à partir de f , c'est à dire le maintien dynamique des processus poiétiques, incluant par exemple la réplication des acides nucléiques.

FIGURE 5.3 : Clôture sous causalité efficiente en biologie relationnelle

« *La génèse de chaque cause efficiente doit elle-même être expliquée comme le résultat d'une autre causalité efficiente à l'œuvre à l'intérieur du système* » [Stewart 02].

En biologie relationnelle, cette clôture sous causalité efficiente donne accès aux quatre types de causalité, et la causalité finale du système — sa raison d'être — est le propre de la biologie : expliquer le vivant, en donnant à chaque type de fonction un rôle biologique dans l'organisation du vivant, comme le rôle régulateur de l'homéostasie⁴ par exemple, non restreint à sa seule notion mathématique d'application. Cette approche relationnelle de la biologie a notamment permis de mieux comprendre le fonctionnement du système immunitaire [Escande 99].

Ainsi, nous demandons à notre modèle d'un système complexe énactif de respecter ce principe de clôture sous causalité efficiente, afin de pouvoir y représenter des entités autonomes.

5.4 Hypothèse énactive

Dans notre approche, les phénomènes constitutifs de l'environnement naturel sont modélisés en tant qu'entités autonomes, interagissant en une organisation énactive :

1. chaque entité participe à la création de la topologie spatio-temporelle et sémantique du milieu où elle évolue, en fonction de son modèle de comportement afin de réaliser ses expériences perceptives,
2. chaque entité agit sur les propriétés du milieu ainsi créé, en fonction de ses relations topologiques avec ce milieu et de ses savoir-faire,
3. chaque entité adapte son comportement, en fonction de sa propre expérience du monde et de ses principes de transformation.

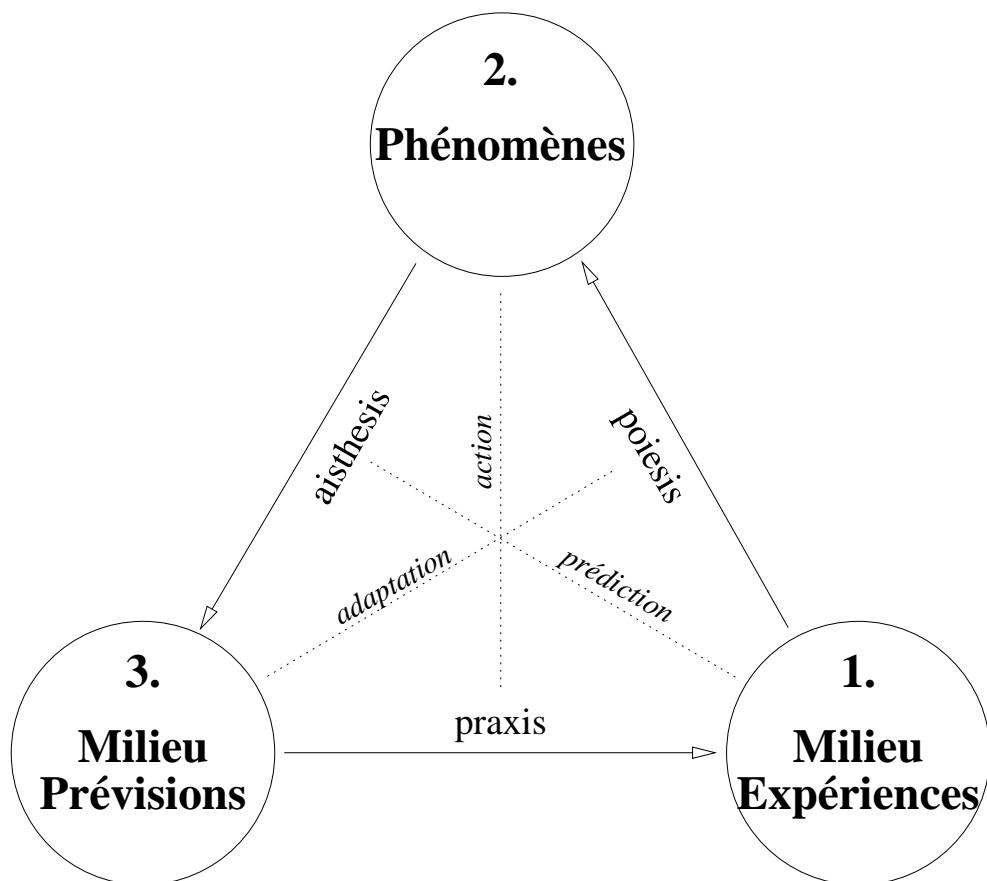
⁴ Homéostasie : Propension d'un système à rester dans sa norme, c'est-à-dire à maintenir un équilibre tendant vers le statu quo, malgré les pressions de l'environnement. Un organisme est caractérisé par un milieu intracellulaire : le contenu de ces cellules est différent du milieu extérieur. Chez les métazoaires, le liquide qui entoure les cellules et les tissus (milieu interstitiel) possède également des caractéristiques propres. On peut donc distinguer différents compartiments liquidiens chez un métazoaire. Ces différents compartiments vont avoir pour fonction principale d'assurer le bon fonctionnement des cellules en leur apportant les éléments nécessaires. Leur composition doit donc être la plus stable possible, c'est l'homéostasie [Chauvet 98].

Les phénomènes créent la topologie spatio-temporelle et sémantique du monde, lui donnent des propriétés, et ces propriétés modifient le comportement des phénomènes qui vont à leur tour modifier la topologie du monde. Ainsi, notre modèle est régi par une boucle triangulaire de causalité circulaire reliant les phénomènes, la géométrie du milieu où ils évoluent et leurs expériences sur ce milieu.

Avant de répondre aux « comment » de chacune de ces fonctions, ce qui sera l'objet du prochain chapitre, nous devons bien comprendre leurs causes finale, efficiente et matérielle. Pour cela, il nous faut répondre aux trois questions suivantes concernant une entité autonome présentant un phénomène, intégrée dans une organisation énactive :

1. Pourquoi l'entité perçoit le monde ? (section 5.4.1)
2. Pourquoi l'entité agit sur le monde ? (section 5.4.2)
3. Pourquoi l'entité s'adapte au monde ? (section 5.4.3)

Rappelons que le but poursuivi par notre modélisation est de réaliser une animation phénoménologique d'un environnement naturel permettant à l'opérateur humain d'y expérimenter, par l'intermédiaire du système de réalité virtuelle, une relation sensible avec ses représentations de l'environnement. Nous proposons tout d'abord de spécifier explicitement les relations de causalité finale, efficiente et matérielle dans notre système *phénomènes-topologie-expériences* : quelles sont les raisons



Notre modèle d'animation s'appuie globalement sur le triplet *expériences-phénomènes-prévisions* de causes matérielles et sur le triplet *aisthesis-praxis-poiesis* de causes efficientes. L'hypothèse de clôture sous causalité efficiente des organisations énactives est vérifiée dans notre modèle d'animation phénoménologique où nous considérons que :

1. *les expériences et l'aisthesis* sont les deux faces — matérielle/efficiente — d'un premier objet nomé *prédiction*
 2. *les phénomènes et la praxis* celles d'un deuxième nomé *action*
 3. *les prévisions et la poiesis* celles d'un troisième nomé *adaptation*;
- Tandis que le milieu est créé (*aisthesis*) et façonné (*praxis*) par les entités elles-mêmes.

FIGURE 5.4 : Clôture sous causalité efficiente dans notre modèle d'animation phénoménologique

d'être des *fonctions* des entités constitutives de l'organisation énactive représentative d'un environnement naturel incluant l'homme dans la boucle, quels en sont les objets et quelles en sont leurs relations ? Cette organisation globale est illustrée par la figure 5.4. Nous résumons alors ces hypothèses conceptuelles au niveau local d'une entité en interaction dans l'organisation *via* la médiation du milieu où chaque entité fait vivre le modèle d'un phénomène naturel dans la simulation (section 5.4.4).

5.4.1 Pourquoi l'entité perçoit le monde ?

La raison d'être de la perception des entités est la volonté du modélisateur de donner au modèle la capacité d'observer certaines propriétés quelque part dans l'environnement. Les expériences perceptives structurent la topologie spatio-temporelle et sémantique du milieu, et chaque entité, localisé dans l'espace-temps, participe à la structuration de cette géométrie du milieu.

Prenons le cas d'un simple observateur humain immergé dans le système. Il doit pouvoir percevoir l'environnement virtuel par la médiation de ses sens (vision, audition, système vestibulaire...). Sa stratégie de perception va le conduire à déterminer une topologie de l'espace-temps en laquelle il souhaite être informé de certaines propriétés de cet espace-temps ; cela correspond, par exemple, pour un expert en dynamique des fluides au choix d'un maillage de l'espace-temps.

Dans notre organisation énactive, chaque entité est autonome dans sa manière de percevoir le monde et participe alors activement à la construction dynamique de la topologie de l'espace-temps, considéré comme le médium des possibles interactions. Ainsi, l'observateur humain a les mêmes pouvoirs perceptifs que les autres entités. Par exemple, s'il est nécessaire de fournir un maillage pour visualiser les phénomènes (modèle de visualisation humaine), il n'est pas nécessaire de prédefinir un maillage pour que la simulation des phénomènes puisse avoir lieu [Parenthoën et al. 04] ; chaque phénomène s'occupe seul de définir la topologie nécessaire à l'expérience qu'il veut mener pour mesurer certaines propriétés effectives dans son environnement, et pouvoir ainsi les comparer à des propriétés prévues afin de mettre à jour son modèle de comportement.

Nous nommons ce rôle de prévision perceptive *aisthesis*⁵ et faisons référence aux travaux issus de la neuro-physiologie et de la psychologie écologique sur la perception active (section 5.2 page 88). La capacité de *perception active*, qui peut s'illustrer par une sorte de « déplacement du regard précédent celui de l'oeil », est une propriété du fonctionnement perceptif chez l'animal. Cette capacité prédictive, à plus ou moins loin terme, est le but de toute modélisation d'un phénomène naturel. On peut voir la physique comme une manifestation de cette capacité de prédition humaine, qui permet le réglage précis, en quelques constantes universelles, d'une théorie d'un merveilleux pouvoir prédictif.

Dans le cas d'un modèle sensé présenter l'*aisthesis* d'une entité, c'est le modélisateur qui doit définir les expériences à réaliser par l'entité, leurs natures et leurs localisations dans le temps et l'espace, afin de vérifier la validité des prévisions de l'entité d'après son modèle de comportement.

L'instrumentation du modèle d'animation phénoménologique doit permettre de définir le rôle perceptif des entités autonomes, en les dotant d'une capacité à participer à la structuration de la topologie perceptive de l'espace-temps.

5.4.2 Pourquoi l'entité agit sur le monde ?

La raison d'être de l'action des entités est la nécessité de présenter les effets des phénomènes sur les propriétés attachées aux points de la topologie de l'espace-temps, elle-même structurée par d'autres entités. Les phénomènes jouent le rôle de ce qui va définir les propriétés effectives du milieu en fonction des actions localisées des phénomènes sur ce milieu.

Etudions le cas d'un acteur humain immergé dans le système. Il doit pouvoir agir sur l'environnement virtuel par la médiation de ses actions (observer, agir, modéliser...). Prenons par exemple

⁵ **Aisthesis** : *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 ».

le cas d'un marin. Sa fonction (son rôle) est de maintenir en équilibre le quadruplet (bateau, mer, vent, homme). Ses stratégies d'action dépendent de relations entre les prévisions perceptives et les propriétés perçues [Paillard 94]. La compétence dans les prévisions perceptives dépend d'une fonction que nous appelons *praxis*⁶. A force d'expériences, la praxis du marin lui fournit une appréciation de cet équilibre qui se traduit en des actions sur son environnement (barrer, naviguer, manger...). Il faut alors pouvoir rendre compte de cette *praxis*, en modélisant les effets de la mer, du vent et du bateau dans le domaine perceptif du marin, afin de pouvoir reconstituer virtuellement ses *affordances*. Dans le cas de la dynamique des fluides, la praxis du physicien est résumée par les équations de Navier-Stokes, et la *praxis* du modèle de simulation correspond à la résolution numérique du système d'équations sur le maillage en appliquant une méthode d'éléments finis [Fedkiw 03] ou un modèle de masses-ressorts [Luciani 00].

Ainsi, dans notre organisation énactive, toutes les entités agissent sur le milieu, selon leurs propres rôles. Ces rôles, que nous appelons *praxis* aussi bien pour les entités réelles que pour les modèles, sont déterminés par l'histoire des interactions de l'ensemble des entités *via* la médiation du milieu qu'elles façonnent. L'acteur humain comme les autres entités autonomes, en même temps qu'ils jouent leurs rôles et donnent des propriétés à leur environnement, "pensent" à l'adéquation de leurs praxis avec l'environnement selon leurs propres individualités [Prochiantz 97]. Dans le cas d'un modèle sensé présenter la *praxis* d'une entité, c'est le modélisateur qui *pense* à l'adéquation de son modèle avec les observations expérimentales, afin d'en modifier la *praxis*.

L'instrumentation du modèle d'animation phénoménologique doit permettre de définir le rôle actif des entités autonomes, en les dotant d'une capacité à participer à l'attribution des propriétés du milieu. Cette capacité de *praxis* évolue dynamiquement en fonction de l'histoire des propriétés perçues et de paramètres internes à l'entité [Gallese 00].

5.4.3 Pourquoi l'entité s'adapte au monde ?

La raison d'être de l'adaptation des entités est la traduction de la sensibilité des phénomènes aux propriétés expérimentées dans l'environnement. Les phénomènes interagissent *via* la médiation du milieu et ce rôle auto-adaptatif va transformer les phénomènes, voire leurs structures et en créer de nouveaux en fonction des propriétés effectivement perçues du milieu qu'ils ont façonné.

En fonction de ce qu'il perçoit et des buts qu'il poursuit, l'adaptation de l'homme peut l'amener à changer sa stratégie perceptive ; cela correspondrait pour un modèle en dynamique des fluides, par exemple, à la modification du maillage afin de minimiser des erreurs numériques, en fonction des propriétés perçues sur le maillage courant [Coupez 96].

Ainsi, dans notre organisation énactive, toutes les entités modifient leurs comportements, selon leurs propres rôles. Ces rôles, que nous appelons *poiesis*⁷, traduit les effets des propriétés perçues sur le comportement des phénomènes. L'humain et les autres entités autonomes adaptent leurs comportements aux propriétés expérimentées par leurs activités de perception. La géométrie du milieu (sa structure topologique spatio-temporelle et sémantique), comme produit de l'*aisthesis*, devient alors conceptuellement identique à la *poiesis* car elle est, elle-aussi, la cause efficiente de l'effet des propriétés expérimentées du milieu sur le comportement des phénomènes.

Dans le cas d'un modèle sensé présenter la *poiesis* d'une entité, le modélisateur définit comment l'entité doit réagir aux résultats de ses expériences perceptives, afin d'adapter son comportement aux propriétés perçues dans son environnement : créer une nouvelle entité, changer ses paramètres ou sa structure, se détruire...

L'instrumentation de notre modèle d'animation phénoménologique doit permettre de définir le rôle poétique des entités autonomes, en les dotant d'une capacité d'adaptation sensible aux propriétés expérimentées du milieu. Cette capacité de *poiesis* permet de modéliser les interactions entre entités et les changements structurels des entités *via* la médiation d'un milieu qu'elles façonnent ensemble.

⁶ **Praxis** : *grec : action*. 1) action chargée d'un projet, activité en vue d'un résultat ; 2) faire et ce faisant, se faire.

⁷ **Poiesis** : *grec : création*. 1) fabrication, création, production ; 2) réparation.

L'hypothèse de clôture sous causalité efficiente des organisations énactives est alors vérifiée conceptuellement dans notre modèle d'animation phénoménologique si nous considérons que : *les phénomènes et la praxis* sont les deux faces (matérielle/efficiente) d'un premier objet, *les prévisions et la poiesis* celles d'un deuxième objet, *les expériences et l'aisthesis* celles d'un troisième. Cette organisation énactive d'entités, faisant vivre des modèles phénoménologiques sous clôture efficiente, est illustrée par la figure 5.4, page 101.

5.4.4 Présentation conceptuelle de l'hypothèse énactive

Nous résumons les hypothèses conceptuelles précédentes au niveau d'une entité autonome dans une organisation énactive pour la conception d'un phénomène dans la simulation (section 5.4.4.1) et évoquons comment l'ordinateur, réalisant la simulation en interaction avec l'être humain, peut être vu comme une entité autonome de l'organisation énactive (section 5.4.4.2).

5.4.4.1 Conception d'un modèle énactif

Notre modèle d'animation phénoménologique est constitué d'entités autonomes structurant dynamiquement un milieu servant de médiateur d'interactions. Chaque entité présentant un phénomène est dotée de trois rôles : l'*aisthesis* (créant la structure topologique du milieu), la *praxis* (attribuant des propriétés au milieu structuré par les expériences perceptives) et la *poiesis* (modifiant la structure interne du phénomène).

Ces entités autonomes interagissent en un système multi-agents présentant globalement une organisation énactive, clos sous causalité efficiente dans une relation triangulaire entre trois concepts formés des couples de causalité — matérielle, efficiente — suivants :

1. le couple *prédiction* de l'*expérience-aisthesis*,
2. le couple *action* du *phénomène-praxis*,
3. et le couple *adaptation* du *milieu-poiesis*.

L'ensemble des phénomènes est la cause matérielle de l'ensemble des milieux (la géométrie de l'espace-temps), et leur cause efficiente que nous appelons *aisthesis* est la fonction de perception active qui à chaque phénomène associe un milieu caractérisé par un élément de topologie spatio-temporelle et sémantique. L'ensemble des milieux (leur structure géométrique) est la cause matérielle de l'ensemble de leurs propriétés expérimentées, et leur cause efficiente que nous appelons *praxis* est la fonction qui à chaque milieu associe les propriétés expérimentées dues aux actions des phénomènes. Les propriétés expérimentées (ou expériences perceptives) sont la cause matérielle des phénomènes et leur cause efficiente que nous appelons *poiesis* est la fonction qui réalise l'adaptation des phénomènes aux propriétés effectivement perçues de l'environnement.

Une entité autonome de notre modèle d'animation phénoménologique est alors décrite (figure 5.5) par la donnée de trois objets du type (paramètres, fonction) : la prédiction, l'action et l'adaptation. Pour chacun de ces objets, nous précisons la fonction, les paramètres, et la caractérisation de l'objet neutre : celui pour lequel la fonction est la fonction neutre (son activation n'a pas d'effets), et les paramètres réduits à l'ensemble vide.

1. Prédiction.

La fonction *aisthesis* est la création par l'entité de la structure topologie spacio-temporelle (où et quand) et sémantique (quoi) du milieu à percevoir du point de vue local de l'entité. Cette fonction est paramétrée par l'*expérimentation* mesurant les propriétés effectivement perçues : c'est le couple prédiction de l'*expérience-aisthesis* au niveau local de l'entité. La fonction *aisthesis neutre* (l'observation du milieu n'est pas modélisée) est caractérisée par l'*absence d'expérience perceptive* ; sans possibilité de mesurer des propriétés effectives du milieu, l'entité ne peut observer le milieu et n'a donc pas à en créer. Elle ne pourra pas non plus réagir à des événements provoqués par les autres entités.

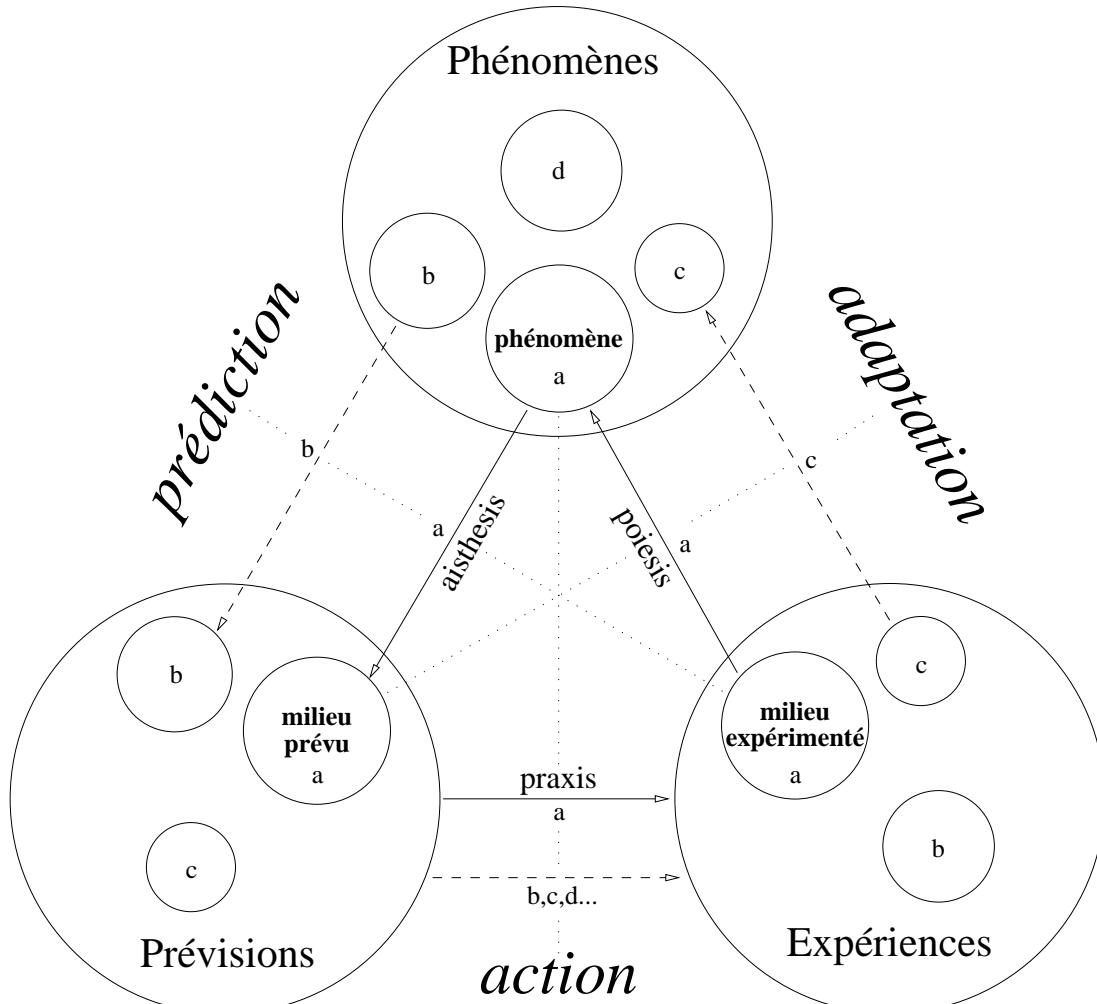
2. Action.

La fonction *praxis* est l'effet de l'entité sur l'ensemble du milieu existant au voisinage de l'entité,

en lui attribuant des propriétés. Elle est paramétrée par la structure interne des comportements du *phénomène* : c'est le *phénomène-praxis*. La fonction *praxis neutre* (l'action sur le milieu n'est pas modélisée) est caractérisée par l'*imperceptibilité du phénomène* (le phénomène ne pourra pas agir sur les autres entités) ; en n'agissant sur aucune des propriétés expérimentées du milieu, l'entité est inobservée. Cela peut être, par exemple, le cas d'un observateur du système.

3. Adaptation.

La fonction *poiesis* est l'auto-modification du comportement phénoménologique traduisant l'effet des propriétés effectivement perçues du milieu sur le phénomène. Elle est paramétrée par la prévisions des propriétés du milieu à percevoir du point de vue locale de cette entité, *i.e.* par le *milieu prévision* : c'est le *prévision-poiesis*. La fonction *poiesis neutre* (l'adaptation au



Ci-dessus, *a*, *b*, *c* ou *d* désignent des entités autonomes de l'organisation, chaque entité résultant de la modélisation d'un phénomène. Une entité autonome est la donnée d'un triplet d'objets actifs [Harrouet et al. 02], 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 (*a*, *b*, *c*, *d*, ...) 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 des ses savoir-faire sur ce milieu en lui donnant des propriétés expérimentées ; c'est le rôle de *praxis* des entités.
- Chaque entité (*a*, *b*, *c*, *d*, ...) adapte son comportement en fonction des caractéristiques perçues du milieu : *i.e.* les propriétés du milieu 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 prédition perceptive, d'action sur le milieu et d'adaptation au milieu.

FIGURE 5.5 : Organisation d'entités autonomes selon l'hypothèse énactive

milieu n'est pas modélisée) est caractérisée par l'*absence de milieu à percevoir*; sans démarche perceptive de création de milieu, l'entité ne peut s'adapter de manière autonome.

Ces données caractérisent la composition d'une entité autonome. Pour faire partie d'une organisation énactive (figure 5.5), chaque entité doit être en mesure de jouer localement ses différents rôles de manière autonome, ce qui correspond à l'autonomie d'exécution dans la simulation de ces entités.

5.4.4.2 Instrumentation : l'entité autonome ordinateur

A titre d'illustration, nous observons l'ordinateur sous l'œil conceptuel de l'hypothèse énactive. Examinons ce que peuvent signifier les trois concepts définissant une entité autonome dans le cas de l'ordinateur et donnons-en des exemples de cause efficiente.

1. Le *milieu*, en tant que zone de perception active de l'ordinateur correspond à son hardware (horloge, mémoires, processeurs, interfaces...); il n'y a que là qu'il peut percevoir les effets des entités présentes (lui-même et les entités qu'il simule, des hommes, d'autres machines...). Le programme qui scrute des impulsions sur le clavier est l'une des activités de type *aisthesis* de l'ordinateur; sans cette activité de la part de l'ordinateur, l'homme ne peut interagir avec l'ordinateur *via* la médiation du clavier.
2. Les *propriétés* perçues par l'ordinateur sont les états mesurés dynamiquement de certains éléments du hardware; ces états perçus dépendent des actions des entités présentes, au sens de leurs *praxis*, sur les éléments en question. Enfoncer une touche du clavier est l'une des manifestations de la *praxis* de l'homme. Le programme qui affiche un caractère dans une console est l'une des activités du type *praxis* de l'ordinateur.
3. Les *phénomènes* de l'ordinateur correspondent à son organisation logicielle dynamique (données, instructions, activités), médiatisée par un langage de programmation et un système d'exploitation. Décider d'exécuter le programme affichant le caractère enfoncé est l'une des activités de type *poiesis* de l'ordinateur; la propriété effectivement perçue modifie le flot d'instructions participant à l'organisation logicielle.

L'activité poïétique fondamentale de l'ordinateur est l'exécution d'un flux d'instructions; la propriété perçue est le "tic" d'horloge, qui déclenche automatiquement l'exécution de la prochaine instruction. Aussi, la perception active correspondante (l'attente du prochain "tic") est automatisée physiquement par un processus électronique. Remarquons que les propriétés de l'horloge sont accessibles à la machine et que la fréquence du processus est paramétrable dynamiquement par la machine elle-même. Un ordinateur portable peut alors adapter sa fréquence à l'énergie disponible et gagner ainsi en autonomie.

Seul, l'ordinateur a peu de chance de réaliser la moindre "praxis". Mais il est conçu pour être sensible à celle de l'homme. En interaction avec un être humain, ce dernier va s'y projeter symboliquement et lui fournir une représentation traduite en des instructions modélisant ce que sa *praxis* devrait être. La mémoire de l'ordinateur, réorganisée par l'être humain *via* la poïèse, lui permet alors de simuler à l'issue de cette interaction cette sorte de "praxis". La poïèse de la machine, est facilitée par la synchronisation des actions de l'homme avec la perception active de la machine permettant une interaction plus confortable. L'homme a développé, au cours de l'histoire de ses interactions avec la machine, toute une organisation logicielle facilitant l'utilisation d'un matériel offrant des mémoires de grande taille à accès rapide et des processeurs effectuant des milliards d'instructions élémentaires par seconde.

Par sa "praxis" dans le domaine perceptif de l'ordinateur, l'homme a ainsi pu projeter sur l'ordinateur les trois rôles nécessaires que doit remplir une entité autonome dans une organisation énactive. Une telle organisation peut être illustrée par l'internet, où chacun des ordinateurs possédant sa propre horloge interne, joue son rôle de manière autonome (l'activité TCP/IP), en interaction avec d'autres ordinateurs et des êtres humains, *via* le support topologique du réseau et les propriétés des paquets de données. Le caractère écologique d'une telle organisation peut être mesuré par un bilan

énergétique/pollution sur les procédés de fabrication du réseau d'ordinateurs et l'entretien énergétique de son fonctionnement, en rapport avec les transformations que peut apporter une telle technologie à la société humaine en énaction dans le monde réel.

Remarquons que les arguments sur l'impossibilité théorique qu'une machine de Turing puisse simuler des phénomènes physiques [Longo 02a] est basée sur une hypothèse d'espace-temps continu pour les modèles de ces phénomènes naturels. Si les modèles étaient basés sur une structure discrète de l'espace et du temps, rien n'empêcherait une machine de Turing de correctement simuler ces modèles [Longo 02b]. L'un des rôles de l'analyse numérique est de réaliser des preuves sur l'équivalence de la simulation des modèles des phénomènes physiques, par passage à la limite dans des méthodes numériques (discrètes), et le modèle continu que ces méthodes simulent. Or on trouve en physique moderne des approches modélisatrices utilisant directement des espace-temps granulaires [Smolin 04] ; la simulation "parfaite" par une machine de Turing de ces modèles discrets devient alors théoriquement possible.

L'objet du chapitre 7 consistera à présenter la modification logicielle résultant de l'instrumentation d'une simulation d'une organisation énactive multi-modèles, dont un des buts est d'offrir au modélisateur une interface écologique pour la description des entités faisant vivre les modèles des phénomènes naturels dans le système de réalité virtuelle.

5.5 Conclusion

Dans le cadre de la psychologie écologique pour l'animation phénoménologique, il est nécessaire de présenter à l'utilisateur, les *affordances* naturelles de cet utilisateur. Ces *affordances*, vues comme des interactions entre l'environnement et l'acteur, vont définir les phénomènes naturels qu'il faut modéliser. Les actions du modèle d'un phénomène naturel sur le milieu créé par l'observateur humain dans l'environnement virtuel doit rendre compte de la praxis de l'homme dans l'environnement naturel, afin que l'utilisateur humain puisse projeter ses expériences du monde réel dans le monde virtuel et réciproquement, par exemple pour pouvoir réaliser des expériences pédagogiques en environnement virtuel qui puissent servir dans le monde réel. Le choix des phénomènes modélisés et la modélisation de leur *praxis* est alors déterminé par des éléments psychologiques permettant l'immersion de l'homme dans l'environnement virtuel.

Une étude écologique de l'activité de modélisation d'un système complexe multi-modèles, nous a conduit à proposer d'autonomiser les modèles des phénomènes en des entités autonomes interagissant selon l'*hypothèse énactive*. Les interactions entre ces entités sont basées sur un principe de *perception active*, principe selon lequel les entités autonomes ont une démarche active dans la perception de leur environnement ; ce sont ces actes de perception qui vont créer les expériences à partir desquelles des interactions peuvent avoir lieu. L'organisation énactive résultante de la modélisation est alors composée d'entités autonomes en interaction *via* le milieu qu'elles créent et façonnent elles-mêmes.

Cette intuition énactive pour l'instrumentation écologique d'un système de réalité virtuelle incluant l'homme dans la boucle, l'homme étant considéré au même niveau conceptuel que les entités qui réalisent l'environnement, nous a permis de décrire un modèle d'animation phénoménologique clos sous causalité efficiente s'appuyant sur le triplet — *expériences, phénomènes, prévisions* — devant être caractérisé pour chaque entité autonome faisant vivre le modèle d'un phénomène naturel dans la simulation. Pour une entité virtuelle, ce triplet prend la forme de trois objets actifs :

prédition : (expérimentation, aisthesis),

action : (phénomène, praxis)

adaptation : (prévision, poiesis).

chaque objet actif étant spécifié par un couple (paramètre, savoir-faire).

Du point de vue de la machine, ce cadre conceptuel d'inspiration écologique va contraindre l'organisation logicielle de l'implémentation d'un modèle d'animation phénoménologique sur un ordinateur appréhendé comme une des entités autonomes du modèle (chapitre 7).

Du point de vue du modélisateur, cette ergonomie cognitive de la modélisation permet d'aborder,

dans le prochain chapitre (chapitre 6), le problème de la formalisation d'un tel modèle énactif, au niveau des entités autonomes qui feront vivre les modèles des phénomènes naturels dans la simulation.

Références

- [Albrechtsen et al. 01] Albrechtsen, H., Andersen, H., Bodker, S., et Pejtersen, A. (2001). Affordances in activity theory and cognitive systems engineering. Rapport Technique Riso-R-1287(EN), Riso National Labolatoty, Roskilde.
- [Andersen et al. 99] Andersen, G., Cisneros, J., Atchley, P., et Saidpour, A. (1999). Speed, size and edge-rate information for the detection of collision events. *Journal of Experimental Psychology : Human, Perception and Performance*, 25 :256–269.
- [Andronache et Scheutz 02] Andronache, V. et Scheutz, M. (2002). Contention scheduling : a viable action-selection mechanism for robotics ? In *Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference (MAICS)*. AAAI Press.
- [Arbib 72] Arbib, M. (1972). *The metaphorical brain : an introduction to cybernetics as artificial intelligence and brain theory*. Wiley Interscience, New York, USA.
- [Badler et al. 93] Badler, N., Phillips, C., et Webber, B. (1993). *Simulating humans : computer graphics animation and control*. Oxford University Press, New York.
- [Bailly 03] Bailly, F. (2003). Invariances, symétries et brisures de symétries. In Boi, L., éditeur, *New Interactions of Mathematics with Natural Sciences and the Humanities*. Springer, Berlin.
- [Bailly et Longo 03] Bailly, F. et Longo, G. (2003). Objective and epistemic complexity in biology. In *International Conference on Theoretical Neurobiology*, pages 1–18, New Delhi, Inde. National Brain Research Centre.
- [Bailly et Longo 04a] Bailly, F. et Longo, G. (2004a). Causalités et symétries dans les sciences de la nature. Le continu et le discret mathématique. In Joinet, éditeur, *Logique et interaction : pour une géométrie de la cognition*, volume numéro spécial de la Revue de Philosophie, page A paraître. Presses de la Sorbonne.
- [Bailly et Longo 04b] Bailly, F. et Longo, G. (2004b). Espace, temps et cognition. A partir des mathématiques et des sciences de la nature. *Revue de Synthèse*, 1 :1–44.
- [Ballaz et al. 01] Ballaz, C., Marendaz, C., Chauvin, A., et Peyrin, C. (2001). L'orientation canonique comme déterminant de la saillance perceptive. *InCognito*, 22 :37–46.
- [Barto et Sutton 81] Barto, A. et Sutton, R. (1981). Landmark learning : an illustration of associative search. *Biological Cybernetics*, 42 :1–8.
- [Bates 92] Bates, J. (1992). Virtual reality, art, and entertainment. *Presence*, 1(1) :133–138.
- [Beer 90] Beer, R. (1990). *Intelligence as adaptive behavior : an experiment in computational neuroethology*. Academic Press, San Diego.
- [Bernstein 67] Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movement*. Pergamon Press, New York.
- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Bohr 22] Bohr, N. (1922). The structure of the atom. *Nobel Lectures*, Physics 1922-1941 :7–43.
- [Brooks 91] Brooks, R. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47 :139–159.
- [Brunia 99] Brunia, C. (1999). Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, 101 :213–242.
- [Buser et Imbert 75] Buser, P. et Imbert, M. (1975). *Neurophysiologie fonctionnelle*. Hermann, Paris.
- [Butz et Hoffmann 03] Butz, M. et Hoffmann, J. (2003). Anticipations control behavior : Animal behavior in an anticipatory learning classifier system. *Adaptive Behavior*, à paraître.
- [Buzsaki et al. 92] Buzsaki, G., Horvath, Z., Urioste, R., Hetke, J., et Wise, K. (1992). High frequency network oscillations in the hippocampus. *Science*, 256 :1025–1027.
- [Chauvet 98] Chauvet, G. (1998). *La vie dans la matière - Le rôle de l'espace en biologie*. Champs Flammarion.

- [Chomsky 65] Chomsky, N. (1965). *Cartesian Linguistics*. Harper and Row, New York.
- [Christoffersen et al. 98] Christoffersen, K., Hunter, C., et Vicente, K. (1998). A longitudinal study of the effects of ecological interface design on deep knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 48 :729–762.
- [Cliff et al. 93] Cliff, D., Harvey, I., et Husbands, P. (1993). Explorations in evolutionary robotics. *Adaptive Behavior*, 2(1) :73–110.
- [Colby et al. 96] Colby, C., Duhamel, J., et Goldberg, M. (1996). Multiple parietal representations of space. In *Brain theory : Biological Basis and Computational Principles*, pages 37–52. Elsevier.
- [Cooper et Shallice 00] Cooper, R. et Shallice, T. (2000). Contention scheduling and the control of routine activities. *Cognitive Neuropsychology*, 17 :297–338.
- [Cornwell et al. 03] Cornwell, J., O'Brien, K., Silverman, B., et Toth, J. (2003). Affordance theory for improving the rapid generation, composability, and reusability of synthetic agents and objects. In *Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS)*, pages 50–63. SISO. <http://www.sisostds.org/conference/index.cfm?conf=03BRIMS>.
- [Coupez 96] Coupez, T. (1996). Parallel adaptive remeshing in 3d moving mesh finite element. In Soni, B. et al., éditeurs, *Numerical Grid Generation in Computational Field Simulation*, volume 1, pages 783–792. Mississippi University.
- [Courty et al. 03] Courty, N., Marchand, E., et Arnaldi, B. (2003). A new application for saliency maps : synthetic vision of autonomous actors. In *International Conference on Image Processing (ICIP)*, Barcelona, Spain. IEEE.
- [Cozot 96] Cozot, R. (1996). *Environnement de simulation des systèmes physiques*. Mémoire de Thèse, Université de Rennes 1.
- [Craik 43] Craik, K. (1943). *The nature of explanation*. Cambridge University Press.
- [Davis et al. 87] Davis, S., Fox, A., et Neidjie, B. (1987). *Australia's Kakadu Man*. Terra Nova.
- [Dennett 96] Dennett, D. (1996). *Kinds of Minds : Towards an Understanding of Consciousness*. Science Masters Series. Basic Books.
- [Devillers et al. 02] Devillers, F., Donikian, S., et Lamarche, F. (2002). A programming environment for behavioral animation. *Visualisation and Computer Animation*, 13 :263–274.
- [Dewey 1896] Dewey, J. (1896). The reflex arc concept in psychology. *Psychological Review*, 3 :357–370.
- [Doyle 02] Doyle, P. (2002). Believability though context : using "knowledge in the world" to create intelligent characters. In *International Joint Conference on Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*, pages 342–349. ACM Press.
- [Doyle et Hayes-Roth 97] Doyle, P. et Hayes-Roth, B. (1997). Agents in annotated worlds. Rapport Technique KSL-97-09, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University.
- [Droulez et Berthoz 88] Droulez, J. et Berthoz, A. (1988). Servo-controlled (conervative) versus topological (projective) modes of sensory motor control. In Bles et Brandt, T., éditeurs, *Disorders of Posture and Gait*, pages 83–97. Elsevier, Amsterdam.
- [Dubos 73] Dubos, R. (1973). *L'homme et l'adaptation au milieu*. Payot, Paris.
- [Duchon et al. 98] Duchon, A., Warren, W., et Kaelbling, L. (1998). Ecological robotics. *Adaptive Behavior*, 6(3/4) :471–507.
- [Duchon et Warren 94] Duchon, A. P. et Warren, W. H. (1994). Robot navigation from a gibsonian viewpoint. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pages 2272–2277, San Antonio, TX, USA.
- [Escande 99] Escande, J. (1999). *La vie, mystère et raison - Comprendre l'infection, comprendre le cancer*. Les Empêcheurs de Penser en Rond.
- [Fechner 1860] Fechner, G. (1860). *Elemente der psychophysik*. Leipzig : Breitkopf und Härtel.
- [Fedkiw 03] Fedkiw, R. (2003). Simulating natural phenomena for computer graphics. In Osher, S. et Paragios, N., éditeurs, *Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics*, pages 461–479. Springer Verlag, New York.
- [Ferber 95] Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris.

- [Ferber 97] Ferber, J. (1997). Les systèmes multi-agents : un aperçu général. *Technique et Science Informatique*, 16(8) :979–1012.
- [Flach et Holden 98] Flach, J. et Holden, J. (1998). The reality of experience : Gibson's way. *Presence*, 7(1) :90–95.
- [Fodor 75] Fodor, J. (1975). *The Language of Thought*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Gallese 00] Gallese, V. (2000). The inner sense of action : agency and motor representations. *Journal of Consciousness Studies*, 7(10) :23–40.
- [Gardner 85] Gardner, H. (1985). *The mind's new science : a history of the cognitive revolution*. Basic Book Inc., New York.
- [Gibson 58] Gibson, J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, 49 :182–194.
- [Gibson 77] Gibson, J. (1977). The theory of affordances. In Shaw, R. et Bransford, J., éditeurs, *Perceiving, acting and knowing - toward an ecological psychology*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Gibson 79] Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Guilbaud 02] Guilbaud, C. (2002). *Modélisation et visualisation de phénomènes naturels simulé par système physique particulaire*. Mémoire de Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG).
- [Guillot et Meyer 00] Guillot, A. et Meyer, J. (2000). From sab94 to sab2000 : what's new, animat ? In *From Animals to Animats (SAB)*, volume 6, pages 1–10.
- [Harrouet 00] Harrouet, F. (2000). *oRis : s'immerger par le langage pour le prototypage d'univers virtuels à base d'entités autonomes*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France.
- [Harrouet et al. 02] Harrouet, F., Tisseau, J., Reignier, P., et Chevaller, P. (2002). oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents. *Technique et Science Informatiques (RSTI-TSI)*, 21(4) :499–524.
- [Havelange et al. 02] Havelange, V., Lenay, C., et Stewart, J. (2002). Les représentations : mémoire externe et objets techniques. *Intellectica*, 35 :115–129.
- [Hayes-Roth et Van Gent 96] Hayes-Roth, B. et Van Gent, R. (1996). Story-making with improvisational puppets and actors. Rapport Technique KSL-96-05, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- [Hebb 49] Hebb, D. (1949). *The organization of behaviour*. John Wiley and Sons, New York, USA.
- [Heidegger 64] Heidegger, M. (1964). "Zur Sache des Denkens", Translated as "On Time and Being" by Joan Stambaugh. Contains : "Time and Being", "The End of Philosophy and the Task of Thinking", and "My Way to Phenomenology". New York : Harper and Row, 1972.
- [Herrmann et Lüding 98] Herrmann, H. et Lüding, S. (1998). Review article : Modeling granular media on the computer. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 10(4) :189–231.
- [Hokari 01] Hokari, M. (2001). Gurindji perspectives on history : body, place, memory and mobility. In *The Power of Knowledge, the Resonance of Tradition - Indigenous Studies (AIATSIS)*, page C6 :3, Australian National University, Canberra. Australian Institute of Aboriginal and Torres Strait Islander Studies. <http://www.aiatsis.gov.au/rsrch/conf2001/PAPERS/HOKARI.pdf>.
- [Hubel et Wiesel 62] Hubel, D. et Wiesel, T. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*, 160 :106–154.
- [Husserl 36] Husserl, H. (1936). Die Krisis der europäischen wissenschaften und die transzendentale phänomenologie : Eine einleitung in die phänomenologische philosophie. *Philosophia*, 1 :77–176.
- [Kesner et Rolls 01] Kesner, R. et Rolls, E. (2001). Role of long-term synaptic modification in short-term memory. *Hippocampus*, 11 :240–250.
- [Kodjabachian et Meyer 98] Kodjabachian, J. et Meyer, J. (1998). Evolution and development of neural controllers for locomotion, gradient-following, and obstacle-avoidance in artificial insects. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9 :796–812.
- [Lahlou 00] Lahlou, S. (2000). Attracteurs cognitifs et travail de bureau. *Intellectica*, 30 :75–113.

- [Le Moigne 77] Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris.
- [Lenay et Sebbah 01] Lenay, C. et Sebbah, F. (2001). La constitution de la perception spatiale. approches phénoménologique et expérimentale. *Intellectica*, 32.
- [Liakos 99] Liakos, T. (1999). *Weak imposition of boundary conditions in the Stokes problem*. Mémoire de Thèse, University of Pittsburg, PA.
- [Lisman et Idiart 95] Lisman, J. et Idiart, M. (1995). Storage of short term memories in oscillatory subcycles. *Science*, 267 :1512–1515.
- [Longo 97] Longo, G. (1997). De la Géométrie à la Cognition. 1/ Introduction : est-ce que les calamars font de la Géométrie? Compte rendu de [Prochiantz 97], 2/ Géométrie, Mouvement, Espace : Cognition et Mathématiques. À partir de [Berthoz 97]. <ftp://ftp.di.ens.fr/pub/users/longo/PhilosophyAndCognition/cogni-geometrie.pdf>. 1/ Soumis à *Les Archives de la Philosophie*, 2/ Soumis à *Intellectica*.
- [Longo 02a] Longo, G. (2002a). Laplace, Turing et la géométrie impossible du "jeu de l'imitation" : aléas, déterminisme et programmes dans le test de Turing. *Intellectica*, 35(2) :131–162.
- [Longo 02b] Longo, G. (2002b). Réponse : continu *vs.* discret, mathématiques et régimes de causalité. *Intellectica*, 35(2) :199–215.
- [Lubin et al. 03] Lubin, P., Vincent, S., Caltagirone, J., et Abadie, S. (2003). Three-dimensional numerical simulation of plunging breaking waves. In *Euromech Fluid Mechanics Conference*.
- [Luciani 00] Luciani, A. (2000). From granular avalanches to fluid turbulences through oozing pastes - a mesoscopic physically-based particle model. In *GraphiCon*, volume 10, pages 282–289, Moscou, Russie.
- [Mac Lane et Birkhoff 67] Mac Lane, S. et Birkhoff, G. (1967). *Algebra*. Mac Millan, New York.
- [Machrouh et al. 01] Machrouh, Y., Liénard, J., et Tarroux, P. (2001). Multiscale feature extraction from visual environment in an active vision system. In *Fourth International Workshop on Visual Form (VF)*, pages 388–397, Capri, Italy. Springer Verlag.
- [Maffre et al. 01] Maffre, E., Tisseau, J., et Parenthoën, M. (2001). Virtual agents self-perception in virtual storytelling. In *International Conference on Virtual Storytelling (ICVS)*, numéro 2197 in Lecture Notes in Computer Science, pages 155–158. Springer.
- [Marr 79] Marr, D. (1979). Representing and computing visual information. In Winston, P. et Brown, R., éditeurs, *Artificial Intelligence : An MIT Persepctive*, volume 2 de *Understanding Vision, Manipulation, Computer Design, Symbol Manipulation*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Mateas 02] Mateas, M. (2002). *Interactive drama, art, and artificial intelligence*. Rapport technique, cmu-cs-02-206, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.
- [Maturana 87] Maturana, H. (1987). Everything said is said by an observer. In Thompson, W., éditeur, *Gaia : A way of knowing*, pages 65–82. Lindisfarne Press, Hudson, NY.
- [Maturana et Varela 80] Maturana, H. et Varela, F. (1980). *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*. Reidel, D., Boston.
- [Maturana et Varela 87] Maturana, H. et Varela, F. (1987). *The tree of knowledge : the biological roots of human understanding*. Shambhala Press, Boston.
- [McCulloch 65] McCulloch, W. (1965). *Embodiments of mind*. MIT Press, Cambridge, MA, USA. For a review by Seymour Papert, see <http://www.papert.org/articles/embodiments.html>.
- [Merleau-Ponty 45] Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard, Paris.
- [Mestre 02] Mestre, D. (2002). Interactions entre réalité virtuelle et neurosciences comportementales. In *Virtual Concept*, Biarritz, France. ESTIA.
- [Meyer et Guillot 91] Meyer, J. et Guillot, A. (1991). Simulation of adaptative behavior in animats : review and prospect. In *From Animals To Animats (SAB'91)*, volume 1, pages 2–14.
- [Minsky 85] Minsky, M. (1985). *The society of mind*, chapitre 5.) Individualité : 5.1) Causalité circulaire, page 76. Simon and Schuster.
- [Morin 77] Morin, E. (1977). *La méthode, Tome 1 : la nature de la nature*. Editions du Seuil, Paris.

- [Morin 90] Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. ESF Editeur, Paris.
- [Morineau 00] Morineau, T. (2000). Context effect on problem solving during a first immersion in virtual environment. *Current Psychology of Cognition*, 14 :73–101.
- [Morineau 04] Morineau, T. (2004). L'émergence d'une perspective écologique en psychologie ergonomique, à ravers la distinction entre différents niveaux de contrôle cognitif dans l'activité. In *Colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCo)*, pages J3–S1, Compiègne, France.
- [Morineau et Parenthoën 03] Morineau, T. et Parenthoën, M. (2003). Une présentation de l'approche écologique en psychologie ergonomique. *Psychologie Française*, 48(2) :77–88.
- [Newell et Simon 72] Newell, A. et Simon, H. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall.
- [Paillard 86] Paillard, J. (1986). Système nerveux et fonction d'organisation. In Piaget, J., Mounoud, P., et Bronckart, J., éditeurs, *Encyclopédie de la Pléïade*, chapitre Psychologie, pages 1378–1441. Gallimard, Paris.
- [Paillard 90] Paillard, J. (1990). Réactif et prédictif : deux modes de gestion de la motricité. In *Pratiques sportives et modélisation du geste*, pages 13–56. Nougier, V. and Bianch, J.P., Grenoble, UFRAPS.
- [Paillard 94] Paillard, J. (1994). L'intégration sensori-motrice et idéomotrice. In Richelle, M., Requin, J., et Robert, M., éditeurs, *Traité de psychologie expérimentale*, chapitre III.6, pages 925–961. Press Universitaires de France, Paris.
- [Parenthoën et al. 02a] Parenthoën, M., Buche, C., et Tisseau, J. (2002a). Action learning for autonomous virtual actors. In *International Symposium on Robotics and Automation (ISRA)*, pages 549–554, Toluca, Mexico.
- [Parenthoën et al. 04] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004). Visualisation de la mer : un épiphénomène maritime. In *Actes du Groupe de Travail Rendu et Visualisation (GT-Rendu)*, Poitier, France.
- [Parenthoën et al. 02b] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002b). Autonomy and proactive perception for virtual actors. In *Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI)*, volume 13, pages 359–364, Orlando, Florida.
- [Parenthoën et al. 02c] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002c). Perception active pour acteurs virtuels/active perception for virtual actors. In *Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA)*, pages 219–226, Montpellier, France.
- [Prochiantz 97] Prochiantz, A. (1997). *Les anatomies de la pensée*. Odile-Jacob.
- [Pylyshyn 99] Pylyshyn, Z. (1999). Is vision continuous with cognition ? the case for cognitive impenetrability of visual perception. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(3) :341–423.
- [Rose 96] Rose, D. (1996). *Nourishing terrains : australian aboriginal views of landscape and wilderness*. Australian Heritage Commission, Canberra, Australie. <http://www.ahc.gov.au/infores/publications/generalpubs/nourishing/index.html>.
- [Rosen 91] Rosen, R. (1991). *Life itself : a comprehensive enquiry into the nature, origin and fabrication of life*. Columbia University Press, New York.
- [Shaw 03] Shaw, R. (2003). The agent-environment interface : Simon's indirect or gibson's direct coupling ? *Ecological Psychology*, 15(1) :37–106.
- [Sims 94] Sims, K. (1994). Evolving 3d morphology and behavior by competition. *Artificial Life*, 4 :28–39.
- [Smolin 04] Smolin, L. (2004). Des atomes d'espace et de temps. *Pour la Science*, 316 :46–55.
- [StAmant 99] StAmant, R. (1999). User interface affordance in a planning representation. *Human Computer Interaction*, 14 :317–354.
- [Stewart 02] Stewart, J. (2002). La modélisation en biologie. In *Enquête sur le concept de modèle, Partie I - Logique et sciences de la nature*, pages 43–66. PUF.
- [Stoffregen et Bardy 01] Stoffregen, T. et Bardy, B. (2001). On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1) :195–261.
- [Sutton 88] Sutton, P. (1988). *Dreamings ; the art of aboriginal australia*, chapitre Dreamings, pages 13–32. Penguin Books.

- [Thalmann 96] Thalmann, D. (1996). A new generation of synthetic actors : the interactive perceptive actors. In *Pacific Graphics*, pages 200–219.
- [Thomas et Donikian 00] Thomas, G. et Donikian, S. (2000). Virtual humans animation in informed urban environments. In *Computer Animation*, pages 129–136, Philadelphie, USA. IEEE.
- [Tisseau et Harrouet 03] Tisseau, J. et Harrouet, F. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 2, chapitre Autonomie des entités virtuelles. Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- [Tisseau et al. 98] Tisseau, J., Reignier, P., et Harrouet, F. (1998). Exploitation de modèles et réalité virtuelle. In *Actes des 6èmes journées du Groupe de Travail Animation et Simulation (GT-AS)*, volume 6, pages 13–22.
- [Tricot et al. 03] Tricot, A., Détienne, F., et Bastien, C. (2003). Recherches en psychologie ergonomique – introduction. *Psychologie Française*, 48(2) :1–8.
- [Turing 50] Turing, A. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236) :433–460.
- [Turvey et al. 81] Turvey, M., Shaw, R., Reed, E., et Mace, W. (1981). Ecological laws of perceiving and acting : in reply to fodor and pylyshyn. *Cognition*, 9 :237–304.
- [Tyndiuk et al. 03] Tyndiuk, F., Schlick, C., Claverie, B., et Thomas, G. (2003). Modèles et facteurs humains en IHM - application à la réalité virtuelle. In Herzig, A., Chaid-draa, B., et Mathieu, P., éditeurs, *Modèles Formels de l'Interaction (MFI)*, pages 301–306, Lille, France. Cépaduès.
- [Varela 79] Varela, F. (1979). *Principles of biological autonomy*. Elsevier, New York.
- [Varela 87] Varela, F. (1987). Laying down a path in walking. In Thompson, W., éditeur, *Gaia : A way of knowing*, pages 48–64. Lindisfarne Press, Hudson, NY.
- [Varela et al. 91] Varela, F., Thompson, E., et Rosch, E. (1991). *The embodied mind : cognitive science and human experience*. MIT Press, Cambridge.
- [Vicente et Wang 98] Vicente, K. et Wang, J. (1998). An ecological theory of expertise effects in memory recall. *Psychological Review*, 105 :33–57.
- [Waldrop 92] Waldrop, M. (1992). *Complexity : The emerging science at the edge of order and chaos*. Touchstone, New York.
- [Ward et Dubos 72] Ward, B. et Dubos, R. (1972). *Only One Earth — The Care and Maintenance of a Small Planet*. Norton, New York.
- [Warren et Whang 87] Warren, W. et Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology : Human, Perception and Performance*, 13 :371–383.
- [Widyanto et al. 91] Widyanto, T., Marriot, A., et West, M. (1991). Applying a virtual perception model to behavioral animation system. In *Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, pages 89–98, Vienne, Autriche.
- [Wilson 85] Wilson, S. (1985). Knowledge growth in an artificial animal. In *Genetic Algorithms and their Applications*, pages 16–23.

Chapitre 6

Formalisation d'un modèle énactif

Deux grands groupes de méthodes sont possibles pour aborder le problème de la connaissance, selon la position qu'on lui assigne dans la succession des travaux. Les unes sont aprioriques ou essentiellement réflexives et partent de la présupposition que les principes de la connaissance peuvent être atteints directement par une discipline autonome et de rang supérieur [...]. Leur postulat en est, si l'on veut, que les "arts poétiques" doivent précéder la poésie et exercer une salutaire influence sur le travail des poètes. Les méthodes du second groupe partent au contraire de l'idée que les connaissances comportent des modes de structuration imprévisibles, multiples et sans cesse renouvelées, et que leur analyse ne peut alors procéder avec fruit qu'après leur constitution ou au cours de leur création; et autant que possible de l'intérieur, avec le minimum de présuppositions, celles-ci courant toujours le risque d'être déformantes. En un mot, selon ces méthodes, le poète reste libre et la question n'est ensuite que de chercher à comprendre comment il a procédé ou pourquoi il a mieux réussi en certaines occasions qu'en d'autres. [...] Le problème des "fondements" n'est plus réservé à une discipline extérieure à la science comme telle, ainsi que ce pouvait être le cas à une époque où la pérennité supposée des principes entretenait une douce quiétude et rendait inutile cet effort constant d'analyse rétroactive et de réflexion épistémologique auquel les créateurs scientifiques sont aujourd'hui conduits de façon irréversible par le mouvement même de leur recherche proactive et de leur découverte. [...] A vouloir comprendre comment se constituent et évoluent [...] les structures de classification, de mise en relation, de nombre, d'espace, de temps, de vitesse ou de rythme, il est entièrement exclu de ne pas se poser sans cesse des questions [...] qui rejoignent précisément les problèmes gnoséologiques que se pose inévitablement l'homme de science lorsqu'il est conduit à faire de la critique rétroactive et à se demander, par exemple si telle ou telle forme d'intuition s'impose nécessairement à l'esprit, ou n'aurait pas une origine plus occasionnelle permettant de la rectifier ou même de s'en passer: que l'on songe, par exemple, aux intuitions de l'objet permanent, de l'espace euclidien, du temps absolu ... [Apostel et al. 67]

Jean Piaget, *Préface à la XXII^e Encyclopédie de la pléiade : Logique et connaissance scientifique.*

6.1 Introduction

Nous entreprenons dans ce chapitre la formalisation d'un modèle d'action des phénomènes naturels, en vue de son instrumentation sur machine, que ces actions soient, par exemple, celles des vagues ou du vent, celles des algues ou des poissons, celles des marins ou des océanographes. Nous tâcherons donc de laisser le plus de liberté possible aux modélisations qui suivraient cette formalisation, en faisant un minimum d'hypothèses, comme l'invite à le faire Piaget dans la citation placée en exergue de ce chapitre. Plus précisément, il s'agit ici de formaliser, pour une instrumentation en un système de réalité virtuelle, la *modélisation* d'une *simulation participative* d'un *environnement naturel* à base d'un modèle d'entités en *éaction*, modèle présenté conceptuellement au chapitre 5.

- Par énaction, nous désignons des interactions entre entités *via* la médiation d'un milieu structuré par les entités elles-mêmes.

- Par environnement naturel, nous entendons que le modèle de simulation est issu d'une praxis humaine, et qu'il doit pouvoir traduire les points de vue physique, biologique, psychologique ou informatique de cette praxis.
- Par simulation participative, nous entendons que le modèle doit pouvoir être instrumenté et expérimenté *in virtuo* [Tisseau 01] tout au long de sa création.
- Par modélisation, nous parlons du résultat mesurable de l'action du modélisateur sous la forme d'un langage décrivant les modèles proposés, et respectant les contraintes imposées par la présente formalisation.

Il semble nécessaire de préciser le modèle conceptuel décrit au chapitre 5 par la médiation d'un formalisme mathématique. En effet, un tel formalisme permet de poser le problème en des termes communs aux langages scientifiques, donne un cadre facilitant son implémentation informatique en offrant des structures géométriques et des savoir-faire analytiques associés, somme toute bien pratiques pour localiser idéellement les phénomènes [Poincaré 14], et limite les argumentations sur les causes finales du modèle, causes qui, il faut bien l'avouer, sont d'inspiration écologique (inscription de l'homme dans son environnement) et libertaire (autonomie des individus) et donc forcément sources de discorde (le monde est ainsi fait). Nous utiliserons les espaces géométriques formels d'un point de vue pragmatique dans notre modèle, sans en oublier le caractère idéal, au sens où les modèles des phénomènes naturels ne seront jamais que des idées issues de la praxis de l'homme, en énaction dans son environnement naturel ou virtuel.

Ce chapitre fournit les prémisses d'une méthodologie de ce que l'on pourrait appeler la *modélisation énactive* des systèmes complexes où chaque phénomène est modélisé par une entité autonome. L'homme lui-même, qu'il soit observateur, acteur ou modélisateur du système de réalité virtuelle, doit être abordé par la fenêtre de l'ergonomie cognitive. En tant qu'observateur ou acteur, l'homme sera en énaction dans le système, ce qui implique dans le cas de la simulation des phénomènes naturels une étude écologique¹ des phénomènes qui doivent être représentés afin de faciliter l'énaction de l'utilisateur. En tant que modélisateur, l'énaction se situe au niveau expérimental, où le système est un outil proposant de faire vivre l'ensemble des modèles en une simulation informatique pour réaliser des vérifications expérimentales.

Nous positionnons dans la section 6.2 notre formalisation par rapport à la méthodologie scientifique. Nous définissons les *objets actifs* qui sont les briques élémentaires de notre formalisation (section 6.3). Nous caractériserons alors trois types d'*objets actifs* d'après leurs structures paramétriques et leurs types de savoir-faire (section 6.4). Puis nous définissons les modèles des phénomènes d'un système complexe comme des entités autonomes, en interaction dans une organisation énactive (section 6.5). Nous résumons l'ensemble de la méthode proposée pour la modélisation d'un système multi-modèles permettant de simuler un environnement naturel (section 6.6). La section 6.7 conclut sur cette méthode énactive et ses perspectives.

6.2 Modélisation informatique

La modélisation est la transformation d'une idée intuitive sur le monde en un modèle respectant le formalisme scientifique et offrant des preuves théoriques sur sa validité ou des prédictions sur des résultats expérimentaux. La formalisation des idées doit alors fournir des instruments de démonstration formelle ou de vérification expérimentale [Piaget 67]. Les différences entre les prévisions et les mesures expérimentales amènent à avoir de nouvelles idées intuitives permettant de modifier le modèle en tenant compte des différentes expériences réalisées.

Nous situons notre formalisation d'un modèle énactif dans le domaine expérimental, notre but étant l'instrumentation d'un système de réalité virtuelle incluant l'homme dans la boucle, devant permettre de simuler des systèmes complexes multi-modèles. Dans notre instrumentation du modèle énactif, les entités autonomes prennent vie en simulant des modèles représentant des phénomènes et nous invitons le modélisateur à autonomiser ces modèles. Nous n'avons pas la prétention de simuler le réel, mais plus humblement de simuler des modèles du réel : le modèle d'un phénomène naturel n'est pas et ne sera jamais le phénomène lui-même.

¹ écologique dans le sens de l'ergonomie cognitive

Après une rapide présentation de la théorie des catégories comme candidat à la formalisation d'un modèle d'entités autonomes en interaction (section 6.2.1), nous précisons le but ultime de notre formalisation qui est une instrumentation d'un système de réalité virtuelle en tant qu'outil pour la modélisation des systèmes complexes (section 6.2.2).

6.2.1 Formalisation théorique

La théorie des catégories [Mac Lane et Birkhoff 67] étudie les “objets” et les “morphismes” entre ces objets. Ces concepts sont des primitives de la théorie : les objets ne sont pas forcément des collections d’éléments et les morphismes n’ont pas besoin d’être des fonctions entre des ensembles. Cette théorie très générale sur les structures mathématiques et leurs relations est présentée comme pouvant être le fondement des mathématiques [Lawvere 66]. Pour définir une catégorie, il faut en préciser les objets, les morphismes entre ces objets, et vérifier les propriétés caractéristiques d’une catégorie. Une catégorie \mathcal{C} est définie par trois types de données :

- une collection d’objets A, B, \dots ;
- à tout couple (A, B) d’objets de \mathcal{C} est associé un ensemble $\mathcal{C}(A, B)$ de morphismes de A vers B ; si f appartient à $\mathcal{C}(A, B)$, on note $f : A \rightarrow B$ ou $A \xrightarrow{f} B$. L’objet A (resp. B) s’appelle *domaine* (resp. *codomaine*) du morphisme f ;
- à tout triplet (A, B, C) d’objets de \mathcal{C} correspond une loi de composition :

$$\mathcal{C}(A, B) \times \mathcal{C}(B, C) \longrightarrow \mathcal{C}(A, C).$$

L’ensemble $\mathcal{C}(A, B) \times \mathcal{C}(B, C)$ est formé des couples (f, g) , tels que $f : A \rightarrow B$ et $g : B \rightarrow C$.

La composée de f et g s’écrit : $A \xrightarrow{f \circ g \text{ ou } fg} C$.

Et doit vérifier les trois axiomes suivants :

- A1.** Les ensembles $\mathcal{C}(A_1, B_1)$ et $\mathcal{C}(A_2, B_2)$ sont disjoints dès que $A_1 \neq A_2$ ou $B_1 \neq B_2$.
- A2.** La loi de composition est associative : si $A \xrightarrow{f} B, B \xrightarrow{g} C, C \xrightarrow{h} D$, alors $f(gh) = (fg)h$.
- A3.** Pour chaque objet A , il existe un morphisme identité noté $1_A : A \rightarrow A$ ou simplement 1, tel que pour tous morphismes $A \xrightarrow{f} B$ et $C \xrightarrow{g} A$, on ait : $1_A f = f$ et $g 1_A = g$.

La catégorie $\mathcal{E}ns$ dont les objets sont les ensembles et les morphismes les applications (que l’on appelle aussi “petite catégorie”), celle des espaces topologiques et des applications continues : $\mathcal{T}op$, celle des espaces vectoriels sur un corps \mathbb{K} et des applications linéaires : $\mathcal{V}_{\mathbb{K}}$, ou celle des groupes et des homomorphismes de groupes $\mathcal{G}rp$, sont parmi les plus connues. Les objets d’une catégorie ne sont pas forcément des “ensembles structurés” comme par exemple dans la catégorie des systèmes déductifs utilisée en théorie des langages dont les objets sont des propositions et les morphismes les classes de preuves qu’une propriété en entraîne une autre, la loi de composition des morphismes correspondant à la transitivité de la preuve : si $f : A \rightarrow B$ et $g : B \rightarrow C$ alors $fg : A \rightarrow C$.

Largement utilisée en théorie des langages de programmation, la théorie des catégories a prouvé son efficacité pour distinguer les langages les uns des autres, en apportant par exemple des preuves formelles sur les compétences de certains langages fonctionnels. Elle a même permis de proposer une méthodologie d’implémentation de certains langages, qui fut appliquée, par exemple, dans le cas du langage fonctionnel CAML [Asperti et Longo 91]. La théorie des catégories est maintenant communément utilisée pour les réseaux de Petri et a notamment mis en évidence les différences entre les réseaux ordinaires, les réseaux colorés et les réseaux algébriques [Padberg et al. 92].

Son utilisation pour formaliser les notions d’agents et de systèmes multi-agents est abordée dans [Di Marzo Serugendo et al. 96], qui évoquent des possibilités de formalisation des regroupements d’agents lors d’un partage de ressource. Leur catégorie de base est la *catégorie de l’information* : les *objets* sont les états d’information et l’on distingue les informations internes aux agents des informations externes aux agents. L’information interne désigne par exemple la connaissance, les croyances, l’état de calcul d’un agent, tandis que l’information externe est composée des propriétés de l’environnement manipulées par les agents. Les *morphismes* sont les exécutions de programmes qui vont représenter des changements des états d’information, comme par exemple un calcul, un raisonnement, une diffusion de message ou un changement de l’environnement. Cependant, leur travail exploratoire sur l’utilisation de la théorie des catégories pour formaliser les notions d’agents et de systèmes multi-agents (SMA) n’a pas donné lieu, à notre connaissance, à une méthode d’instrumentation.

Comme nous l'avons précisé au chapitre précédent, la théorie des catégories sert de cadre formel à la biologie relationnelle depuis les travaux de [Rosen 85] et a même donné naissance au modèle MES (*Memory Evolutive Systems*) [Ehresmann et Vanbremersch 87]. Ses auteurs proposent d'expliquer la formation sémantique des concepts sensorimoteurs dans les systèmes autonomes prédictifs en se basant sur le principe de multiplicité de la physique quantique et l'utilisation de catégories par le système autonome pour prédire ses actions en interaction avec l'évolution de son environnement ; une notion sémantique est attachée à la nature de la catégorie utilisée pour réaliser la prédiction [Ehresmann et Vanbremersch 02]. Cependant, ce dernier modèle est fondé sur l'hypothèse de l'existence d'un temps global à tout l'univers : la catégorie de base utilisée est l'état de l'univers à un moment t donné, les *objets* étant les composants du système à ce moment donné et les *morphismes* les interactions entre ces composants autour de ce moment ; cette notion globale du temps est incompatible avec notre approche locale où chaque entité évolue selon sa propre notion du temps. Aussi, faut-il accepter que tout système autonome prédictif utilise exclusivement des catégories pour représenter son environnement, et que l'environnement est forcément descriptible par les catégories utilisées par les physiciens ; je peux éventuellement accepter l'idée précédente à la condition expresse de remplacer "système autonome prédictif" par "modèle d'un système autonome prédictif" et "environnement" par "modèle d'environnement". Quoi qu'il en soit, ce modèle reste somme-toute trop formel pour une instrumentation dans un système de réalité virtuelle.

Nous pourrions être tentés par une *catégorie de la modélisation* où les objets sont des modèles autonomes et les morphismes des interactions entre ces modèles. Cette « catégorie » (qui reste à inventer) semble attirante pour parler de réalité virtuelle, car il s'agit bien d'un univers de modèles en interaction où l'homme peut être simple observateur, mais aussi modifier en ligne les modèles [Tisseau et Harrouet 03]. Le système de réalité virtuelle devient alors un *outil* pour la modélisation interactive des phénomènes : le *virtuoscope* [Tisseau 04]. Mais si l'on veut pouvoir *formaliser* un système de réalité virtuelle incluant l'homme dans la boucle, cela demande de considérer l'homme au même niveau que le modèle qui le représente dans la catégorie et nous ne voulons pas faire cette hypothèse, qui serait le pendant idéologique au matérialisme de l'hypothèse computationnelle.

Ainsi, nous avons présenté des pistes de formalisation par la théorie des catégories d'un modèle à base d'entités autonomes en interaction. Le but des modélisations présentées était principalement théorique et elles n'apportent pas, à l'heure actuelle, de solution au problème d'une instrumentation d'un modèle énactif.

6.2.2 Formalisation pragmatique

Le but de notre formalisation est une instrumentation d'un système de réalité virtuelle en tant qu'outil pour la modélisation des systèmes complexes. L'ordinateur peut être vu comme un outil au sein duquel l'être humain peut projeter des idées intuitives *via* la médiation d'un modèle formel, traduit en un langage informatique. Ne pouvant décrire un système complexe par un modèle unique, mais plutôt par un système multi-modèles en interaction, la formalisation du système doit guider le modélisateur dans sa tâche descriptive de chacun des modèles et de leurs interactions.

L'autonomisation d'un modèle (chapitre 5, section 5.3.1) apparaît comme une contrainte nécessaire pour la modélisation interactive d'un système complexe, *via* sa simulation informatique dans un système de réalité virtuelle. En effet, le travail effectué pour décrire un phénomène par un modèle autonomisé n'a pas à être remis en cause lors de l'introduction d'un nouveau phénomène dans le système. Cela facilite la construction itérative du système multi-modèles en offrant la possibilité de ne travailler que sur l'un des modèles à la fois sans s'occuper des autres, ou d'introduire à tout moment un nouveau modèle.

En ce qui concerne la modélisation des phénomènes naturels, autonomiser le modèle en lui donnant des capacités de perception et d'adaptation ne demande pas de considérer le phénomène comme ayant ces capacités. Le phénomène réel est naturellement inscrit dans un monde physique contraignant son évolution et il n'y a pas de raison nécessaire de supposer, par exemple, qu'un phénomène physique perçoive quoi que ce soit, ce serait lui donner des intentions anthropomorphiques qui n'ont pas lieu

d'être dans le cas d'un phénomène physique. En revanche, en réalité virtuelle, le modèle d'un tel phénomène n'est pas inscrit dans un monde physique autre que le support matériel informatique ; il faut donc reconstituer, au sein de l'ordinateur, un modèle de ce monde physique, ne serait-ce que pour localiser le phénomène dans l'espace et le temps. Il est évidemment impossible d'en reconstituer l'intégralité, mais on peut tenter de ne simuler que la partie du monde physique dont a besoin le modèle du phénomène pour agir dans le système ; c'est là qu'interviennent les espaces géométriques idéels, leur raison d'être n'est pas conceptuelle, mais pragmatique en vue de l'instrumentation.

Lors de la modélisation d'un phénomène naturel, on sera guidé par les remarques suivantes pour autonomiser le modèle du phénomène naturel :

1. Le phénomène est observable par ses actions sur son environnement. Il est localisé dans l'espace-temps et l'on mesure ses actions par des expériences sur son environnement. Un modèle d'action doit permettre de décrire les actions de ce type de phénomène en précisant *où et quand* il agit sur *quoi et comment*, ces actions étant paramétrées par des caractéristiques internes au modèle du phénomène et variant dans un certain domaine de validité. L'une de ces caractéristiques doit être une estimation de l'erreur commise par le modèle.
2. L'évolution du phénomène dépend de son environnement qui est alors représenté dans le modèle du phénomène. Cette représentation de l'environnement permet au modèle d'évoluer de manière autonome sans mettre à jour cette représentation, autrement que par des activités internes sans acte de perception. Cependant, plus le temps passe et moins cette représentation de l'environnement est pertinente ; au bout d'un certain temps, le modèle d'action quitte son domaine de validité : selon son critère d'estimation d'erreur, le modèle a besoin de réaliser des mesures expérimentales dans son environnement pour assurer une simulation correcte du phénomène.
3. Il faut alors définir comment faire une mesure expérimentale, sachant que demander la réalisation d'une expérience prend du temps : il faut reconstituer la structure de l'espace-temps nécessaire à cette expérience et faire agir les différents modèles d'action présents dans cet environnement. Aussi, pour assurer une certaine précision à la simulation et pour ne pas avoir à attendre le résultat d'une expérience, il vaut mieux anticiper sur *où et quand* le modèle aura besoin de *quoi*, afin que l'environnement soit disponible avant que le modèle ne quitte son domaine de validité.
4. Le résultat de l'expérience est alors utilisé par le modèle du phénomène pour modifier la représentation de son environnement, adapter son comportement à cette représentation interne pertinente et assurer ainsi une simulation du modèle dans son domaine de validité, notamment en maintenant le critère d'estimation d'erreur en deçà d'un valeur maximale.

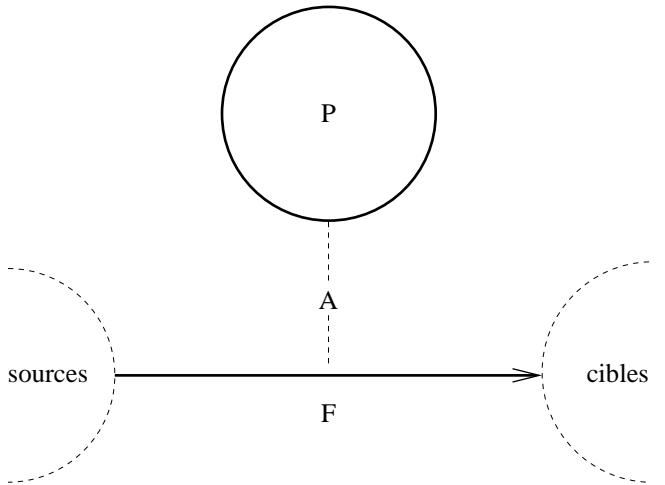
C'est pourquoi nous définissons formellement les notions d'expérience, de milieu, de prédiction, d'action et d'adaptation correspondant à des étapes de modélisation d'un phénomène naturel en un modèle autonomisé vu comme une entité énactive, présentée conceptuellement au chapitre 5, section 5.4, page 104. Nous formaliserons alors l'interaction entre les modèles par une organisation d'entités énactives.

La formalisation des notions précédentes partage une notion commune qui est celle d'objet actif, c'est pourquoi nous nous proposons de commencer par la formalisation des objets actifs.

6.3 Objets actifs

Les objets actifs sont des ensembles structurés, entre lesquels s'organisent des activités (figure 6.1). Ce sont les briques de base permettant de construire dynamiquement une modélisation d'un système complexe, au fur et à mesure des phénomènes modélisés, où chaque objet actif représente un modèle et définit ses interactions avec les autres modèles.

Un objet actif \mathcal{O} est caractérisé par la donnée d'un produit cartésien entre trois ensembles : $\mathcal{P} \times \mathcal{F} \times \mathcal{A}$, sa structure paramétrique (section 6.3.1), sa structure des savoir-faire (section 6.3.2) et sa structure des activités (section 6.3.3). Nous résumons la structure des objets actifs et caractérisons un objet actif nul (section 6.3.4).



Un objet actif \mathcal{O} est caractérisé par trois structures \mathbf{P}, \mathbf{F} et \mathbf{A} . Son ensemble de paramètres \mathbf{P} désigne un domaine de comportement ; il est matérialisé par un cercle en trait plein. Les éléments de \mathbf{P} paramètrent ses savoir-faire (ou rôles) \mathbf{F} , matérialisés par la flèche reliant les domaines de comportement d'objets sources à ceux d'objets cibles. Les activités \mathbf{A} matérialisées par les pointillés correspondent à la mise en œuvre effective de ses savoir-faire.

FIGURE 6.1 : Objet actif : brique élémentaire de modélisation

6.3.1 Structure paramétrique

\mathcal{P} s'appelle la **structure paramétrique** de l'objet.

Cette structure paramétrique doit permettre de spécifier l'objet actif dont on parle en lui donnant un nom identifié par un entier² $n \in \mathbb{N}$, en désignant un nombre $r \in \mathbb{N}$ et la nature de chacun de ses savoir-faire, natures identifiées par une famille F_n de r entiers³ r_{n_1}, \dots, r_{n_r} deux à deux distincts dès que $r > 1$, et en définissant un ensemble \mathcal{P}_n spécifiant un domaine d'évolution pour les variables ou les paramètres du phénomène modélisé :

$$\left| \begin{array}{l} n \in \mathbb{N}, r \in \mathbb{N} \\ \text{si } r > 0, (r_{n_1}, \dots, r_{n_r}) \in \mathbb{N}^r \\ \text{tel que, si } r > 1, \forall i, j, 1 \leq i < j \leq r; r_{n_i} \neq r_{n_j} \\ F_n = \left| \begin{array}{l} \emptyset, \text{ si } r = 0 \\ \{r_{n_1}, \dots, r_{n_r}\}, \text{ sinon} \end{array} \right. \\ acteur = (n, \{F_n\}) \\ \mathcal{P} = \{acteur\} \times \{\mathcal{P}_n\} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

où n est le nom de l'objet actif, r le nombre des natures de ses savoir-faire, F_n une partie de \mathbb{N} de cardinal r que l'on appelle la famille des natures de ses savoir-faire. Ces caractéristiques sont résumées par le couple *acteur* qui est le premier élément de sa structure paramétrique \mathcal{P} , le second élément étant l'ensemble de ses paramètres \mathcal{P}_n , également appelé son domaine d'évolution. $r = 0$ signifie que l'objet n ne possède aucun savoir-faire, auquel cas : $F_n = \emptyset$. Aussi, $\mathcal{P}_n = \emptyset$ signifie que l'objet a un domaine d'évolution vide ; s'il possède des savoir-faire, ceux-ci sont systématiques dans le sens où ils ne dépendent d'aucun paramètre.

Lorsqu'il n'y aura pas de risque de confusion possible, nous utiliserons n à la place de \mathcal{O} pour désigner l'objet actif.

6.3.2 Structure des savoir-faire

\mathcal{F} est la **structure des savoir-faire** de l'objet.

Il contient la famille de rôles qui sont le résultat de la modélisation des savoir-faire, *i.e* : la modélisation de la connaissance de l'objet actif, au sens de l'éaction où toute connaissance est action [Maturana 87].

² Nous choisissons délibérément les entiers pour identifier les noms des objets actifs ou la nature de leurs rôles, car la dénomination de ces caractéristiques proviennent d'actes de modélisation de la part d'êtres humains dont le vocabulaire est fini, et car le nombre de phrases effectivement construites par un individu ou même un ensemble fini d'individus sur ce vocabulaire est toujours fini.

³ *c.f* : note 2

Nous définissons les rôles dans le cas où $F_n \neq \emptyset$ et $\mathcal{P}_n \neq \emptyset$, puis nous examinons les cas particuliers lorsque ces hypothèses ne sont pas vérifiées.

Les rôles d'un objet actif n sont décrits pour chaque nature de savoir-faire ρ dans F_n , par la donnée d'une famille \mathcal{R}^ρ de fonctions f_p^ρ paramétrées par les éléments p de l'ensemble \mathcal{P}_n . Chaque fonction f_p^ρ associe à un élément p_{dom} de son ensemble de définition $\text{Def}_{f_p^\rho}$ qui est une partie non vide de l'ensemble des paramètres de la structure paramétrique d'un objet source dom , au moins un élément p_{cod} de son ensemble des images $\text{Im}_{f_p^\rho}$ qui est une partie non vide de l'ensemble des paramètres de la structure paramétrique d'un objet cible cod .

$$\mathcal{F} = \left\{ \bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho \right\},$$

avec $\mathcal{R}^\rho = \left\{ f_p^\rho : \begin{array}{ccc} \mathcal{P}_{n_{dom_\rho}}^{dom_\rho} & \rightarrow & \mathcal{P}_{n_{cod_\rho}}^{cod_\rho} \\ p_{dom} & \mapsto & p_{cod} = f_p^\rho(p_{dom}) \end{array} / p \in \mathcal{P}, \text{Def}_{f_p^\rho} \neq \emptyset \text{ et } \text{Im}_{f_p^\rho} \neq \emptyset \right\}$ (6.2)

Pour une nature de savoir-faire donnée ρ dans F_n , la famille \mathcal{R}^ρ traduit le savoir-faire de l'objet n qui met en relation l'objet dom_ρ avec l'objet cod_ρ , par l'intermédiaire des éléments de leurs ensembles de paramètres $\mathcal{P}_{n_{dom_\rho}}^{dom_\rho}$, respectivement $\mathcal{P}_{n_{cod_\rho}}^{cod_\rho}$. Ces fonctions ne changent pas les objets actifs eux-mêmes qui conservent la même structure paramétrique, la même structure des savoir-faire et la même structure des activités ; elles ne s'appliquent qu'aux éléments de leurs ensembles de paramètres.

Les remarques suivantes étudient la structure des savoir-faire lorsque la description précédente ne peut s'appliquer ; c'est le cas lorsque certains des ensembles utilisés sont vides.

1. Si $F_n = \emptyset$, l'objet ne possède pas de savoir-faire, sa famille des rôles est vide et sa structure des savoir-faire est réduite à l'ensemble vide : $\mathcal{F} = \{\emptyset\}$.
2. Si $F_n \neq \emptyset$ et si $\mathcal{P}_n = \emptyset$, cela signifie qu'il n'existe qu'un unique rôle f^ρ pour chaque nature $\rho \in F_n$, et l'on obtient :

$$\mathcal{F} = \left\{ \bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho \right\} = \left\{ \bigcup_{\rho \in F_n} \{f^\rho\} \right\}, \text{ avec } f^\rho : \begin{array}{ccc} \mathcal{P}_{n_{dom_\rho}}^{dom_\rho} & \rightarrow & \mathcal{P}_{n_{cod_\rho}}^{cod_\rho} \\ p_{dom} & \mapsto & p_{cod} = f^\rho(p_{dom}) \end{array}$$

Ces fonctions f^ρ doivent en outre vérifier : $\forall \rho \in F_n, \text{Def}_{f^\rho} \neq \emptyset$ et $\text{Im}_{f^\rho} \neq \emptyset$, sinon cette nature de savoir-faire n'a pas de raison d'être vue qu'elle n'est associée à aucun rôle.

3. Le dernier point de l'item précédent s'applique aussi dans le cas où $\mathcal{P}_n \neq \emptyset$, à la différence près suivante : pour qu'une nature ρ de savoir-faire soit acceptable, c'est à dire que la famille \mathcal{R}^ρ soit non vide, il suffit que : $\exists p \in \mathcal{P}_n$ tel que $\text{Def}_{f_p^\rho} \neq \emptyset$ et $\text{Im}_{f_p^\rho} \neq \emptyset$.
4. Aucune nature de savoir-faire ne peut définir une relation entre deux objets actifs dont au moins l'un d'entre eux a un ensemble vide de paramètres.

Si la structure des savoir-faire \mathcal{F} d'un objet actif définit des connaissances en termes d'actions, leurs exécutions sont précisées par le troisième ensemble \mathcal{A} .

6.3.3 Structure des activités

$\mathcal{A} = \{\mathcal{D} \times \mathcal{L}(\mathcal{G})\}$ spécifie la **structure des activités** de l'objet et permet de modéliser la manière dont les activités peuvent se succéder. Il est composé d'une part d'une famille de fonctions \mathcal{D} caractérisant une notion locale de durée d'inhibition suite à une activité (section 6.3.3.1), d'autre part d'un langage des activités potentielles, spécifié par une famille finie de règles de succession d'activités potentielles \mathcal{G} (section 6.3.3.2).

Précisons ce qu'est la structure des activités lorsque l'ensemble des natures des savoir-faire est vide :

$$F_n = \emptyset \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{F} = \{\emptyset\} \\ \mathcal{A} = \{\emptyset \times \emptyset\} = \{\emptyset\} \end{array} \right. \quad (6.3)$$

puisque il n'y a pas de rôle, il n'y a pas d'inhibition d'activité, ni de succession d'activités.

Nous supposerons dans la suite de cette section 6.3.3 que $F_n \neq \emptyset$.

6.3.3.1 Activités et famille des inhibitions d'activité

Pour un objet actif \mathcal{O} , une *activité* de nature $\rho \in F_n$ est l'application effective d'un rôle $f^\rho \in \mathcal{R}^\rho$ sur un élément de $\text{Def}_{f^\rho} \subset \mathcal{P}_{n_{dom^\rho}}^{dom^\rho}$, où dom^ρ est l'objet source correspondant à cette nature de rôle.

Trois conditions préalables à une activité de nature ρ doivent être vérifiées dans le cas où $\mathcal{P}_n \neq \emptyset$:

1. Existence des structures paramétriques des objets source \mathcal{P}^{dom_ρ} et cible \mathcal{P}^{cod_ρ} ,
2. Choix d'un élément p de l'ensemble des paramètres \mathcal{P}_n caractérisant le rôle f_p^ρ ,
3. Choix d'un paramètre source p_{dom} dans l'ensemble de définition de f_p^ρ .

Etant donné une activité $f_p^\rho(p_{dom})$ caractérisée par sa nature ρ , un élément p de \mathcal{P}_n et un élément p_{dom} dans l'ensemble de définition de f_p^ρ , on lui associe une durée d pendant laquelle une activité de même nature ne peut avoir lieu. Nous supposons que d peut s'exprimer comme un multiple d'un quantum de temps \hbar_t propre à l'objet actif \mathcal{O} , i.e : $d = d^* \hbar_t$, avec $d^* \in \mathbb{N}$. Et l'on note \mathcal{D}^ρ la famille de fonctions D_p^ρ qui à l'activité correspondant à $f_p^\rho(p_{dom})$ associe un entier d^* , comme décrit précédemment :

$$\mathcal{D}^\rho = \left\{ D_p^\rho : \begin{array}{c|c} \text{Def}_{f_p^\rho} \subset \mathcal{P}_{n_{dom^\rho}}^{dom^\rho} & \rightarrow \mathbb{N} \\ p_{dom} & \mapsto d^* / p \in \mathcal{P}_n \end{array} \right\} \quad (6.4)$$

Dans le cas où $\mathcal{P}_n = \emptyset$, il existe un unique rôle f^ρ de nature ρ et les conditions préalables à une activité de nature ρ se réduisent à deux points : le premier (existence des structures paramétriques des objets source et cible) et le dernier (choix d'un paramètre source $p_{dom} \in \text{Def}_{f^\rho}$). La famille \mathcal{D}^ρ se réduit au singleton $\{D^\rho\}$:

$$\mathcal{D}^\rho = \left\{ D^\rho : \begin{array}{c|c} \text{Def}_{f^\rho} \subset \mathcal{P}_{n_{dom^\rho}}^{dom^\rho} & \rightarrow \mathbb{N} \\ p_{dom} & \mapsto d^* \end{array} \right\} \quad (6.5)$$

où D^ρ est la fonction qui à l'activité correspondant à $f^\rho(p_{dom})$ associe un entier d^* , correspondant au nombre de quantum de temps propre à l'objet pendant lequel toute activité de même nature est inhibée.

Nous appelons *famille des inhibitions d'activité* \mathcal{D} la réunion des familles \mathcal{D}^ρ . A tout rôle $f \in \mathcal{R}$ tel que $\text{Def}_{(f)} \neq \emptyset$ correspond dans \mathcal{D} sa fonction $D_{(f)} : \text{Def}_{(f)} \rightarrow \mathbb{N}$ caractérisant ses inhibitions d'activité.

$$\left| \begin{array}{l} \mathcal{D} = \bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{D}^\rho \\ \forall f \in \mathcal{R}, \exists D \in \mathcal{D}, D = D_{(f)} : \text{Def}_{(f)} \rightarrow \mathbb{N} \end{array} \right. \quad (6.6)$$

permettant de modéliser le fait que toute activité est suivie d'un temps d'inhibition pendant lequel aucune activité de même nature ne peut s'exécuter au niveau local de l'objet actif.

6.3.3.2 Langage des activités potentielles

Une *activité potentielle* est un ensemble regroupant toute *activité* dont le rôle effectivement joué est de même nature $\rho \in F_n$, c'est à dire toute application effective d'un rôle $f^\rho \in \mathcal{R}^\rho$ à n'importe quel élément de $\text{Def}_{f^\rho} \subset \mathcal{P}_{n_{dom^\rho}}^{dom^\rho}$. Aussi, les activités potentielles d'un objet actif n s'identifient à la famille F_n des natures de ses savoir-faire. L'enchaînement des natures de rôles effectivement joués forme alors une succession d'activités potentielles, qui s'identifie à une succession d'éléments de F_n . Une règle de succession traduit alors un ordre possible pour la nature des rôles effectivement joués par l'objet actif, en définissant des règles contextuelles permettant à partir d'une situation donnée de proposer les prochains rôles jouables par l'objet actif. L'un de ces rôles pourra devenir actif s'il n'est plus inhibé temporellement.

La grammaire des successions d'activités potentielles d'un objet actif est la réunion d'un nombre fini de telles règles, dont le vocabulaire terminal s'identifie à l'ensemble F_n des natures de ses rôles :

$$\mathcal{G} = \left\{ a_m / m \in A, \text{card}(A) < +\infty \right\}, \text{ où } \forall m \in A, a_m : \{F_n \cup N_n\} \rightarrow \{F_n \cup N_n\}^* \quad (6.7)$$

où $a_m : \{F_n \cup N_n\} \rightarrow \{F_n \cup N_n\}^*$ désigne une règle de la grammaire \mathcal{G} , N_n étant un vocabulaire non terminal permettant d'exprimer le plus simplement possible les règles de la grammaire⁴.

⁴ Nous supposons que $\text{card}(N_n)$ est majoré par un nombre fini indépendant de n . Cette hypothèse est non limitative dans la mesure où la construction des grammaires est un acte de modélisation (c.f : note 2, page 120).

Le langage des activités d'un objet actif est donc constitué des phrases générées par la *grammaire des successions d'activités potentielles* \mathcal{G} . On le note $\mathcal{L}(\mathcal{G})$. Une phrase finie de ce langage caractérise un historique des activités effectives qui ont eu lieu au sein de l'objet actif. Aussi, les règles de la grammaire devront pouvoir proposer une famille d'activités potentielles réalisables d'un point de vue formelle, en complément aux inhibitions temporelles.

Lorsque deux objets actifs ne diffèrent que par leurs grammaires et que celles-ci sont équivalentes, *i.e.* : les deux grammaires en question \mathcal{G}_1 et \mathcal{G}_2 génère le même langage : $\mathcal{L}(\mathcal{G}_1) = \mathcal{L}(\mathcal{G}_2)$, on ne distingue pas ces deux objets.

On demande également à la grammaire \mathcal{G} de générer un langage $\mathcal{L}(\mathcal{G})$ qui permet d'utiliser au moins une fois chaque savoir-faire de l'objet actif ; c'est une question de bon sens.

$$\forall \rho \in F_n, \exists \text{phrase} \in \mathcal{L}(\mathcal{G}), \text{ telle que : } \{\rho\} \subset \text{phrase} \quad (6.8)$$

Si cette propriété n'est pas vérifiée pour un savoir-faire $\rho \in F_n$, ce savoir-faire n'a pas de raison d'être.

Nous retiendrons, lors de la modélisation des phénomènes naturels, que cette grammaire est à concevoir comme un moyen de caractériser ce qui est interdit (les phrases qui n'appartiennent pas au langage), plutôt que comme ce qui est possible.

6.3.4 Briques élémentaires du modèle formel

Ainsi, nous avons défini la structure d'un objet actif \mathcal{O} , constituant une brique de base pour la modélisation d'une organisation énactive, comme la donnée d'un produit cartésien entre trois ensembles $\mathcal{O} = \mathcal{P} \times \mathcal{F} \times \mathcal{A}$.

1. $\mathcal{P} = \{\{(n, \{F_n\})\} \times \{\mathcal{P}_n\}\}$ est sa structure paramétrique permettant de nommer (n), de quantifier et qualifier les natures de ses savoir-faire (F_n), et de fournir un domaine d'évolution possible pour ses caractéristiques internes (\mathcal{P}_n),
2. $\mathcal{F} = \{\mathcal{R}\} = \{\bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho\}$ est sa structure des savoir-faire, fournissant une définition des interactions entre cet objet et les autres ou lui-même par la donnée d'une famille de rôles \mathcal{R} dont les sources et les cibles sont des éléments de domaines d'évolution (aussi appelés ensembles de paramètres des objets).
3. $\mathcal{A} = \{\mathcal{D} \times \mathcal{G}\}$ est sa structure des activités, décrivant les durées d'inhibition suivant toute activité et caractérisant les ordres possibles dans la succession de ses activités.

Si l'ensemble des paramètres \mathcal{P}_n est non vide, la donnée d'un élément de \mathcal{P}_n caractérise un unique rôle de \mathcal{R} par savoir-faire dans F_n . Un rôle peut s'appliquer effectivement, dès qu'on lui donne un élément source dans son ensemble de définition et que l'histoire des activités le permet. La structure des activités \mathcal{A} contrôle l'histoire des activités selon chaque savoir-faire de deux manières distinctes. La première, temporelle, inhibe pendant un certain laps de temps toute activité de même nature que celle qui vient de s'exécuter ; ces durées d'inhibitions sont caractérisées par \mathcal{D} pour chaque rôle et pour chaque élément transformable par ce rôle. La seconde, formelle, demande à l'enchaînement des savoir-faire d'exprimer des phrases respectant la grammaire \mathcal{G} d'un langage des savoir-faire.

Dans une collection d'objets actifs où l'on aurait donné un élément de chaque ensemble non vide de paramètres. Chaque objet actif cherche à appliquer ses rôles en examinant si les éléments de ses objets sources sont bien dans son ensemble de définition, tout en respectant sa structure des activités. Lorsque l'on examine une famille d'éléments dans chaque objet actif, la description précédente s'applique à chacun des éléments de chacun des objets.

Il existe un objet actif particulier désigné par $n = 0$ que l'on appelle *objet nul* et que l'on note \mathcal{O}^0 , dont la structure paramétrique \mathcal{P}^0 est donnée par aucune nature des savoir-faire $F_0 = \emptyset$ et un ensemble de paramètres réduit à l'ensemble vide $\mathcal{P}_0^0 = \emptyset$:

$$\mathcal{P}^0 = \{(0, \{\emptyset\})\} \times \{\emptyset\} \quad (6.9)$$

Sa structure des savoir-faire \mathcal{F}^0 et sa structure des activités \mathcal{A}^0 sont donc réduites à l'élément vide :

$$\mathcal{F}^0 = \mathcal{A}^0 = \{\emptyset\} \quad (6.10)$$

En résumé, l'objet nul \mathcal{O}^0 est le plus simple des objets actifs :

$$\mathcal{O}^0 = \mathcal{P}^0 \times \mathcal{F}^0 \times \mathcal{A}^0 = (\{(0, \{\emptyset\})\} \times \{\emptyset\}) \times \{\emptyset\} \times \{\emptyset\} \quad (6.11)$$

et il ne sait rien faire.

Dans la suite de ce chapitre, nous n'utilisons que trois types d'objets actifs (section 6.4) s'organisant de manière très spécifique sous la forme d'entités autonomes en énaction (section 6.5). Dans le cadre de ce mémoire, nous n'avons pas besoin d'étudier de manière générale les organisations quelconques d'objets actifs, ni de caractériser la notion de morphismes entre ces objets comme leur création, leur destruction ou leur transformation, afin de nous placer complètement dans le domaine de la théorie des catégories. Cela pourra faire l'objet d'études ultérieures, et sera certainement très utile pour formaliser des notions d'évolution structurelle d'entités comme l'ontogénèse (évolution structurelle d'une entité) [Kodjabachian et Meyer 98] ou la phylogénèse (évolution structurelle d'une espèce) [Cliff et al. 93], ou encore pour classer les organisations énactives par rapport aux autres types de modélisations pour la simulation de phénomènes naturels et obtenir des preuves formelles sur certaines de leurs compétences.

6.4 Trois types d'objets actifs

Nous définissons trois types d'objets actifs selon leur utilisation dans la modélisation des phénomènes naturels : le type prédition, le type action et le type adaptation, correspondants à une formalisation des trois concepts définis à la section 5.4 du chapitre précédent sur lesquels est fondée notre approche des systèmes complexes énactifs.

1. Le type **prédition** est utilisé pour construire la structure topologique du milieu, médiateur des interactions. La réflexion à mener pour modéliser une *prédition* est une étape de l'*autonomisation du modèle* représentant le phénomène naturel. Elle consiste à le doter d'une *perception active*.
2. Le type **action** est plus classique : il s'agit de la modélisation des effets du phénomène naturel sur son milieu environnant en fonction de caractéristiques internes au modèle de ce phénomène. Il convient notamment de localiser le phénomène, de définir son voisinage d'influence et les propriétés du milieu mises en cause.
3. Le type **adaptation** définit la manière dont les caractéristiques internes au modèle du phénomène naturel sont modifiées par l'environnement et quoi faire si cette évolution fait sortir le modèle de son domaine de validité. C'est également une étape de l'*autonomisation du modèle*.

Chacun de ces trois types d'objet actif est caractérisé par son ensemble de paramètres, les domaines et codomains de ses savoir-faire, *i.e.* les types des objets dont les ensembles de paramètres sont la source et la cible de ses rôles et leur structure des activités. Nous définissons alors successivement les types de paramètres (section 6.4.1), puis les savoir-faire (section 6.4.2) et leurs activités permettant de formaliser ces trois types d'objets actifs (section 6.4.3).

6.4.1 Champ expérimental, milieux et phénomènes

Cette section étudie les différents types d'ensembles de paramètres que nous utilisons pour définir les objets actifs nécessaires à notre formalisation d'entités autonomes représentant un système multi-modèles en énaction. Tout d'abord, nous utilisons la notion mathématique d'*espace topologique* pour modéliser la localisation des phénomènes et caractériser formellement la structure de l'espace-temps commun à tous les modèles du système, cette structure spatio-temporelle servant alors de cadre aux *expériences* des modèles (section 6.4.1.1). Puis, nous considérons des ensembles de paramètres du type milieu (section 6.4.1.2) et du type phénomène (section 6.4.1.3).

6.4.1.1 Topologie et expériences

Le choix d'un espace topologique va permettre de reconstituer artificiellement au sein du modèle la structure de l'espace-temps, afin d'y localiser les phénomènes modélisés. Aux points de cet espace seront associées des propriétés nécessaires aux expériences à réaliser par les modèles des phénomènes.

A. Structure topologique de l'espace-temps : « où et quand »

Mathématiquement, un espace topologique est un ensemble \mathcal{E} muni d'une structure topologique, c'est à dire que l'on a spécifié une famille de parties de cet ensemble que l'on appelle des ouverts ; cette famille, contenant l'ensemble vide et \mathcal{E} , doit être stable par union quelconque et par intersection finie. Etant donné un espace topologique, on appelle voisinage d'un point toute partie de l'ensemble qui contient le point et un ouvert contenant le point.

Les espaces topologiques peuvent posséder des propriétés intéressantes d'un point de vue algorithmique, comme c'est le cas, par exemple, des espaces quasi-compacts, des espaces séparés, des espaces métriques ou des espaces de Baire.

- On dit qu'un espace est *quasi-compact* s'il vérifie la propriété de Borel-Lebesgue : de tout recouvrement ouvert, on peut extraire un sous-recouvrement fini.
- On dit qu'un espace est *séparé* ou de Hausdorff lorsque deux points quelconques admettent des voisinages disjoints.
- On dit qu'un espace est *métrique*, si l'on peut le munir d'une distance⁵. Cette distance permet alors de caractériser les ouverts comme toute partie contenant une boule ouverte centrée en chacun de ses points.
- Un espace topologique est dit *de Baire* si toute intersection dénombrable d'ouverts denses est dense. Cette propriété permet d'assurer à une méthode numérique que tous les points de l'espace topologique sont accessibles par ladite méthode. C'est par exemple le cas de la droite réelle muni des intervalles ouverts pour laquelle cette propriété assure la densité de \mathbb{Q} dans \mathbb{R} : autrement dit, on peut approcher n'importe quel nombre réel $x \in \mathbb{R}$ par une suite de nombres rationnels $(r_n) \in \mathbb{Q}^{\mathbb{N}}$.

Il existe de nombreuses autres classes d'espaces topologiques (espaces vectoriels normés, espace de Banach, compacts, complets, connexes, localement compacts, localement connexes...), chacun d'eux possédant des propriétés permettant d'y manipuler les voisinages plus ou moins facilement. L'espace topologique le plus simple est l'ensemble vide \emptyset , muni de la famille $\{\emptyset\}$. On l'appelle espace tautologique.

Ainsi, on choisira l'espace topologique $\mathcal{T}op$ en fonction des besoins spatio-temporels de la modélisation, tout en gardant à l'esprit que les calculs des interactions entre les modèles demanderont de résoudre des calculs d'intersections de voisinages dans cet espace topologique $\mathcal{T}op$. Ce choix correspond à une solution retenue aux questions : « où et quand ? ». La remise en cause de cet espace topologique demandera de réviser l'ensemble de toute la modélisation.

B. Propriétés expérimentables et expériences : « quoi et comment »

Un phénomène naturel est caractérisé par ses actions sur son environnement. Ces actions sont observables par la mesure d'un ensemble de propriétés dans l'environnement, chaque propriété étant associée à une notion sémantique dans la description du phénomène naturel. La mesure d'une propriété appartient à un ensemble caractéristique de cette propriété qui peut être, par exemple, un nombre (booléen, entier, réel...), un vecteur, une liste..., bref n'importe quelle structure permettant de quantifier la notion sémantique associée à cette propriété.

Lors de la modélisation d'un système complexe, on retiendra certaines de ces propriétés que l'on appellera *propriétés expérimentables* par le système, chacune d'elle étant associée à un nom *prop*, à la

⁵ Une distance étant une application $d : \mathcal{E} \times \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{R}^+$ vérifiant les propriétés de symétrie : $\forall (a, b), d(a, b) = d(b, a)$, de séparation $d(a, b) = 0 \iff a = b$ et l'inégalité triangulaire $\forall (a, b, c), d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$

liste \mathcal{L}_{prop} des savoir-faire⁶ d'objets actifs influençant ou utilisant cette propriété, et à un ensemble structuré \mathcal{M}_{prop} , dit ensemble des mesures expérimentales dont les éléments quantifient des mesures de cette propriété. L'ensemble \mathcal{M}_{prop} des mesures de la propriété contient au minimum l'élément vide \emptyset , caractérisant l'absence de mesure pour la propriété en question ou l'absence d'estime de cette propriété.

$$\left| \begin{array}{l} \text{Si } N = 0, \mathcal{P}rop = \emptyset \\ \text{Si } N > 0, \mathcal{P}rop = \{(prop_1, \mathcal{L}_{prop_1}, \mathcal{M}_{prop_1}), \dots, (prop_N, \mathcal{L}_{prop_N}, \mathcal{M}_{prop_N})\} \\ \text{avec } \forall l, 0 < l \leq N, \emptyset \in \mathcal{M}_{prop_l} \end{array} \right. \quad (6.12)$$

où $N \in \mathbb{N}$ est le nombre de propriétés expérimentables modélisées dans le système. On pourra alors construire, de manière itérative une famille de propriétés expérimentables $\mathcal{P}rop$ en ajoutant une nouvelle propriété à cette famille ou de nouveaux savoir-faire dans la liste des N propriétés expérimentables déjà existante.

Une fois qu'une *propriété expérimentable* est caractérisée, il faut spécifier comment réaliser une mesure, car si la liste des savoir-faire \mathcal{L}_{prop} donne une information nécessaire, elle n'est pas suffisante pour caractériser le protocole expérimental, notamment si les rôles associés à ces savoir-faire se composent de manière non commutative. Avant de préciser comment est obtenu l'ordre dans lequel les rôles influents vont s'appliquer (section 6.5.2), nous aurons besoin d'utiliser la notion de *protocole expérimental* dans notre formalisation sous la forme d'une suite finie de rôles d'un des types de \mathcal{L}_{prop} , soit comme l'élément vide.

On appelle un *protocole expérimental* d'une propriété $prop$, soit l'ensemble vide \emptyset , soit une fonction Λ dont l'ensemble de définition est du type $\llbracket 1, n \rrbracket$, avec $n \in \mathbb{N}^*$, vers la famille de tous les rôles dont les natures sont dans la liste des savoir-faire \mathcal{L}_{prop} , une telle fonction spécifiant alors une liste finie et ordonnée de rôles agissant sur la propriété $prop$ pour établir la mesure dans \mathcal{M}_{prop} . Pour avancer dans un *protocole* non réduit à l'élément vide, on exécute le premier rôle et on l'élimine du protocole et l'on décrémente la numérotation des rôles restants. Le *protocole* \emptyset caractérise le fait que l'expérience mesurant $prop$ est terminée.

$$\left| \begin{array}{l} \Lambda \text{ est un protocole pour } prop \\ \Updownarrow \\ \Lambda = \emptyset \\ \text{ou} \\ \exists n \in \mathbb{N}^*, \Lambda : \llbracket 1 \dots n \rrbracket \rightarrow \{f \text{ rôle modélisé} / \exists \rho \in \mathcal{L}_{prop}, \text{nature}_{(f)} = \rho\} \end{array} \right. \quad (6.13)$$

Si $\Lambda \neq \emptyset$, on désigne par $\text{Longueur}(\Lambda)$ l'entier $n > 0$ (c'est la longueur de la suite finie). Et l'on convient que $\text{Longueur}(\emptyset) = 0$.

La réunion de tous les protocoles expérimentaux d'une propriété $prop$ forme un ensemble que l'on appelle l'ensemble des protocoles expérimentaux de $prop$; on le note Ξ_{prop} .

$$\Xi_{prop} = \bigcup_{\Lambda \text{ protocole de } prop} \{\Lambda\} \quad (6.14)$$

On appelle *expérience élémentaire*, en un point M de l'espace topologique $\mathcal{T}op$, la donnée en ce point du nom $prop$, de la liste \mathcal{L}_{prop} des savoir-faire d'une propriété expérimentable de $\mathcal{P}rop$ ainsi que de l'ensemble Ξ_{prop} des protocoles expérimentaux associés à la mesure de cette propriété.

$$e = (prop, \mathcal{L}_{prop}, \Xi_{prop}) \quad (6.15)$$

où l'expérience élémentaire est notée e .

Par la suite, on utilisera les notations suivantes :

- $prop^e$ pour le nom de la propriété de e .
- \mathcal{L}^e pour la liste des savoir-faire de e .
- Ξ^e pour l'ensemble des protocoles associés à e .

On appelle *expérience*, en un point M de l'espace topologique, la donnée en ce même point M , d'une famille d'expériences élémentaires deux à deux distinctes.

$$E = \{e_{n_1}, \dots, e_{n_K}\} = \{(prop^{e_{n_1}}, \mathcal{L}^{e_{n_1}}, \Xi^{e_{n_1}}), \dots, (prop^{e_{n_K}}, \mathcal{L}^{e_{n_K}}, \Xi^{e_{n_K}})\} \quad (6.16)$$

⁶ Presque tous ces savoir-faire seront du type *praxis* tel que nous le définirons à la section 6.4.2.2.

où l'expérience est noté E , avec $\forall k, l, 1 \leq k < l \leq K, n_k \neq n_l$.

Si $K = N$, avec N le nombre de toutes les propriétés modélisées, on obtient l'expérience \bar{E} associée à toutes les propriétés expérimentables du système :

$$\bar{E} = \{e_1, \dots, e_N\} = \{(prop^{e_1}, \mathcal{L}^{e_1}, \Xi^{e_1}), \dots, (prop^{e_N}, \mathcal{L}^{e_N}, \Xi^{e_N})\} \quad (6.17)$$

Lorsque l'espace topologie est l'ensemble vide, les notions de propriété expérimentable et d'expérience perdent leur sens.

Ainsi, les *propriétés expérimentables* par le système sont des structures résultant de la modélisation de l'action des phénomènes naturels sur leur environnement commun. Une *expérience* est une famille de *propriétés expérimentables* dont on souhaite une mesure en un point de la topologie ; une *expérience* ne précise que les noms des *propriétés* (« *quoi ?* »), les *listes des savoir-faire* d'objets actifs agissant sur les mesures de ces propriétés et les *ensembles des protocoles* permettant de réaliser des mesures (« *comment ?* »). L'ajout d'une nouvelle *propriété expérimentable* ne demande de remettre en cause ni les *propriétés*, ni les *expériences* déjà existantes.

En associant en tout point de l'espace topologique Top , l'expérience \bar{E} dont la famille comprend toutes les *expériences élémentaires* disponibles dans le modèle, c'est à dire l'ensemble des noms de toutes les *propriétés expérimentables* et de leurs actions influentes associées, on obtient un ensemble $Top \times \bar{E}$, noté $Top_{\bar{E}}$, que l'on appelle le *champ expérimental de la modélisation*.

$$Top_{\bar{E}} = Top \times \bar{E} \quad (6.18)$$

Un élément de $Top_{\bar{E}}$ est une expérience élémentaire $e = (prop^e, \mathcal{L}^e, \Xi^e) \in \bar{E}$, en un point $M \in Top$; on le note M_e et l'on dit que M_e est un *point expérimental*.

Ainsi, le champ expérimental $Top_{\bar{E}}$ est la partie la plus abstraite de la formalisation du milieu en tant qu'ensemble, en réponse aux questions « *où, quand, quoi et comment ?* » de la modélisation du médiateur des interactions. Le *champ expérimental* est constitué de *points expérimentaux* caractérisant une *propriété expérimentable* en un point de l'espace topologique. La modélisation est entièrement dépendante du choix de l'espace topologique, tandis que de nouvelles propriétés et les expériences correspondantes ne remettent pas en cause la modélisation déjà existante.

6.4.1.2 Milieux, prévisions, expérimentations

Le *milieu* désigne un ensemble de paramètres commun, à des notions de classes d'équivalence près, aux objets des types *adaptation* et *prédiction*. Il est soit vide dans le cas d'une topologie tautologique ($Top = \emptyset$), soit constitué de *balises expérimentales* qui sont des familles de couples formés :

- d'une part d'un point expérimental M_e du champ expérimental de la modélisation $Top_{\bar{E}}$ localisant une expérience élémentaire $e = (prop^e, \mathcal{L}^e, \Xi^e)$ en un point M de l'espace topologique,
- d'autre part d'un triplet : (protocole, propriétés prévues, propriétés expérimentées) : $(\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e}) \in \Xi^e \times \mathcal{M}^e \times \mathcal{M}^e$, où Ξ^e est l'ensemble des protocoles expérimentaux associés à l'expérience élémentaire e , et \mathcal{M}^e est l'ensemble des mesures de la propriété *prop* caractérisée par cette expérience élémentaire e (voir l'équation 6.12),

couples tels que, pour une *balise expérimentale* donnée $Top_{\bar{E}}$ dans le milieu et caractérisée par une partie non vide Top de l'espace topologique Top et une expérience E en les points de Top , les expériences élémentaires e soient toutes dans la même expérience E et les points M soient tous dans la partie Top de l'espace. Autrement dit, une balise expérimentale $Top_{\bar{E}}$ est définie par :

$$Top_{\bar{E}} = \bigcup_{M_e \in (Top \times E) \subset Top_{\bar{E}}} (M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})) \quad (6.19)$$

où $(\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e}) \in \Xi^e \times \mathcal{M}^e \times \mathcal{M}^e$.

Dans cette équation 6.19 caractérisant une balise expérimentale, $m_{pre}^{M_e}$ est une *mesure prévue* de la propriété du milieu, prévision réalisée par l'entité qui aura généré cette balise, $m_{exp}^{M_e}$ est une *mesure*

expérimentée de la propriété du milieu, *i.e.* un résultat, éventuellement intermédiaire, de l'expérience élémentaire e et Λ^{M_e} est un *protocole expérimental* associé à l'expérience élémentaire e au point M permettant de savoir ce qu'il reste à faire à partir de la mesure expérimentée $m_{exp}^{M_e}$ de la propriété pour finir l'expérience.

Chaque application effective d'un de ces rôles (due à l'activité correspondante) s'enlève de la liste Λ^{M_e} en même temps qu'il participe à la mesure expérimentée de la propriété en modifiant $m_{exp}^{M_e}$. Lorsque la liste est vide $\Lambda^{M_e} = \{\}$, on dit que la mesure $m_{exp}^{M_e}$ est complète, sinon elle est dite partielle.

Dans un triplet $(\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})$, pour lequel le protocole expérimental n'a pas encore commencé : la mesure $m_{exp}^{M_e}$ ne correspondant à rien ; il sera préférable d'utiliser l'élément vide \emptyset de \mathcal{M}^e pour caractériser le fait que le protocole n'a pas commencé : $(\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, \emptyset)$. Cet élément vide sera également utilisé, en posant $m_{pre}^{M_e} = \emptyset$, lorsque l'entité ne dispose d'aucune prévision pour estimer la mesure de la propriété recherchée.

Le *milieu* est alors défini comme la réunion de toutes les balises expérimentales constructibles sur le champ expérimental :

$$milieu = \bigcup_{\substack{(Top \times E) \subset Top_{\bar{E}} \\ \forall e \in E, (\Xi^e \times \mathcal{M}^e \times \mathcal{M}^e)^{Top}}} Top_{\bar{E}} \quad (6.20)$$

où $Top_{\bar{E}}$ est une balise caractérisée par l'élément choisi dans $\Xi^e \times \mathcal{M}^e \times \mathcal{M}^e$ pour chaque expérience e de E et chaque point M de Top .

Nous caractérisons maintenant d'une part la notion de milieu “terminal” en allant chercher les éléments des balises elles-mêmes, d'autre part, nous regroupons au contraire ces balises par classes d'équivalences selon des différences sur le protocole, les mesures prévues ou expérimentées de leurs propriétés ou selon la topologie et les expériences. Nous commençons par définir le *milieu terminal*, puis, pour une partie non vide donnée du champ expérimental $(Top \times E) \subset Top_{\bar{E}}$, nous distinguons trois types de classes de balises dans le milieu : les classes des *prévisions*, les classes des *expérimentations* et les classes des *zones expérimentales*.

1. Milieu terminal.

Dans la catégorie des ensembles $\mathcal{E}ns$, les éléments terminaux sont les singltons. Jusque là, nous avons défini les éléments du milieu par les balises, mais les balises ne sont pas toutes des éléments terminaux, il faudrait pour cela que la partie Top de l'espace topologie et l'expérience E soient tous les deux des singltons ; c'est le cas lorsque la balise est supportée par un unique point expérimental. Nous définissons donc le *milieu terminal* comme suit :

$$milieu_{terminal} = \left\{ (M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})) / \left\{ \begin{array}{l} M_e \in Top_{\bar{E}} \\ (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e}) \in \Xi^e \times \mathcal{M}^e \times \mathcal{M}^e \end{array} \right\} \right\} \quad (6.21)$$

qui est une définition du milieu comme une réunion explicite d'éléments terminaux. Cette notion de *milieu terminal* nous sera utile pour définir les savoir-faire du type *praxis* (section 6.4.2.2).

2. Les classes du type prévision, $Top_{\bar{E}}:prev$.

Ces classes sont des parties du milieu qui sont les éléments de l'ensemble des paramètres des objets actifs du type *adaptation*. Une telle classe est déterminée par une *prévision* du résultat de l'expérience E sur Top , c'est à dire la donnée d'une mesure prévue $prev_{M_e} \in \mathcal{M}^e$ pour chaque point expérimental $M_e \in Top \times E$. Une balise $Top_{\bar{E}}$ appartient à cette classe si et seulement si pour chaque point expérimental $M_e \in Top \times E$, sa mesure prévue $m_{pre}^{M_e}$ vaut $prev_{M_e}$:

$$prev = \bigcup_{M_e \in Top \times E} prev_{M_e} , \quad \text{où} \quad prev_{M_e} \in \mathcal{M}^e \quad (6.22)$$

$$Top_{\bar{E}}:prev = \left\{ Top_{\bar{E}} / \forall (M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})) \in Top_{\bar{E}}, m_{pre}^{M_e} = prev_{M_e} \right\} \quad (6.23)$$

Une telle classe de balises $Top_{\bar{E}}:prev$ permet de caractériser une partie du milieu comme un unique élément de l'ensemble des paramètres d'un objet du type *adaptation* ; cette partie du

milieu regroupe toutes les balises qui ne diffèrent que par leur protocole expérimental ou par leurs propriétés expérimentées. Une réunion de telles classes forme alors un ensemble d'un type que l'on appelle *milieux-prévisions*.

3. Les classes du type expérimentation, $Top_E:expé$.

Ce sont les parties du milieu spécifiant les éléments de l'ensemble des paramètres des objets actifs du type *prédition*. Une classe de ce type est déterminée par un *état de l'expérimentation* en chacun des points expérimentaux. Un état de l'expérimentation est la donnée, pour chaque expérience élémentaire $e \in E$ et en chaque point $M \in Top$, d'un couple, noté $expé_M_e$, formé d'un protocole $\Lambda^{M_e} \in \Xi^e$ et d'une mesure $m_{exp}^{M_e} \in \mathcal{M}^e$ en M de la propriété *prop* associé à e . Une balise Top_E appartient à cette classe si et seulement si pour chaque point expérimental $M_e \in Top \times E$, le couple formé par le protocole et la mesure expérimentée vaut $expé_{M_e}$:

$$expé = \bigcup_{M_e \in Top \times E} expé_{M_e} , \text{ où } expé_{M_e} \in \Xi^e \times \mathcal{M}^e \quad (6.24)$$

$$Top_E:expé = \left\{ Top_E / \forall (M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})) \in Top_E, (\Lambda^{M_e}, m_{exp}^{M_e}) = expé_{M_e} \right\} \quad (6.25)$$

Une telle classe de balises $Top_E:expé$ permet de caractériser une partie du milieu comme un unique élément de l'ensemble des paramètres d'un objet du type *prédition*; cette partie du milieu regroupe toutes les balises qui ne diffèrent que par les propriétés prévues et s'appelle un *milieu-expérimentation*.

Une famille formée par la réunion de classes du type *milieu-expérimentation* est un ensemble d'un type que l'on appelle *milieux-expérimentation*.

4. Les classes du type zone expérimentale.

Ce sont les parties du milieu regroupant les balises Top_E dont la partie Top de l'espace topologique est dans une famille donnée \mathcal{Z} de parties de Top et la famille des expériences E est une expérience donnée $E_{\mathcal{Z}}$, quels que soient le protocole, les mesures prévues et les mesures expérimentées.

$$\mathcal{Z}_{E_{\mathcal{Z}}} = \left\{ Top_E / Top \in \mathcal{Z} \text{ et } E = E_{\mathcal{Z}} \right\} \quad (6.26)$$

où $E_{\mathcal{Z}} \subset \bar{E}$ et \mathcal{Z} est, par exemple, la famille des bi-points, celle des triangles ...

Ainsi, nous avons défini le *milieu* comme la réunion des *balises expérimentales*. Ces dernières sont caractérisées par l'association de *points expérimentaux* du champ expérimental à des triplets constitués d'un *protocole*, de *mesures estimées* des propriétés de ces points, et de *mesures expérimentées* de ces propriétés. Puis nous avons défini la notion de *milieu terminal* et trois types de classes d'équivalence entre les éléments du milieu. Les deux premiers types de classe distinguent les balises concernées par la même partie du champ expérimental : les classes des *prévisions* et les classes des *expérimentations*. Le troisième type désigne des classes que l'on appelle des *zones expérimentales*. Une *zone expérimentale* regroupe les balises partageant une même famille de géométries dans l'espace topologique et une même famille d'expériences élémentaires.

Les deux premières classes de balises seront les parties du milieu spécifiant les éléments des ensembles des paramètres des objets actifs du type *prédition* pour les classes des *expérimentations* et du type *adaptation* pour les classes des *prévisions*.

Les *zones expérimentales* permettront de relier les *savoir-faire* des objets actifs du type *prédition* avec ceux des objets actifs du type *adaptation*, lorsqu'ils partagent une même *zone expérimentale*.

6.4.1.3 Phénomène

Ce que nous appelons *phénomène*, au sens formel, est l'ensemble non vide des paramètres des objets actifs du type *action* : le *phénomène* paramètre les *rôles* de l'*action*.

La modélisation du phénomène naturel doit définir la partie du champ expérimental concernée par le modèle du phénomène. L'ensemble de paramètres \mathcal{P} que l'on appelle *phénomène* doit permettre

de localiser le modèle d'action du phénomène dans le champ expérimental. Pour cela, il est constitué au minimum d'un point M de \mathcal{Top} que l'on appelle la *position* du modèle du phénomène et d'un r -uplet de voisinages \mathcal{V}^r de \mathcal{Top} , avec r égale le nombre de savoir-faire définissant la nature de rôles qui sont des endomorphismes⁷ du *milieu terminal*⁸; ce r -uplet s'appelle la *zone active* du *phénomène*. Aussi, la plupart du temps, le modèle d'action d'un phénomène naturel dépend de propriétés mesurées dans le milieu. Une partie de l'ensemble de paramètres : *phénomène*, sera alors utilisé pour mémoriser à court terme ces informations sensorielles directement issues de mesures expérimentales ; on appelle cette partie la *zone sensorielle*.

Nous choisissons de définir l'ensemble *phénomène* par la donnée d'un produit cartésien formant un couple (*localisation de l'action*, *représentation interne*), comme précisé ci-après.

$$\mathcal{P} = \mathcal{L} \times \mathcal{I} \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L} = \left\{ (M, \mathcal{Z}_{active}) / \left\{ \begin{array}{l} M \text{ point de } \mathcal{Top} \\ \mathcal{Z}_{active} r\text{-uplet de voisinages de } \mathcal{Top} \end{array} \right\} \right\} \\ \mathcal{I} \supset \mathcal{Z}_{sens} \end{array} \right\} \quad (6.27)$$

où r est le nombre de savoir-faire associés à des rôles dont le domaine et le codomaine sont le *milieu terminal*, et \mathcal{I} est un ensemble structuré caractérisant une représentation interne de l'environnement, contenant notamment une zone sensorielle \mathcal{Z}_{sens} .

L'autonomisation du modèle passe souvent par une représentation interne de l'environnement, et l'ensemble *phénomène* tâche de spécifier au mieux la représentation interne de cet environnement. Par exemple, il peut contenir une estimation des propriétés expérimentables auxquelles le modèle du phénomène naturel est sensible, en constituant l'estime à partir des dernières mesures réalisées et mémorisé dans la zone sensorielle. Une stratégie d'expérimentation associée à la représentation interne de l'environnement et à la construction de l'estime peut alors être modélisée, et les paramètres de cette stratégie seront disponibles dans l'ensemble *phénomène*. Notre modèle possède alors des capacités cognitives caractérisées dans l'ensemble *phénomène*. Dans le cas d'une modélisation de la physique du système naturel, il peut paraître étonnant de vouloir donner des capacités cognitives à un phénomène physique, mais n'oublions pas que le modèle du phénomène n'est pas le phénomène lui-même. Ces capacités cognitives pourrons s'avérer extrêmement efficaces d'un point de vue pragmatique pour l'instrumentation, sans nuire à l'exactitude théorique de la représentation des phénomènes physiques par le modèle : il ne s'agit pas, par exemple, d'accepter ou de réfuter une idée comme "la mémoire de l'eau" [Davenas et al. 88], mais de faire l'hypothèse qu'un modèle de l'eau puisse utiliser de la mémoire pour en faciliter sa simulation.

Ainsi, lors de la modélisation de l'ensemble *phénomène* des paramètres d'une action, les paramètres devront donner les moyens de localiser les rôles de l'action dans l'espace topologique. Aussi, l'autonomisation du modèle d'action passe par une réflexion sur un moyen pertinent de représenter en interne le milieu environnant, l'ensemble *phénomène* devant alors contenir les paramètres descriptifs d'une telle représentation et d'une stratégie d'estime associée.

Maintenant que nous avons défini les différents types d'ensembles — *milieux-prévisions*, *milieux-expérimentation* et *phénomène* — nous pouvons parler des types de savoir-faire mettant en relation ces trois types d'ensembles.

6.4.2 Aisthesis, praxis et poiesis

Cette section étudie les différents types de savoir-faire, permettant de définir les rôles des objets actifs nécessaires à notre formalisation d'entités autonomes représentant un système multi-modèles en énaction. La définition des différents types de savoir-faire ne dépend que des domaines (la source) et des codomaines (la cible) des rôles associés à ces savoir-faire, selon que ces domaines ou codomaines sont des ensembles de paramètres du type *milieux-prévisions*, *milieux-expérimentation* ou *phénomène*.

⁷ Le morphisme étant une application au sens de la petite catégorie \mathcal{Ens} .

⁸ Nous verrons dans la section 6.4.3.2 que ces savoir-faire de l'*action* sont dit du type *praxis*.

Dans la suite de cette section 6.4.2, nous désignons par $\mathcal{O} = \mathcal{P} \times \mathcal{F} \times \mathcal{A}$ un objet actif possèdant au moins un savoir-faire, nous considérons un rôle $f \in \mathcal{R}$, $\mathcal{R} \in \mathcal{F}$:

$$f : \begin{array}{ccc} \mathcal{P}_{n_{dom}}^{dom} & \rightarrow & \mathcal{P}_{n_{cod}}^{cod} \\ p_{dom} & \mapsto & p_{cod} = f(p_{dom}) \end{array} \quad (6.28)$$

et nous supposerons que $\text{Def}_{(f)} \neq \emptyset$.

Nous distinguons trois types de savoir-faire : l'*aisthesis*, la *praxis* et la *poiesis*. Le choix de ces termes empreintés aux sciences humaines peut paraître surprenant dans un modèle formel. Il sont là pour rappeler au modélisateur que ces rôles ne sont pas à attribuer au phénomène naturel lui-même, mais à des idées anthropomorphiques forcément présentes dans tout modèle d'un phénomène naturel. Ces rôles traduisent les intentions du modélisateur vis à vis du modèle proposé pour le phénomène naturel.

6.4.2.1 Aisthesis

L'*aisthesis*⁹ est le savoir-faire type des objets actifs du type *prédition*. Le rôle f répond à la nature *aisthesis* si les deux points suivants sont vérifiés :

1. L'ensemble source ou domaine de f est un ensemble de paramètres du type *phénomène* d'un objet actif du type *action*.
2. L'ensemble cible ou codomaine de f est une famille de *balises expérimentales* telles que la réunion des classes du type *milieu-prévision* dont elles sont des représentants s'identifie à un ensemble de paramètres du type *milieux-prévisions* d'un objet actif du type *adaptation*. De plus, tout élément du *phénomène* admet au plus une image par f .

Ces deux propriétés peuvent se résumer par la formule suivante :

$$\text{type}_{\text{nature}}(f) = \text{aisthesis} \iff \begin{cases} \mathcal{P}_{n_{dom}}^{dom} \text{ est du type } \text{phénomène} \\ \forall p_{dom} \in \text{Def}_{(f)}, f(p_{dom}) = \text{Top}_{\mathbf{E}} \\ \text{avec } \text{Top}_{\mathbf{E}} = \text{Top}(p_{dom})_{\mathbf{E}(p_{dom})} : \text{prév}(p_{dom}) \end{cases} \quad (6.29)$$

où $\text{Top}_{\mathbf{E}}$ est une balise représentant une classe *milieu-prévision* $\text{Top}(p_{dom})_{\mathbf{E}(p_{dom})} : \text{prév}(p_{dom})$, comme définie par l'équation 6.23. Le choix de la balise représentant une classe *milieu-prévision* sera effectué par l'aisthesis, en fonction de ses propres paramètres et de son élément source dans l'ensemble du type *phénomène*.

Le savoir-faire du type *aisthesis* est une démarche répondant à la problématique de la *perception-active* d'un modèle lors de son autonomisation : il faut créer la partie du champ expérimental nécessaire à une expérience perceptive et attendre que les autres modèles aient agi sur le milieu expérimental correspondant pour disposer du résultat sous la forme de mesures expérimentées des propriétés du milieu. Aussi, les rôles d'*aisthesis* devront anticiper sur *où* et *quand* le modèle aura besoin de *quoi*, afin que l'environnement soit disponible avant que le modèle utilisant cette *aisthesis* ne quitte son domaine de validité. Il faudra alors fournir à ce rôle une estimation sur l'autonomie du modèle et pouvoir en déduire une localisation des expériences perceptives optimisée pour le modèle. Pour ce faire, on pourra s'inspirer d'études sur le sens du mouvement [Berthoz 97] ou la perception de soi [Dennett 89], et on utilisera des méthodes numériques plus ou moins classiques, comme le *dead reckoning* [Singhal et Zyda 99, Szwarcman et al. 01] généralisant les notions d'intégration numérique intervenant dans l'estimation des trajectoires.

Dans le cas d'un phénomène physique, le modèle du phénomène aura ses activités perceptives à l'endroit même où il se trouve. En fonction de son autonomie, le modèle prévoit, en estimant sa trajectoire, où et quand il aura besoin d'une nouvelle information sur les propriétés du milieu auxquelles

⁹ **Aisthesis** : $\sqrt{\text{grec}} : \text{perception}$. 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 ».

il est sensible, *i.e.* sa prochaine aisthesis. Dès que cette estimation est terminée, il active l'aisthesis correspondante.

En fonction des caractéristiques du milieu le modèle sera autonome à plus ou moins long terme. L'horizon temporel de validité du modèle est généralement éloigné et l'autonomie du modèle importante, lorsque les propriétés du milieu ont des gradients faibles : les aisthesis seront alors peu fréquentes. Alors que, si les propriétés changent rapidement, l'horizon temporel du modèle sera beaucoup plus rétréci et la faible autonomie du modèle l'obligera à avoir des activités d'aisthesis très fréquentes.

Ainsi, les rôles de nature *aisthesis* structurent le milieu nécessaire aux expériences perceptives des modèles des phénomènes. La modélisation des *aisthesis* n'oubliera pas l'apport des notions de *perception-active*, afin d'utiliser au mieux la possibilité offerte par le modèle du milieu, de préparer la future adaptation des phénomènes (et donc indirectement de la prochaine aisthesis) en proposant des prévisions pour les propriétés de ce milieu, qui pourrons alors être comparées aux expérimentations.

6.4.2.2 Praxis

La *praxis*¹⁰ est le savoir-faire type des objets actifs du type *action*. Pour définir la *praxis*, nous considérerons les éléments du milieu, non pas comme des balises expérimentales, mais comme les éléments de ces balises ; c'est la notion de *milieu terminal* spécifiée par l'équation 6.21.

Le rôle f répond à la nature du type *praxis* si les trois points suivants sont vérifiés :

1. Le rôle f (équation 6.28) est un endomorphisme¹¹ du *milieu terminal*.
2. Le rôle f est globalement invariant sur toutes les classes du type *milieu-prévision* d'un point de vue de leurs représentants.
3. – Soit f laisse invariant tout l'élément du milieu.
– Soit f s'élimine des protocoles pour les expériences élémentaires concernées par cette nature de rôle, et ne modifie la mesure expérimentée que dans un voisinage (au sens topologique) de points expérimentaux, voisinage caractérisé par ses paramètres.

Mathématiquement, cela se traduit par la définition suivante :

$$\text{type}_{\text{nature}}(f) = \text{praxis} \iff \left\{ \begin{array}{l} \forall M_e \in \text{Top}_{\bar{E}}, \forall (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e}) \in \Xi^e \times \mathcal{M}^e \times \mathcal{M}^e, \\ (M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})) \in \text{Def}_{(f)} \\ \text{et} \\ \begin{array}{l} \text{Si } \text{nature}(f) \notin \mathcal{L}^e, \text{ ou si } \Lambda = \emptyset, \text{ ou si } f \neq \Lambda^{M_e}(1) \\ f(M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})) = (M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})). \end{array} \\ \text{Sinon } \text{nature}(f) \in \mathcal{L}^e \text{ et } f = \Lambda^{M_e}(1) \\ \exists (\tilde{\Lambda}^{M_e}, \tilde{m}_{exp}^{M_e}) \in \Xi^e \times \mathcal{M}^e, \text{ tel que :} \\ f(M_e, (\Lambda^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, m_{exp}^{M_e})) = (M_e, (\tilde{\Lambda}^{M_e}, m_{pre}^{M_e}, \tilde{m}_{exp}^{M_e})) \\ \text{avec } \tilde{\Lambda}^{M_e} = \begin{cases} r \mapsto \Lambda^{M_e}(r-1) & , \text{ si } \text{Longueur}(\Lambda^{M_e}) > 1 \\ \emptyset & , \text{ si } \text{Longueur}(\Lambda^{M_e}) = 1 \end{cases} \\ \text{et } \tilde{m}_{exp}^{M_e} = m_{exp}^{M_e}, \text{ si } M_e \notin \mathcal{V}^f \end{array} \right. \quad (6.30)$$

où $\text{Top}_{\bar{E}}$ est **tout** le *champ expérimental* de la modélisation, \mathcal{L}^e la liste des natures des rôles caractérisant l'expérience élémentaire e , spécifiée par le point expérimental M_e , et $\mathcal{V}^f \subset \text{Top}_{\bar{E}}$ le

¹⁰ **Praxis** : *grec : action*. 1) action chargée d'un projet, activité en vue d'un résultat ; 2) faire et ce faisant, se faire.

¹¹ Un morphisme de la petite catégorie $\mathcal{E}ns$ étant une application.

voisinage d'influence expérimentale de f ; ce dernier est spécifié, explicitement dans le cas où l'ensemble des paramètres est du type *phénomène*, pour toute nature de rôle caractérisant un endomorphisme du milieu terminal par la *zone active du phénomène* (équation 6.27).

Si la nature de f n'est pas dans la liste \mathcal{L}^e ou si f n'est pas le premier élément du protocole restant à réaliser, ou enfin si le point expérimental M_e n'est pas dans son voisinage d'influence, f ne change pas cet élément du milieu.

L'ordre dans lequel se combinent les *praxis* sera fourni par un protocole Λ^{M_e} en chaque point expérimental, protocole déterminé par l'interaction entre les entités (section 6.5.2) et la définition précédente assure la possibilité de combiner des *praxis* dans *a priori* n'importe quel ordre.

Nous avons défini le type *praxis* à partir des éléments du *milieu terminal* (équation 6.21). Examinons maintenant comment l'on peut accéder aux structures plus complexes comme la *balise expérimentale* qui est un élément du milieu “normal”, le *milieu-prévision* et le *milieu-expérimentation*. Si la nature de f est un savoir-faire du type *praxis*, nous définissons successivement l'image par f d'une balise, la construction d'une classe *milieu-expérimentation* sur l'image d'une balise donnée puis la propriété d'invariance globale d'une classe *milieu-prévision*.

1. L'image par f d'une balise est définie comme la réunion des images par f des éléments de cette balise. Puisque f est invariant sur les points expérimentaux, l'image par f d'une balise est une balise associée aux mêmes points expérimentaux, mais dont les protocoles et les mesures expérimentées peuvent différer.
2. L'image par f d'une balise donnée étant une balise, celle-ci peut être alors considérée comme un représentant d'une classe *milieu-expérimentation*, c'est à dire un élément de l'ensemble des paramètres *milieux-expérimentation* d'un objet actif du type *adaptation*.
3. Etant donnée une classe *milieu-prévision* dans le milieu (équation 6.23), l'image par f d'un représentant de cette classe est un représentant de la même classe ; c'est ce que l'on entend par :
“ f est globalement invariant sur toutes les classes du type *milieu-prévision*. ”
En effet, le représentant d'une classe *milieu-prévision* est une balise et l'image par f de cette balise est une balise caractérisé par les mêmes points expérimentaux et les mêmes mesures des propriétés prévues, c'est donc bien un représentant de la même classe.

La modélisation d'un phénomène naturel pour un système de réalité virtuelle doit permettre à l'observateur de reconnaître le phénomène par l'observation de ses savoir-faire du type *praxis* sur son environnement virtuel, afin de pouvoir y transposer sa propre praxis en tant qu'être humain. Pour le modèle, il ne s'agit pas d'une véritable praxis, dans le sens où le modèle n'a pas forcément d'intentions comme c'est le cas pour les actions d'un être vivant. La praxis du modèle est en fait celle du modélisateur, qui a bien des intentions lorsqu'il modélise un système de réalité virtuelle. Cependant, lorsque l'on cherchera à modéliser des phénomènes biologiques, et pas seulement physiques, alors le savoir-faire du type *praxis* pourra être considéré, si nécessaire, dans son sens éthymologique et associé à des intentions.

Les *praxis* sont localisées dans l'espace-temps par un voisinage d'influence, comme les actions des phénomènes naturels. Cela signifie qu'en dehors d'un certain voisinage, qu'il faut pouvoir caractériser, une *praxis* ne change rien aux mesures des propriétés. Aussi, la modélisation des *praxis* cherchera à autonomiser le modèle grâce à une représentation interne au modèle de l'environnement virtuel ; plus cette représentation sera pertinente et plus le modèle pourra appliquer ses *praxis* de manière autonome, c'est à dire sans avoir besoin de créer du milieu pour son compte afin d'assurer une simulation correcte du phénomène. Le gros avantage d'autonomiser les *praxis* est de diminuer considérablement la complexité numérique de la simulation lors du calcul de l'intersection des voisinages d'influence avec les balises expérimentales. Remarquons que la plupart du temps, pour les simulations présentant un certain intérêt, il serait pire, d'un point de vue numérique, de donner comme voisinage l'espace topologique en entier.

Ainsi, les savoir-faire du type *praxis* laissent identiques les points expérimentaux avec leurs propriétés prévues et ne transforment que les propriétés expérimentées, en avançant dans les protocoles expérimentaux construits en chacun de ces points expérimentaux. Ils sont associés à des voisinages

d'influence permettant de considérablement diminuer la complexité numérique des simulations. Les *praxis* transforment le milieu en tenant compte des *propriétés expérimentées* intermédiaires résultant des *praxis* s'étant déjà exercées sur ce milieu. A l'issue d'une expérience E , les *propriétés expérimentées* du milieu correspondant sont alors le résultat d'une combinaison des différentes *praxis*, la définition (équation 6.30) leur permettant de suivre n'importe quel protocole expérimental Λ^{M_E} .

6.4.2.3 Poiesis

La *poiesis*¹² est le savoir-faire type des objets du type *adaptation*.

Le rôle f répond à la nature *poiesis* si les deux points suivants sont vérifiés :

1. L'ensemble source ou domaine de f est une famille de balises telles que la réunion des classes du type *milieu-expérimentation* dont elles sont des représentants s'identifie à un ensemble de paramètres du type *milieux-expérimentation* d'un objet actif du type *prédiction*.
2. L'ensemble cible ou codomaine de f est une partie \mathcal{S}^f non vide de l'ensemble de paramètres du type *phénomène* d'un objet actif du type *action*. Cette partie s'appelle la *zone sensorielle* du *phénomène*.

Ces deux propriétés peuvent se résumer par la formule suivante :

$$\text{type}_{\text{nature}}(f) = \text{poiesis} \iff \begin{cases} \forall p_{\text{dom}} \in \text{Def}_{(f)}, \exists \text{Top}_{\mathbf{E}} \in \text{milieu}, p_{\text{dom}} = \text{Top}_{\mathbf{E}} \\ \text{avec } \text{Top}_{\mathbf{E}} = \text{Top}_{\mathbf{E}}: \text{expé} \\ \mathcal{P}_{n_{\text{cod}}}^{\text{cod}} \text{ est du type } \text{phénomène} \\ \text{Im}_{(f)} = \mathcal{S}^f \subset \mathcal{P}_{n_{\text{cod}}}^{\text{cod}} \end{cases} \quad (6.31)$$

où $\text{Top}_{\mathbf{E}}$ est une balise représentant une classe *milieu-expérimentation* $\text{Top}_{\mathbf{E}}: \text{expé}$, comme définie par l'équation 6.25. Le rôle f étant une fonction, une balise de $\text{Def}_{(f)}$ peut avoir une ou plusieurs images dans éventuellement seulement une partie stricte $\mathcal{S}^f \neq \mathcal{P}_{n_{\text{cod}}}^{\text{cod}}$ de l'ensemble de paramètres du type *phénomène*; cette remarque sera utilisée lors de la création de nouvelles entités dans le système et pour l'évolution d'une entité (section 6.5).

Le savoir-faire du type *poiesis* est une démarche répondant à la problématique de l'adaptation d'un modèle lors de son autonomisation. Il s'agit d'expliquer quelle partie du *phénomène* est modifiée par le résultat d'une expérience. La *poiesis* ne modifie pas forcément directement toute la représentation interne du *phénomène*, mais seulement une partie de ce *phénomène* que l'on qualifie de "sensorielle", sauf si le *phénomène* est réduit à la *zone sensorielle*. La modification de cette *zone sensorielle* \mathcal{S} entraînera une modification plus complète du *phénomène* de manière indirecte, de par les activités des savoir-faire internes au *phénomène* lui-même ; qui vont transformer sa représentation interne de son environnement, adapter son comportement à cette représentation interne pertinente et assurer ainsi pour un phénomène physique ou biologique une simulation du modèle dans son domaine de validité, notamment en maintenant le critère d'estimation d'erreur en deçà d'un valeur maximale ; cette adaptation modifiera aussi indirectement les activités de perception modélisées par les savoir-faire du type *aisthesis*.

Ainsi, un savoir-faire du type *poiesis* permet d'utiliser des résultats expérimentaux éventuellement partiels pour modifier les éléments des ensembles du type *phénomènes* ou en créer de nouveaux. Ce n'est pas forcément tout le *phénomène* qui sera modifié directement par une activité de *poiesis*, il convient alors de bien spécifier quelle est la partie *sensorielle* du *phénomène* concerné par la *poiesis*, et pouvoir ainsi distinguer la *poiese* comme activité préalable et nécessaire à l'épigénèse.

¹² **Poiesis** : *grec : création*. 1) fabrication, création, production ; 2) réparation.

6.4.3 Objets actifs *prédition, action et adaptation*

Nous disposons maintenant de trois types d'ensembles de paramètres et de trois types de savoir-faire, avec leurs rôles associés. Nous pouvons dès lors définir nos trois types d'objets actifs en associant les ensembles de paramètres, les savoir-faire et les rôles correspondants de trois manières particulières, en précisant la structure des activités de chaque assemblage.

Dans toute la suite de cette section 6.4.3, on considère un objet actif $\mathcal{O} = \mathcal{P} \times \mathcal{F} \times \mathcal{A}$ avec :

- $\mathcal{P} = \{\{(n, \{F_n\})\} \times \{\mathcal{P}_n\}\}$ sa structure paramétrique permettant de nommer (n), de quantifier et qualifier les natures de ses savoir-faire (F_n), et de fournir un domaine d'évolution possible pour ses caractéristiques internes (\mathcal{P}_n),
- $\mathcal{F} = \{\bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho\}$ sa structure des savoir-faire, fournissant une définition des interactions entre cet objet et les autres ou lui-même par la donnée d'une famille de rôles dont les sources et les cibles sont des éléments de domaines d'évolution (aussi appelés ensembles de paramètres des objets).
- $\mathcal{A} = \{\mathcal{D} \times \mathcal{G}\}$ sa structure des activités, décrivant les durées d'inhibition suivant toute activité et caractérisant les ordres possibles dans la succession de ses activités.

Nous examinons successivement le type *prédition*, le type *action* et le type *adaptation*.

6.4.3.1 Objet actif *prédition*

L'objet actif \mathcal{O} est du type *prédition*, seulement si ses savoir-faire sont tous du type *aisthesis* (équation 6.29) et seulement si son ensemble de paramètres est constitué des classes de *balises expérimentales* (équation 6.19) du type *milieu-expérimentation* (équation 6.25).

$$n = n_{\text{prédition}} \Leftarrow \begin{cases} F_n = \bigcup_{i=1 \dots r} \text{aisthesis}_{r_n} & (\text{ou } F_n = \emptyset, \text{ si } r = 0) \\ \forall p \in \mathcal{P}_n, \exists \text{Top}_{\mathbf{E}}: \text{expé}, p = \text{Top}_{\mathbf{E}}: \text{expé} \end{cases} \quad (6.32)$$

où $\text{Top}_{\mathbf{E}}: \text{expé}$ désigne une classe du type *milieu-expérimentation*, et r un entier qui vaut $\text{Card}(F_n)$.

Si $r = 0$, sa structure des savoir-faire et sa structure des activités sont réduites à l'élément vide : $\mathcal{F} = \mathcal{A} = \{\emptyset\}$, et les propriétés suivantes caractérisant les rôles et leurs activités pour le type *prédition* sont forcément vérifiées car elles sont définies sur un rôle donné dans l'élément de \mathcal{F} ; lorsque cet élément est \emptyset , la propriété ne peut être mise en défaut par la donnée d'un contre exemple. Ainsi, l'objet actif nul¹³ (équation 6.11) et tout objet "actif" n'ayant pas de savoir-faire et ayant un ensemble de paramètres constitué de classes du type *milieu-expérimentation* peut être considéré comme un objet actif du type *prédition*.

Dès que $F_n \neq \emptyset$, il existe au moins un rôle f dans $\bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho$ tel que $\text{Def}_{(f)} \neq \emptyset$ (section 6.3.2), avec sa fonction inhibition d'activité $D_{(f)} : \text{Def}_{(f)} \rightarrow \mathbb{N}$ correspondant à f dans la famille des inhibitions d'activité \mathcal{D} (section 6.3.3.1).

Soit f un rôle de l'objet actif \mathcal{O} tel que $\text{Def}_{(f)} \neq \emptyset$ et $D_{(f)} \in \mathcal{D}$ sa fonction *inhibitions d'activité* (équation 6.6). La nature de f étant forcément du type *aisthesis*, f doit vérifier l'équation 6.29. On demande, en outre, que l'inhibition d'une activité de type *aisthesis* soit strictement positive. Cela signifie qu'au niveau du temps local de l'objet actif, une *aisthesis* ne peut être instantanée.

$$\forall p \in \text{Def}_{(f)}, D_{(f)}(p) \geq 1 \quad (6.33)$$

Autrement dit, toute activité d'un objet actif du type *prédition* consomme du temps du point de vue de cet objet actif. La grammaire doit simplement vérifier la propriété¹⁴ 6.8, dite du bon sens.

¹³ son ensemble de paramètres étant vide, le seconde propriété de l'équation 6.32 ne peut être mise en défaut.

¹⁴ c.f. page 123. Cette propriété demande à la grammaire d'un objet actif que tout savoir-faire de l'objet actif soit accessible par une phrase du langage

L'objet \mathcal{O} est du type *prédition* si les propriétés 6.32 et 6.33 sont vérifiées.

Dans un objet du type *prédition*, étant donné un savoir-faire $\rho \in F_n$, ρ est une *aisthesis* et l'on appelle *zone expérimentale* de cette *aisthesis*, la classe du milieu du type *zone expérimentale* générée par les images de tous les éléments du phénomène par tous les rôles dont la nature est cette *aisthesis*.

$$\mathcal{Z}_{E_Z}(\rho) = \overbrace{\{f^\rho(p_{dom}) / f^\rho \in \mathcal{R}^\rho, p_{dom} \in \text{Def}_{(f^\rho)} \subset \mathcal{P}_{n_{dom}^\rho}^{dom^\rho}\}}^{\cdot} \quad (6.34)$$

où $\mathcal{P}_{n_{dom}^\rho}^{dom^\rho}$ est le *phénomène* source de cette *aisthesis*, et la classe (notation \dot{x}) est au sens de celle des *zones expérimentales* (équation 6.26) qui ne tient compte que de la topologie et des expériences des balises.

Ainsi, un rôle d'un objet actif du type *prédition* transforme un élément d'un ensemble de paramètres du type *phénomène* en une balise expérimentale représentant une classe du type *milieu-prévision*, caractérisée par une partie du champ expérimental de la modélisation possédant une estime des propriétés recherchées dans le milieu. Ce rôle est paramétré par une classe *milieu-expérimentation*, qui est représentée par une balise dont on connaît les *protocoles* restant à réaliser et les mesures expérimentées de ses propriétés. L'objet actif nul ou tout objet exempt de savoir-faire et dont l'ensemble de paramètres est du type *milieu-expérimentation* peut être considéré comme un objet actif du type *prédition*. Si l'objet actif du type *prédition* possède au moins une *aisthesis*, toute activité d'*aisthesis* est suivie d'une période d'inhibition, et une *aisthesis* est associée à une *zone expérimentale* cible.

6.4.3.2 Objet actif *action*

Nous caractérisons tout d'abord formellement l'objet actif du type *action*, puis nous indiquons une piste à suivre pour réaliser une modélisation interne à l'objet de son environnement, méthode qui peut servir tant pour la modélisation de phénomènes physiques que pour la modélisation de comportements humains.

Définition formelle

L'objet actif \mathcal{O} est du type *action*, seulement si son ensemble de paramètres est du type *phénomène* (équation 6.27), seulement s'il possède au moins un savoir-faire du type *praxis* (équation 6.30), et seulement si les savoir-faire d'un autre type sont tous associés à des rôles internes à son propre ensemble de paramètres.

$$n = n_{action} \Leftarrow \begin{cases} \exists \rho \in F_n, \text{type}(\rho) = \text{praxis} \\ \forall \rho \in F_n, \text{type}(\rho) \neq \text{praxis} \Rightarrow \forall f^\rho \in \mathcal{R}^\rho, f^\rho : \mathcal{P}_n \rightarrow \mathcal{P}_n \end{cases} \quad (6.35)$$

D'autre part, une activité de *praxis* n'est pas suivie d'un temps d'inhibition ; elle doit pouvoir s'appliquer à nouveau immédiatement si nécessaire : son inhibition d'activité doit être nulle du point de vue locale à l'objet actif. Alors que les savoir-faire internes seront suivis d'un certain temps non nul d'inhibition et auront des activités d'inhibition strictement positives.

$$n = n_{action} \Leftarrow \begin{cases} \forall \rho \in F_n, \text{type}(\rho) = \text{praxis}, \forall f^\rho \in \mathcal{R}^\rho, \forall m_t \in \text{milieu}_{\text{terminal}}, D_{(f^\rho)}(m_t) = 0 \\ \forall \rho \in F_n, \text{type}(\rho) \neq \text{praxis}, \forall f^\rho \in \mathcal{R}^\rho, \text{Def}_{f^\rho} \neq \emptyset, \forall p \in \text{Def}_{f^\rho}, D_{(f^\rho)}(p) \geq 1 \end{cases} \quad (6.36)$$

Puisque les rôles de type *praxis* sont des endomorphismes du *milieu-terminal*, leurs ensembles de définition sont tout le milieu terminal, ainsi doit-il en être également pour leurs inhibitions d'activités. Par contre, un rôle *interne* peut ne pas être défini ; il faut s'assurer que ce n'est pas le cas lorsque l'on veut parler de son inhibition d'activité.

La grammaire d'une *action* doit vérifier, en plus de la propriété du bon sens (équation 6.8), le fait que lorsqu'une certaine famille de *praxis* est permise à un moment donné pour poursuivre la phase de l'*action*, les *praxis* de cette famille peuvent être répétées autant de fois que nécessaire pour agir

sur le milieu et dans un ordre quelconque. De plus, que ces *praxis* soient activées ou non, ne doit pas changer la manière dont peuvent s'enchaîner les *s.-f. internes*.

En effet, les *praxis* ne sont pas situées dans le temps local à l'entité, mais dans celui d'une autre entité lors d'une interaction par la médiation du milieu. Dès lors qu'une *praxis* est autorisée formellement par une *action* de l'entité agissant sur le milieu demandé par une autre entité, et puisque la durée d'une *praxis* est nulle, elle doit pouvoir se répéter autant de fois que nécessaire pour agir sur le milieu créé par toutes les entités. Il n'est pas question que les activités de *praxis* modifient directement l'état de l'entité qui les exercent.

Tandis que les *s.-f. internes*, eux, sont situés temporellement dans l'entité. Toute activité *interne* est associée à une avancée dans la phrase du langage de l'*action* qui peut changer la famille des *praxis* autorisées. La modélisation d'un enchaînement ordonné de plusieurs *praxis* est alors obtenue en intercalant entre chacune des *praxis* un *s.-f. interne* permettant de passer d'une *praxis* à l'autre.

L'objet \mathcal{O} est du type *action* si les propriétés 6.35, 6.36 sont vérifiées et si la grammaire des actions respecte la propriété énoncée ci-dessus.

La nécessaire présence d'un savoir-faire du type *praxis* est la traduction de la modélisation des actions du phénomène naturel qui le caractérisent, selon la “projection” de la praxis d'un observateur humain en une idée intuitive explicitée dans le modèle représentant ce phénomène ; ce modèle est alors simulé dans le système de réalité virtuelle qui fournit un outil de vérification expérimentale. Aussi, pour être en énaction dans la simulation, un expérimentateur humain ne pourra pas modifier directement des *mesures expérimentées* dans le système de réalité virtuelle ; il n'aura que la possibilité de le faire indirectement par la médiation d'un *modèle d'action*, modèle spécifié notamment par des *savoir-faire* du type *praxis*. L'utilisateur ne pourra que modifier le paramètre *phénomène* de son propre modèle d'*action*, médiateur de ses interactions avec le milieu virtuel.

Modélisation de la représentation interne de l'environnement pour l'*action*

Même dans le cas de la modélisation de phénomènes physiques, il peut être intéressant d'utiliser des modèles autonomes qui peuvent chercher à reproduire un résultat théorique obtenu par une autre approche de la modélisation du phénomène, ou à reproduire des conditions naturelles correspondant à des enregistrements réalisés lors d'expériences.

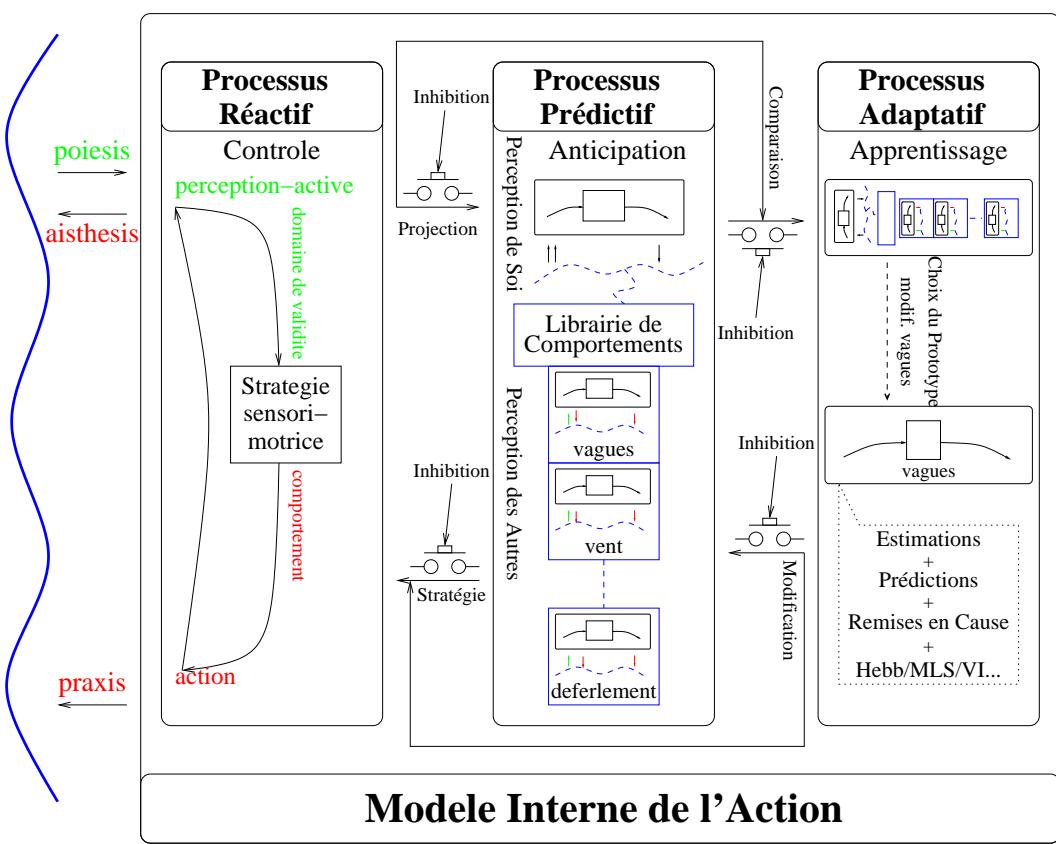
Lorsqu'on voudra modéliser des comportements plus complexes où la représentation interne prendra de plus en plus d'importance, on entrera dans le vaste monde de la modélisation de l'apprentissage et des représentations de la connaissance ; ne pouvant être exhaustif, nous ne donnons que quelques exemples : l'identification des modèles [Richalet 98], les approximatrices universels comme les systèmes d'inférences floues [George Lee 02], l'apprentissage chez l'enfant [Piaget et Inhelder 75], la perception des autres [Meltzoff 95] selon un mécanisme de *décentration* permettant la coopération entre entités et l'apprentissage par *imitation* [Byrne et Russon 98, Mataric 02], les théories pédagogiques comme le constructivisme [Vygotsky 35, Wells 99] qui fait précéder l'apprentissage des *savoir-faire* à celui des *savoir-savant* [Lindblom et Ziemke 03], sans oublier le domaine des sciences cognitives [Gardner 85]. Appliqués en réalité virtuelle, les principes du constructivisme permettent d'obtenir des environnements virtuels de formation efficaces [Buche et al. 04]. L'approche *perception comme anticipation* [Berthoz 97] fusionne le cycle *perception / décision / action* en un unique processus neurophysiologique [Buzsaki et al. 92, Lisman et Idiart 95], comme décrit à la figure 5.1, page 91. De tels processus artificiels ont été appliqués aux animats [Trullier et Meyer 00, Heinze et Gross 01, Gaussier et al. 02]. La modélisation d'acteurs virtuels selon le principe de *perception-active* — principe selon lequel leurs décisions ne sont pas prises selon un raisonnement nécessitant des inférences logiques, mais par une *simulation dans la simulation* [Maffre et al. 01] leur permettant un raisonnement par abduction sans nécessiter de représentations symboliques [Lévy 91] — a montré son efficacité pour accroître l'autonomie et la crédibilité de ces acteurs [Parenthoën et al. 02b].

Des recherches en ergonomie cognitive ont montré l'existence de plusieurs niveaux cognitifs fonctionnant en parallèle lors de l'exécution de tâches de planification de trajectoires par les être humains [Hoc et Amalberti 95, Morineau et al. 03]. Les deux premiers niveaux peuvent correspondre aux modes de contrôle réactifs et prédictifs de la perception active. Le troisième niveau, plus abstrait, serait le siège des remises en cause et de l'apprentissage. Dans cette optique, on peut penser que les représentations mentales symboliques propres à des niveaux de contrôle cognitif supérieurs seraient

élaborées sur la base de contraintes sensorimotrices, internalisées au fur et à mesure de l'interaction d'un individu (ou d'une espèce) avec son environnement [Shepard 84]. On peut alors envisager qu'en tant qu'espace d'expérimentation, la réalité virtuelle puisse servir de support à des travaux articulant les approches symbolique et écologique dans l'étude de l'adaptation de l'être humain à son environnement naturel ou artificiel [Morineau et Parenthoën 03].

Nous invitons alors le modélisateur à suivre cette piste, suivant le récent changement de paradigme en psychologie ergonomique [Morineau 04], pour structurer P_n et les savoir-faire internes dans un objet actif du type *action* sous la forme de trois modes cognitifs asynchrones fonctionnant en parallèle (figure 6.2). Grossièrement, P_n sera un produit cartésien entre trois ensembles et les savoir-faire doivent offrir la possibilité à chacune de ces trois structures d'évoluer en parallèle de manière autonome tandis que d'autres savoir-faire seront des communications asynchrones entre ces trois processus. La plupart du temps, les activités des savoir-faire entre ces ensembles seront inhibées.

1. Le premier correspond à la partie motrice et son contrôle associé de la modélisation de l'*action*. Il peut être vu comme paramétrant directement les *praxis* selon des automatismes ; seules quelques praxis, parmi toutes celles qui sont disponibles, ne seront pas inhibées ce qui correspond à la notion de *posture* en psychologie, l'évolution d'une posture et leurs successions étant coordonnées par des activités de *poiesis* en réponse aux *aisthesis* spécifiques aux besoins de cette posture. Un



Ce schéma présente le principe de fonctionnement interne d'un acteur virtuel autonome, prédictif et adaptatif. Trois processus cognitifs fonctionnent en parallèle et ne se synchronisent que par des messages intermittents levant les inhibitions. Grossièrement, ils correspondent de gauche à droite à des cognitions à court ($10 \text{ millisec} < 5 \text{ min}$), moyen ($100 \text{ millisec} < 10 \text{ heures}$) et long terme ($1 \text{ sec} < 10 \text{ ans}$) — les indications temporelles donnent un ordre de grandeur des temps de cognition humaine, tels que je me les imagine personnellement. Le processus réactif applique une stratégie sensorimotrice de perception-active ; il réalise un enchaînement programmé de postures paramétrant des *praxis* sur le milieu. Ces postures sont associées à des caractéristiques attendues du milieu, recherchées par des activités d'*aisthesis*. Les *poiesis* correspondantes sont utilisées pour évaluer l'erreur de prédition : si cette erreur est faible et que l'on reste dans le domaine de validité de la stratégie, les *praxis* sont légèrement corrigées et la même stratégie se poursuit, si l'erreur est importante la stratégie est abandonnée. Le processus prédictif permet de simuler des comportements et de suivre le bon déroulement du processus réactif qu'il paramètre. Le processus adaptatif fournit le contexte en paramétrant les deux autres processus et est le siège des remises en cause et de l'apprentissage. L'apprentissage fonctionne en arrière plan et modifie l'action afin que sa *praxis*, en énaction avec les autres modèles, respecte au mieux le but fixé par l'apprentissage.

FIGURE 6.2 : Représentation interne comme 3 modes cognitifs asynchrones en parallèle

enchaînement donné de postures pouvant être vu comme une *stratégie sensorimotrice*. Quand le résultat d'une aisthesis donné par la poiesis correspondante sort d'un domaine de validité propre à la posture (fin de posture ou événement non anticipé), les inhibitions des savoir-faire entre les ensembles sont levées. Cette partie motrice reçoit l'information sur la stratégie à appliquer de la partie prédictive de l'action.

2. Le deuxième correspond à la partie prédictive de l'action, non pas par des raisonnements symboliques, mais par des simulations de ses propres modèles d'actions. Il offre une capacité de simulation interne permettant de choisir une *stratégie* par des simulations de son propre comportement automatique, mais aussi celui d'autres acteurs tels que cette action peut les voir par la médiation de ses propres modèles comportementaux, c'est à dire selon une bibliothèque interne de comportements constituant la culture comportementale de l'acteur. Cette partie de l'action reçoit des informations de la partie motrice, afin de pouvoir se synchroniser avec elle et de détecter des erreurs de prédiction et des informations de la partie adaptative de type contextuel, afin de choisir les modèles comportementaux qui seront simulés.
3. Le troisième correspond à la partie adaptative de l'action. C'est le lieu au sein duquel les processus d'apprentissage et de reconnaissance se mettent en œuvre. La reconnaissance fournit le contexte permettant aux deux autres processus de fonctionner, tandis que l'apprentissage est mis en œuvre lors des erreurs de prédiction. L'apprentissage peut alors fonctionner en arrière-plan et modifier le comportement de l'acteur virtuel afin que son comportement, en énaction avec les autres modèles, respecte au mieux le but fixé par l'apprentissage (pour le modèle d'un phénomène physique, le but poursuivi sera généralement de respecter un modèle théorique de référence, des expériences naturelles...).

Ce modèle d'action, tout d'abord implémenté en un système de réalité virtuelle dans lequel des acteurs perceptifs autonomes interagissent en temps réel a permis de valider sa pertinence pour la modélisation d'acteurs virtuels, puis est devenu opérationnel sous la forme d'un pilote automatique pour des voiliers de compétition après une étude du comportement d'un barreur virtuel en simulation.

- Dans le cadre d'un système de réalité virtuelle simulant une population d'acteurs perceptifs autonomes en interaction, les comportements des acteurs déterminent leurs réponses, non seulement en fonction des stimulus externes, mais également en fonction d'émotions internes telles que la peur, la satisfaction, l'amour ou encore la haine. Nous avons décrit de tels comportements émotionnels à l'aide de cartes cognitives floues où ces états internes sont explicitement représentés [Parenthoën et al. 01]. Issues des travaux précurseurs aux sciences cognitives de la psychologie expérimentale, le concept de *carte cognitive* fut introduit pour décrire des mécanismes de mémorisation de trajectoire chez les rats et les hommes [Tolman 48]. Bien que le terme *carte cognitive* ait pris une signification confuse en psychologie contemporaine et qu'il ne soit pas établi si les animaux possèdent de telles cartes cognitives pour mémoriser les relations spatiales dans l'environnement [Bennett 96], le concept de *carte cognitive* a été repris et formalisé en théorie de la décision pour devenir les cartes cognitives floues (en anglais : *Fuzzy Cognitive Map* ou *FCM*) [Kosko 86]. Nous avons montré expérimentalement [Tisseau et al. 04] qu'en tant qu'objet formel, les *FCMs* sont un outil efficace pour la spécification, le contrôle, la prédiction et l'adaptation de comportements décisionnels crédibles [Bates 94]. Chaque comportement basé *FCMs* correspond à un *savoir-faire* de l'acteur virtuel. Regroupés en une bibliothèque, de tels comportements décisionnels forment la culture sensorimotrice de l'agent, à partir de laquelle il peut agir, prédire, imiter, reconnaître ou apprendre ; selon le principe des trois modes cognitifs fonctionnant en parallèle et de manière asynchrone illustré par la figure 6.2. Les expérimentations ont été menées dans le cas d'un exemple non trivial — le berger, son chien et son troupeau — qui nous a permis d'illustrer l'ensemble des possibilités des cartes cognitives floues pour la spécification, le contrôle et l'évolution du comportement perceptif d'acteurs virtuels autonomes [Parenthoën et al. 02a], mais également dans un cas moins académique de barreur virtuel.
- Des travaux initiaux [Morineau et al. 01, Parenthoën et al. 01, Parenthoën 02] sur la modélisation du comportement d'un barreur virtuel, ont donné lieu, en collaboration avec une société d'électronique et des athlètes de haut niveau, à leur valorisation par la réalisation d'un modèle

de pilotage automatique pour des voiliers de compétition — Le trimaran **Géant** de Michel Desjoyaux, Les open-60 PRB et VMI de Vincent Riou et Sébastien Josse. Ce système de pilotage fonctionne selon l'évolution asynchrone d'un barreur réactif, d'un barreur prédictif et d'un barreur adaptatif constituant, avec des capteurs réels également asynchrones, un barreur virtuel respectant une expertise maritime du pilotage [Parenthoën et al. 02c]. Ce pilote, tout d'abord testé en boucle ouverte sur des mesures réelles du comportement d'un couple barreur/voilier réalisé lors de la course en solitaire transatlantique *mini'97*, puis rendu opérationnel par les sociétés Mer Agitée¹⁵ et NKE¹⁶, est basé sur un modèle de comportement du voilier et une expertise résumée dans des cartes cognitives floues pour la partie prédictive, lui permettant de choisir une trajectoire optimale à l'échelle des vagues et impliquant des changements de stratégies sensori-motrices de pilotage toutes les 2 à 20 secondes; un mode réactif actionnant la barre à 4 Hz, capable d'appliquer trois stratégies principales et de gérer des situations pré-critiques par des réflexes comportementaux, et un mode adaptatif mettant à jour le modèle de comportement du voilier, en fonction des voiles, du vent et de l'état de mer, capable de suivre une évolution normale d'un état de mer si le marin s'occupe des voiles et renseigne le pilote sur ses actions. Les premiers tests en situation de course en solitaire devraient avoir lieu à partir de l'été 2005.

Ainsi, un objet actif du type *action* est constitué d'un *phénomène* et d'au moins une *praxis*, s'appliquant systématiquement à tout élément du milieu et dont les activités associées ne sont suivies d'aucune inhibition : leur durée est "invisible" du point de vue de l'objet actif.

Aussi, afin de préserver l'autonomie du modèle d'*action*, il n'est pas question ici d'agir directement entre plusieurs *phénomènes* sans passer par la médiation du milieu au sein duquel se composent leurs *praxis*. Tous les autres types de savoir-faire d'une *action* doivent être internes au *phénomène* lui-même de cette *action* et leurs activités associées sont forcément suivies d'une inhibition d'une durée non nulle ; la réflexion nécessaire à la mise en place de cette représentation interne prend du temps du point de vue de l'objet actif.

L'autonomisation de l'*action* passe par une représentation interne de l'environnement, qui dans le cadre de notre modélisation ne peut elle-même être plus qu'un système de réalité virtuelle. Il conviendra alors, pour enrichir la modélisation, de bien faire la part des choses entre l'intégralité de tout le système de réalité virtuelle (qui peut être vu comme un objet actif du type *action*, sa représentation interne étant une simulation du système multi-modèles) et les modèles de représentation interne de chacun des modèles d'*action* en œuvre dans le système ; les choix réalisés dépendront du but poursuivi par la modélisation du système complexe. Nous invitons alors le modélisateur à utiliser une représentation interne de l'action sous la forme de trois processus fonctionnant en parallèle et de manière asynchrone, notamment lorsqu'il est question de donner des capacités d'adaptation à la simulation.

Cette approche de la modélisation de l'action permet d'envisager des recherches ultérieures sur l'utilisation d'un système de réalité virtuelle pour étudier par exemple l'articulation symbolique/écologique dans l'étude de l'apprentissage chez l'être humain.

6.4.3.3 Objet actif adaptation

L'objet actif \mathcal{O} est du type *adaptation*, si ses savoir-faire sont tous du type *poiesis* (équation 6.31) et si son ensemble de paramètres est constitué des classes de *balises expérimentales* (équation 6.19) du type *milieu-prévision* (équation 6.23).

$$n = n_{adaptation} \iff \begin{cases} F_n = \bigcup_{i=1 \dots r} poiesis_{r_{n_i}} & (\text{ou } F_n = \emptyset, \text{ si } r = 0) \\ \forall p \in \mathcal{P}_n, \exists Top_{\mathbf{E}}: \text{prév}, p = Top_{\mathbf{E}}: \text{prév} \end{cases} \quad (6.37)$$

où $Top_{\mathbf{E}}: \text{prév}$ désigne une classe du type *milieu-prévision*, et r un entier qui vaut $\text{Card}(F_n)$.

Si $r = 0$, sa structure des savoir-faire et sa structure des activités sont réduites à l'élément vide : $\mathcal{F} = \mathcal{A} = \{\emptyset\}$, et les propriétés suivantes caractérisant les rôles et leurs activités pour le type

¹⁵ <http://www.meragitee.com>

¹⁶ <http://www.nke.fr>

adaptation sont forcément vérifiées car elles sont définies sur un rôle donné dans l'élément de \mathcal{F} ; lorsque cet élément est \emptyset , la propriété ne peut être mise en défaut par la donnée d'un contre-exemple. Ainsi, l'objet actif nul¹⁷ (équation 6.11) et tout objet "actif" n'ayant pas de savoir-faire et ayant un ensemble de paramètres constitué de classes du type *milieu-prévision* peut être considéré comme un objet actif du type *adaptation*.

Dès que $F_n \neq \emptyset$, il existe au moins un rôle f dans $\bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho$ tel que $\text{Def}_{(f)} \neq \emptyset$ (section 6.3.2), avec sa fonction inhibition d'activité $D_{(f)} : \text{Def}_{(f)} \rightarrow \mathbb{N}$ correspondant à f dans la famille des inhibitions d'activité \mathcal{D} (section 6.3.3.1).

Soit f un rôle de l'objet actif \mathcal{O} tel que $\text{Def}_{(f)} \neq \emptyset$ et $D_{(f)} \in \mathcal{D}$ sa fonction *inhibition d'activité* (équation 6.6). La nature de f étant forcément du type *poiesis*, f doit vérifier l'équation 6.31. On demande, en outre, que l'inhibition d'une activité de type *poiesis* soit non nulle. Cela signifie qu'on niveau du temps local de l'objet actif, une *poiesis* ne peut être instantanée.

$$\forall p \in \text{Def}_{(f)}, D_{(f)}(p) \geq 1 \quad (6.38)$$

Autrement dit, toute activité d'un objet actif du type *adaptation* consomme du temps du point de vue de cet objet actif. La grammaire doit simplement vérifier la propriété¹⁸ 6.8, dite du bon sens.

L'objet \mathcal{O} est du type *adaptation* si les propriétés 6.37 et 6.38 sont vérifiées.

Dans un objet du type *adaptation*, étant donné un savoir-faire $\rho \in F_n$, ρ est une *poiesis*, et l'on appelle *zone expérimentale* de cette *poiesis*, la classe du milieu du type *zone expérimentale* générée par les éléments de la réunion des ensembles de définition de tous les rôles dont la nature est cette *poiesis*.

$$\mathcal{Z}_{E_Z}(\rho) = \overbrace{\bigcup_{f^\rho \in \mathcal{R}^\rho} \text{Def}_{(f^\rho)}}^{\dot{x}} \quad (6.39)$$

où la classe (notation \dot{x}) est au sens de celle des *zones expérimentales* (équation 6.26) qui ne tient compte que de la topologie et des expériences des balises.

Ainsi, un objet actif du type *adaptation* est constitué de savoir-faire exclusivement du type *poiesis* et les éléments de son ensemble de paramètres sont des classes de milieu du type *milieu-prévision*, chaque classe étant caractérisée par des balises ayant les mêmes points expérimentaux et les mêmes mesures prévues de leurs propriétés. Ce paramétrage permet à une *poiesis* de fournir directement au *phénomène* cible, une différence entre les mesures estimées et les mesures expérimentées, intégrant ainsi la notion de perception-active. Si l'objet actif du type *adaptation* possède au moins une *poiesis*, toute activité du type *poiesis* est suivie d'une période d'inhibition, et toute *poiesis* est associée à une *zone expérimentale* source. Aussi, il faudra bien préciser ce que l'on entend par la *zone sensorielle* d'un rôle du type *poiesis*, pour faire la part des choses entre les *poiesis* de l'*adaptation* et les savoir-faire internes de l'*action*, l'*adaptation* étant à prendre au sens d'un résultat perceptif permettant au phénomène cible un apprentissage ou une remise en cause.

En résumé, nos trois types d'objets actifs définissent des relations entre un *phénomène* et le *milieu*. Le type *prédiction* traduit la préparation du milieu à une perception nécessaire au modèle d'un phénomène naturel pour déterminer ses actions, sur la base du principe anticipateur de la perception-active; cette préparation du milieu consiste à créer des zones dans le milieu où des propriétés recherchées devront être expérimentées. Le type *action* agit sur le milieu ainsi créé pour lui donner des propriétés expérimentées. Une action est réalisée en fonction de sa représentation interne de l'environnement et l'action structure cette représentation interne en fonction des buts qu'elle poursuit, en tant que modèle d'un phénomène naturel dans un système de réalité virtuelle. Enfin, le type *adaptation* informe le modèle du phénomène naturel des résultats expérimentaux réalisés en les zones explorées par les prédictions.

Du point de vue de ces trois types d'objets actifs, le rythme des activités est cadencé par les *aisthesis*,

¹⁷ son ensemble de paramètres étant vide, le seconde propriété de l'équation 6.37 ne peut être mise en défaut.

¹⁸ c.f. page 123. Cette propriété demande que tout savoir-faire d'un objet actif soit accessible par une phrase du langage

les *poiesis* et les *s.-f. internes* aux actions. Les *praxis* d'une *action* s'exécutent indépendamment de la notion de temps local à cet objet actif.

Les trois types d'objets *Prédiction*, *Action* et *Adaptation* vont maintenant nous permettre de définir formellement les notions relatives à une organisation d'entités en énaction, pour la simulation d'un système multi-modèles.

6.5 Organisation énactive

Notre approche de la modélisation des systèmes complexes consiste à choisir des phénomènes naturels correspondant à une certaine praxis humaine, puis à les modéliser en des entités autonomes qui vont donner vie, dans une simulation, aux différents modèles en interaction. La formalisation suivante sert de guide à la procédure à mettre en œuvre pour construire chacune des entités qui vont représenter un phénomène naturel.

Nous formalisons la notion d'entité autonome (section 6.5.1), puis nous verrons comment les entités interagissent en une organisation énactive (section 6.5.2) et peuvent s'organiser en des entités du second ordre (section 6.5.3).

6.5.1 Modèle d'entité autonome

Un type d'entité est structuré par trois objets actifs — *Prédiction*, *Action* et *Adaptation* — s'organisant de manière spécifique autour d'une horloge interne à l'entité et le choix des objets actifs permet de réaliser une *distinction* en caractérisant un certain type d'entité (section 6.5.1.1). Puis nous spécifions la notion d'*unité* au sein d'une *distinction*, c'est à dire la manière dont le modèle d'un phénomène naturel prend vie dans la simulation sous la forme de l'évolution d'une *unité entité* (section 6.5.1.2).

6.5.1.1 Distinction d'un type d'entité

Nous caractérisons la structure d'une entité comme un diagramme triangulaire orienté entre chacun de nos trois types d'objets actifs (section 6.4) sachant jouer leurs rôles de manière autonome : ce que cherche à percevoir l'entité, ce que fait l'entité sur le milieu, ce que devient l'entité à partir des propriétés perçues. Nous étudions tout d'abord les relations qui doivent exister entre ces objets actifs pour pouvoir constituer une entité, puis nous caractérisons la manière dont ils peuvent jouer leurs rôles en autonomie, par la donnée d'une horloge interne. Nous finirons par examiner comment on peut réaliser une distinction caractéristique d'un certain type d'entité.

Relations structurelles entre l'*action*, la *prédiction* et l'*adaptation*

Prenons un objet actif dans chacun de nos trois types pour former un triplet :

$$\mathcal{P}^E = (\mathcal{O}^{action}, \mathcal{O}^{adaptation}, \mathcal{O}^{prédiction})$$

Pour être caractéristique d'un type d'entité, on demande à \mathcal{P}^E de vérifier les six propriétés suivantes. Les trois premières propriétés sont caractéristiques de la notion de clôture sous causalité efficiente (figure 5.4) et les trois dernières structurent les associations *aisthesis/poiesis*.

1. Au sein de \mathcal{P}^E , le *phénomène* source de toute *aisthesis* de $\mathcal{O}^{prédiction}$ est l'ensemble de paramètres *phénomène* de \mathcal{O}^{action} . Formellement, cela se traduit comme suit :

$$\forall f \in \mathcal{R}_{prédiction}, \text{Def}_{(f)} \subset \mathcal{P}_{action} \quad (6.40)$$

où \mathcal{P}_{action} est un ensemble du type *phénomène* et f un rôle du type *aisthesis*.

2. Au sein de \mathcal{P}^E , la spécification d'un élément du *phénomène* et d'un rôle du type *aisthesis* fabriquera, si l'activité correspondant à l'application de cette *aisthesis* à l'élément du phénomène est possible, une classe *milieu-prévision* appartenant à l'ensemble de paramètres de l'*adaptation*, permettant alors de déterminer au plus un rôle par type de *poiesis* (section 6.3.2, page 120). Autrement dit, l'ensemble des classes *milieux-prévisions* cibles des rôles de $\mathcal{O}^{prédition}$ doit être l'ensemble de paramètres *milieux-prévisions* des rôles de $\mathcal{O}^{adaptation}$:

$$\forall f \in \mathcal{R}_{prédition}, \forall p \in \text{Def}_{(f)}, (f(p)) \in \mathcal{P}_{adaptation} \quad (6.41)$$

où p est un élément du *phénomène*, $f(p)$ une balise expérimentale ayant des propriétés prévues déterminées par le rôle f de nature *aisthesis* et $(f(p))$ une classe du type *milieu-prévision*.

3. L'image d'un *milieu-expérimentation* dans l'ensemble de définition d'un rôle de type *poiesis* dans \mathcal{P}^E est une famille *finie* non vide d'éléments du *phénomène* cible de cette *poiesis*, qu'il soit ou non dans \mathcal{P}^E ; ceci est important pour pouvoir dénombrer les entités évoluant dans le système.
4. Au sein de \mathcal{P}^E , à chaque type d'*aisthesis* doit correspondre un unique type de *poiesis* caractérisé par une *zone expérimentale* (équation 6.26) commune aux cibles de tous les rôles de ce type d'*aisthesis*, avec les sources de tous les rôles du type de *poiesis* correspondant. De plus, cette *zone expérimentale* doit être disjointe de toutes les autres *zones expérimentales* sources des autres types de *poiesis* :

$$\forall \rho \in F_{prédition}, \exists! \rho' \in F_{adaptation}, \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{Z}_{E_Z}(\rho') \subset \mathcal{Z}_{E_Z}(\rho) \\ \forall \rho'' \in F_{adaptation}, \rho'' \neq \rho' \Rightarrow \mathcal{Z}_{E_Z}(\rho'') \cap \mathcal{Z}_{E_Z}(\rho) = \emptyset \end{array} \right. \quad (6.42)$$

où

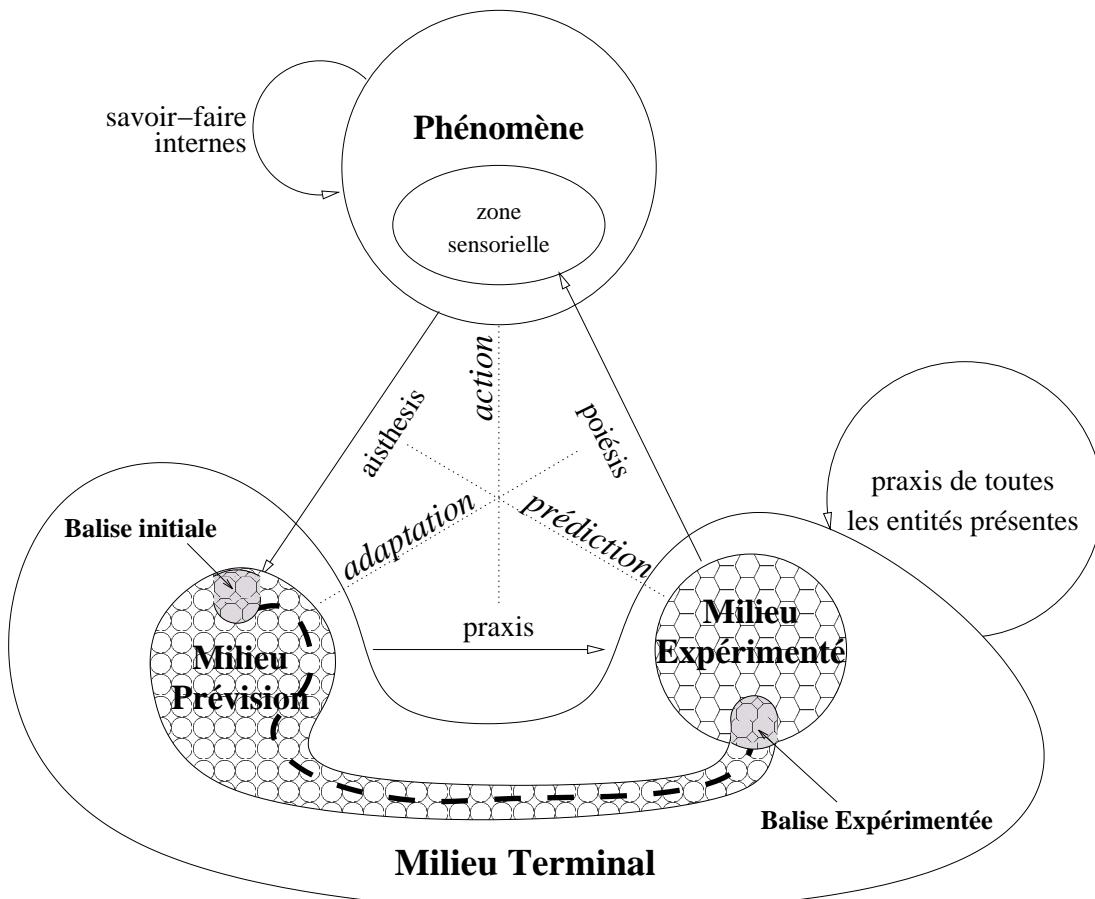
- $\mathcal{Z}_{E_Z}(\rho)$ désigne la *zone expérimentale* cible de l'aisthesis ρ (section 6.4.2.1), c'est à dire la *zone expérimentale* générée par toutes les balises images de tout élément de \mathcal{P}_{action} par tout rôle du type ρ dans la famille des rôles $\mathcal{R}_{prédition}^\rho$,
- $\mathcal{Z}_{E_Z}(\rho')$ (resp. $\mathcal{Z}_{E_Z}(\rho'')$) désigne la *zone expérimentale* source de la poiesis ρ' (resp. ρ'') (section 6.4.2.3), c'est à dire la *zone expérimentale* générée par toutes les balises sources d'un rôle du type ρ' (resp. ρ'') dans la famille des rôles $\mathcal{R}_{adaptation}^{\rho'}$ (resp. $\mathcal{R}_{adaptation}^{\rho''}$),
- et l'intersection $\mathcal{Z}_{E_Z}(\rho'') \cap \mathcal{Z}_{E_Z}(\rho)$ est à considérer au niveau des balises expérimentales, et pas au sens du *milieu terminal*; il ne doit pas y avoir de balise commune aux ensembles de définition de deux poiesis de natures distinctes.

Autrement dit, pour chaque nature du type *aisthesis*, quel que soit l'élément du *phénomène* et le rôle dont la nature est ce type d'*aisthesis*, l'activité correspondante fabrique un *milieu-prévision* dont chaque balise expérimentale est un représentant d'un *milieu-expérimentation* qui ne peut être la source que d'un seul type de *poiesis*, que l'on dira associé au type de l'*aisthesis*. Ainsi, le *milieu-prévision* généré par l'*aisthesis* spécifique dans *adaptation* au plus un rôle par type de *poiesis*, et seul le rôle du type de *poiesis* associé à l'*aisthesis* pourra avoir dans son ensemble de définition, le *milieu-expérimentation* résultant des *praxis* sur ce *milieu-prévision*.

5. Au sein de \mathcal{P}^E , l'image de l'ensemble \mathcal{P}_{action} par les rôles d'un type d'*aisthesis* génère une famille de *milieux-prévisions* paramétrant les rôles des *poiesis* (section 6.3.2, page 120) ; seuls les rôles de la *poiesis* associée à cette *aisthesis* sont définis.
6. Au sein de \mathcal{P}^E , la spécification d'un *milieu-expérimentation* dans l'ensemble de définition d'un rôle de type *poiesis* caractérise au plus un rôle par type d'*aisthesis* dans $\mathcal{O}^{prédition}$ (section 6.3.2, page 120), mais seuls les rôles de l'*aisthesis* associée à cette *poiesis* sont définis.

Ces propriétés structurelles sont illustrées par la figure 6.3.

Si les trois premières propriétés établissent globalement un diagramme triangulaire orienté dans le sens des ensembles de paramètres *phénomène*, *milieux-prévisions*, *milieux-expérimentations*, les trois dernières propriétés imposent d'associer les aisthesis et les poiesis, non seulement au niveau des cibles et des sources des rôles correspondants, mais également au niveau des paramètres de ces rôles.



La structure d'une entité comme un diagramme triangulaire orienté entre chacun de nos trois types d'objets actifs (section 6.4) sachant jouer leurs rôles de manière autonome : la *prédiction* crée une balise par *aisthesis* en fonction du *phénomène* pour rechercher des propriétés dans le milieu, l'*action* agit sur le milieu à percevoir par les entités présentes au voisinage du *phénomène* par sa *praxis*, ainsi font toutes les actions des autres entités en donnant à la balise initiale une trajectoire finissant source de la *poiesis* de l'*adaptation* correspondant à l'*aisthesis* ayant générée cette balise. Cette *poiesis* projette le milieu expérimenté dans sa *zone sensorielle* du *phénomène* de l'*action* qui transforme alors sa propre représentation du milieu par ses *savoir-faire internes*.

FIGURE 6.3 : Structure formelle d'entité et relation au milieu expérimental

Ainsi, au sein de \mathcal{P}^E , une balise appartenant à l'intersection d'une classe *milieu-prévision* avec une classe *milieu-expérimentation*, ne peut être la source que de la *poiesis* associée à l'*aisthesis* l'ayant générée, le paramètre *milieu-prévision* ne définit un rôle que de ce type de *poiesis* et le paramètre *milieu-expérimentation* ne définit un rôle que de ce type d'*aisthesis*.

Horloge interne d'une distinction

Chacun des trois objets actifs propose des rôles à jouer. Sa grammaire des activités va caractériser formellement les natures des rôles qui peuvent s'activer, en fonction de sa phrase courante et des prochains *savoir-faire* possibles pour poursuivre sa phrase. L'objet actif a donc besoin d'une horloge capable d'endormir et de réveiller ses *savoir-faire* en fonction des durées d'inhibition suivant toute activité. Ce rôle d'*horloge* est pris en charge par l'*entité* pour chacun de ses trois objets actifs. Nous supposerons que les trois objets caractérisant la structure de l'*entité* partagent la même notion de temps, notion de temps local à l'*entité*, et basée sur une pulsation élémentaire assurée par un mécanisme réel formalisé par un quantum de temps \hbar_t propre à l'*entité* (section 6.3.3.1) et commun à ces trois objets actifs.

Aussi, pour chacun des *savoir-faire* autres que les *praxis*, des trois objets structurant l'*entité*, le rôle d'*horloge* décrémente à chacune de ses pulsations le temps d'inhibition restant à écouler pour ce

savoir-faire. Dès que ce temps d'inhibition est nul, un *rôle* dont l'activité est formellement réalisable, et dont la nature est ce *savoir-faire*, est appliqué à un élément de son ensemble de définition s'il en existe effectivement un, et sa durée d'inhibition associée (équation 6.6) devient le nouveau temps d'inhibition restant à écouter pour ce *savoir-faire*.

Remarquons qu'il est inutile à l'entité de s'occuper des *savoir-faire* du type *praxis* car leurs durées d'inhibition sont systématiquement nulles, par définition de l'objet actif du type *action* (propriété 6.36). Nous notons F la réunion de ces *savoir-faire* autres que les *praxis* :

$$F = \left(\bigcup_{i \in \left\{ \begin{array}{c} \text{prédition} \\ \text{action} \\ \text{adaptation} \end{array} \right\}} F_{n_i} \right) \setminus \{ \rho \in F_{n_{action}} / \text{type}(\rho) = \text{praxis} \} \quad (6.43)$$

et l'on note F_G le sous-ensemble de F constitué des *savoir-faire* de F autorisés par les grammaires $\mathcal{G}_{\text{prédition}, \text{action}, \text{adaptation}}$ à s'activer formellement.

L'entité doit donc posséder une structure lui permettant de réaliser son rôle d'*horloge*. A savoir un compteur de temps d'inhibition par *savoir-faire* qui n'est pas du type *praxis* :

$$\mathcal{P}_h = \mathbb{N}^s \text{ où } s = \text{Card}(F) \quad (6.44)$$

pour la structure du compteur des temps d'inhibition,

$$\text{inhibition} : \left| \begin{array}{ccc} \mathcal{P}_h & \rightarrow & \mathcal{P}_h \\ (h_1, \dots, h_s) & \mapsto & (h'_1, \dots, h'_s) \end{array} \right. \text{ avec } h'_i = h_i - 1 \text{ si } h_i > 0, \text{ sinon } h'_i = 0 \quad (6.45)$$

une application réalisant la mise à jour des compteurs d'inhibition de l'horloge,

$$\text{activation}_{F_G} : \left| \begin{array}{ccc} F & \rightarrow & \{0, 1\} \\ k & \mapsto & \mathbf{b} \end{array} \right. \text{ avec } \mathbf{b} = 1 \text{ si } h_{r(k)} = 0 \text{ et } k \in F_G, \text{ sinon } \mathbf{b} = 0 \quad (6.46)$$

où $r(k)$ donne l'indice du *savoir-faire* k dans le s -uplet \mathcal{P}_h , une application qui, à un *savoir-faire* k , établit si un rôle dont la nature est ce *savoir-faire* est temporellement et formellement activable.

L'application suivante permet de savoir si un élément d'un des ensembles de paramètres est bien dans l'ensemble de définition d'un rôle d'une des familles des rôles :

$$\text{définition} : \left| \begin{array}{ccc} \mathcal{R} \times \mathcal{P} & \rightarrow & \{0, 1\} \\ (f, p) & \mapsto & \mathbf{b} \end{array} \right. \text{ avec } \mathbf{b} = 1 \text{ si } p \in \text{Def}(f), \text{ sinon } \mathbf{b} = 0 \quad (6.47)$$

où \mathcal{R} est la réunion des rôles des trois objets actifs structurant l'entité et dont la nature est dans F et \mathcal{P} la réunion des éléments des ensembles de paramètres des trois objets actifs.

L'application suivante réalise la mise à jour des compteurs des temps d'inhibition en exécutant effectivement l'application d'un rôle sur un élément de son ensemble de définition :

$$\text{exécution} : \left| \begin{array}{ccc} \text{définition}^{-1}(\mathbf{1}) & \rightarrow & \mathbb{N} \times \mathcal{P} \\ (f, p) & \mapsto & (h, p') \end{array} \right. \text{ avec } p' = f(p) \text{ et } h = D^f(p) \quad (6.48)$$

où $\text{définition}^{-1}(\mathbf{1})$ est l'ensemble des activités des objets actifs qui sont définies au sein de l'*entité* et $D^f(p)$ est la durée d'inhibition suivant l'activité $f(p)$ (équation 6.6).

Le rôle d'*horloge* de l'*entité* consiste alors à chaque pas de temps \mathbb{h}_t à faire les cinq étapes suivantes :

1. Calculer : $\text{inhibition}((h_1, \dots, h_s))$, pour $(h_1, \dots, h_s) \in \mathcal{P}_h$.
2. Mettre à jour le sous-ensemble F_G de F constitué des *savoir-faire* de F autorisés par les grammaires $\mathcal{G}_{\text{prédition}, \text{action}, \text{adaptation}}$ à s'activer formellement.

3. Déterminer les natures d'activité autorisées : $activation_{F_g}(\rho)$, pour chaque $\rho \in F$.
4. Déterminer les rôles et les éléments définissant une activité : $définition^{-1}(1)$.
5. Choisir un tel couple (rôle, élément) dont la nature du rôle est un *savoir-faire* autorisé par la troisième étape et l'exécuter en mettant à jour son temps d'inhibition restant dans \mathcal{P}_h par sa durée d'inhibition associée.

Les quatre premières étapes sont explicites dans notre formalisation, par contre, la cinquième étape du rôle d'horloge demande de modéliser explicitement la manière dont le choix est fait lorsqu'il n'y a pas unicité du type de savoir-faire. Nous n'aurons pas besoin de faire des choix dans des ensembles transfinis comme la famille des rôles ou les ensembles de paramètres, car la définition d'une unité nous assurera l'unicité du couple associé à chaque type de savoir-faire. La spécification du type d'entité dépendra exclusivement du modèle retenu pour expliciter le choix parmi un nombre fini de savoir-faire.

Lors de la modélisation du choix d'un savoir-faire par l'horloge, il faudra être attentif au fait qu'un choix peut introduire un biais dans la simulation et nous verrons dans le chapitre 7, pour l'exemple de la simulation du temps propre à chaque entité, par une unique horloge matérielle fournie par l'ordinateur, comment l'introduction du chaos peut éliminer le biais dans ce cas particulier d'itérations asynchrones pour la simulation d'entités autonomes (section 7.3).

Ainsi, le rôle d'*horloge* de l'*entité* demande à cette dernière de posséder une structure du genre :

$$\mathcal{P}_{entité} = (\{0, 1\}^s \times \mathcal{P}_h \times \mathcal{P}(F)) \times \mathcal{P}^E \quad (6.49)$$

où :

- les s booléens permettent de mémoriser l'activabilité des s savoir-faire de F ; ils sont obtenus par le calcul des autorisations avec les fonctions *définition* et *activation* de l'*horloge*.
- \mathcal{P}_h mémorise les temps d'inhibition restants.
- l'ensemble $\mathcal{P}(F)$ des parties de F permet de mémoriser F_g
- enfin, \mathcal{P}^E est la structure offerte par nos trois objets actifs.

En ce qui concerne la durée d'inhibition associée au rôle d'*horloge*, nous lui avons donné implicitement la valeur 1, puisque ces cinq étapes doivent avoir lieu en un temps \mathcal{H}_t .

Nous proposons donc de voir une *entité* comme une structure d'*objet actif autonome*, c'est à dire muni de sa propre horloge matérielle, $Entité = \mathcal{P} \times \mathcal{F} \times \mathcal{A}$.

1. Sa structure paramétrique \mathcal{P} est le nom du type de l'*entité*, son unique savoir-faire qui est l'*horloge*, et l'ensemble de paramètres $\mathcal{P}_{entité}$ proposé par l'équation 6.49.
2. Sa structure des savoir-faire \mathcal{F} est composée d'un singleton : son rôle d'*horloge*.
3. Sa structure des activités \mathcal{A} est constituée de la durée d'inhibition de son horloge qui est constante et vaut 1, et d'une grammaire génératrice du langage constitué des répétitions d'un nombre quelconque de fois son unique savoir-faire *horloge*.

Ainsi, un type entité est un objet actif muni d'une horloge dont la structure paramétrique contient un objet actif de chacun des trois types *prédition*, *action*, *adaptation* et de ce qui permet à son horloge d'exécuter les activités demandées par ces trois types d'objet actif. La détermination complète du type d'*entité* demande de spécifier le modèle utilisé par l'*horloge* pour choisir un savoir-faire à exécuter parmi plusieurs possibles au même *tic* d'*horloge*.

Méthode de création d'une distinction

Le choix des objets actifs et de l'*horloge* intervenant dans la structure d'une entité permet de réaliser une *distinction*, c'est à dire de caractériser un certain type d'*entité*. Nous indiquons ici un exemple de procédure à suivre lors de la modélisation d'un nouveau phénomène naturel dans le système.

La distinction d'un certain type d'entité commence généralement par une caractérisation de l'action du phénomène naturel permettant de le reconnaître. On définira alors les propriétés du milieu sur lesquelles agit le phénomène naturel et l'on modifiera en conséquence la liste des propriétés (équation 6.12). Puis, on spécifiera un objet du type *action* par la donnée de son ensemble de paramètres *phénomène* et d'au moins un savoir-faire du type *praxis*, avec les rôles correspondant à ces *praxis*, afin de pouvoir réaliser les expériences élémentaires (équation 6.15) mesurant ces propriétés.

Il faudra alors préciser la manière dont ils se combinent entre eux et avec les *praxis* déjà modélisées dans le système agissant sur ces propriétés, c'est à dire comment modifier le protocole expérimental pour tenir compte de cette nouvelle *action*. Initialement minimal, l'ensemble *phénomène* peut alors être enrichi pour paramétriser les *praxis* de cette *action* et définir un comportement de plus en plus pertinent. Tant que de nouvelles *praxis* ne sont pas ajoutées, cette modélisation de plus en plus pertinente de l'*action* ne demande aucune modification du reste du système. On fera cependant attention à l'adéquation de la pulsation \mathbb{N}_t de l'horloge avec la complexité numérique des activités internes de l'*action*, afin que la simulation du modèle soit compatible avec notre propre notion du temps [Chareix 01] ; nous pensons surtout au problème de l'immersion en temps réel d'un utilisateur dans le système de réalité virtuelle.

L'enrichissement du modèle d'action sera réalisé selon les modes descriptifs, causaux ou comportementaux [Arnaldi 94]. Mais, à part dans un cas dégénéré du mode descriptif où l'évolution de l'action est non-seulement préprogrammée [Beer 90] mais en plus ne dépend que de l'horloge *interne* à l'entité se contentant d'intégrer son propre pas de temps, il faudra définir des activités de perception, afin que l'*action* soit sensible à son environnement. On sera alors amené à spécifier les objets actifs du type *prédiction* et *adaptation* permettant de doter l'entité d'une perception-active.

Remarquons qu'afin de pouvoir différencier deux distinctions par leurs ensembles \mathcal{P}_{action} du type *phénomène*, nous demandons, lors de la modélisation de deux distinctions qui auraient un même *phénomène*, d'ajouter une caractéristique à leur *phénomène*, pour pouvoir les distinguer.

Ainsi, tout type d'entité est constitué d'une structure formant un diagramme triangulaire orienté entre chacun de nos trois types d'objets actifs par leurs *aisthesis*, *praxis* et *poiesis*. Cette structure est complétée par une horloge interne dotant l'entité d'une autonomie d'exécution pour les différents savoir-faire des trois types d'objets actifs. L'entité peut alors être vue comme un objet actif autonome. Le choix des trois objets actifs et de l'horloge permet de réaliser une *distinction*. Une distinction caractérise alors la structure permettant de catégoriser un type d'entité.

6.5.1.2 L'unité entité et son évolution

A partir d'une *distinction* catégorisant un type d'entité, nous définissons l'*unité entité* avec la donnée d'un élément de son phénomène et d'une famille de balises. Puis nous spécifions la vie d'une *unité entité* en suivant le rythme imposé par les activités de ses trois types d'objets actifs.

L'unité entité

On appelle *état* d'une *entité* la donnée d'un élément du produit cartésien suivant :

$$(\{0,1\}^s \times \mathcal{P}_h \times \mathcal{P}(F)) \times (\mathcal{L}(\mathcal{G}_{prédiction}) \times \mathcal{L}(\mathcal{G}_{action}) \times \mathcal{L}(\mathcal{G}_{adaptation})) \times \mathcal{P}_{action} \times milieu^{F_{n_{aisthesis}}}$$

c'est à dire :

- un triplet assurant la structure de l'horloge et constitué d'un *s*-uplet de booléens, d'un *s*-uplet d'entiers et d'une partie des savoir-faire *F*
- d'un triplet de phrases spécifiant l'histoire de chacun des trois objets actifs et permettant de déterminer $Fg \in \mathcal{P}(F)$, chacune d'elles étant dans chacun des trois langages des objets actifs *prédiction*, *action* et *adaptation*,
- un élément de l'ensemble de paramètres *phénomène* de l'*action*, caractérisant les rôles de l'*action*,

- et d'un $\text{Card}(F_{n_{aisthesis}})$ -uplet de balises, c'est à dire une famille ordonnée constituée d'autant de balises qu'il y a d'aisthesis dans la *prédiction*, traduisant la partie du milieu créée par l'entité pour percevoir activement son environnement

$$\begin{aligned} \text{état}_{\text{entité}} &= \left(\left(\begin{array}{c} \mathbf{b}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_s \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} h_1 \\ \vdots \\ h_s \end{array} \right), F_{\mathcal{G}}, \left(\begin{array}{c} m_{\text{prédiction}} \\ m_{\text{action}} \\ m_{\text{adaptation}} \end{array} \right), p_{\text{action}}, \left(\begin{array}{c} (Top_{\mathbf{E}})^{\rho_1} \\ \vdots \\ (Top_{\mathbf{E}})^{\rho_K} \end{array} \right)_{\rho_k \in F_{n_{aisthesis}}} \right) \\ \text{avec } & \left\{ \begin{array}{l} p_{\text{action}} \in \text{phénomène} \\ m_{\text{prédiction}} \in \mathcal{L}(\mathcal{G}_{\text{prédiction}}), m_{\text{action}} \in \mathcal{L}(\mathcal{G}_{\text{action}}) \text{ et } m_{\text{adaptation}} \in \mathcal{L}(\mathcal{G}_{\text{adaptation}}) \\ \forall \rho_k \in F_{n_{aisthesis}}, \left\{ \begin{array}{l} (Top_{\mathbf{E}})^{\rho_k} \in \mathcal{Z}_{E_{\mathbf{Z}}}(\rho_k) \\ \overbrace{(Top_{\mathbf{E}})^{\rho_k}}^1 = Top_{\mathbf{E}}: \text{prév} \in \text{milieux-prévisions} \\ \overbrace{(Top_{\mathbf{E}})^{\rho_k}}^2 = Top_{\mathbf{E}}: \text{expé} \in \text{milieux-expérimentations} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (6.50)$$

où $F_{\mathcal{G}} \subset F$ sont les savoir-faire des objets actifs pris en charge par l'*horloge* de l'entité, autorisés formellement par les grammaires des trois objets actifs sur la base de chacune des trois phrases $m_{\text{prédiction}}$, m_{action} et $m_{\text{adaptation}}$.

Dans cette définition 6.50, \mathbf{b}_i ne vaut **1** que si $h_i = 0$ et $r^{-1}(i) \in F_{\mathcal{G}}$, $r^{-1}(i)$ étant le savoir-faire correspondant à l'indice i dans \mathcal{P}_h (équation 6.46), mais il faut également pour chaque savoir-faire répondant à ces deux critères que *définition*⁻¹(**1**) soit non vide pour tout rôle du type $r(i)$ et tout élément disponible dans le domaine de ce rôle (équation 6.47), pour qu'une exécution de ce savoir-faire puisse avoir lieu (équation 6.48).

Or, la donnée d'un *état* spécifie les rôles des objets actifs et leurs éléments sources, utilisables par l'unité entité. En effet, grâce aux relations triangulaires dans $\mathcal{P}^{\mathcal{E}}$, la donnée de l'élément p_{action} du phénomène et des balises $(Top_{\mathbf{E}})^{\rho_k}$ paramètre non seulement au plus un rôle pour chaque type de savoir-faire dans les familles de rôles correspondantes, mais définit aussi un unique élément source pour chacun de ces rôles dont la nature n'est pas une *praxis*; pour les *aisthesis* et les *poiesis*, c'est une conséquence des propriétés spécifiées par les items 4 (pour l'unicité des éléments sources), 5 et 6 (pour l'unicité du paramétrage) de la structure $\mathcal{P}^{\mathcal{E}}$ (section 6.5.1.1, page 142).

On appelle *état initial* d'une *entité* un *état* (équation 6.50) tel qu'aucun savoir-faire de F ne soit activable avec aucune inhibition temporelle et aucune autorisation formelle, tel que les phrases soient vides pour chacun des trois objets actifs, et tel qu'aucune balise ne soit créée dans le milieu par les *aisthesis* :

$$\text{état}_{\text{initial}} = \left(\left(\begin{array}{c} \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \right), \emptyset, \left(\begin{array}{c} \emptyset \\ \emptyset \\ \emptyset \end{array} \right), p_{\text{action}}, \left(\begin{array}{c} \emptyset \\ \vdots \\ \emptyset \end{array} \right)_{\rho_k \in F_{n_{aisthesis}}} \right) \quad (6.51)$$

L'*état initial* d'une entité est ainsi entièrement déterminé par la donnée d'un unique élément p_{action} de son ensemble *phénomène*.

Nous définissons l'*unité entité* comme la donnée d'un état initial, d'une horloge respectant la distinction du type de l'entité, mais spécifique à cette *unité*, d'une suite récurrente d'*états*, obtenus par l'activité de l'*horloge* qui exécute, en autonomie au niveau de l'*unité*, des rôles respectant la structure imposée par les trois objets actifs de la distinction, à partir de l'état initial.

$$\left| \begin{array}{l} \text{état}_0 = \text{état}_{\text{initial}} \\ \forall n \in \mathbb{N}, \text{état}_{n+1} = \text{horloge}_{|_{\text{unité}}}(\text{état}_n) \end{array} \right. \quad (6.52)$$

où $\text{horloge}_{|_{\text{unité}}}$ est l'*horloge* de la *distinction* avec des activités du type *poiesis* modifiées comme suit :

1. Lorsqu'une activité — du type *poiesis* sur le *milieu-expérimentation* représenté par la balise de l'*aisthesis* associée à cette *poiesis* — fournit un unique élément du *phénomène* de la distinction, cet élément est le nouveau p_{action} de l' état_{n+1} .
2. Lorsqu'une activité du même type fournit au moins deux éléments du *phénomène* de la distinction, seulement l'un d'entre eux devient le nouveau p_{action} de l' état_{n+1} . Les autres, y compris

ceux dont le *phénomène* cible est dans une autre distinction, sont en nombre fini (section 6.5.1.1, page 142 propriétés de \mathcal{P}^E item 3) et sont utilisés pour créer autant de nouvelles unités des distinctions concernées par la cible de la *poiesis* en question. Ces nouvelles entités sont spécifiées au sein de leurs distinctions, par des *états initiaux* entièrement déterminés par chacun des éléments *paction* de leurs ensembles respectifs du type *phénomène*. Il faut alors expliciter dans la modélisation comment est fait le choix lorsque le *phénomène* cible est celui de la distinction de cette unité, en introduisant une notion d'*image principale* dans les rôles du type *poiesis* dont la cible est le *phénomène* de l'entité elle-même.

Il peut exister des savoir-faire internes comme, par exemple, l'*apoptose* [Brenner et al. 98] des cellules biologiques, terminant la phrase du langage de l'action, de sorte que plus aucune activité *interne* ou du type *praxis* ne puisse avoir lieu au sein de l'entité. Dans ce cas, plus aucune *praxis* ne sera autorisée formellement, et l'entité n'a plus de raison d'être dans la simulation du système multi-modèles. L'entité peut être détruite de la simulation ; ses balises sont alors retirées du milieu.

Ainsi, une *unité entité* — ou plus simplement *entité* — est la donnée d'un état initial au sein d'une distinction d'un certain type d'entité et d'une horloge spécifique à cette entité faisant évoluer ses états en respectant les contraintes imposées par la structure des trois objets actifs constituant la distinction. Chaque entité permet de faire vivre le modèle résultant de la modélisation d'un phénomène naturel.

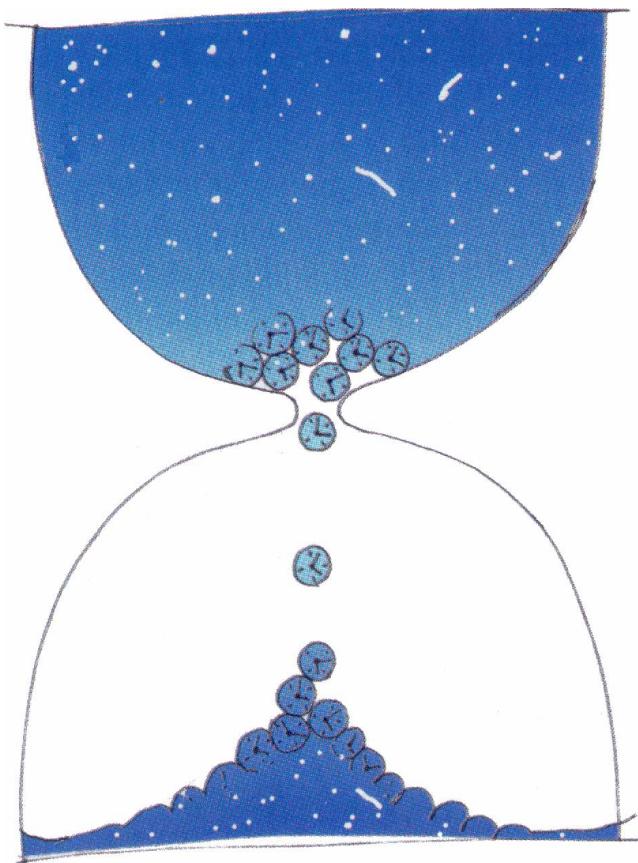
Rythme des activités

Nous examinons le rythme qu'imposent les activités dans une entité autonome, au niveau de son triplet d'objets actifs \mathcal{P}^E . L'évolution d'une *entité* va dépendre du type de l'activité exécutée par son horloge interne, en venant modifier les paramètres et les rôles de l'entité. Ces effets sont déterminés par les savoir-faire du type *interne*, *aisthesis*, *praxis* ou *poiesis*.

1. Une activité *interne* change le phénomène *paction* donc le paramétrage des rôles *internes* et des *praxis* ; le phénomène *paction* peut entrer dans le domaine de définition d'une *aisthesis* activable formellement et temporellement.
Elle change aussi la phrase *maction*, de nouvelles *praxis* et des *s.-f. internes* sont peut-être autorisés formellement. Si cette phrase n'a pas de suite formelle, comme dans le cas de l'*apoptose*, l'entité se détruit.
2. Une activité *aisthesis* change la balise expérimentale correspondant à son type d'*aisthesis*, donc le paramétrage de sa *poiesis* associée ; cette balise créée par l'*aisthesis* est un nouvel élément sur lequel peuvent s'exercer des *praxis*.
Elle change aussi la phrase des *aisthesis* *mprédiction* ; de nouvelles *aisthesis* sont peut-être autorisées formellement.
3. Les activités *praxis* de cette entité, ou des autres entités présentes, ne sont exécutées qu'à l'occasion d'une *poiesis* (section 6.5.2). Les *praxis* concernées précèdent cette *poiesis* sans en modifier le paramétrage, puisqu'elles laissent invariante la classe *milieu-prévision* représentée par la balise sur laquelle s'exercent les *praxis*.
Elles changeront alors la partie *milieu-expérimentation* de la balise source de la *poiesis*, donc le paramétrage de l'*aisthesis* associée à cette *poiesis*. La prochaine telle *aisthesis* pourra notamment savoir si l'expérience est terminée ou non, selon le *protocole* du *milieu-expérimentation* à l'issue des *praxis* précédant la *poiesis*, et elle pourra en tenir compte lors de la demande d'une nouvelle expérience.
La *praxis* changera aussi la phrase *maction*, simplement dans un but de mémorisation des *praxis* activées. Ce changement n'aura aucune incidence sur la manière dont s'enchaînent les *s.-f. internes* à l'entité (section 6.4.3.2, page 136).
4. Une activité *poiesis* change le phénomène *paction* donc le paramétrage des *s.-f. internes* et des *praxis*. Cet élément du *phénomène* peut alors entrer dans le domaine de définition d'un *s.-f. interne* ou d'une *aisthesis* activable formellement et temporellement.

Une *poiesis* change la phrase *m_{adaptation}*, donc de nouvelles *poiesis* sont peut-être autorisées formellement. Elle peut également créer de nouvelles entités.

Toutes les activités autres que celles du type *praxis* font avancer le temps de l'horloge locale à l'entité. Tandis que les *praxis* n'ont aucune influence sur l'écoulement du temps ; elles ont lieu à partir du moment où une autre entité réalise une mesure des propriétés aux points expérimentaux d'une de ses balises, et une *praxis* est située entre deux pas de temps de l'horloge de son entité. La figure 6.4 illustre la manière dont le temps s'écoule dans la simulation en fonction des horloges internes spécifiques à chaque entité autonome.



Ce sablier, extrait de [Smolin 04], peut être une illustration du temps dans notre modèle, lorsqu'on l'observe depuis la *poiesis* d'une entité. Chaque *entité* est munie de sa propre *horloge* interne qui rythme ses *aisthesis*, ses *s.-f. internes* et ses *poiesis*. Le goulet d'étranglement correspond au présent d'un groupe d'entités en interaction, dont l'une a une activité de *poiesis* et les autres ont les activités de *praxis* nécessaires à cette *poiesis* pour établir la mesure des propriétés recherchées. La partie du sablier située en haut représente des entités qui vont interagir dans leurs futurs. Tandis que la partie du sablier située en bas représente des entités qui ont interagi dans leurs passés. Ces notions de passé et de futur n'ont de sens que pour les entités qui ont ou qui vont effectivement interagir directement ou indirectement avec l'entité activant présentement l'une de ses *poiesis*. Toutes les autres entités évoluent ailleurs, dans un espace temporel disjoint du présent sablier.

FIGURE 6.4 : Le sablier des horloges des entités en interaction

Ainsi, chacune des activités associées à un savoir-faire de *F* et qui ne sont pas des *praxis*, rythme la vie de l'entité qui évolue dans la suite de ses états selon son horloge interne. Par contre, les *praxis* de l'entité sont rythmées par les *poiesis* de toutes les entités présentes dans la simulation comme nous le décrivons dans la sous-section suivante.

6.5.2 Interactions entre entités

Les interactions entre les *entités* passent par la médiation du *milieu* créé par les *aisthesis* de chacune des *entités*. L'interaction commence du moment où une *aisthesis* a créé une *balise expérimentale* dans le milieu sous la forme d'un *milieu-prévision*, et se termine au moment de la *poiesis* correspondante, réalisée par cette même entité sur cette *balise expérimentale* qui entre-temps (du point de vue du temps local à cette entité) doit être devenue un *milieu-expérimentation*.

Entre l'*aisthesis* et la *poiesis* va alors avoir lieu la préparation du milieu à la *poiesis* sans qu'aucune *praxis* ne s'exécute : c'est la phase de détermination du *protocole expérimental*, protocole qui sera remis en cause jusqu'à la demande de *poiesis*. A cet instant précis, toutes les activités *praxis* sont exécutées

et se composent dans l'ordre établi par le *protocole*.

6.5.2.1 Détermination du protocole

Nous considérons une collection finie d'entités \mathcal{E}^γ , $\gamma \in \Gamma$, chacune d'elles étant dans un état $\text{état}_{n_{\mathcal{E}^\gamma}}$. Le modèle \mathcal{M}_Γ de l'organisation est alors constitué de la réunion des états des entités \mathcal{E}^γ :

$$\mathcal{M}_\Gamma = \bigcup_{\gamma \in \Gamma} \text{état}_{n_{\mathcal{E}^\gamma}} \quad (6.53)$$

Chacun des états caractérise un certain nombre de balises expérimentales, selon les *aisthesis* précédemment activées par l'entité \mathcal{E}^γ pour arriver dans l'état $\text{état}_{n_{\mathcal{E}^\gamma}}$.

Considérons alors une balise Top_E créée par une certaine *aisthesis* d'une entité : $\text{aisthesis}_k \in F_{n_{\text{aisthesis}}}$. Cette balise Top_E est un représentant d'une classe *milieu-prévision* qui définit et paramètre un unique rôle du type *poiesis* associé à *l'aisthesis* ayant généré cette balise, rôle que l'on note $f_{\text{poiesis}_k} \in \mathcal{R}^{\text{poiesis}_k}$.

Nous allons tout d'abord définir un protocole expérimental commun à tous les points M de Top , pour une expérience élémentaire e donnée dans E ; on le note $\Lambda^{\text{Top}_e} \in \Xi^e$.

Dans toute cette phase préliminaire de détermination du protocole, à part le premier rôle du protocole, l'ordre des autres rôles n'est pas pris en compte pour le moment ; ce sera l'objet de la section 6.5.2.2.

1. initialisation depuis l'*aisthesis*

Tout d'abord, le premier élément de Λ^{Top_e} est temporairement le rôle f_{poiesis_k} . Ainsi, tant que ce rôle est en première position, aucune *praxis* ne modifiera le *milieu-expérimentation* (équation 6.30, page 132).

- (a) Ensuite, viennent tous les rôles du type *praxis* disponibles dans \mathcal{M}_Γ dont la nature est dans la liste des savoir-faire \mathcal{L}^e associée à l'expérience élémentaire e .
Cette première partie de la phase initiale détermine un premier protocole expérimental $\Lambda^{\text{Top}_e} \in \Xi^e$, constitué du premier terme f_{poiesis_k} , et suivi de tous les rôles dont le type de *praxis* participe à e .

$$\Lambda_{\text{sémantique}}^{\text{Top}_e} = \left\{ f_{\text{poiesis}_k} \cup \left\{ f_{p_{\text{action}}} / \exists \gamma \in \Gamma_e, \begin{array}{l} p_{\text{action}} \text{ phénomène de état}_{n_{\mathcal{E}^\gamma}} \\ \text{praxis} \in (F_{n_{\text{praxis}}}^{\mathcal{E}^\gamma} \cap \mathcal{L}^e) \end{array} \right\} \right\} \quad (6.54)$$

où Γ_e est la partie de Γ constitué des entités dont au moins une *praxis* est concernée par l'expérience élémentaire e .

- (b) Ce protocole est alors simplifié en élémiant tous les rôles f du type *praxis*, dont le voisinage d'influence expérimentale \mathcal{V}^f n'intercepte pas les points expérimentaux M_e , $M \in \text{Top}$. Ces voisinages d'influences sont caractérisés par chaque p_{action} de chacune des entité, qui donne explicitement une *zone active* à ses *praxis* (équations 6.27 et 6.30).

$$\Lambda_{\text{topologie}}^{\text{Top}_e} = \left\{ f \in \Lambda_{\text{sémantique}}^{\text{Top}_e} / \mathcal{V}^f \cap \text{Top} \neq \emptyset \right\} \quad (6.55)$$

où $\mathcal{V}^f \cap \text{Top}$ est à considérer au niveau des points de la topologie Top .

La première partie de la construction des rôles du type *praxis* est réalisée selon des aspects sémantiques de la modélisation, associant des *propriétés* avec des *praxis*. Une structure des données favorisant une entrée par l'expérience élémentaire e diminuera la complexité algorithmique de cette étape.

La deuxième partie, demande elle d'effectuer des intersections entre les zones actives des *praxis* et le support topologique de la balise expérimentale. Si n entités demandent chacune une balise, et que toutes ces entités agissent sur chaque balise, cela fait n^2 calculs d'intersection. Cette

complexité en n^2 est propre à tout système d'agents en interaction. Nous verrons que l'organisation temporaire des entités en entités du second ordre (section 6.5.3) peut être une solution pour diminuer fortement cette complexité.

2. remises en cause du protocole initial jusqu'à la *poiesis*

A chaque fois qu'une entité change d'état, le modèle \mathcal{M}_Γ de l'organisation (équation 6.53) est modifié : Γ peut avoir de nouvelles entités créées par une *poiesis*, ou perdre des entités, suite à un savoir-faire interne comme l'*apoptose*. De nouvelles balises peuvent être créées par les *aisthesis*, des éléments de certain *phénomènes* peuvent être changés par des *s.-f. internes* ou des *poiesis*. Toutes les remises en causes suivront les étapes sémantique puis topologique afin de diminuer le plus possible la complexité de ces opérations.

- (a) Toute entité détruite doit retirer ses propres balises et ses rôles du type *praxis* de tous les protocoles.
- (b) Toute nouvelle entité doit éventuellement ajouter à $\Lambda_{topologie}^{Top_e}$, tout rôle f d'un des types *praxis* concernés par e et tel que son voisinage d'influence \mathcal{V}^f intercepte la topologie *Top* de la balise en question.
- (c) Tout rôle d'*aisthesis* est paramétré par une balise de son entité ; si le protocole de cette balise n'est pas vide, le paramétrage peut permettre d'inhiber si nécessaire cette aisthesis en restreignant son ensemble de définition, jusqu'à ce que la *poiesis* correspondante ait pu avoir lieu.
- (d) Tout changement dans la *zone active* \mathcal{Z}_{active} d'un élément *paction* d'une entité \mathcal{E}^γ peut ajouter ou retirer tout rôle f dont la *praxis* est dans $F_{n_{praxis}}^{\mathcal{E}^\gamma} \cap \mathcal{L}^e$. Ce rôle est ajouté dans le cas où la *zone active* $\mathcal{V}^f \subset \mathcal{Z}_{active}$ de f intercepte la topologie *Top* de la balise caractérisant le protocole $\Lambda_{topologie}^{Top_e}$, retiré dans le cas contraire.
- (e) Tout changement d'un élément *paction* d'une entité \mathcal{E}^γ ne modifiant pas la *zone active* \mathcal{V}^f d'un ancien rôle $f \in \Lambda_{topologie}^{Top_e}$ de l'entité \mathcal{E}^γ , entraîne un simple remplacement de l'ancien rôle par le nouveau rôle d'un type identique de *praxis*.

A l'issue de l'initialisation, le protocole contient une majorité de rôles de type *praxis* dont la zone active ne sera pas remise en cause, car situés dans le domaine d'autonomie de l'*action* d'entités \mathcal{E}^γ , $\gamma \in \Gamma^e$. Cependant, des imprévus peuvent survenir et remettre en cause la représentation interne d'une entité qui aurait mal évalué son autonomie ; en effet, il vaut mieux, pour la complexité de la simulation, une grande autonomie, quitte à vérifier des hypothèses sans remettre en cause à chaque fois son comportement, plutôt qu'une prévision à trop court terme demandant de réaliser de nombreux changements dans les protocoles expérimentaux.

D'éventuelles *poiesis* ou des savoir-faire internes peuvent faire entrer de nouveaux rôles dans le protocole associé à une balise, tant que la *poiesis* correspondante n'a pas lieu. Exceptionnellement, des entités peuvent se détruire et doivent alors se retirer de tous les protocoles.

Au moment où l'activité de *poiesis* correspondant à la balise étudiée est prise en charge par l'horloge de l'entité, son exécution demande de vérifier si :

$$\overbrace{Top_E}^{\cdot} \in \text{Def}_{(f^{poiesis_k})} \text{ est vrai ou faux ?}$$

C'est à ce moment que s'arrête la remise en cause du protocole et qu'est véritablement réalisée l'expérience.

6.5.2.2 Réalisation de l'expérience

Le protocole $\Lambda_{topologie}^{Top_e}$ donne la liste de tous les rôles du type *praxis* qu'il faut exécuter pour réaliser l'expérience e en chaque point M de *Top*. L'ordre de leurs combinaisons doit être spécifié par le modélisateur si besoin est. La permutation étant effectuée, le protocole $\Lambda_{topologie}^{Top_e}$ dont les rôles ont été permutés est recopié en chacun des points expérimentaux M^e , sauf le rôle $f^{poiesis_k}$ pour donner autant de protocoles Λ^{M^e} . Ce processus est valable pour toutes les expériences e de E .

Toutes les *praxis* s'exercent alors dans l'ordre des protocoles sur tous les points expérimentaux de la balise, en caractérisant ainsi le *milieu-expérimentation* source de la *poiesis* associée à l'*aisthesis* ayant généré la balise.

Une fois que le protocole est vide pour chacun des points expérimentaux de la balise en question, la *poiesis* peut s'exécuter, si le *milieu-expérimentation* correspondant est bien dans son ensemble de définition.

Ainsi, nous avons caractérisé la *distinction* d'un type d'entité par une *structure triangulaire* entre les trois type d'objets actifs et par une *structure d'horloge autonome* rythmant les activités autres que les *praxis*; la création d'une distinction par le modélisateur peut suivre un processus itératif initialisé par la caractérisation de l'action du modèle sur le monde, médiateur des interactions dans le système multi-modèles.

Au sein d'une distinction, nous avons spécifié formellement la notion d'*entité autonome* comme une succession d'*états* rythmée par une *horloge spécifique* à chaque *unité entité*, chaque état déterminant des paramètres et des rôles disponibles au sein d'un type d'entité ; l'*entité autonome* est la représentation dans la simulation du modèle d'un phénomène naturel. Enfin, nous avons expliquer comment les *aisthesis* permettent de préparer le *milieu* à la réalisation des expériences nécessaires aux *poiesis* des entités autonomes en interaction. L'ensemble des *balises* caractérisant l'état d'une entité forme ce que l'on peut appeler le milieu perceptif de cette entité, par lequel cette entité peut réagir aux *praxis* des autres entités ; nous respectons ainsi les principes de l'interaction des entités situées dans un environnement, tels qu'ils sont décrits par [Ferber et Müller 96].

Ainsi, nous avons formalisé une organisation énactive d'entités autonomes comme une collection d'entité en interaction *via* la médiation d'un milieu qu'elles créent et façonnent par leur propres activités. Chaque entité fait vivre le modèle d'un phénomène naturel dans la simulation, et cette approche permet de construire le modèle d'un système complexe, au fur et à mesure des choix d'hypothèses réalisées lors de la modélisation.

6.5.3 Entités du second ordre

Nous disons qu'une entité est du second ordre, si la distinction, dont elle est une unité, possède un modèle d'*action* dont la représentation interne contient elle-même des entités en énaction. L'horloge d'une entité du second ordre pourra s'occuper de simuler les horloges des entités élémentaires qui constituent sa représentation interne, ou pourra synchroniser ces horloges dans sa représentation interne.

Il peut être intéressant, du point de vue de la complexité des interactions, que des entités s'organisent temporairement en une entité du second ordre qui prendra en charge les multiples aisthesis/poiesis de ces entités en une simulation interne, limitant ainsi le calcul des interactions à ces seules entités, indépendamment du reste du monde. La mise à jour de la représentation interne étant réalisé par l'entité du second ordre à des fréquences beaucoup plus faible que si les entités étaient restées en dehors de l'organisation. Cela est notamment possible lorsque les entités impliquées dans une interaction resteront les mêmes (ou presque) du début à la fin de l'interaction. Le calcul des intersections n'est alors fait qu'une seule fois au début de l'interaction. Tandis que la *praxis* de l'organisation du second ordre est la réunion des *praxis* des entités qui la composent. Lorsque les hypothèses sont réunies pour permettre à un tel type d'organisation de se mettre en œuvre, la diminution de la complexité des interactions peut être particulièrement spectaculaire et permettre des interactions en temps réel entre plusieurs dizaines de milliers d'entité élémentaires.

Un autre intérêt de la notion d'entité du second ordre est de donner accès à la modélisation d'entités autonomes complexes à partir d'entités plus élémentaires, ces entités pouvant s'organiser en une hiérarchie de systèmes emboités comme les orgs [Gerard 60], les unités systémiques organisées [Weiss 61], les holons [Koestler 67], les intégrons [Jacob 70], ou les biolons et les orgons [Bailly et Longo 03].

Dans le cas d'une simulation d'une organisation énactive sur un unique ordinateur, l'horloge du processeur sera utilisée pour simuler des horloges autonomes des entités en interaction et les entités seront représentées à l'intérieur de la machine, dans des zones mémoires spécifiques à chaque

entité, afin de garantir le principe d'autonomie dans une organisation énactive. Le système de réalité virtuelle peut alors être vu comme une entité du second ordre, en interaction avec le modélisateur ou l'utilisateur *via* des périphériques comme des interfaces homme-machine, et avec d'autres machines possèdant leur propre horloges autonomes *via* une structure électronique comme dans une carte VLSI ou dans un réseau éthernet ou internet.

La prochaine section retrace l'ensemble de la méthode de modélisation énactive.

6.6 Vers une méthodologie

Cette section résume l'ensemble de la méthode associée à la modélisation énactive d'un système complexe, en vue de son instrumentation. On peut alors voir se dessiner les prémisses d'une méthodologie. Nous avons donné une formalisation des modèles d'entité autonome et d'organisation énactive, conceptuellement présentés au chapitre 5. Nous rappelons le positionnement de notre formalisation par rapport à la méthodologie scientifique (section 6.6.1). La méthode consiste à définir les *objets actifs* qui sont les briques élémentaires de la formalisation (section 6.6.2). Il faut ensuite caractériser pour chaque modèle, chacun des trois types d'*objets actifs* d'après leurs structures paramétriques et leurs types de savoir-faire (section 6.6.3). Enfin, il faut spécifier l'organisation temporelle des modèles de chaque phénomène d'un système complexe multi-modèles pour définir les horloges des entités autonomes, en interaction dans une organisation énactive (section 6.6.4).

6.6.1 Méthodologie expérimentale

Notre formalisation d'un modèle énactif appartient plus au domaine expérimental que théorique. Plutôt que de vouloir établir des preuves formelles, notre but est l'instrumentation d'un système de réalité virtuelle incluant l'homme dans la boucle et la formalisation proposée permet de simuler des systèmes complexes multi-modèles et multi-échelles. Les simulations sont réalisables tout au long de la création du modèle énactif, et le système offre ainsi un outil de vérification expérimental pour l'aide à la modélisation d'un environnement naturel. Dans notre instrumentation du modèle énactif, les entités autonomes prennent vie en simulant des modèles représentant des phénomènes et nous invitons le modélisateur à autonomiser ces modèles.

6.6.2 Briques formelles

Nous avons défini la structure d'un objet actif \mathcal{O} , constituant une brique de base pour la modélisation d'une organisation énactive, comme la donnée d'un produit cartésien entre trois ensembles $\mathcal{O} = \mathcal{P} \times \mathcal{F} \times \mathcal{A}$.

1. $\mathcal{P} = \{\{(n, \{F_n\})\} \times \{\mathcal{P}_n\}\}$ est sa structure paramétrique permettant de nommer (n), de quantifier et qualifier les natures de ses savoir-faire (F_n), et de fournir un domaine d'évolution possible pour ses caractéristiques internes (\mathcal{P}_n),
2. $\mathcal{F} = \{\mathcal{R}\} = \{\bigcup_{\rho \in F_n} \mathcal{R}^\rho\}$ est sa structure des savoir-faire, fournissant une définition des interactions entre cet objet et les autres ou lui-même par la donnée d'une famille de rôles \mathcal{R} dont les sources et les cibles sont des éléments de domaines d'évolution (aussi appelés ensembles de paramètres des objets).
3. $\mathcal{A} = \{\mathcal{D} \times \mathcal{G}\}$ est sa structure des activités, décrivant les durées d'inhibition suivant toute activité et caractérisant les ordres possibles dans la succession de ses activités.

Si l'ensemble des paramètres \mathcal{P}_n est non vide, la donnée d'un élément de \mathcal{P}_n définit au plus un unique rôle de \mathcal{R} par savoir-faire dans F_n . Un rôle peut s'appliquer effectivement, dès qu'on lui donne un

élément source dans son ensemble de définition et que l'histoire des activités le permet. La structure des activités \mathcal{A} contrôle l'histoire des activités selon chaque savoir-faire de deux manières distinctes. La première, temporelle, inhibe pendant un certain laps de temps toute activité de même nature que celle qui vient de s'exécuter ; ces durées d'inhibition sont caractérisées par \mathcal{D} pour chaque rôle et pour chaque élément transformable par ce rôle. La seconde, formelle, demande à l'enchaînement des savoir-faire d'exprimer des phrases respectant la grammaire \mathcal{G} d'un langage des savoir-faire.

6.6.3 Autonomisation des modèles

Le modèle du phénomène naturel doit préciser les propriétés du milieu virtuel sur lequel il agit et définir sa zone d'influence ; ceci caractérise des structures paramétriques appelées *milieux* et *phénomènes* : **A**. L'autonomisation du modèle demande de le doter de rôles afin qu'il puisse percevoir son environnement — *aisthesis, poiesis* — et être perçu par les autres modèles avec lesquels il peut interagir — *praxis* — : **B**. Enfin, ces paramètres et ces rôles sont regroupés pour former trois types d'objets actifs — *prédiction, action, adaptation* — et l'autonomisation de l'action du modèle du phénomène naturel passe par une représentation interne de l'environnement : **C**.

A. La contrainte majeure pour la simulation d'un environnement naturel en réalité virtuelle est qu'il faut recréer artificiellement au sein de la machine l'immersion nécessaire.

1. Chaque phénomène naturel est associé à des observables localisées dans un espace spatio-temporel. Les observables sont des propriétés mesurables aux points de cet espace topologique par des expériences. Les associations des points de la topologie avec les noms des expériences mesurant des propriétés en ces points forment le *champ expérimental* de la modélisation. Les *propriétés expérimentables* par le système sont des structures résultant de la modélisation de l'action des phénomènes naturels sur leur environnement commun. Une *expérience* est une famille de *propriétés expérimentables* dont on souhaite une mesure en un point de la topologie ; une *expérience* ne précise que les noms des *propriétés* (« *quoi ?* »), les *listes des savoir-faire* d'objets actifs agissant sur les mesures de ces propriétés et les *ensembles des protocoles* permettant de réaliser des mesures (« *comment ?* »). L'ajout d'une nouvelle *propriété expérimentable* ne demande de remettre en cause ni les *propriétés*, ni les *expériences* déjà existantes.
2. Nous avons alors défini le *milieu* comme la réunion des *balises expérimentales*. Ces dernières sont caractérisées par l'association de *points expérimentaux* du champ expérimental à des triplets constitués d'un *protocole*, de *mesures estimées* des propriétés de ces points, et de *mesures expérimentées* de ces propriétés. Puis nous avons défini la notion de *milieu terminal* et trois types de classes d'équivalence entre les éléments du milieu. Les deux premiers types de classe distinguent les balises concernées par la même partie du champ expérimental : les classes des *milieux-prévisions* et les classes des *milieux-expérimentations*. Le troisième type désigne des classes que l'on appelle des *zones expérimentales*. Une *zone expérimentale* regroupe les balises partageant une même famille de géométries dans l'espace topologique et une même famille d'expériences élémentaires.
3. La modélisation d'une action passe par la spécification de l'ensemble *phénomène* des paramètres de l'action ; les paramètres devront donner les moyens de localiser les rôles de l'action dans l'espace topologique. Aussi, l'autonomisation du modèle d'action passe par une réflexion sur un moyen pertinent de représenter en interne le milieu environnant, l'ensemble *phénomène* devant alors contenir les paramètres descriptifs d'une telle représentation et d'une stratégie d'estime associée.

B. L'autonomisation du modèle d'un phénomène naturel, étape nécessaire pour aborder les systèmes complexes, passe par une réflexion sur comment le modèle peut percevoir son environnement et comment ce modèle peut être perçu par les autres modèles. Nous avons alors défini les rôles du type *aisthesis, praxis et poiesis*.

1. Les rôles de nature *aisthesis* créent le milieu nécessaire aux expériences perceptives des modèles des phénomènes. Le savoir-faire du type *aisthesis* est une démarche répondant à la problématique de la *perception-active* d'un modèle lors de son autonomisation : il faut créer la partie du champ expérimental nécessaire à une expérience perceptive et attendre que les autres modèles aient agi sur le milieu expérimental correspondant pour disposer du résultat sous la forme de mesures expérimentées des propriétés du milieu. Aussi, les rôles d'*aisthesis* devront anticiper sur *où* et *quand* le modèle aura besoin de *quoi*, afin que l'environnement soit disponible lorsque le modèle aura besoin de récupérer le résultat de son activité de perception.
2. La modélisation d'un phénomène naturel pour un système de réalité virtuelle doit permettre à l'observateur de reconnaître le phénomène par l'observation de ses savoir-faire du type *praxis* sur son environnement virtuel, afin de pouvoir y transposer sa propre *praxis* en tant qu'être humain. Pour le modèle, il ne s'agit pas d'une véritable *praxis*, dans le sens où le modèle n'a pas forcément d'intentions comme c'est le cas pour les actions d'un être vivant. La *praxis* du modèle est en fait celle du modélisateur, qui a bien des intentions lorsqu'il modélise un système de réalité virtuelle. Cependant, lorsque l'on cherchera à modéliser des phénomènes biologiques, et pas seulement physiques, alors le savoir-faire du type *praxis* pourra être considéré, si nécessaire, dans son sens éthymologique et associé à des intentions.
3. Le savoir-faire du type *poiesis* est une démarche répondant à la problématique de l'adaptation sensorielle d'un modèle lors de son autonomisation ou la création de nouveaux éléments du type *phénomène*. La source d'une *poiesis* est un *milieu-expérimenté*, initialement créé par une *aisthesis* et modifié par les *praxis* en présence. Il s'agit de bien spécifier quelle est la partie *sensorielle* du *phénomène* concernée par la *poiesis*, et pouvoir ainsi distinguer la *poïèse* comme activité préalable et nécessaire à l'épigénèse. Aussi, la création de nouveaux éléments de type *phénomène* se réalise lorsqu'un élément *phénomène* atteint les limites de ses compétences et doit faire appel à d'autres *phénomènes* pour prendre en charge la simulation de l'environnement.

C. Une fois définis ces types de structure paramétrique et de structure des savoir-faire, nous avons caractérisé un paramétrage spécifique de ces savoir-faire. Nos trois types d'objets actifs définissent des relations entre un *phénomène* et les *milieux*, et ces relations sont paramétrées par les éléments mêmes des *milieux* et du *phénomène*.

1. Le type *prédiction* est un couple (*milieu-expérimentation,aisthesis*) qui traduit la préparation du milieu à une perception nécessaire au modèle d'un phénomène naturel pour déterminer ses actions, sur la base du principe anticipateur de la *perception-active* ; cette préparation du milieu consiste à créer des balises dans le milieu où des propriétés recherchées devront être expérimentées ; ce sont les expérimentations précédentes qui paramètrent la prochaine création de milieu.
2. Le type *action* est un couple (*phénomène,praxis*) agissant sur le milieu ainsi créé pour lui donner des propriétés expérimentées. Une action est réalisée en fonction de sa représentation interne de l'environnement et l'action structure cette représentation interne en fonction des buts qu'elle poursuit, en tant que modèle d'un phénomène naturel dans un système de réalité virtuelle.
3. Enfin, le type *adaptation* est un couple (*milieu-prévision,poiesis*) qui informe le modèle du phénomène naturel des résultats expérimentaux réalisés dans les zones explorées par les prédictions ; ce sont les prévisions sur les expérimentations qui paramètrent la manière dont le phénomène perçoit le milieu.

L'autonomisation de l'*action* passe par une représentation interne de l'environnement, qui dans le cadre de notre modélisation ne peut elle-même être plus qu'un sous-système de réalité virtuelle. Nous invitons alors le modélisateur à utiliser une représentation interne de l'*action* sous la forme de trois processus fonctionnant en parallèle et de manière asynchrone, notamment lorsqu'il est question de donner des capacités d'adaptation à la simulation. Cette approche de la modélisation de l'*action*

permet d'envisager des recherches ultérieures sur l'utilisation d'un système de réalité virtuelle pour étudier par exemple l'articulation symbolique/écologique dans l'étude de l'apprentissage chez l'être humain.

Du point de vue de ces trois types d'objets actifs, le rythme des activités est cadencé par les *aisthesis*, les *poiesis* et les *s.-f. internes* aux actions. Les *praxis* d'une *action* s'exécutent indépendamment de la notion de temps local à cet objet actif.

6.6.4 Modèles autonomes en énaction

Les modèles des phénomènes naturels sont autonomisés pour être vus comme des entités autonomes. Une entité autonome est doté d'une horloge interne qui lui est propre, et fait vivre un modèle structuré par un triplet d'objets actifs — *action*, *adaptation*, *prédition*.

1. Un type d'entité est constitué d'une structure formant un diagramme triangulaire orienté entre chacun de nos trois types d'objets actifs par leurs *aisthesis*, *praxis* et *poiesis*, où chaque *aisthesis* est associée à une *poiesis* selon le partage d'une *zone expérimentale* exclusive à chaque couple *aisthesis/poiesis*. Cette structure est complétée par une *structure d'horloge autonome* rythmant les activités autres que les *praxis*. Le choix des trois objets actifs et de l'horloge permet de réaliser une *distinction*. La création d'une distinction par le modélisateur peut suivre un processus itératif initialisé par la caractérisation de l'action du modèle sur le monde, médiateur des interactions dans le système multi-modèles.
2. Au sein d'une distinction, nous avons spécifié formellement la notion d'*entité autonome* comme une succession d'*états* rythmée par une *horloge spécifique* à chaque *unité entité*, chaque état déterminant des paramètres et des rôles disponibles au sein d'un type d'entité ; l'*entité autonome* est la représentation dans la simulation du modèle d'un phénomène naturel.

Nous avons alors formalisé une organisation énactive, comme une collection d'entités autonomes faisant vivre les modèles en interaction dans la simulation. Cette approche permet de construire le modèle d'un système complexe, au fur et à mesure des hypothèses réalisées lors de la modélisation. Les interactions entre les entités autonomes passent par la médiation d'un milieu qu'elles créent par leurs *aisthesis* et façonnent par leur *praxis*. Le temps disponible entre le moment où l'*aisthesis* crée une balise expérimentale et celui où la *poiesis* correspondante récupère le résultat de l'expérience, est utilisé pour préparer le protocole expérimental. Cette préparation consiste notamment à résoudre des problèmes d'intersection, nous avons distingué les aspects sémantiques, des aspects topologiques et nous avons précisé le type de complexité de chacun de ces problèmes.

Enfin, nous avons caractérisé la notion d'entité du second ordre, comme une entité dont la représentation interne contient elle-même des entités en énaction. L'organisation d'entités élémentaires en entités du second ordre est une solution pour diminuer la complexité des interactions. Dans le cas d'une simulation d'une organisation énactive sur un unique ordinateur, l'horloge du processeur sera utilisée pour simuler des horloges autonomes des entités en interaction et les entités seront représentées à l'intérieur de la machine, dans des zones mémoires spécifiques à chaque entité, afin de garantir les principes d'une organisation énactive. Le système de réalité virtuelle peut alors être vu comme une entité du second ordre, en interaction avec le modélisateur.

6.7 Conclusion

Ainsi, nous avons proposé, pour une instrumentation en un système de réalité virtuelle, une méthode de *modélisation* d'une *simulation interactive* d'un *environnement naturel* à base d'un modèle d'entités en *énaction*, modèle présenté conceptuellement au chapitre 5 et formalisé dans le présent

chapitre. Les principales hypothèses retenues sont au nombre de trois et laissent une grande liberté au modélisateur.

1. La modélisation provient d'une praxis humaine.
2. Les modèles des phénomènes naturels sont formalisés comme des entités autonomes et ceci demande d'autonomiser les modèles associés.
3. Les interactions entre entités passent par la médiation d'un milieu structuré par les entités elles-mêmes.

Nous espérons que cette approche de la modélisation des systèmes complexes en vue de leur instrumentation, méthode que l'on pourrait appeler la *modélisation énactive*, apporte un nouveau point de vue au problème de la simulation des phénomènes naturels et que ce point de vue permettra de simuler des systèmes complexes multi-modèles et multi-échelles, jusque là non abordables par les méthodes usuelles de simulation dans des cas pragmatiques.

Le prochain chapitre décrit un langage de programmation invitant le modélisateur à suivre cette formalisation d'un modèle énactif pour en implémenter une simulation en un système de réalité virtuelle, de sorte que le modèle soit instrumentable et expérimentable tout au long de sa création.

Références

- [Apostel et al. 67] Apostel, L., de Broglie, L., Costa de Beauregard, O., Desanti, J., Dubarle, D., Goldmann, L., Granger, G., Gréco, P., Grize, J., Ladrière, J., Leray, J., Lichnerowicz, A., Mandelbrot, B., Matalon, B., Meyr, F., Nowinski, C., Papert, S., Piaget, J., et Ullmo, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*. Encyclopédie de la Pléiade, nrf Gallimard édition.
- [Arnaldi 94] Arnaldi, B. (1994). Modèles physiques pour l'animation. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université de Rennes 1, Rennes, France.
- [Asperti et Longo 91] Asperti, A. et Longo, G. (1991). *Categories, types and structures : an introduction to category theory for the working computer scientist*. Foundations of computing. MIT Press.
- [Bailly et Longo 03] Bailly, F. et Longo, G. (2003). Objective and epistemic complexity in biology. In *International Conference on Theoretical Neurobiology*, pages 1–18, New Delhi, Inde. National Brain Research Centre.
- [Bates 94] Bates, J. (1994). The role of emotion in believable agents. *Communications of the ACM*, 37(7) :122–125.
- [Beer 90] Beer, R. (1990). *Intelligence as adaptive behavior : an experiment in computational neuroethology*. Academic Press, San Diego.
- [Bennett 96] Bennett, A. (1996). Do animals have cognitive maps? *Experimental Biology*.
- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Brenner et al. 98] Brenner, C., Marzo, I., Zamzami, N., Susin, S., Vieira, H., et Kroemer, G. (1998). Coopération mortelle entre la protéine pro-apoptotique Bax et le translocateur à adénine nucléotidique pour le contrôle mitochondriaire de l'apoptose. *Med. Sci.*, 14 :1399–1401.
- [Buche et al. 04] Buche, C., Querrec, R., De Loor, P., et Chevaillier, P. (2004). MASCARET : A pedagogical multi-agent system for virtual environment for training. *International Journal of Distance Education Technologies*, 2(4) :41–61.
- [Buzsaki et al. 92] Buzsaki, G., Horvath, Z., Urioste, R., Hetke, J., et Wise, K. (1992). High frequency network oscillations in the hippocampus. *Science*, 256 :1025–1027.
- [Byrne et Russon 98] Byrne, R. et Russon, A. (1998). Learning by imitation : a hierarchical approach. *Behavioral and Brain Sciences*, 21 :667–721.

- [Chareix 01] Chareix, F. (2001). Le temps et sa mesure, quatre leçons : Aristote, Augustin, Huygens, Einstein. *Documents, Archives de Travail et Arguments (D.A.T.A.)*, 48 :1–66. <http://www.cerphi.net/public/data.htm>.
- [Cliff et al. 93] Cliff, D., Harvey, I., et Husbands, P. (1993). Explorations in evolutionary robotics. *Adaptive Behavior*, 2(1) :73–110.
- [Davenas et al. 88] Davenas, E., Beauvais, F., Arnara, J., Oberbaum, M., Robinzon, B., Miadonna, A., Tedeschi, A., Pomeranz, B., Fortner, P., Belon, P., Sainte-Laudy, J., Poitevin, B., et Benveniste, J. (1988). Human basophil triggered by very dilute antiserum against ige. *Nature*, 333 :816–818.
- [Dennett 89] Dennett, D. (1989). The origins of selves. *Cogito*, 3 :163–173. Reprinted in Kolak D. and R. Martin, eds., *Self and Identity : Contemporary Philosophical Issues*, Macmillan, 1991.
- [Di Marzo Serugendo et al. 96] Di Marzo Serugendo, G., Muhugusa, M., Tschudin, C., et Harms, J. (1996). Formalisation of agents and multi-agent systems – The special case of category theory – Working paper. Rapport Technique CUI-109, Centre Universitaire d’Informatique, Université de Genève.
- [Ehresmann et Vanbremersch 87] Ehresmann, A. et Vanbremersch, J. (1987). Hierarchical evolutive systems. *Bul. Math. Bio.*, 49(1) :13–50.
- [Ehresmann et Vanbremersch 02] Ehresmann, A. et Vanbremersch, J. (2002). Emergence processes up to consciousness using the multiplicity principle and quantum physics. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 627 :221–233.
- [Ferber et Müller 96] Ferber, J. et Müller, J. (1996). Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, pages 72–79, Kyoto.
- [Gardner 85] Gardner, H. (1985). *The mind’s new science : a history of the cognitive revolution*. Basic Book Inc., New York.
- [Gaussier et al. 02] Gaussier, P., Revel, A., Banquet, J., et Babeau, V. (2002). From view cells and place cells to cognitive map learning : processing stages of the hippocampal system. *Biological Cybernetics*, 86 :15–28.
- [George Lee 02] George Lee, C. (2002). Structure and learning of self-adaptative neuro-fuzzy systems. In *International Symposium on Robotics and Automation (ISRA) – Toward metabotics and novel fields and areas*, pages 5–6, Toluca, Mexico.
- [Gerard 60] Gerard, R. (1960). Neurophysiology : an integration (molecules, neurons and behavior). In Field, J., Magoun, H., et Hall, V., éditeurs, *Handbook of Physiology, section 1 : Neurophysiology*, volume 3, chapitre 81, pages 1919–1965. American Physiological Society, Washington DC.
- [Heinze et Gross 01] Heinze, A. et Gross, H. (2001). Anticipation-based control architecture for a mobile robot. In *International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN)*, pages 899–905.
- [Hoc et Amalberti 95] Hoc, J. et Amalberti, R. (1995). Diagnosis : some theoretical questions raised by applied research. *Current Psychology of Cognition*, 14 :73–101.
- [Jacob 70] Jacob, F. (1970). *La Logique du vivant, une histoire de l'hérédité*. Gallimard, Paris.
- [Kodjabachian et Meyer 98] Kodjabachian, J. et Meyer, J. (1998). Evolution and development of neural controllers for locomotion, gradient-following, and obstacle-avoidance in artificial insects. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9 :796–812.
- [Koestler 67] Koestler, A. (1967). *The ghost in the machine*. Hutchinson, London.
- [Kosko 86] Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24 :65–75.
- [Lawvere 66] Lawvere, F. (1966). The category of categories as a foundation for mathematics. In *La Jolla Conference on Categorical Algebra*, pages 1–20. Springer.
- [Lindblom et Ziemke 03] Lindblom, J. et Ziemke, T. (2003). Social situatedness of natural and artificial intelligence : Vygotsky and beyond. *Adaptive Behavior*, 11(2) :to appear.
- [Lisman et Idiart 95] Lisman, J. et Idiart, M. (1995). Storage of short term memories in oscillatory subcycles. *Science*, 267 :1512–1515.

- [Lévy 91] Lévy, P. (1991). *L'idéographie dynamique. Vers une imagination artificielle ?* La Découverte.
- [Mac Lane et Birkhoff 67] Mac Lane, S. et Birkhoff, G. (1967). *Algebra*. Mac Millan, New York.
- [Maffre et al. 01] Maffre, E., Tisseau, J., et Parenthoën, M. (2001). Virtual agents self-perception in virtual storytelling. In *International Conference on Virtual Storytelling (ICVS)*, numéro 2197 in Lecture Notes in Computer Science, pages 155–158. Springer.
- [Mataric 02] Mataric, M. (2002). Visuo-motor primitives as a basis for learning by imitation : linking perception to action and biology to robotics. In Dautenhahn, K. et Nehaniv, C., éditeurs, *Imitation in Animals and Artifacts*, pages 392–422. MIT Press.
- [Maturana 87] Maturana, H. (1987). Everything said is said by an observer. In Thompson, W., éditeur, *Gaia : A way of knowing*, pages 65–82. Lindisfarne Press, Hudson, NY.
- [Meltzoff 95] Meltzoff, A. (1995). Understanding the intentions of others : re-enactement of intended acts by 18-month-old children. *Developmental Psychology*, 31 :838–850.
- [Morineau 04] Morineau, T. (2004). L'émergence d'une perspective écologique en psychologie ergonomique, à ravers la distinction entre différents niveaux de contrôle cognitif dans l'activité. In *Colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCo)*, pages J3–S1, Compiègne, France.
- [Morineau et al. 01] Morineau, T., Chedmail, P., et Parenthoën, M. (2001). An affordance-based model to support simulation in virtual environment. In *Virtual Reality International Conference (VRIC)*, pages 19–26, Laval, France.
- [Morineau et al. 03] Morineau, T., Hoc, J.-M., et Denecker, P. (2003). Cognitive levels of control in air-traffic radar controller activity. *International Journal of Aviation Psychology*, 13 :107–130.
- [Morineau et Parenthoën 03] Morineau, T. et Parenthoën, M. (2003). Une présentation de l'approche écologique en psychologie ergonomique. *Psychologie Française*, 48(2) :77–88.
- [Padberg et al. 92] Padberg, J., Ehrig, H., et Ribeiro, L. (1992). *Recent trends in data type specification*, volume LNCS 785, chapitre Algebraic Petri nets – Petri nets revisited, pages 188–206. Springer-Verlag.
- [Parenthoën et al. 01] Parenthoën, M., Reignier, P., et Tisseau, J. (2001). Put fuzzy cognitive maps to work in virtual worlds. In *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz-IEEE)*, volume 1, pages 252–255, Melbourne, Australia.
- [Parenthoën 02] Parenthoën, M. (2002). Autonomie et perception proactive pour des acteurs virtuels. In *Journée d'Information sur la Commande et le Diagnostic (JICD)*, Rennes, France. INSA.
- [Parenthoën et al. 02a] Parenthoën, M., Buche, C., et Tisseau, J. (2002a). Action learning for autonomous virtual actors. In *International Symposium on Robotics and Automation (ISRA)*, pages 549–554, Toluca, Mexico.
- [Parenthoën et al. 01] Parenthoën, M., Morineau, T., et Tisseau, J. (2001). Affordances implemented by fuzzy cognitive maps for believable agents ; virtual helmsman prototyping by sailing affordances. In *European Operational Research Conference (EURO)*, page 146, Rotterdam, NetherLand.
- [Parenthoën et al. 02b] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002b). Believable decision for virtual actors. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE-SMC)*, volume 3, page MP2R3, Tunisia.
- [Parenthoën et al. 02c] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002c). Perception active pour acteurs virtuels/active perception for virtual actors. In *Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA)*, pages 219–226, Montpellier, France.
- [Piaget 67] Piaget, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*, chapitre Nature et méthodes de l'épistémologie, pages 1–132. Encyclopédie de la Pléiade, nrf Gallimard édition.
- [Piaget et Inhelder 75] Piaget, J. et Inhelder, B. (1975). *La psychologie de l'enfant*, volume 369 de *Que Sais-je ?* PUF, Paris.
- [Poincaré 14] Poincaré, H. (1914). *La science et l'hypothèse*. Flammarion, Paris, Le Bon édition. <http://www.univ-nancy2.fr/ACERHP/bhp/sh.html>.

- [Richalet 98] Richalet, J. (1998). *Pratique de l'identification*. Hermès.
- [Rosen 85] Rosen, R. (1985). *Anticipatory systems*. Pergamon.
- [Shepard 84] Shepard, R. (1984). Ecological constraints on internal representation : resonant, kinematics of perceiving, imagining, thinking and dreaming. *Psychological Review*, 91 :417–447.
- [Singhal et Zyda 99] Singhal, S. et Zyda, M. (1999). *Networked Virtual Environments – Design and Implementation*. ACM Press, addison-wesley édition.
- [Smolin 04] Smolin, L. (2004). Des atomes d'espace et de temps. *Pour la Science*, 316 :46–55.
- [Szwarcman et al. 01] Szwarcman, D., Feijó, B., et Costa, M. (2001). Goal-oriented dead reckoning for autonomous characters. *Computers and Graphics*, 25 :999–1011.
- [Tisseau 01] Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle : autonomie in virtuo. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), document de synthèse, Université de Rennes 1. <http://www.enib.fr/~tisseau/>.
- [Tisseau 04] Tisseau, J. (2004). Manifeste de la réalité virtuelle – le virtuoscope. Rapport Technique CERV-2004-001, Centre Européen de Réalité Virtuelle, Brest, France.
- [Tisseau et Harrouet 03] Tisseau, J. et Harrouet, F. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 2, chapitre Autonomie des entités virtuelles. Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- [Tisseau et al. 04] Tisseau, J., Parenthoën, M., Buche, C., et Reignier, P. (2004). Comportements perceptifs d'acteurs virtuels autonomes – une application des cartes cognitives floues. *Technique et Science Informatiques*, à paraître.
- [Tolman 48] Tolman, E. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4) :189–208.
- [Trullier et Meyer 00] Trullier, O. et Meyer, J. (2000). Animat navigation using a cognitive graph. *Biological Cybernetics*, 83 :271–285.
- [Vygotsky 35] Vygotsky, L. (1935). *Mental development of children during education*. Uchpedzig.
- [Weiss 61] Weiss, P. (1961). Self-differentiation of basic patterns of coordination. *Comparative Psychological Monographs*, 77 :1–96.
- [Wells 99] Wells, G. (1999). *Dialogic inquiry : towards a sociocultural practice and theory of education*, chapitre The zone of proximal development and its implications for learning and teaching. Cambridge University Press, New York. <http://www.oise.utoronto.ca/~gwellis/resources/ZPD.html>.

Chapitre 7

Du modèle formel aux entités virtuelles

Les objets virtuels, tout comme l'espace dans lequel ils s'inscrivent, sont des acteurs, des agents. Dotés de mémoire, ils disposent de fonctions de traitement de l'information et d'une autonomie, régulée par leurs programmes. Les mondes virtuels ne cessent d'être traversés d'une étrange vie artificielle, intermédiaire. Chaque entité, chaque objet, chaque agent est assimilable à un système expert, possédant ses propres règles de comportement et les appliquant ou les adaptant en réponse aux changements de l'environnement, aux modifications des règles et des métarègles régissant le monde virtuel [Quéau 93].

Philippe Quéau, *Le virtuel, vertus et vertiges*

7.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons le point de vue de l'instrumentation informatique du modèle présenté conceptuellement dans le chapitre 5 et formellement dans le chapitre 6. C'est une interaction homme-ordinateur, dont le résultat définit l'interaction ordinateur-entité virtuelle. En d'autre termes : que faut-il apporter à l'ordinateur pour permettre l'implémentation d'une organisation énactive et sa simulation participative ?

Cette interaction ordinateur-entité ne peut se situer que dans la composante phénoménologique de l'ordinateur, c'est à dire son organisation logicielle : les données, les instructions et les activités. Le développement du génie logiciel a conduit à la définition de modèles, de méthodes et de méthodologies qui sont rendus opérationnels par les nombreux outils qui les mettent en œuvre. Cependant, parler d'environnement de développement de logiciel serait par trop vague : aucun référentiel et *a fortiori* aucun outil ne couvre l'ensemble des besoins (même si *l'on peut tout écrire en assembleur!*). Dans le domaine plus restreint du développement de systèmes multi-agents (ici, nos entités en énaction peuvent être vues comme des agents autonomes), on retrouve cette même diversité avec des méthodes [Iglesias et al. 98], des modèles (par exemple un modèle de coordination d'actions comme les réseaux contractuels [Smith 80]), des langages (citons par exemple **MetateM** [Fisher 94], **ConGolog** [De Giacomo et al. 00], des générateurs d'applications comme **ZEUS** [Nwana et al. 99], des bibliothèques de composants comme **JATLite**¹, des simulateurs de systèmes multi-agents comme **SMAS**², des boîtes à outils qui sont généralement des paquetages de classes offrant des services fondamentaux (cycle de vie des agents, communication, transport de messages...) et des classes implémentant certaines composantes d'un système multi-agents [Boissier et al. 99, Parunak 99].

¹ **JATLite** : Java Agent Template Lite (java.stanford.edu/java_agent/html)

² **SMAS** : Simulation of Multiagent Asynchronous Systems (www.hds.utc.fr/~barthes/SMAS)

Pour la simulation multi-agents participative, il est nécessaire de disposer d'un environnement permettant d'exécuter en parallèle le comportement des différentes entités et offrant une large gamme de composants pour l'interface avec les utilisateurs. Le choix se porte sur des langages s'exécutant sur une machine virtuelle autotisant la programmation parallèle : historiquement **Smalltalk'80** et, de plus en plus, **Java** ; l'évolution de la plateforme **DIMA** est révélatrice de cette tendance [Guessoum et Briot 99]. Dans le cas où le système participatif est distribué sur plusieurs ordinateurs, le système **Magellan** illustre une approche récente orientée composants pour la visualisation interactive d'environnements virtuels via des réseaux [Marvie 04].

Le moteur de simulation d'objets actifs et de rendu 3D, **ARéVi**³, développé au Laboratoire d'Ingénierie Informatique (LI2)⁴, a été conçu pour répondre à la fois au besoin d'un langage d'implémentation des systèmes multi-agents et aux exigences de la simulation participative en réalité virtuelle de ces systèmes. En effet, le noyau d'**ARéVi** offre fondamentalement les possibilités d'un langage orienté *objets actifs*, par extension de la notion de langage orienté *objets* consistant à donner une autonomie d'exécution aux objets. De plus, **ARéVi** propose toutes les fonctionnalités classiques d'une plateforme de réalité virtuelle participative, ce qui répond à la contrainte conceptuelle de l'utilisateur — observateur, acteur, créateur — du chapitre 5. La bibliothèque **ARéVi** représente près de cent mille lignes de code source principalement écrites en **C++** mais aussi en **Flex++** et **Bison++** ; elle est tout à fait opérationnelle et stable, et est utilisée dans de nombreux projets, notamment au sein du Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV)⁵.

Les interactions ordinateur-entité virtuelle ou entité-entité définissent la représentation informatique des entités au sein de l'ordinateur qui doit simuler les comportements d'entités énactives. Leurs activités doivent être ordonnancées par la machine qui les supporte et leurs interactions demandent de résoudre des problèmes non triviaux de topologie spatio-temporelle. Notre contribution s'inscrit alors dans le noyau d'**ARéVi** et consiste à ajouter les classes, les méthodes et les activités nécessaires pour passer d'un langage orienté objets actifs à un langage orienté entités énactives (section 7.2), générant un environnement virtuel peuplé d'entités en interaction. Leur autonomie temporelle est assurée par des itérations asynchrones et chaotiques (section 7.3), et leurs interactions passent par la médiation d'un milieu structuré et façonné par les entités elles-mêmes (section 7.4).

7.2 Représentation des entités virtuelles

Dans un ordinateur, ce qu'on appelle usuellement un objet est une structure particulière de la mémoire contenant des données (les attributs de l'objet) et des instructions (les méthodes de l'objet). Ces notions correspondent pour nos objets actifs formels (chapitre 6, section 6.3) à leurs structures paramétriques et à leurs structures des savoir-faire. Typiquement, l'exécution de l'une des méthodes d'un des objets modifie les données de la mémoire, donc indirectement les objets et leurs méthodes. Seulement, dans les langages orientés objets, ces objets sont passifs ; ils ne s'activent que sur invocation explicite d'une de leur méthode.

La section suivante explique en quoi le travail effectué au LI2 sur le moteur de simulation d'objets actifs **ARéVi** permet d'implémenter la structure des activités associée au modèle formel des objets actifs, en leur fournissant une autonomie d'exécution et proposant ainsi les possibilités d'un langage orienté *objets actifs* (section 7.2.1). Nous présentons ensuite les classes qu'il faut introduire au noyau d'**ARéVi** pour implémenter les notions relative à la description des entités en enaction et passer ainsi d'un langage orienté *objets actifs* à un langage orienté *entités énactives* (section 7.2.2).

³ **ARéVi** (Atelier de Réalité Virtuelle) : disponible sous licence LGPL sur <http://www.enib.fr/~harrouet>

⁴ LI2 (Laboratoire d'Ingénierie Informatique) <http://www.enib.fr/LI2>

⁵ CERV (Centre Européen de Réalité Virtuelle) <http://www.cerv.fr>

7.2.1 Objets actifs et activités

L'implémentation des objets actifs est réalisée *via* la bibliothèque ARéVi (Atelier de Réalité Virtuelle), spécifiquement dédiée au problème de faire vivre des objets actifs dans un monde virtuel interactif. Cette bibliothèque, écrite en C++, est développée par l'équipe ARéVi du LI2 au CERV. Elle est le prolongement des travaux sur oRis [Harrouet et al. 02], comme moteur de simulation d'objets actifs pouvant être distribué sur plusieurs ordinateurs [Rodin et Nédélec 00], et des développements menés sur les versions antérieures d'ARéVi [Harrouet et al. 99] (première version en 1994), comme moteur de rendu 3D et d'immersion propre à la réalité virtuelle [Duval et al. 97, Reignier et al. 98]. 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, par exemple, en utilisant Cygwin pour compiler ARéVi sous l'OS Windows.

Un point qui motive souvent des reproches à l'encontre de C++ concerne l'utilisation des pointeurs et en particulier la politique d'allocation/libération d'objets qui sont eux-mêmes partagés par d'autres objets. De nombreux langages proposent des mécanismes de ramasse-miettes afin de décharger l'utilisateur de cette tâche. De la même façon, en C/C++, il existe de nombreuses solutions à base de *smart-pointers* plus ou moins souples et automatisées. ARéVi utilise le mécanisme `template` afin de fournir des types qui se substituent complètement aux pointeurs et qui s'utilisent exactement de la même façon. Le propos principal de ces pseudo-pointeurs est de pouvoir mettre en œuvre un ramasse-miettes qui soit à la fois automatique et contrôlable. La classe `Objet`, au sens d'ARéVi représente l'ancêtre commun de toutes les classes de la bibliothèque ARéVi et des applications qui utilisent ses services. Elle propose un ensemble de fonctionnalités qui sont donc communes à tous les objets quels que soient leur rôle et leur signification. En particulier, la mise en œuvre des pseudo-pointeurs et du mécanisme de ramasse-miettes repose sur le fait que les objets manipulés sont de type `Objet` ou d'un type qui en dérive. Les objets de type `Objet` ou d'un type dérivé ne peuvent donc être créés que par allocation dynamique et ne peuvent être manipulés qu'à travers les pseudo-pointeurs.

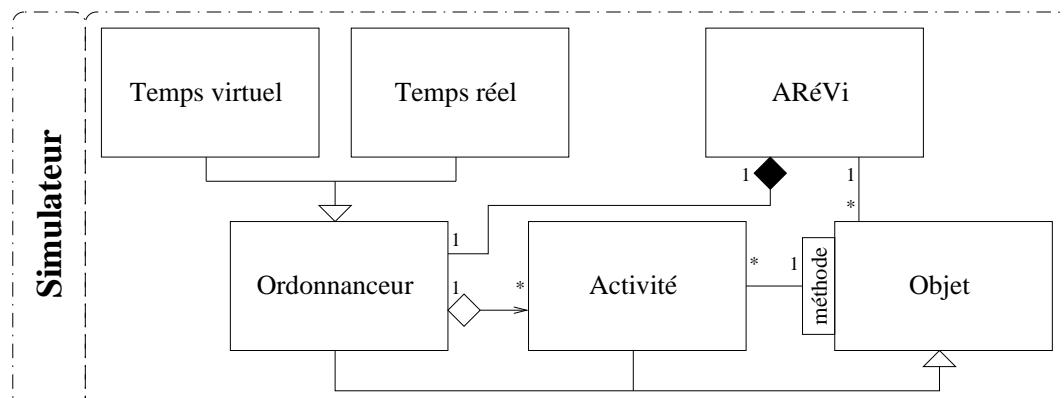
Nous retrouvons alors dans cette notion d'`Objet` au sens d'ARéVi, un mécanisme qui, en déchargeant l'utilisateur de la gestion des allocations/libérations d'objets qui sont eux-mêmes partagés par d'autres objets, facilite la participation de l'utilisateur et qui permet d'implémenter la *structure paramétrique* et la *structure des savoir-faire* telles qu'elles sont définies formellement au chapitre 6, section 6.3, page 119. Il reste à préciser comment la *structure des activités* des objets actifs formels prend du sens dans un langage orienté objets actifs, consistant à donner une autonomie d'exécution aux objets.

Le déroulement normal d'une application ARéVi se décompose généralement en deux phases bien distinctes : l'initialisation et la simulation.

1. L'initialisation de la simulation par la création d'un ensemble d'objets dotés d'une autonomie d'exécution.
2. La simulation proprement dite qui consiste à laisser *vivre* ces objets actifs, qui peuvent eux-mêmes en créer d'autres.

De plus, pendant toute la durée de la simulation, ARéVi met à jour les vues 3D et détecte les actions de l'utilisateur (clavier, souris ...). L'activation des entités énactives est assurée par un ordonnanceur qui gère des activités (figure 7.1). Ces notions sont représentées respectivement par les classes `Ordonnanceur` et `Activité` ; ce sont des types d'`Objet`, au sens d'ARéVi.

L'instant courant est déterminé par l'ordonnanceur et est exprimé sous la forme d'un `double`. Tous les calculs sur le temps sont donc sujets à des erreurs d'arrondis, c'est pourquoi il est nécessaire de fournir une précision à la construction de l'ordonnanceur. Tous les calculs sur le temps sont arrondis à



Le simulateur *ARéVi* se résume en un unique **Ordinateur** gérant des **Activités** qui appellent des méthodes d'**Objets**. L'**Ordinateur** peut être **Temps réel** ou **Temps virtuel**. Le **Temps réel** s'appuie sur l'horloge matérielle du processeur. Le **Temps virtuel** ne s'appuie que sur les durées d'inhibitions fournies par les objets actifs eux-mêmes, quel que soit le temps processeur nécessaire à l'exécution des différentes activités.

FIGURE 7.1 : Activité et Objets : *ARéVi* un langage orienté *objets actifs*

cette précision qui doit être négligeable devant le plus petit ordre de grandeur temporel de l'application. Dans ces conditions, le test d'égalité stricte entre deux instants a du sens.

La classe **Ordinateur** est une classe abstraite et **ARéVi** en propose deux implémentations qui se distinguent par la manière de déterminer l'instant courant : les classes **Temps réel** et **Temps virtuel**.

1. **Temps réel** considère que le temps s'écoule comme à notre montre, ou plutôt, comme pour l'horloge du processeur.
2. **Temps virtuel** considère que le temps *sauté* d'instant remarquable en instant remarquable.

Dans tous les cas, il est possible de suspendre/relancer l'ordonnanceur à l'aide de sa méthode `setSuspended()`. Bien entendu, pendant la durée de suspension, l'ordonnanceur considère que le temps ne s'est pas écoulé.

Pour l'ordonnanceur **Temps réel**, l'heure courante est demandée au système d'exploitation à chaque début de cycle d'activation. Cette valeur représente le nombre de secondes depuis le démarrage de la simulation. Il est possible d'accélérer ou de ralentir le temps perçu par un facteur multiplicatif réglé à l'aide de sa méthode `setTimeFactor()`. Un cycle d'activation de l'ordonnanceur **Temps réel** concerne donc toutes les activités qui ont une date de déclenchement antérieure ou égale à la date déterminée. Ce déclenchement peut éventuellement avoir un retard non négligeable par rapport à la date prévue si la machine est extrêmement chargée en calcul.

Ce type d'ordonnanceur est particulièrement adapté aux applications de simulation interactive puisque la notion de temps utilisée dans la simulation correspond à la notion de temps perçue par l'utilisateur.

L'ordonnanceur **Temps virtuel**, quant à lui, détermine l'heure courante en début de cycle comme étant la date de déclenchement prévue la plus proche. Ainsi, toutes les activités dont la date de déclenchement prévue est strictement égale à cet instant sont exécutées. Quel que soit le temps de calcul nécessaire aux différents cycles d'activation, nous sommes sûrs que le temps de simulation ne prendra jamais de retard ; toutefois ce temps de simulation n'a plus rien à voir avec le temps perçu par l'utilisateur et est exprimé dans une unité qui ne doit pas nécessairement être assimilé à des secondes ; on peut l'interpréter comme des nanosecondes ou des siècles.

Ce type d'ordonnanceur est particulièrement adapté aux simulations dans lesquels le temps doit être contrôlé avec une échelle propre aux phénomènes modélisés. Cette notion de temps peut alors être très différente de l'impression humaine du temps et l'interactivité avec l'utilisateur ne peut avoir le même statut qu'en temps-réel.

Une **activité** doit être créée en précisant un délai de déclenchement ; c'est à dire que la date de son premier déclenchement correspond à l'instant courant de l'ordonnanceur plus le délai spécifié. Ce délai sera mis à jour par l'objet actif en fonction de la *durée d'inhibition* calculée sur cette activité (chapitre 6, section 6.3.3, page 121). L'exécution d'une activité consiste simplement à appeler une

méthode sur un **Objet**. Cette méthode doit avoir le prototype suivant :

```
bool maMéthode (Réf<Activité> act, double dt) ;
```

et doit être affectée, ainsi que l'objet actif concerné par cette méthode qui est l'un de ses rôles au sens formel (chapitre 6, section 6.3.2, page 120), à l'activité à l'aide de sa méthode **setBehavior()**. Ainsi, très souvent les objets créent eux-mêmes les activités qui les concernent. Bien entendu, il est possible de créer plusieurs activités pour un même objet et celles-ci sont indépendantes.

La méthode appelée par le déclenchement doit renvoyer un **bool** indiquant si l'activité doit être relancée une prochaine fois. Si cette valeur vaut **vrai**, le délai passé au constructeur est réutilisé pour déterminer la date du prochain déclenchement. Ce délai est modifié à la fin de chaque activité avec la méthode **setInterval()** de l'activité, correspondant au résultat du calcul de la durée d'inhibition suivant cette activité, durée fournie par la *famille des durées d'inhibition* de l'objet actif (chapitre 6, équation 6.6, page 122). Une activité peut donc servir à provoquer un traitement unique dans le futur ou bien un traitement répétitif en jouant simplement sur la valeur de retour du traitement en question. On peut même imaginer un traitement répétitif qui s'arrête à un moment donné (il renvoie **faux**) sur un critère applicatif (l'objectif de l'activité a été atteint).

Cette même méthode reçoit en argument l'activité qui est en train de l'exécuter ainsi que la durée qui s'est écoulée (toujours du point de vue de l'ordonnanceur) depuis le précédent déclenchement, ou depuis l'instantiation de l'activité pour le premier déclenchement. Avec un ordonnanceur **Temps virtuel**, l'argument **dt** correspond exactement à la période de l'activité. En revanche, avec une ordonnanceur **Temps réel**, il peut y avoir du retard et **dt** est nécessairement supérieur ou égal à la période spécifiée. Il est par exemple envisageable, dans une simulation interactive, de comparer l'argument **dt** avec la période de l'activité (obtenu avec sa méthode **getInterval()**) et ajuster celle-ci quand le retard est manifestement trop important (la machine est trop chargée en calcul). Cela correspond, par exemple, pour une entité énactive à une situation où une *aisthesis* prédit un certain pas de temps avec **setInterval()**, et que cette prédiction est systématiquement erronée. Il faut alors remettre en cause le modèle interne de l'entité afin d'augmenter son autonomie *d'action* pour que la prédiction respecte le résultat de la *poiesis* correspondante **getInterval()**; sinon, la simulation sera entachée d'une erreur numérique non garantie par le modèle de l'entité énactive.

Notons, qu'à l'inverse, une activité peut recevoir une période nulle (dans son constructeur ou avec **setInterval()**), ce qui signifie qu'elle sera déclenchée aussi souvent que possible, c'est à dire à chaque cycle de l'ordonnanceur, comme c'est le cas, par exemple, pour les *praxis* des entités.

Il est possible de suspendre et relancer une activité à l'aide de sa méthode **setSuspended()**. C'est le mécanisme qui permet de respecter la *grammaire des activités potentielles* de l'objet actif, en suspendant les activités des savoir-faire non autorisés formellement par cette grammaire (chapitre 6, section 6.3.3.2, page 122). Remarquons qu'une activité est dans l'état **terminé** (méthode **isEnded()**) lorsque la méthode qu'elle exécute renvoie **faux** ou bien lorsqu'on invoque sa méthode **abort()**; elle devient alors inutilisable. Lorsque, par exemple, toutes les activités d'une entité sont dans l'état **terminé**, cette entité peut être détruite de la simulation.

Ainsi, la notion formelle *d'objet actif* peut être correctement instrumentée par **ARÉVi** qui donne une autonomie d'exécution aux objets actifs et facilite la participation de l'utilisateur dans le système. Il reste à préciser l'instrumentation des notions *d'entité autonomes* en interaction par la *médiation* d'un milieu créé par les entités elles-mêmes.

7.2.2 Vers un langage orienté entités énactives

Une entité énactive est fondamentalement un objet actif possédant une autonomie d'exécution, lui-même constitué d'un objet actif de chacun des trois types — *prédiction*, *action*, *adaptation* — chaque type d'objet actif étant caractérisé par ses types de savoir-faire :

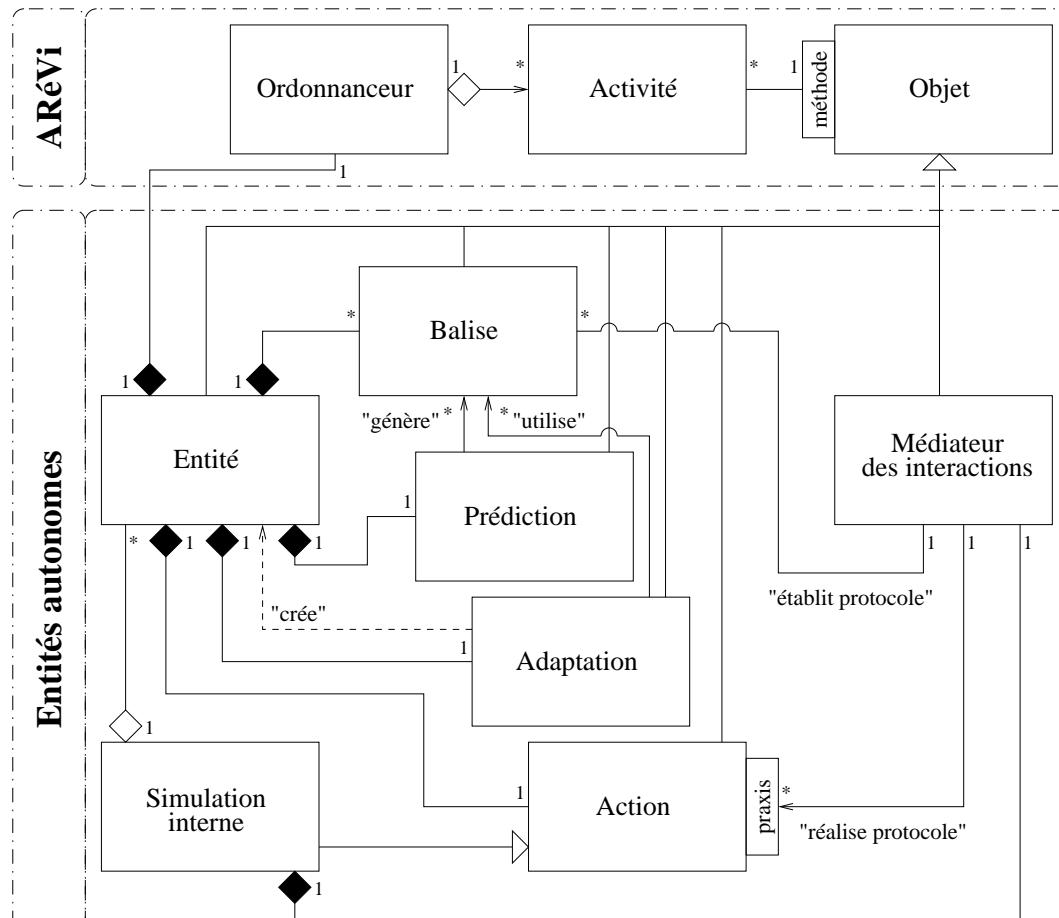
- l'*aisthesis* pour la *prédiction*,
- la *praxis* et les *savoir-faire internes* pour l'*action*,
- et la *poiesis* pour l'*adaptation*;

Une *aisthesis* structure une balise expérimentale en fonction de l'élément *phénomène* de l'entité. Une *poiesis* modifie la zone sensorielle de cet élément *phénomène* ou crée de nouvelles entités en fonction des propriétés expérimentées données par la balise correspondante au sein de cette entité. Un *s.-f. interne* modifie l'élément *phénomène* en fonction de lui-même et une *praxis* participe à donner des propriétés à toutes les balises structurées par les *aisthesis* de chacunes des entités présentes dans la simulation.

Les balises qu'une entité utilise pour percevoir son environnement sont constitutives de l'entité ; leur nombre égale le nombre d'*aisthesis* de l'objet *prédition*, lui-même égal au nombre de *poiesis* de l'objet *adaptation*. Ces balises ne sont qu'une structure de données ; elles n'ont pas de savoir-faire, ni d'activité. D'une certaine manière, l'entité « transporte » le milieu auquel elle réagit. L'entité génère ce milieu perceptif par ses *aisthesis* et en utilise les propriétés expérimentées par ses *poiesis*.

La notion d'entité du second ordre (chapitre 6, section 6.5.3, page 153) demande que l'action d'une telle entité ait des capacités de *simulation interne* faisant vivre un ensemble d'entités, en autonomie au sein de l'entité du second ordre.

La détermination dynamique du protocole expérimental (chapitre 6, section 6.5.2.1) est assurée par un objet actif que l'on appelle le *médiateur des interactions* ; c'est lui qui a la tâche de mettre en relation les *praxis* des entités présentes avec les *balises* en demande d'expérimentation. Lorsqu'une



Toutes les classes impliquées dans l'instrumentation d'un modèle énactif des phénomènes naturels hérite d'**Objet**, au sens d'ARéVi. Une **Entité** est constituée d'un ordonnanceur et d'un objet actif de chaque type — **Prédiction**, **Adaptation**, **Action** — et des types de **Balise** générées par les *aisthesis* de sa **Prédiction** et utilisées comme sources des *poiesis* correspondantes dans son **Adaptation**. Si l'objet actif du type **Action** d'une entité possède une représentation interne de son environnement permettant la **Simulation d'Entités**, c'est une **Entité** du second ordre. Le **Médiateur des interactions** s'occupe d'établir et de réaliser les *protocoles expérimentaux* demandés par les entités prises en charge à un niveau donnée de simulation, en mettant en relation les *praxis* des **actions** avec les *balises expérimentales* de l'**Entité**. De même qu'une **Simulation** est composée d'un unique **Médiateur** s'occupant des balises et des praxis des entités simulées en interne, le simulateur ARéVi orienté entités est composé d'un unique **Médiateur**.

FIGURE 7.2 : Vers un langage orienté entités énactives pour l'animation des modèles énactifs

balise expérimentale est récupérée par la *poiesis* correspondante, le *médiateur des interactions* fournit tous les pointeurs vers les *praxis* participant à la réalisation de l'expérience telle qu'elle est spécifiée par le protocole. Il existe un unique médiateur par simulation, que ce soit pour la simulation ARéVi, ou pour chacune des simulations internes aux entités du second ordre.

La modification à apporter à ARéVi, consiste alors à lui ajouter un unique médiateur des interactions (au même titre qu'il possède déjà un unique ordonnanceur d'objets actifs) et à donner la possibilité à chaque entité de posséder son propre simulateur interne, chaque simulateur interne étant constitué d'un unique ordonnanceur et d'au plus un médiateur des interactions : aucun dans le cas d'une entité simple, un unique dans le cas d'une entité du second ordre.

Aussi, l'ordonnanceur n'est plus unique, et il faut préciser à la construction des activités à quel ordonnanceur elles appartiennent. L'ordonnanceur d'une entité ordonnera les activités de ses propres constituants, à savoir chacun des objets des trois types ; dans le cas d'une entité du second ordre, son ordonnanceur doit s'occuper en plus du médiateur et des horloges des entités simulées en interne (voire des simulateurs internes à certaines de ces entités).

De plus, toute écriture/lecture d'une balise (par *aisthesis/poiesis*) ou toute modification d'une praxis (par *s.-f. interne/poiesis*) doit être accompagnée d'une mise à jour chez le médiateur prenant en charge ces balises ou ces praxis ainsi modifiées.

Les relations structurelles entre l'entité, ses trois types d'objet actif, ses balises, son ordonnanceur et le médiateur des interactions, associé au niveau de simulation de ces entités, sont illustrées par le diagramme UML de la figure 7.2.

Ainsi, nous avons proposé une spécialisation du langage orienté *objets actifs* ARéVi à la description d'entités autonomes en énaction ; cela nous rapproche alors de la notion de langage orienté *entités énactives*, facilitant la modélisation participative des systèmes complexes, comme, par exemple, un environnement naturel. L'environnement virtuel est constitué d'*entités autonomes* implémentées en tant qu'objet actif au sens d'ARéVi, et définies à partir de chacun des trois types d'objet actif — *prédiction, action, adaptation*. Les *entités*, situées dans l'espace et le temps, interagissent *via* des *balises expérimentales* proposant un support topologique spatio-temporel et sémantique permettant de définir et de localiser les interactions dans l'espace et dans le temps. L'ensemble des *balises* d'une entité forme ce que l'on peut appeler le milieu perceptif de cette entité. Le rôle du *médiateur des interactions* est d'établir le protocole expérimental pour chaque balise, ce qui demande, une fois résolue la question sémantique : « *qui agit sur quoi ?* », de résoudre les problèmes topologiques relatifs à la localisation des *praxis* des entités et de leurs *balises*, afin de répondre à : « *qui agit où et quand ?* ».

La mise en œuvre d'une organisation énactive repose sur le fait que l'ensemble des entités autonomes jouent leurs rôles respectifs et que les médiateurs des interactions établissent et réalisent les protocoles expérimentaux de chacune des balises des milieux perceptifs des entités. La prochaine section propose d'étudier de plus près comment peuvent être simulées les horloges internes des entités, par l'unique horloge du processeur. Puis la section 7.4 étudie le problème de leurs interactions *via* le milieu.

7.3 Itérations asynchrones et chaotiques

Chaque entité autonome, qu'elle soit réelle ou virtuelle, utilise des propriétés temporelles perçues dans l'environnement pour déterminer ses activités. Ces propriétés temporelles sont issues de la praxis de l'ensemble des entités agissant dans l'environnement réel. L'homme et l'ordinateur sont tous deux inscrits dans le monde réel et possèdent leurs propres horloges internes qu'ils utilisent consciemment ou non pour organiser leurs activités dans le temps. L'homme ou l'ordinateur sont des exemples d'entités autonomes dans le sens où ils possèdent leurs propres mécanismes physiques de mise en œuvre de leurs activités. Tel n'est pas le cas d'un objet actif simulé sur un ordinateur ; ses activités doivent être prises en charge par l'ordinateur qui le simule, afin que chaque objet actif puisse jouer son activité.

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

[Baudet 78] afin de respecter l'autonomie des entités (section 7.3.1), et chaotiques [Miellou 74] pour ne pas introduire de biais dans la simulation (section 7.3.2).

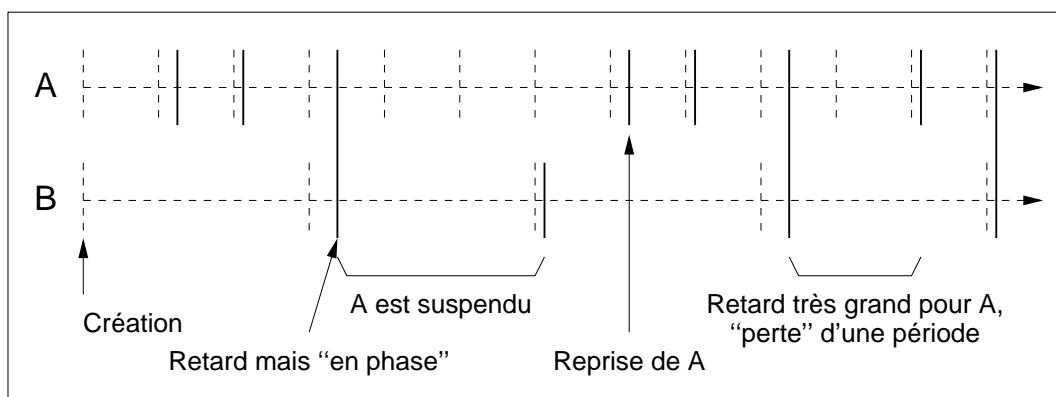
7.3.1 Simulation de l'autonomie temporelle

L'ordonnanceur système d'ARéVi est un singleton. C'est le seul ordonnanceur faisant des appels directs au système d'exploitation du CPU : typiquement la méthode `getTimeOfDay()` pour connaître l'heure courante et la méthode `select()` pour réveiller l'ordonnanceur par tout événement provenant sur un descripteur de fichiers ou simplement pour faire une pause jusqu'à l'instant de la prochaine activité ; il s'agit alors de ne pas faire "chauffer" inutilement le CPU dans le cas d'une utilisation Temps réel et qu'il reste du temps à la fin d'un cycle avant la prochaine activité, tout en vérifiant qu'une IHM ne donne pas une nouvelle activité à prendre en charge de suite. Tous les autres ordonnanceurs éventuels passent par cet ordonnanceur système. Dans le cas où il existe plusieurs ordonnanceurs, une activité donnée ne peut être prise en charge que par un unique ordonnanceur, comme indiqué par le diagramme UML d'ARéVi (figure 7.1). Aussi, pour changer une activité d'ordonnanceur, il faut explicitement l'arrêter (méthode `abort()`) auprès de son ordonnanceur courant et la créer auprès du nouvel ordonnanceur, afin de ne pas risquer de la dédoubler.

Un ordonnanceur est responsable de l'avancement du temps pour les activités qu'il prend en charge et doit donc exécuter ces activités lorsque leur date de déclenchement respective est atteinte (section 7.2.1). A un instant donné, il sélectionne toutes les activités qui ont une date de déclenchement antérieure ou égale et provoque leur exécution.

Durant l'exécution de toutes les activités retenues à un instant donné, le temps est considéré comme indiscernable ; la méthode `getTime()` de l'ordonnanceur renvoie la même valeur pendant tout le cycle d'activation.

Aussi, le temps étant considéré comme indiscernable, la précision des calculs sur le temps liée à un ordonnanceur joue sur l'asynchronisme des itérations (figure 7.3). Plus la précision est caractérisée par un nombre proche de zéro (grande précision), plus la simulation est asynchrone : à la limite, une unique activité à lieu par cycle de simulation. Tandis qu'à l'opposée, plus la précision est associée à des erreurs d'arrondis importantes (faible précision), plus la simulation est quasi-synchrone ; même si plusieurs activités s'exécutent séquentiellement dans un même cycle de simulation, elles voient toutes le temps de la même manière au sein de ce cycle.



Les calculs sur le temps sont arrondis selon une précision qui doit être négligeable devant le plus petit ordre de grandeur temporel de l'application. Lorsque l'on assimile une durée d'inhibition (constante) à une période, l'ordonnanceur respecte cette notion de période pour déclencher une activité donnée, sur un multiple de cette période ; afin que des modèles quasi-asynchrones puissent être simulés. Ici, l'activité A fonctionne trois fois plus souvent que B, et de manière synchrone : lorsque B s'exécute, A s'exécute aussi. En pointillé apparaissent les instants d'exécution théoriques de A et B, tandis que les très pleins (verticaux) correspondent aux moments d'exécution lors d'une simulation. Plus la tolérance sur l'erreur d'arrondi est petite, et plus les activités sont asynchrones ; alors que plus la tolérance est grande, moins les activités distinguent une différence sur le temps et plus elles réalisent des simulations quasi-synchrones.

FIGURE 7.3 : Déclenchement périodique d'activités quasi-asynchrones

Cependant, pour des raisons utilitaires, extérieures au principe même de la simulation réalisée, les activités peuvent être réparties selon trois priorités :

- 0 priorité *normale* (par défaut),
- 1 activation en début de cycle,
- 1 activation en fin de cycle.

Cela permet de gérer des problèmes comme des acquisitions/émissions de données externes, en particulier pour les interactions avec l'utilisateur. La plupart du temps, la priorité normale sera utilisée et il vaudra mieux expliciter un ordre pour les activités avec les grammaires des objets actifs, plutôt qu'avec cette possibilité de « dernier recours ».

Chaque entité qui n'est pas dans une simulation interne demande alors directement à l'ordonnanceur système d'ARéVi de prendre en charge l'activité de son horloge interne. L'horloge de l'entité est alors un ordonnanceur local, simulé par l'ordonnanceur système d'ARéVi ; elle fait vivre ses trois types d'objet actif. Si cet ordonnanceur est minimaliste pour une entité qui n'est pas du second ordre, il peut avoir la même complexité que l'ordonnanceur d'ARéVi (dont ont aurait redirigé les appels systèmes directs) pour les entités du second ordre, dont l'objet actif du type *Action* doit faire vivre d'autres entités en simulation interne. Les entités qui sont en simulation interne demandent à l'ordonnanceur de l'entité qui les simule directement de prendre en charge leurs horloges. A part le fait que l'ordonnanceur permettant une simulation dans la simulation n'est pas l'ordonnanceur système d'ARéVi, tout le reste se passe comme si l'entité simulante se comportait comme ARéVi vis à vis des entités qui ne sont pas en simulation interne ; l'ordonnanceur système d'ARéVi construit le temps de la simulation pour chaque entité du second ordre et sert de médiateur avec l'OS de l'ordinateur pour les ordonnanceurs spécifiques à chaque entité du second ordre. Cette spécificité dépend des types de simulation à réaliser en interne par l'entité du second ordre, et ne se limite pas aux seules dérivations Temps réel ou Temps virtuel proposées par ARéVi.

Ainsi, l'autonomie d'exécution des entités est prise en charge directement ou indirectement par l'ordonnanceur système d'ARéVi. Les entités qui ne sont pas dans une simulation interne sont considérées comme n'importe quel objet actif : c'est l'ordonnanceur système d'ARéVi qui donne directement une autonomie d'exécution à leurs horloges, selon des itérations qui peuvent aller d'asynchrones à quasi-synchrones, en fonction de la précision temporelle à laquelle travaille cet ordonnanceur principal. Pour les entités simulées par une entité du second ordre, tout se passe de la même manière à une indirection près pour les appels systèmes, sauf que c'est l'ordonnanceur de l'entité du second ordre (son horloge locale) qui prend en charge l'ordonnancement des entités qu'il fait vivre en simulation interne et du médiateur des interactions correspondant.

7.3.2 Rôle du chaos

Lorsque plusieurs activités doivent avoir lieu dans un même cycle de simulation, l'ordre dans lequel ces activités ont lieu peut donner des résultats différents à l'issu de ce cycle. Par exemple, l'activité interne ou poétique d'une entité modifie sa praxis, donc potentiellement la source de la *poiesis* d'une autre entité, selon qu'elle est exécutée avant ou après cette modification de *praxis*. Nous avons vu à la sous-section précédente, qu'il était possible de donner une priorité aux activités, ce qui impose d'exécuter d'abord celles de priorité 1, puis celles de priorité 0, et enfin celles de priorité -1. En revanche, pour une priorité donnée et un instant donné, il n'y a aucune raison que les activités s'exécutent selon un ordre préétabli. Utiliser un ordre systématique, ou pire, ne pas faire attention à l'ordre d'exécution des activités risquerait d'introduire un biais dans la simulation [Harrouet 00]. Afin de minimiser le risque de biais dans une simulation, les activités ayant la même priorité sont exécutées dans un ordre aléatoire au sein de chaque cycle d'activation.

En proposant de telles itérations, dites chaotiques [Miellou 74], le biais dû à l'ordre d'exécution s'annule en moyenne au bout d'un nombre suffisamment grand d'itérations. Pour les deux types d'ordonnanceur système d'ARéVi, les itérations sont par défaut chaotiques. Il en sera de même pour les ordonnanceurs du second ordre ; on proposera des solutions à base d'itérations chaotiques, afin de minimiser le risque de biais qui pourrait apparaître dans les simulations internes des entités du second ordre.

Pour la résolution numérique des systèmes d'équations différentielles, il a été démontré mathématiquement qu'à tout problème de résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles pour lequel il existe une méthode numérique synchrone, peut être également associé une

méthode numérique asynchrone et chaotique et sa vitesse de convergence est du même ordre (jusqu'à l'ordre 4) [Redou 02]. Ces deux approches synchrones/asynchrones de la résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles ont été comparées en détail pour le problème de la coagulation du sang en bio-informatique (impliquant une cinquantaine de réactions chimiques interdépendantes dans la cascade hématologique de formation d'un caillot), et les solutions numériques sont identiques [Kerdelo et al. 02].

Ainsi, la simulation de l'autonomie temporelle des entités est réalisée par un ensemble d'ordonnanceurs tous simulés par l'ordonnanceur système d'ARéVi, déclenchant les activités des entités selon un temps commun, construit sur la base de l'horloge matérielle du CPU de l'ordinateur. Les itérations sont asynchrones afin de respecter l'autonomie des entités, et lorsque plusieurs activités doivent être exécutées dans un même cycle de simulation, l'introduction du chaos permet de minimiser le biais de simulation.

La prochaine section étudie le fonctionnement des médiateurs des interactions, mettant en relation les balises expérimentales avec les *praxis* des entités.

7.4 Interactions entité-entité

Nous étudions dans cette section le problème de l'implémentation du *milieu* dans une organisation énactive, en tant que *médiateur des interactions* entre les entités virtuelles en énaction au sein du système ARéVi. Le rôle de chacun des médiateurs est d'établir et de réaliser les *protocoles expérimentaux* de chacune des balises des *milieux perceptifs* des entités selon les *praxis* mises à disposition par les entités du même niveau de simulation ; *i.e.* celles dont les activités d'horloge sont prises en charge par le même ordonnanceur que celui du médiateur.

Quel que soit le niveau de simulation étudié, le processus mis en œuvre par le médiateur à chaque cycle de la simulation est identique (section 7.4.1). Les entités s'organisent dynamiquement en entités du second ordre ou se détruisent et modifient alors le terrain des activités des médiateurs (section 7.4.2).

7.4.1 L'objet actif *médiateur des interactions*

Nous étudions le comportement du médiateur d'un niveau donné de la simulation. Un certain nombre d'entités vivent à ce niveau. Elles structurent des balises par leurs *aisthesis*, mettent à disposition un certain nombre de *praxis* et ont besoin de récupérer le résultat d'une expérience au moment d'une de leur *poiesis*.

Le but du médiateur des interactions est de permettre, pour chaque balise structurée par une *aisthesis*, la définition du protocole expérimental — de son initialisation à sa remise en cause — jusqu'à la *poiesis* correspondante, puis de réaliser alors l'expérience en faisant s'exécuter les *praxis* concernées par le protocole.

L'objet actif *médiateur des interactions* utilise une représentation interne des protocoles sémantiques et topologiques (chapitre 6, section 6.5.2), sous la forme de *dictionnaires* de pseudo-pointeurs (ou *template*) vers les balises et les *praxis*. Les clés d'entrée dans ces dictionnaires seront d'abord sémantiques, selon les types de *praxis* concernés ou les expériences élémentaires, puis topologiques selon la forme des balises et le voisinage d'influence des *praxis*.

Toute apparition d'entité, toute disparition d'entité, ou toute modification de la part d'une entité concernant ses balises ou ses *praxis* demande de mettre à jour les dictionnaires du médiateur. Aussi, afin d'éviter que le médiateur se comporte tel Sisyphe avec l'établissement des protocoles, un système de drapeau est utilisé par le médiateur, pour qu'il puisse réarranger ses deux dictionnaires de protocoles, sans avoir à tout parcourir à nouveau pour les mettre à jour. Toute *praxis* du protocole sémantique dont la topologie a été étudiée est marquée comme telle, qu'elle participe ou non au

protocole topologique ; afin de ne pas avoir à réévaluer l'intersection de son domaine d'influence avec la topologie de la balise. Toute balise pour laquelle l'initialisation a eu lieu, respectivement le protocole topologique est entièrement spécifié, respectivement l'expérience a été réalisée, est dite **initialisée**, respectivement **prête**, respectivement **expérimentée**.

Les savoir-faire principaux du médiateur sont l'initialisation sémantique des protocoles des balises, la simplification du protocole sémantique en un protocole topologique, la remise en cause des protocoles et la réalisation d'une expérience.

1. L'initialisation sémantique des protocoles des balises consiste à réaliser l'équation 6.54 définissant page 151 la notion de protocole sémantique pour notre modèle énactif (figure 7.4). Cette méthode devra être appelée en premier pour toute balise résultant d'une *aisthesis* d'une entité en énaction au niveau de ce médiateur des interactions.

initialisation_des_protocoles(Réf<Balise> Top_E) :

```

précondition : la balise  $Top_E$  est non initialisée (résultat d'une aisthesis).
RAZ marquage des praxis étudiées pour  $Top_E$  ;
RAZ protocole sémantique pour  $Top_E$  ;
RAZ protocole topologique pour  $Top_E$  ;
marquer comme étudiée pour  $Top_E$  chaque praxis du protocole de la balise ;
recopier protocole de la balise dans le protocole sémantique pour  $Top_E$  ;
recopier protocole de la balise dans le protocole topologique pour  $Top_E$  ;
tant que { il existe une praxis  $f$  non étudiée pour  $Top_E$  et que
   $f$  concernée sémantiquement par  $Top_E$  :  $\exists e \in E, \text{nature}_{(f)} \in \mathcal{L}^e$  }, faire
  ajouter  $f$  dans protocole sémantique ;
  RAZ du drapeau "balise prête" pour  $Top_E$  ;
fin tant que
 $Top_E$  est initialisée ;
RAZ du drapeau "balise nouvelle ou modifiée" pour  $Top_E$  ;
RAZ du drapeau "balise expérimentée" pour  $Top_E$  ;

```

FIGURE 7.4 : Pseudo-code du rôle d'initialisation des protocoles par le *Médiateur des interactions*

2. La simplification topologique des protocoles des balises consiste à réaliser l'équation 6.55 définissant page 151 la notion de protocole topologique pour notre modèle énactif (figure 7.5). Cette méthode participe à l'initialisation du protocole, au sens formel de la section 6.5.2.1 du chapitre 6 ; elle doit être précédée de la méthode **initialisation_des_protocoles(Top_E)** pour une balise donnée Top_E . A moins que la balise soit prête ou expérimentée, cette méthode sera utilisée pour préparer la source de la future *poiesis* en résolvant à l'avance les problèmes d'intersection entre la topologie Top de la balise et les domaines d'influences V^f des praxis f concernées par une expérience de E . Remarquons que le calcul des intersections peut être réalisé par une heuristique approchée, à condition que l'heuristique assure qu'un résultat vide signifie une intersection effectivement vide, comme, par exemple, l'heuristique des boîtes englobantes ; sinon des praxis influentes risqueraient d'être éliminées.

simplification_topologique(Réf<Balise> Top_E , Réf<Praxis> f) :

```

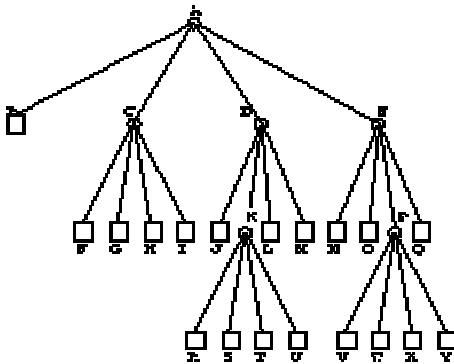
précondition balise : la balise  $Top_E$  est initialisée et non prête et non expérimentée.
précondition praxis : { la praxis  $f$  est non étudiée pour  $Top_E$  et
  est dans le protocole sémantique pour  $Top_E$ .
si  $V^f \cap Top = \emptyset$  alors
  retirer  $f$  du protocole topologique de  $Top_E$  si besoin est ;
sinon
  ajouter  $f$  dans protocole topologique de  $Top_E$  ;
fin si
marquer  $f$  comme étudiée pour  $Top_E$  ;
si toute praxis du protocole sémantique pour  $Top_E$  est étudiée pour  $Top_E$  alors
   $Top_E$  est prête ;
fin si

```

FIGURE 7.5 : Pseudo-code du rôle de simplification topologique par le *Médiateur des interactions*

Les problèmes de topologie plus fine, jusqu'au point, sont résolus par les praxis elles-mêmes ; si le nombre de points dans une balise est trop grand la praxis demande la méthode à l'entité ayant

enregistré cette balise, comme c'est le cas pour la balise de visualisation constituant la géométrie de la surface de la mer à animer. La répartition des points n'étant pas régulière, une simple méthode à base de boîtes englobantes n'est pas suffisamment efficace. Aussi, un processus d'arbre à cadrants ou *quad-tree* (figure 7.6) est utilisé afin de simplifier la complexité de cette opération [Klinger et Dyer 76]. La fabrication de l'arbre est réalisée à l'initialisation de la géométrie, en même temps que la triangulation. Ces deux structures topologiques peuvent rester fixes d'un point de vue des voisinages pendant toute la simulation, si elles ne subissent que des transformations laissant invariante la notion de voisinage.



L'approche "quad-tree" base la représentation d'une région en une subdivision successive de la région en cadrants. Si un quadrant ne vérifie pas un critère, il est subdivisé à son tour en 4 sous-cadrants. Cette procédure récursive permet de recouvrir toute la région avec des blocs vérifiant le critère donné initialement. Ce processus peut être représenté par un arbre, où chaque noeud représente une subdivision. Chaque feuille de cet arbre est un bloc représentant un portion de la région totale qui vérifie le critère initial, qui n'a donc pas besoin d'être à nouveau subdivisé. Nous avons appliqué cette technique sur la grille géométrique nécessaire à la visualisation de la mer, avec comme critère le nombre maximal de points par bloc, afin de disposer de la notion de "boîte englobante" généralisée à une grille irrégulière permettant de déterminer les points de la grille appartenant aux groupes de vagues ou aux déferlements, et avons ainsi fortement diminuer la complexité numérique de l'animation de la mer.

FIGURE 7.6 : Décomposition des points de la géométrie en "quad-tree"

3. La remise en cause des protocoles des balises consiste à tenir compte de toute modification concernant une praxis pour toutes les balises non expérimentées et concernées par cette praxis (figure 7.7). Cette méthode met à jour le protocole sémantique des balises pour tenir compte de l'ajout ou du retrait de cette praxis et redemande l'étude topologique dans le cas où elle aurait déjà été effectuée ; le pseudo-pointeur sur la praxis peut être le même si ce ne sont que les paramètres de la praxis qui sont modifiés, il faut donc réévaluer l'intersection de son domaine d'influence avec la forme de la balise. Cette méthode doit être appelée systématiquement à chaque fois qu'une praxis apparaît, disparaît ou est modifiée.

remise_en_cause_des_protocoles(Réf<Praxis> f) :

```

précondition : la praxis f est nouvelle ou modifiée (résultat de poiesis ou de s.-f. interne).
pour chaque balise non expérimentée TopE concernée par f ( $\exists e \in E, \text{nature}_{(f)} \in \mathcal{L}^e$ ) faire
  si f indisponible (langage des actions, entité détruite) alors
    retirer f des praxis étudiées pour TopE ;
    retirer f du protocole sémantique pour TopE ;
    retirer f du protocole topologique pour TopE ;
  sinon
    ajouter ou remplacer f dans protocole sémantique pour TopE ;
    marquer f comme non étudiée pour TopE ;
    RAZ du drapeau "balise prête" pour TopE ;
  fin si
fin pour
  RAZ du drapeau "praxis nouvelle ou modifiée" ;

```

FIGURE 7.7 : Pseudo-code du rôle de remise en cause des protocoles par le *Médiateur des interactions*

4. La réalisation de l'expérience, décrite formellement par la section 6.5.2.2 du chapitre 6, consiste à finir de préparer l'initialisation sémantique et topologique, puis à écrire le protocole effectif en les points expérimentaux des balises respectant un ordre des compositions des praxis, puis d'excécuter les praxis dans cet ordre afin de caractériser les mesures expérimentées de la balise, en tant que source d'une *poiesis* (figure 7.8). Ecrire les protocoles en chaque point expérimental n'a de sens que si ces protocoles diffèrent d'un point à l'autre ; sinon, un unique protocole est mémorisé par le médiateur et est utilisé indirectement en chaque point expérimental de la balise.

Si les deux dernières méthodes, correspondant aux remises en cause des protocoles et aux réalisations d'expériences sont appelées directement par les entités en fonction des activités des leurs horloges, les deux premières méthodes d'initialisation sémantique et topologique peuvent être associées à des activités propres au médiateur des interactions pour la préparation du milieu aux expériences

réalisation_expérience(Réf<Balise> *Top_E*) :

```

précondition balise : la balise TopE est non expérimentée.
si TopE non initialisée alors
    initialisation_des_protocoles(TopE)
fin si
tant qu'il existe une praxis f non étudiée pour TopE faire
    simplification_topologique(TopE, f)
fin tant que
// la balise est alors prête du point de vue du médiateur.
pour chaque expérience élémentaire e ∈ E faire
    extraire du protocole topologique pour TopE les praxis concernées par e ;
    calculer la permutation des ces praxis respectant l'ordre protocolaire ;
    recopier le protocole résultant en chaque point expérimental Me (M ∈ Top) de la balise.
fin pour
pour chaque point expérimental Me ∈ Top × E faire
    composer les praxis dans l'ordre du protocole de la balise en Me ;
fin pour
TopE est expérimentée (et peut alors servir de source à la poiesis) ;

```

FIGURE 7.8 : Pseudo-code du rôle de réalisation d'une expérience par le *Médiateur des interactions*

nécessaires aux *poiesis*. Ces activités du médiateur seront créées par les entités en énaction, et deux idées peuvent guider la manière de spécifier des heuristiques dans le cadre d'une animation temps réel. La première consiste à observer la charge du processeur pour augmenter ou diminuer dynamiquement leurs durées d'inhibition et profiter d'un éventuel temps libre au niveau du processeur. La seconde consiste à rendre linéaire l'écoulement du temps dans la simulation.

1. Les délais d'exécution des activités du médiateur peuvent être établis en fonction des informations temporelles que l'horloge de l'entité reçoit par exemple de son ordonnanceur, et à partir desquelles elle peut estimer la charge du processeur en comparant son heure d'exécution avec sa demande prévisionnelle. Moins le processeur est chargé, et plus il sera intéressant de préparer activement le milieu.
2. D'autre part, ces activités propres au médiateur, permettent de répartir la préparation d'une balise expérimentale sur toute la durée séparant l'*aisthesis* l'ayant générée de la *poiesis* correspondante ; cela a comme conséquence de générer une simulation dans laquelle le temps peut s'écouler de manière plus linéaire, en évitant, par exemple, un blocage du temps dû à la réalisation simultanée d'un grand nombre d'expériences à un moment donné, séparé par de grands intervalles pendant lesquels il n'y a qu'un nombre faible d'expériences à réaliser.

N'oublions pas que ce rôle de médiateur est lié à une complexité en n^2 où n serait le nombre d'entités demandant chacune une balise et proposant chacune une praxis. Cependant, si les entités ne fonctionnent pas toutes à la même fréquence temporelle, ce n'est qu'une fraction de n qui impose sa complexité à une certaine échelle temporelle.

Prenons l'exemple de la visualisation de la surface de la mer, modélisée en tant qu'interaction avec un utilisateur humain. La visualisation demande de définir une entité dont l'*aisthesis* structure une grille de visualisation dont les points sont animés selon un modèle d'animation de la mer (chapitre 4) ; la géométrie obtenue permet d'y spécifier des propriétés lumineuses, mesurables par la modélisation de l'interaction de la mer avec des ondes électromagnétiques dans le domaine visible données par un environnement (soleil, ciel, nuages, sable, rochers, algues, profondeur...), et le tout est dessiné sur un écran (ou projeté par une IHM de visualisation) par le rôle *poiesis* de l'entité visualisation.

Le phénomène de visualisation humaine demande de se situer au minimum à 14 Hz d'après des études sur la rémanence rétinienne et l'impression de fluidité dans une animation. Donc les *praxis* des entités réalisant la simulation doivent s'exercer sur le milieu demandé par l'*aisthesis* de la visualisation à une fréquence d'au minimum 14 Hz. Si les n entités présentes dans le système fonctionnaient à cette fréquence pour leur *aisthesis*, nous aurions une complexité en n^2 à 14 Hz (toujours une balise et une praxis par entité), et nous serions très limités pour le nombre maximum d'entités simulables en temps réel. Cependant, hormis l'entité visualisation, ces entités sont des modèles du soleil, des nuages, des rochers, des vagues... et l'on peut imaginer que les modèles de tels phénomènes ont des autonomies d'action bien supérieur au dixième de seconde ; supposons qu'ils fonctionnent tous avec des besoins perceptifs toutes les 10 secondes. Supposons de plus que la complexité des interactions

soit temporellement répartie de manière linéaire, et que l'heuristique utilisée n'influence que très peu la complexité de la simulation. A partir d'une hypothèse de $1 + \frac{n}{140}$ balises et n entités, la complexité à 14 Hz devient grossièrement $n + \frac{n^2}{140} \sim (\frac{n}{\sqrt{140}})^2$. On est toujours en $\mathcal{O}(n^2)$, mais on a multiplié par plus de dix ($\sqrt{140} \approx 12$) le nombre maximum d'entités simulables dans un même pas de temps.

Ainsi, nous avons caractérisé le médiateur des interactions en tant qu'objet actif dont le but est de permettre l'éaction entre les entités d'un même niveau de simulation. Il organise les balises et les praxis en des dictionnaires de pseudo-pointeurs représentant les protocoles utilisés pour réaliser les expériences perceptives des entités. Il possède des méthodes pour initialiser, simplifier, remettre en cause ces protocoles associés aux balises et sait faire participer les praxis aux mesures expérimentales selon les protocoles qu'il a établis auprès des balises. Ses activités propres lui permettent de préparer le milieu en répartissant ainsi la complexité de la réalisation des expériences dans toute la période située entre l'*aisthesis* générant une balise et la *poiesis* récupérant le résultat des mesures expérimentales de cette balise.

Même si les entités ne fonctionnent pas à la même fréquence temporelle, cette complexité intrinsèque limite fortement le nombre d'entités simulables pour des applications pratiques. La prochaine sous-section examine comment des entités peuvent s'organiser dynamiquement en des entités du second ordre afin de diminuer sensiblement la complexité intrinsèque de ces interactions, qui restera quand même en $\mathcal{O}(n^2)$.

7.4.2 Entités du second ordre et complexité des interactions

Les entités décident de changer de niveau de simulation en autonomie, que ce soit pour entrer dans une entité du second ordre ou pour quitter une entité du second ordre. En quittant un niveau de simulation, l'entité emporte avec elle ses praxis et les balises de son milieu perceptif. L'ensemble des entités qui se constituent en une entité du second ordre n'est plus vu alors, au niveau de la simulation qu'elles quittent, que comme une unique entité — d'accord plus complexe, mais cependant unique du point de vue des interactions.

Deux types d'intuition peuvent guider la manière de penser les entités du second ordre vis à vis du problème de la complexité algorithmique des interactions entre entités énactives. La première est d'ordre phénoménologique, au sens où l'entité du second ordre peut être considérée comme le modèle d'un phénomène naturel. La seconde est d'ordre mathématique, au sens où les entités du second ordre sont créées selon des propriétés mathématiques de l'espace topologique utilisé pour localiser les phénomènes.

7.4.2.1 Intuition phénoménologique

Il s'agit, par exemple, de la notion d'une société vis à vis de ses individus, ou de la notion d'un organisme vis à vis de ses constituants. L'avantage est que le modèle du second ordre peut avoir une *aisthesis*, respectivement une *praxis*, plus élaborée que la simple réunion des *aisthesis* des entités qu'il contient, respectivement pour les *praxis*.

Par exemple, l'*aisthesis* d'un banc de poisson peut se réduire à une *aisthesis/poiesis* synchronisée des poissons périphériques au banc fournissant une unique balise (assez grosse mais unique), et le modèle de banc distribuera la perception de l'environnement aux *aisthesis/poiesis* des autres poissons qui le constituent. Aussi, la praxis du banc peut être structurée par les praxis des poissons qui le constituent ; notamment le domaine d'influence de la praxis du banc peut être la réunion des domaines d'influence des praxis de chaque poisson du banc. Supposons qu'il faut simuler 10^6 poissons, répartis dans 1000 bancs de 1000 poissons chacun ; les calculs qui suivent cherchent à établir des ordres de grandeur de la complexité, afin d'illustrer l'effet de l'organisation en entité du second ordre. Si les bancs de poissons ne se croisent pas (et ça peut être le cas la plupart du temps), la complexité globale est la simple somme des complexités de chaque banc (pris indépendamment les uns des autres), disons $1000^2 = 10^6$, et de la complexité de la vérification que les bancs ne se croisent pas, disons $1000^2 = 10^6$, soit grossièrement un total de $2 \cdot 10^6$; il est envisageable de simuler ce million de poissons en un

temps raisonnable. Tandis que le même million de poissons, non organisés en 1000 entités du second ordre, mais se comportant exactement de la même manière (ils nagent les uns à côté des autres pour former 1000 “groupes connexes” qui ne se croisent pas) présente une complexité de $(10^6)^2 = 10^{12}$; la complexité des interactions est multipliée par un facteur 5.10^5 . Evidemment, il faut modéliser comment deux bancs peuvent se croiser pour que les simulations aient les mêmes compétences ; quels que soit les choix de modélisation pour faire se croiser des bancs, si tous les bancs se croisent simultanément, il y a de fortes chances pour que la complexité soit du même genre que lorsque la notion de bancs n’était pas utilisée. Le banc de poisson sera donc vu globalement moins complexe à son niveau de simulation que lorsque cette notion de banc n’était pas modélisée, tant du point de vue des balises que du point de vue de la topologie des praxis.

La simulation, ne sera en revanche, pas forcément équivalente selon que les entités s’organisent en entités du second ordre ou non : le phénomène du second ordre peut avoir une influence sur le comportement des individus qui le constituent, même si ces individus sont autonomes.

7.4.2.2 Intuition mathématique

Nous illustrons ce type d’intuition par l’exemple d’un zonage de la topologie, ce qui est particulièrement bien adapté au cas où les protocoles concernés sont commutatifs, la répartition des entités est assez homogène sur tout le domaine topologique étudié, et que les balises de la plupart des entités sont localisées au voisinage de leur praxis, comme c’est souvent le cas pour les entités modélisant des phénomènes physiques. A l’inverse de l’approche phénoménologique, cette approche mathématique ne doit pas introduire de biais dans la simulation.

Prenons le cas d’un espace topologique auquel peut être associé des partitionnements finis, découpant le domaine topologique en plusieurs voisinages distincts que l’on appelle des zones d’un partitionnement. Supposons que l’on dispose d’une fonction rapide à calculer pour un partitionnement donné qui permette de savoir dans quelle zone est inclus une balise ou le voisinage d’influence d’une praxis. Donnons nous un partitionnement et supposons que la répartition des balises et des praxis soient telles que pour la plupart des entités, leurs balises et les domaines d’influences de leurs praxis soient inclus dans une des zones, que cette répartition soit relativement homogène sur chaque zone, et qu’au cours du temps, il n’y ait qu’un petit nombre d’entités dont les balises et les praxis arrivent sur le bord d’une zone ou change de zone.

Si toutes ces conditions sont réunies et que de plus les protocoles des balises concernées sont tous commutatifs, chaque zone peut être associée à une entité du second ordre, que l’on appelle entité topologique. Une telle entité topologique prend en charge toutes les entités dont les balises et les praxis sont incluses dans la zone en question. L’entité décide de quitter l’entité du second ordre si l’une de ses balises ou l’une de ses praxis n’est plus incluse dans la zone. Elle décide d’entrer dans l’entité du second ordre, si toutes ses balises et toutes ses praxis sont incluses dans la zone correspondante.

La **praxis** de l’entité topologique est la réunion des praxis des entités qu’elle contient, et le voisinage d’influence de cette praxis du second ordre est au maximum la zone sur laquelle s’appuie cette entité topologique. Lorsque l’entité topologique doit exercer sa praxis, elle demande à chaque entité qu’elle contient d’exercer sa propre *praxis* ; c’est pourquoi les protocoles doivent être commutatifs, car les praxis internes à l’entité topologique ne peuvent être repositionnés selon n’importe quelle permutation dans le protocole de la balise affectée par la praxis de l’entité topologique.

L’**aisthesis** de l’entité topologique génère une unique balise caractérisée par toutes les *poiesis* internes qu’elle devra effectuer au prochain cycle ; cette balise unique est constituée de la réunion des balises des *aisthesis* internes correspondant à ces *poiesis* ; d’autre part, le protocole de cette balise *topologique* est pré-constitué de sa propre praxis *topologique*. Aussi, le support topologique des *aisthesis* interne étant inclus dans la zone prise en charge, il n’est pas nécessaire au médiateur de tenir compte des praxis des autres entités topologiques, car elles seront toujours exclues du protocole topologique. C’est là que se situe une grande part de la réduction de la complexité algorithmique des interactions.

La **poiesis** de l’entité topologique lui permet alors de distribuer le résultat de l’expérience topologique à ses *poiesis* internes. Du point de vue de l’entité constitutive de l’entité topologique, tout s’est passé comme si elle avait vécu en dehors de cette entité du second ordre.

Les savoir-faire **internes** de l'entité topologique, indépendamment de l'ordonnancement de ses entités constituante, sont de permettre aux entités d'entrer et sortir de la zone de prise en charge, et éventuellement d'adapter le partitionnement dynamiquement en communiquant avec les autres entités topologiques. Elles génèrent alors des balises spécifiques pour ces communications entre entités topologiques, complètement indépendantes des balises directement nécessaires aux simulations des entités internes.

Cette approche est utilisée dans le cas de l'animation de la mer. Les problèmes topologiques résolus par un médiateur sont ceux de l'intersection des boîtes englobantes des balises avec les voisinages d'influence des praxis des entités physiques. La majeure partie des entités physiques s'inscrivant avec un ensemble de médiateurs, il s'agit d'un problème d'une complexité en $O(n^2)$ où n est le nombre d'entités physiques.

Par exemple, si 10^4 entités physiques demandent chacune la mise à jour d'une balise, il faut réaliser pour chaque entité le test des boîtes englobantes avec les 10^4 balises ; cela donne cent millions de tests : $n^2 = (10^4)^2 = 10^8$. Cette complexité en $O(n^2)$ ne peut être évitée, mais un découpage de l'espace topologique en plusieurs zones disjointes permet de reporter le problème à de plus grandes valeurs de n . Si nous divisons un plan d'eau carré de $3,2\text{ km}$ de côté par une grille régulière avec un pas de cent mètres : cela transforme un plan d'eau d'environ 10 km^2 en approximativement mille zones de cent mètres par cent. La nature régulière de la grille permet d'obtenir les zones concernées par chaque entité physique et chaque balises en $2n$ tests. En supposant que les entités physiques et les balises sont régulièrement réparties sur le plan d'eau et d'une taille moyenne relativement faible en moyenne devant 100 mètres, cela divise grossièrement par mille le nombre d'entités en énaction par zone du plan d'eau. Avec le même exemple que précédemment, cela ramène grossièrement le nombre de tests à cent mille : $2n + 10^3 \times (n/10^3)^2 \approx 10^3 \times (n/10^3)^2 = 10^3 \times (10^4/10^3)^2 = 10^5$. Aussi, si l'on désire obtenir au moins dix images par seconde (10 fps ; fps : en anglais, frames per second) avec un processeur à 1 GHz (un milliard d'opérations élémentaires par seconde), il reste de l'ordre de mille opérations élémentaires par entité et par cycle lorsque le plan d'eau est quadrillé en mille zones — ce qui peut correspondre à l'ordre de grandeur de la complexité moyenne d'une entité physique très simple — alors qu'il ne reste que dix opérations élémentaires par entité et par cycle si le même plan d'eau n'est pas quadrillé ; ce qui ne laisse même pas le temps de réaliser une simple division flottante.

Il est envisageable, d'étendre cette technique de zonage récursivement à la manière d'une fractale (chaque zone est à nouveau découpée par une partition, et la zone initiale est tout le domaine topologique), dont chaque niveau de récursion, sauf le domaine topologique initial, serait associé à un ensemble d'entités topologiques ; les entités topologiques sont toutes au même niveau de simulation, mais elles connaissent entre elles les relations topologiques de leurs zones d'influence et peuvent alors décharger le médiateur en préparant les protocoles qui concernent les interactions entre entités topologiques, le médiateur ne devant plus s'occuper que des interactions entre les entités topologiques et les autres types d'entités énactives. Le choix d'un niveau de zonage par une entité dépendrait de la taille et la variation de ses balises/praxis vis à vis de la taille des éléments topologiques supportés par les entités topologique à ce niveau. Les entités topologiques inutilisées seraient endormies en attendant d'avoir suffisamment d'entités à simuler. Ainsi, de très nombreuses petites entités peuvent cohabiter avec un nombre modéré d'entités beaucoup plus étendues.

Ainsi, que ce soit par une approche phénoménologique ou mathématique, l'organisation d'entités en entités du second ordre est une solution permettant dans un même temps processeur de réaliser des simulations impliquant beaucoup plus d'entités en énaction que si elles ne se regroupaient pas en des entités du second ordre. En combinant les deux approches, on peut envisager des simulations aux durées raisonnables, impliquant jusqu'à cent mille, voir un million d'entités physiques en énaction. Pour l'animation de la mer selon les entités en énactions décrites dans la prochaine partie (Partie III), nous avons réalisé des simulations d'un plan d'eau hétérogène d'une dizaine de kilomètres carrés sur un simple PC, impliquant jusqu'à près de 100 000 entités physiques (principalement des groupes de vagues et des déferlements) et plus de 400 000 points expérimentaux regroupés dans plus de 100 000 balises avec un ratio temporel de $\frac{1}{60}$: 1 minute de temps physique simulée en une heure de temps CPU.

7.5 Conclusion

Nous avons défini les interactions ordinateur-entité virtuelle par une représentation informatique des entités en énaction facilitant la participation active de l'utilisateur, et l'invitant à respecter le formalisme du modèle énactif du chapitre 6. Les activités des entités sont ordonnancées par la machine qui les supporte et leurs interactions demandent de résoudre des problèmes non triviaux de topologie spatio-temporelle. Ces interactions entité-entité sont assurées au sein de l'ordinateur par un médiateur des interactions, spécifié en tant qu'*objet actif*.

La notion formelle d'*objet actif* peut être correctement instrumentée par ARéVi, développée au CERV par le Laboratoire d'Ingénierie Informatique, qui donne une autonomie d'exécution aux objets actifs et facilite la participation de l'utilisateur dans le système, qu'il soit observateur, acteur ou créateur. Nous avons alors spécialisé le langage orienté *objets actifs* ARéVi à la notion de langage orienté *entités énactives*, facilitant la modélisation participative des systèmes complexes. L'environnement virtuel est constitué d'*entités autonomes en énaction* implémentées en tant qu'*objet actif* au sens d'ARéVi, et définies à partir de chacun des trois types d'*objet actif* — *prédiction*, *action*, *adaptation*. Les *entités*, situées dans l'espace et le temps, interagissent *via* des *balises expérimentales* proposant un support topologique spatio-temporel et sémantique permettant de définir et de localiser les interactions dans l'espace et dans le temps. L'ensemble des *balises* d'une entité correspond au milieu perceptif de cette entité.

L'*autonomie d'exécution* des entités est prise en charge directement ou indirectement par l'ordonnanceur système d'ARéVi. Les entités qui ne sont pas dans une simulation interne sont considérées comme n'importe quel *objet actif* : c'est l'ordonnanceur système d'ARéVi qui donne directement une autonomie d'exécution à leurs horloges. Pour respecter l'autonomie des entités, les itérations sont asynchrones (elles peuvent être aussi quasi-synchrones) et chaotiques pour ne pas introduire de biais d'ordonnancement dans la simulation. Pour les entités simulées par une entité du second ordre, tout se passe de la même manière à une indirection près pour les appels système, sauf que c'est l'ordonnanceur de l'entité du second ordre (son horloge locale) qui prend en charge l'ordonnancement des entités qu'il fait vivre en simulation interne et du médiateur des interactions correspondant.

Nous avons caractérisé le médiateur des interactions en tant qu'*objet actif* dont le but est de permettre l'énaction entre les entités d'un même niveau de simulation ; il doit établir le protocole expérimental pour chaque balise, ce qui demande, une fois résolue la question sémantique : « *qui agit sur quoi ?* », de résoudre les problèmes topologiques relatifs à la localisation des *praxis* des entités et de leurs *balises*, afin de répondre à : « *qui agit où et quand ?* ». Il organise alors les balises et les praxis en des dictionnaires de pseudo-pointeurs représentant les protocoles utilisés pour réaliser les expériences perceptives des entités. Il possède des méthodes pour initialiser, simplifier, remettre en cause ces protocoles associés aux balises et sait faire participer les praxis aux mesures expérimentales selon les protocoles qu'il a établi auprès des balises, proposant ainsi une instrumentation de la détermination du protocole selon le formalisme du chapitre 6, section 6.5.2. Ses activités propres lui permettent de préparer le milieu en répartissant ainsi la complexité de la réalisation des expériences dans toute la période située entre l'*aisthesis* générant une balise et la *poiesis* récupérant le résultat des mesures expérimentales de cette balise.

Même si les entités ne fonctionnent pas à la même fréquence temporelle, la complexité algorithmique intrinsèque en $\mathcal{O}(n^2)$ pour la localisation topologique des interactions, où n est le nombre d'*entités énactives*, limite fortement le nombre d'*entités simulables* pour des applications pratiques. L'organisation d'*entités* en *entités du second ordre*, que ce soit par une approche phénoménologique ou topologique, est une solution permettant d'envisager, malgré cette complexité intrinsèque, des simulations aux durées raisonnables, impliquant jusqu'à cent mille, voire un million d'*entités* relativement simples en énaction.

Aujourd'hui, cette instrumentation d'une notion de langage orienté *entités énactives* n'a pu être testée que pour le prototypage du modèle énactif de la mer, modèle présenté dans la prochaine partie. Nous espérons que le code pourra être éprouver par d'autres applications, validant ainsi d'une manière instrumentale les conceptions du chapitre 5 et la formalisation du chapitre 6.

Références

- [Baudet 78] Baudet, G. (1978). Asynchronous iterative methods for multiprocessors. *Journal of the association for computing machinery*, 25 :226–244.
- [Boissier et al. 99] Boissier, O., Guessoum, Z., et Occello, M. (1999). Plateformes de développement de systèmes multi-agents. *Groupe ASA, Bulletin de l'AFIA* n°39.
- [De Giacomo et al. 00] De Giacomo, G., Léspérance, Y., et Levesque, H. (2000). ConGolog : a concurrent programming language based on situation calculus. *Artificial Intelligence*, 121(1-2) :109–169.
- [Duval et al. 97] Duval, T., Morvan, S., Reignier, P., Harrouet, F., et Tisseau, J. (1997). ARéVi : une boîte à outils 3d pour des applications coopératives. *Revue Calculaterus Parallèles*, 9(2) :239–250.
- [Fisher 94] Fisher, M. (1994). A survey of concurrent metatem : the langage and its applications. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 827 :480–505.
- [Guessoum et Briot 99] Guessoum, Z. et Briot, J. (1999). From active objects to autonomous agents. *IEEE Concurrency*, 7(3) :68–76.
- [Harrouet 00] Harrouet, F. (2000). *oRis : s'immerger par le langage pour le prototypage d'univers virtuels à base d'entités autonomes*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France.
- [Harrouet et al. 99] Harrouet, F., Reignier, P., et Tisseau, J. (1999). Multiagent systems and virtual reality for interactive prototyping. In *(ISAS)*, volume 3, pages 50–57, Orlando (USA).
- [Harrouet et al. 02] Harrouet, F., Tisseau, J., Reignier, P., et Chevaller, P. (2002). oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents. *Technique et Science Informatiques (RSTI-TSI)*, 21(4) :499–524.
- [Iglesias et al. 98] Iglesias, C., Garijo, M., et Gonzalez, J. (1998). A survey of agent-oriented methodologies. In *Proceedings ATAL*, pages 317–330.
- [Kerdelo et al. 02] Kerdelo, S. and Abgrall, J., Parenthoën, M., et Tisseau, J. (2002). In vitro blood coagulation versus in silico blood coagulation : an individual-centered approach. In *IEEE Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, volume 1, page MA1B3, Hammamet, Tunisia.
- [Klinger et Dyer 76] Klinger, A. et Dyer, C. (1976). Experiments on picture representation using regular decomposition. *Computer Graphics and Image Processing*, 5 :68–105.
- [Marvie 04] Marvie, J. (2004). *Visualisation Interactive d'Environnements Virtuels Complexes à travers des Réseaux et sur des Machines à Performances Variables*. Mémoire de Thèse, Université de Rennes, IRISA/SIAMES.
- [Miellou 74] Miellou, J. (1974). Itérations chaotiques à retard, étude de la convergence dans le cas d'espace partiellement ordonnés. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série A*, 278 :957–960.
- [Nwana et al. 99] Nwana, H., Nduma, D., Le, L., et Collis, J. (1999). ZEUS : a toolkit for building distributed multiagent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 13(1-2) :129–185.
- [Parunak 99] Parunak, H. (1999). *Multiagent systems : a modern approach to distributed artificial intelligence*, chapitre Industrial and practical application of DIA, pages 377–421. MIT Press, Cambridge, weiss, g. édition.
- [Quéau 93] Quéau, P. (1993). *Le virtuel, vertus et vertiges*. Collection Milieux, Champ vallon, Seyssel.
- [Redou 02] Redou, P. (2002). Itérations chaotiques et asynchrones. Rapport technique, Laboratoire d'Ingénierie Informatique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest, France.
- [Reignier et al. 98] Reignier, P., Harrouet, F., Morvan, S., Tisseau, J., et Duval, T. (1998). ARéVi : a virtual reality multiagent plateform. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1434 :229–240.
- [Rodin et Nédélec 00] Rodin, V. et Nédélec, A. (2000). oRis : an agent communication langage for distributed virtual environment. In *IEEE Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pages 955–960.
- [Smith 80] Smith, R. (1980). The Contract Net protocol : high level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, 29(12) :1104–1113.

Conclusion de la partie II

Dans cette partie, nous avons présenté une méthode de modélisation d'un environnement naturel, un tant que système complexe, où de nombreux phénomènes interagissent de multiples façons. L'environnement est modélisé en un système multi-modèles et les modèles interagissent simultanément à différentes échelles spatiales et temporelles. Le modèle d'environnement est élaboré dynamiquement par la médiation de simulations d'environnements virtuels faisant vivre ces modèles et la méthode de modélisation est conceptualisée, formalisée et instrumentée.

Les **fondements conceptuels** de l'approche énactive des systèmes complexes naturels trouvent leurs racines en ergonomie de la cognition qui est la branche écologique de la psychologie expérimentale. Le choix des phénomènes modélisés provient d'une expertise de l'environnement naturel ; il est nécessaire de présenter à l'utilisateur, les *affordances* naturelles de cet utilisateur. Ces *affordances*, vues comme des interactions entre l'environnement et l'acteur, vont définir les phénomènes naturels qu'il faut modéliser.

Une ergonomie cognitive de l'activité de modélisation d'un système complexe multi-modèles, nous a conduit à proposer d'autonomiser les modèles des phénomènes en des entités autonomes interagissant selon l'*hypothèse énactive*. Les principales hypothèses retenues sont au nombre de trois et laissent une grande liberté au modélisateur.

1. La modélisation provient d'une praxis humaine.
2. Les phénomènes naturels sont modélisés en tant qu'entités autonomes et ceci demande d'autonomiser les modèles associés.
3. Les interactions entre entités passent par la médiation d'un milieu structuré par les entités elles-mêmes.

Les interactions entre ces entités sont basées sur un principe de *perception active*, principe selon lequel les entités autonomes ont une démarche active dans la perception de leur environnement ; ce sont ces actes de perception qui vont créer les expériences à partir desquelles des interactions peuvent avoir lieu. L'organisation énactive résultante de la modélisation est alors composée d'entités autonomes en interaction *via* le milieu qu'elles créent et façonnent elles-mêmes.

Dans cette conception de l'*hypothèse énactive* pour l'instrumentation d'un système participatif de réalité virtuelle, l'homme — *observateur, acteur, créateur* — est considéré au même niveau conceptuel que les phénomènes modélisés dans l'environnement virtuel.

La **formalisation d'un modèle énactif** est réalisée selon une intention « praxéo-épistémologique » au sens de [Vallée 97] : la formalisation est attachée à décrire une méthode constructive de modélisation d'une *simulation interactive* d'un *environnement naturel* à base d'un modèle d'*entités énactives*. Cette formalisation ne contient plus l'homme en tant qu'individu ; elle formalise le résultat de son activité de modélisation selon les principes de l'hypothèse énactive. L'homme n'est plus représenté que par la médiation de ses modèles. Le modèle formel d'organisation d'entités énactives est clos sous causalité efficiente et s'appuie sur le triplet — *expériences, phénomènes, prévisions* — devant être caractérisé pour chaque entité énactive faisant vivre le modèle d'un phénomène naturel dans la simulation. Pour une entité énactive, ce triplet prend la forme de trois types d'objet actif, chaque type étant spécifié par un couple (paramètre, savoir-faire).

prédition : (expérimentation, aisthesis),

action : (phénomène, praxis et savoir-faire internes)

adaptation : (prévision, poiesis).

Les entités, situées dans l'espace et le temps, interagissent *via* des balises expérimentales permettant de définir et de localiser les interactions dans l'espace et dans le temps. L'ensemble des *balises* d'une entité énactive correspond au milieu perceptif de cette entité. Les aisthesis structurent le milieu selon un principe prédictif, basé sur des résultats expérimentaux précédents. Les praxis agissent sur le milieu créé par les aisthesis en réalisant les expériences sur le milieu. Les poiesis récupèrent les résultats expérimentaux pour créer de nouvelles entités ou pour modifier les phénomènes. Les savoir-faire inter-

nes transforment les phénomènes eux-mêmes. Toutes ces fonctions demandent l'utilisation d'un mécanisme matériel comme support de leurs activités.

L'**instrumentation du modèle énactif** est une simulation des entités faisant vivre les modèles phénoménologiques en un système de réalité virtuelle, de sorte que le modèle soit expérimentable tout au long de sa création. Nous avons défini les interactions ordinateur-entité virtuelle par une représentation informatique des entités en énaction facilitant la participation active de l'utilisateur, et l'invitant à respecter le formalisme du modèle énactif du chapitre 6 par la médiation d'un langage orienté entités énactives, s'appuyant sur le moteur de simulation d'objets actifs et de rendu 3D ARéVi, développé par le Laboratoire d'Ingénierie Informatique. Les activités des entités sont ordonnancées par la machine qui les supporte selon des itération asynchrones et chaotiques et leurs interactions sont assurées au sein de l'ordinateur par un médiateur des interactions, spécifié en tant qu'*objet actif*.

Cette partie peut être vue comme la description d'un cadre méthodologique d'une grande partie des travaux réalisés au CERV. Nous espérons que cette approche de la modélisation des systèmes complexes en vue de leur simulation en réalité virtuelle, méthode que l'on pourrait appeler la *modélisation énactive*, apporte un nouveau point de vue au problème de la simulation des phénomènes naturels et que ce point de vue permettra de simuler des systèmes complexes multi-modèles et multi-échelles, jusque là non abordables par les méthodes usuelles de simulation dans des cas pragmatiques.

La prochaine partie est l'application de cette méthodologie à la modélisation de la mer en surface, selon les affordances maritimes et océanographiques identifiées dans la partie I.

Troisième Partie

Le modèle IPAS

Introduction à la partie III

Le problème de l'animation interactive de la mer pour un système de réalité virtuelle peut être vu comme un cas particulier de la modélisation des environnements naturels en vue de leur instrumentation [Longo 03]. Aussi, l'approche écologique appliquée à l'étude de l'activité d'un marin et celle d'un océanographe nous fait proposer un modèle original d'animation phénoménologique pour la mer, nommé IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea), selon les principes de l'*hypothèse énactive* (chapitre 5). Notre modèle phénoménologique de mer IPAS doit permettre la simulation d'un plan d'eau hétérogène pour un environnement virtuel au sein duquel des opérateurs humains, immergés par la triple médiation des sens, de l'action et du langage, peuvent improviser avec les modèles qu'ils veulent expérimenter. Cet environnement virtuel de simulation maritime est implémenté dans le langage ARéVi étendu à la notion de programmation par *entités énactives* (chapitre 7), développé par le Laboratoire d'Ingénierie Informatique (LI2)⁶ au Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV)⁷.

Dans IPAS, les spécifications des différentes entités et de leurs interactions sont basées sur la nécessité de rendre compte des *affordances* maritimes (figure 2.10 page 40) et océanographiques (figure 3.13 page 65) des états de mer. Le modèle IPAS est constitué d'*entités physiques* primitives dont la modélisation est inspirée par ces *affordances* communes aux marins et aux océanographes évoquant des phénomènes naturels responsables des états de mer, tels qu'ils sont décrits dans la partie I : les groupes de vagues, les déferlements, les vents, les courants et la bathymétrie.

Le chapitre 8 décrit les modèles d'*action* de ces phénomènes dans IPAS. Pour chaque entité physique modélisant l'un de ces phénomènes, nous caractérisons la structure de son ensemble du type *phénomène* qui paramètre les *praxis* donnant au milieu des propriétés spécifiques à ce phénomène, et ses savoir-faire *internes* donnant au modèle du phénomène une certaine autonomie d'action, sans besoin perceptif dans son environnement. Le chapitre 9 présente comment les notions physiques de conservation de l'action, de stress du vent et de réfraction des vagues de gravité sont respectées dans IPAS lors des interactions groupes/déferlements/vents/courant/bathymétrie, en caractérisant les modèles de *prédiction* et d'*adaptation* par la description des couples *aisthesis*, *poiesis* et leurs conséquences sur le comportement des entités modélisant la notion de groupe de vagues de gravité et la notion de déferlements actifs et passifs.

La publication [Parenthoën et al. 04a] est une présentation à la communauté océanographique (ISOPE'04) des entités physiques et de leurs interactions, telles qu'elles sont mises en œuvre dans le modèle IPAS. La publication [Parenthoën et al. 04c] évoque comment la visualisation de la mer virtuelle peut être modélisée en tant qu'entité énactive, comme l'interaction visuelle avec l'observateur humain.

⁶ LI2 : <http://www.enib.fr/LI2>

⁷ CERV : <http://www.cerv.fr>

Chapitre 8

Entités physiques du modèle IPAS

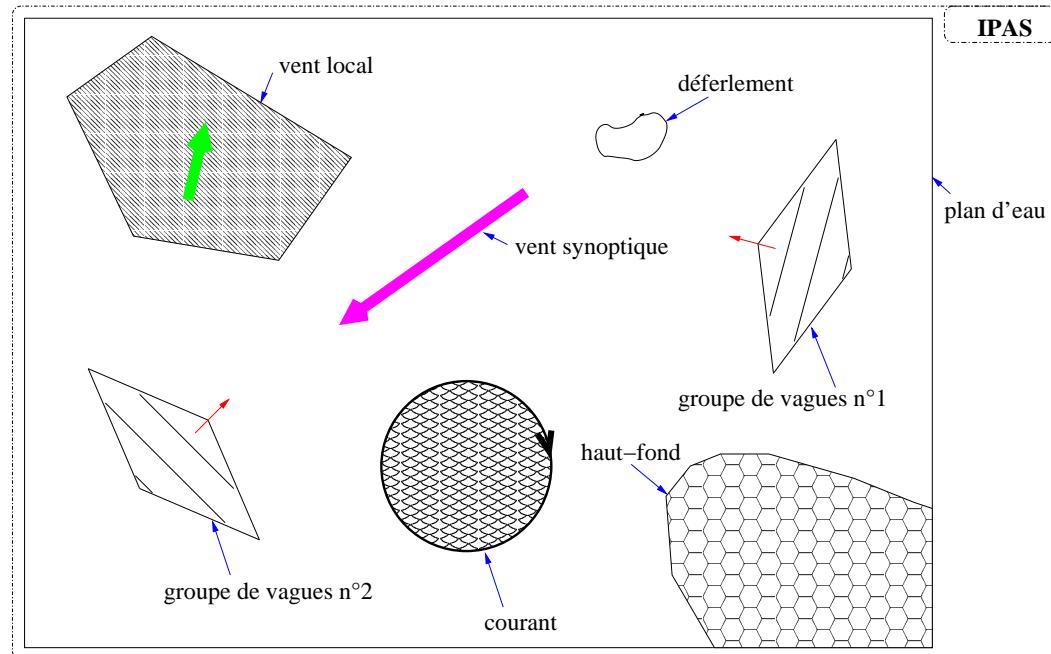


Image extraite d'une mer virtuelle très forte à grosse simulée par IPAS [Juin 2004, ©erv].

8.1 Introduction

Dans IPAS, les spécifications des différentes entités et de leurs interactions sont basées sur la nécessité de rendre compte des *affordances* maritimes (figure 2.10 page 40) et océanographiques (figure 3.13 page 65) des états de mer. Le modèle IPAS est le résultat de l'application de la méthode de *modélisation énactive* (chapitre 6) aux phénomènes naturels primitifs choisis comme les *affordances* communes aux marins et aux océanographes : les groupes de vagues, les déferlements, les vents, les courants et la bathymétrie (figure 8.1). Ces phénomènes naturels que l'on cherche à simuler sont réifiés en des *entités physiques* autonomes situées dans l'environnement qu'elles structurent et façonnent selon le formalisme d'une organisation énactive (section 6.5 du chapitre 6). Nous décrivons, dans le présent chapitre, les modèles d'*action* de ces phénomènes. Pour chaque entité physique modélisant l'un de

ces phénomènes, nous caractérisons la structure de son ensemble du type *phénomène* qui paramètre les *praxis* donnant au milieu des propriétés spécifiques à ce phénomène, et ses savoir-faire *internes* donnant au modèle du phénomène une certaine autonomie d'action, sans besoin perceptif dans son environnement.



Le modèle informatique de la mer virtuelle est un système multi-modèles/multi-échelles, hétérogène et composé d'entités physiques en énaction. Chaque entité énactive 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.

FIGURE 8.1 : Plan d'eau hétérogène peuplé d'entités physiques en énaction

Notre but étant la simulation d'un plan d'eau d'une dizaine de kilomètres carrés, la surface de la planète Terre est assimilée localement à un plan, et les géodésiques sont des droites. L'espace topologique de base Top est un compact convexe de \mathbb{R}^4 , muni de la distance euclidienne usuelle, permettant de localiser, par ses coordonnées spatio-temporelles (a, b, z, t) , les points de référence M d'un volume convexe de mer simulé pendant un laps de temps fini. Une coordonnée spatiale représente la position au repos d'un élément de fluide, et $z = 0$ signifie que cet élément de fluide au repos est à la surface de la mer. On oriente le vecteur unitaire vertical \vec{z} vers le haut, et les deux vecteurs unitaires horizontaux \vec{a} et \vec{b} , respectivement vers le Nord et l'Ouest, afin de former un trièdre directe $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{z})$. L'origine du repère est un point O de Top .

Vu que nous voulons animer la surface de la mer, nous ne nous intéressons dans les prochaines sections qu'aux points de la surface $z = 0$, et la position d'un point expérimental M de la surface sera caractérisée à un instant t par un vecteur horizontal $\vec{x}_0 = \vec{OM}$.

Les phénomènes physiques modélisés dans notre animation phénoménologique se déclinent en un modèle océanographique pour les groupes de vagues (section 8.2) et les déferlements (section 8.3), et un modèle descriptif pour les vents, les courants et la bathymétrie (section 8.4). La manière dont sont respectées les lois physiques de conservation pour les groupes et les déferlements est précisée dans le chapitre 9.

8.2 Groupe de vagues

L'entité physique *groupe de vagues* est notre primitive principale pour l'animation phénoménologique de la mer ; elle lui donne ses caractéristiques géométriques et cinématiques. Elle inclut les

notions physiques d'enveloppe d'extention finie, de position moyenne \vec{X} , de vecteur d'onde moyen \vec{K} et de pulsation moyenne Ω gouvernés par les équations eikonales (équation 3.34 page 50). Inspirés par l'utilisation de l'ondelette de Morlet 2D pour l'analyse fractale des états de mer (figure 3.4 page 53), nous avons réifié cette ondelette en une ondelette dynamique que nous appelons un *train d'ondes*. Cette notion de train d'ondes est associée aux caractéristiques moyennes et à l'enveloppe du groupe. Ce modèle est enrichi par des perturbations en phase et en amplitude pour constituer un groupe de vagues, permettant d'animer les points expérimentaux selon l'approche particulière (section 4.2 du chapitre 4). Le modèle de groupe présente alors un comportement pouvant être fortement non-linéaire dans le cas où le stress du vent est important, la bathymétrie faible ou les courants contraires, même s'il est le seul groupe du plan d'eau.

Notre modèle de groupe est attaché à la notion de groupe de vagues au sens marin du terme présentant de 2 à 30 vagues, dont la structure de groupe est stable dès qu'ils sont stressés par le vent. Notre modèle n'utilise pas classiquement le modèle physique du train de vagues encore appelé *wave packet* [Yang 91]. Ces objets théoriques font usuellement de cents à dix mille vagues et sont utilisés pour décrire des coalitions/décoalitions fréquentielles d'ondelettes expliquant la formation temporaire de vagues très cambrées, voire déferlantes, au centre des groupes ; mais cette théorie n'explique pas la stabilité de forme de groupes de 2 à 30 vagues qui peuvent conserver des cambrures très fortes, tant qu'ils restent stressés par le vent.

Le modèle d'action d'un groupe de vagues est caractérisé par un train d'ondes qui le contrôle (section 8.2.1), des perturbations dynamiques locales en phase et en amplitude (section 8.2.2), des savoir-faire internes lui permettant de mettre à jour les paramètres de son train d'ondes et de ses perturbations de phase et d'amplitude (section 8.2.3) et les propriétés qu'il peut donner aux points expérimentaux par ses praxis (section 8.2.4).

8.2.1 Train d'ondes contrôlant le groupe

Notre idée consiste à imaginer une ondelette de Morlet 2D (figure 3.4) non pas comme un outil mathématique, mais comme une réification de la notion physique de train de vagues [Yang 91], dont l'enveloppe se déplace à la vitesse de groupe et dont la phase progresse à la vitesse de phase, sans dépacer la trentaine de vagues par train. Cette notion de train d'ondes est illustrée par la figure 8.2.

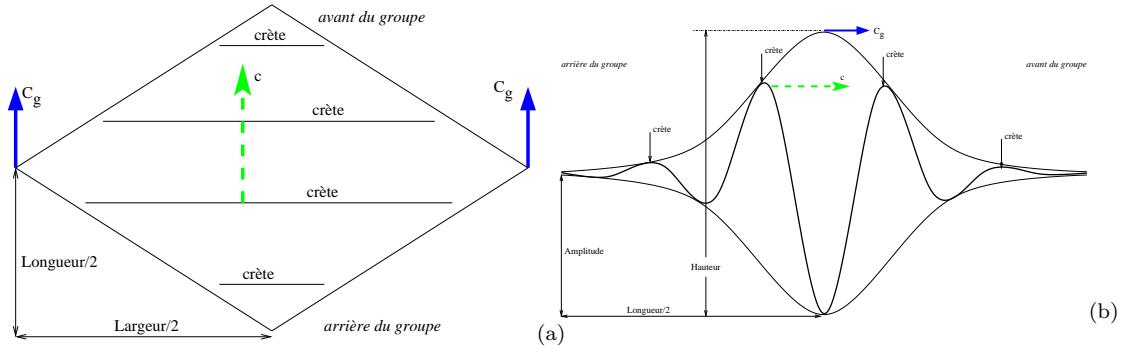
Un train d'ondes est caractérisé à son *n^{ème}* cycle d'horloge par sa taille (L_n, l_n) , son nombre N_n de vagues avec les positions relatives de leur crête dans le train associant à chaque crête un numéro m_n , son vecteur d'onde \vec{K}_n , sa pulsation Ω_n , son déphasage χ_n , sa position \vec{X}_n sur le plan d'eau, sa vitesse de groupe \vec{C}_{g_n} et sa hauteur H_n au centre. Toutes ces caractéristiques sont fonctions de l'histoire du groupe de vagues qu'il contrôle selon ses interactions avec l'environnement et leurs valeurs initiales lors de la naissance du groupe :

$$\left((L_0, l_0), N_0, \vec{K}_0, \Omega_0, \chi_0, \vec{X}_0, \vec{C}_{g_0}, H_0 \right) \in \mathbb{R}_{*+}^2 \times \mathbb{N} \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}_{*+} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}_{*+}$$

Pour des raisons d'optimisation informatique, nous avons tronqué l'ondelette 2D par un losange Γ (figure 8.2(a)). La taille d'un train d'ondes dépend de son vecteur d'onde moyen \vec{K} et de son nombre N de vagues ; la longueur L de l'enveloppe Γ est égale à N fois la longueur d'onde moyenne $\lambda = 2\pi/K$ pour pouvoir contenir N vagues et la largeur l de l'enveloppe Γ d'un train d'ondes doit être supérieur à $N - 1$ fois la longueur d'onde $\lambda = 2\pi/K$, afin d'observer la notion de crête :

$$l \geq (N - 1)\lambda = 2(N - 1)\pi/K \quad \text{et} \quad L = N \times \lambda = \frac{2N\pi}{K} \quad (8.1)$$

L'amplitude de l'onde est ainsi enveloppée par une lentille gaussienne (figure 8.2(b)) tronquée par un losange Γ centré en \vec{X} , dont les diagonales sont les axes de l'ellipse de l'ondelette définis par les vecteurs propres de la matrice A dans l'équation (3.36) page 52. Sauf exception, la matrice définie positive A caractérisant la répartition des amplitudes dans l'enveloppe Γ est liée à la largeur l et la longueur L du train d'ondes. Le premier (resp. second) vecteur propre de A est colinéaire (resp.



Un groupe de vagues est contrôlé par une ondelette de Morlet 2D dont l'enveloppe se déplace à la vitesse de groupe et dont la phase progresse à la vitesse de phase : c : c'est une réification de la notion physique de train d'ondes. L'onde se déplace en haute mer deux fois plus vite que le groupe selon l'équation (8.4). Lorsqu'une onde entre dans le train, son amplitude est faible car très atténuée par l'enveloppe. Sur la première moitié du train, elle gagne de l'énergie lors de son trajet et son amplitude augmente. Sur la deuxième moitié, elle en perd et son amplitude décroît. En vue de dessus (a), l'ondelette est vue comme un losange (la gaussienne est tronquée lorsque l'amplitude devient très faible). En vue de coté (b), l'amplitude des vagues dans le train évolue dans une enveloppe gaussienne. Un train d'onde (ou ondelette dynamique) est caractérisé par sa taille, sa position sur le plan d'eau, son vecteur d'onde moyen, sa vitesse de groupe, sa phase, son amplitude au centre et son nombre de vagues (ici quatre) avec les positions relatives des crêtes correspondantes.

FIGURE 8.2 : L'ondelette de Morlet, réifiée en un train d'onde, contrôle le groupe de vagues

orthogonal) au vecteur d'onde \vec{K} et est inversement proportionnel à L^2 (resp. l^2) ; ces relations entre A et la taille du train d'ondes définissent une notion de similarité dans les proportions de l'enveloppe Γ d'un train d'ondes par rapport à sa taille. Cette matrice A est alors définie pour l'ondelette dynamique par l'équation suivante :

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \left(\frac{4}{L}\right)^2 & 0 \\ 0 & \left(\frac{4}{l}\right)^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

où θ est la direction du vecteur d'onde moyen \vec{K} du train d'ondes. Ainsi, pour un groupe de vagues situé en \vec{X} , l'amplitude locale obéit à l'équation suivante :

$$a(\vec{u}, t) = \begin{cases} \frac{H(\vec{u}, t)}{2} \cdot e^{-\vec{u}' \cdot A \cdot \vec{u}} & \text{si } \vec{x}_0 = \vec{u} + \vec{X} \in \Gamma \\ 0 & \text{si } \vec{x}_0 = \vec{u} + \vec{X} \notin \Gamma \end{cases} \quad (8.3)$$

où $H(\vec{u}, t)$ est la hauteur non enveloppée (équation 8.7) et $\vec{u} = \vec{x}_0 - \vec{X}$ la position du point expérimental \vec{x}_0 relativement à la position \vec{X} du centre du groupe.

L'enveloppe Γ du train d'ondes suit sa position qui se déplace sur le plan d'eau à la vitesse de groupe. Lorsque la profondeur est infinie et les courants nuls, les équations eikonales (3.34) page 50 disent que le vecteur d'onde moyen \vec{K} et la vitesse de groupe \vec{C}_g sont constants. L'équation de dispersion des ondes de gravité (3.42) page 57 donne alors une expression de la vitesse de groupe en haute mer :

$$\vec{C}_g = \frac{d\vec{X}}{dt} = \nabla_k \Omega = \frac{\Omega \vec{K}}{2K^2} = \frac{\vec{c}}{2} \quad (8.4)$$

où \vec{c} est la vitesse de phase (équation 3.28 page 50) des vagues du train d'ondes. Lorsque la profondeur est grande, la vitesse de groupe est la moitié de la vitesse de phase. Nous verrons dans la section sur les savoir-faire internes (section 8.2.3) comment est modifiée cette équation lorsque l'effet de la profondeur n'est plus négligeable. Aussi, nous considérons que cette vitesse de groupe est exprimée dans un référentiel lié à l'eau.

Le profil longitudinal des vagues d'une ondelette de Morlet est une ligne droite, mais en mer, les vagues peuvent présenter d'autres types de profil longitudinal. Nous considérons qu'un unique profil longitudinal sera suffisant pour caractériser toutes les vagues d'un même groupe (figure 8.3). Ce profil est défini par une fonction P_{crests} :

$$\begin{bmatrix} -\frac{l}{2}, \frac{l}{2} \\ v \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} -\frac{L}{2}, \frac{L}{2} \\ P_{\text{crests}}(v) \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} P_{\text{crests}}(v) dv = 0 \quad (8.5)$$

dont la moyenne est nulle, afin de conserver la notion de vitesse de phase et la numérotation des crêtes. Un profil est caractérisé par une forme polynomiale par morceaux (ou spline) et le groupe contrôle ses points d'interpolation comme nous le verrons dans le chapitre 9..

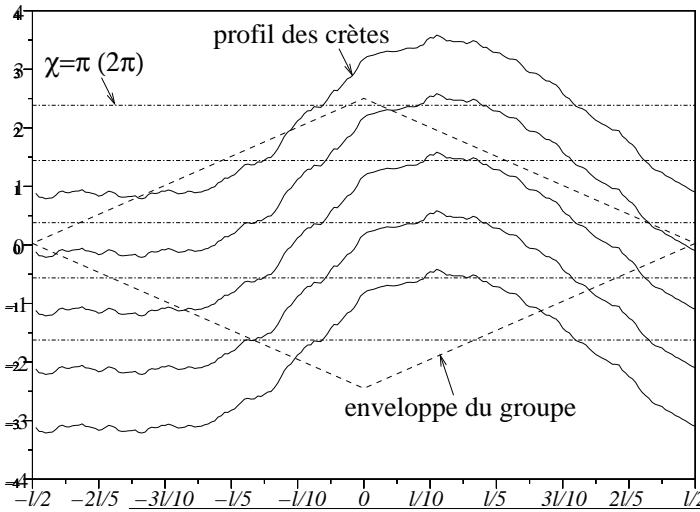


FIGURE 8.3 : Profil longitudinal des crêtes des vagues du train d'ondes

Ici, un train d'onde est tel que son nombre d'onde est $K = 2\pi$, et sa longueur d'onde $\lambda = 1\text{m}$. Son enveloppe Γ est en tiretés. Ce train a 5 vagues en tiretés-pointillés numérotées de (1 à 5). Leurs crêtes correspondantes (de 1' à 5'), en ligne continue ont toute le même profil longitudinal P^{crests} . Ici, les points d'interpolation de la spline définissant ce profil P^{crests} sont générés par un mouvement fractionnaire Brownien avec un exposant de Holder valant 0,9. C'est une manière de modéliser l'histoire inconnue d'un groupe à sa naissance par un processus aléatoire.

Si le profil des vagues d'un groupe est généré par un processus aléatoire lors de la création du groupe, selon un mouvement Brownien fractionnaire [Mandelbrot et Ness 68], afin de modéliser l'histoire inconnue du groupe, son évolution dépend de ce qui arrive au groupe, en fonction des interactions avec son environnement et de ses savoir-faire internes.

Un tel profil longitudinal est utilisé pour calculer la phase χ , en translatant la position de référence \vec{x}_0 le long du vecteur d'onde \vec{K} d'une distance algébrique définie par $P^{\text{crests}}(v)$, v étant la distance de \vec{x}_0 à la droite passant par \vec{X} et de direction \vec{K} . Cette phase principale χ est alors définie en \vec{x}_0 à l'instant t par l'équation suivante :

$$\forall t, \forall \vec{x}_0 \in \Gamma, \chi(\vec{x}_0, t) = \vec{K} \cdot \left(\vec{x}_0 - P^{\text{crests}}(v) \frac{\vec{K}}{K} \right) - \Omega t + \chi_n \quad (8.6)$$

avec $v = (\vec{x}_0 - \vec{X}) \cdot \frac{\vec{K} \wedge \vec{z}}{K}$

où \vec{z} est le vecteur unitaire, $\|\vec{z}\| = 1$, pointant vers le zénith.

Plutôt que de considérer directement cette “ondelette réifiée” ou train d'ondes comme primitive d'une approche spectrale avec les outils de l'analyse multifractale animant des cartes altimétriques¹ basées sur des filtres océanographiques à la manière de [Mastin et al. 87], nous préférons utiliser ce train d'ondes dans une approche particulière [Fournier et Reeves 86, Peachey 86] pour contrôler un groupe de vagues selon le modèle de Gerstner utilisable pour les vagues très cambrées, afin de pouvoir générer des états de mer jeunes par vent fort, et d'avoir accès au mouvement des particules ; c'est particulièrement important lorsqu'il s'agira d'évaluer les impacts de la mer sur un bateau ou une infrastructure. Les perturbations en phase et en amplitude (prochaine sous-section) vont nous permettre de modifier, dynamiquement selon l'avancement d'une vague dans le groupe, la manière de parcourir ces orbites et de contrôler ainsi le moment des vagues dans le groupe selon des modèles non-linéaires.

En océanographie physique, la position moyenne d'un groupe de vagues est caractérisée par l'équation (3.32) à partir de la modélisation mathématique d'un groupe déterminée par l'équation (3.31) page 50. Ces calculs ne sont pas réalisables en temps réel pour nos groupes de vagues inspirés du modèle de Gerstner, non seulement à cause du profil des crêtes, mais aussi à cause des perturbations non-linéaires sur le parcours des orbites. Dans notre modèle phénoménologique IPAS, nous considérerons que la position moyenne d'un groupe de vagues est le centre de l'enveloppe gaussienne du train d'ondes

¹ voir les travaux de Denis Haumont à l'Université Libre de Bruxelles pour une approche multifractale de ce type : <http://www.ulb.ac.be/polytech/sln/team/dhaumont/dhaumont.html>

le contrôlant, que son vecteur d'onde moyen est le vecteur d'onde de l'ondelette correspondante, et que sa pulsation moyenne est la pulsation du train d'ondes le contrôlant.

Ainsi, un tel *train d'ondes* caractérise la zone d'influence des praxis du groupe de vagues qui lui est attaché. Il précise la position des crêtes dans le groupe et le profil principal des crêtes. Aussi, il donne une expression de la phase principale des vagues (équation 8.6). La zone d'influence a la forme d'un losange tronquant une enveloppe gaussienne. Le train d'ondes transporte alors l'enveloppe du groupe, le profil principal des crêtes, les paramètres moyens des vagues et se propage à la surface du plan d'eau à la vitesse de groupe.

8.2.2 Perturbations en phase et en amplitude

Aux caractéristiques moyennes d'un groupe spécifiées par son train d'ondes, nous ajoutons des perturbations en phase et en amplitude attachées aux crêtes et aux creux des vagues du groupe. Pour être attachées aux crêtes et aux creux, ces perturbations sont des fonctions de la phase $\chi(\vec{x}_0, t)$ (équation 8.6). Elles sont utilisées dans notre modèle de groupe, à la fois pour spécifier des effets locaux des vents, des courants ou de la bathymétrie sur un groupe, mais aussi lors de la création d'un groupe pour représenter les aspects inconnus de son histoire.

Comme pour le profil vagues d'un groupe, la génération des perturbations en phase et en amplitude est due à un processus aléatoire lors de la création du groupe, selon des mouvements Brownien fractionnaires [Mandelbrot et Ness 68] bornés, afin de modéliser l'histoire inconnue du groupe. En revanche, une fois générées, leurs évolutions ne dépendent que de ce qui arrive au groupe, en fonction des interactions avec son environnement et de ses savoir-faire internes, qui réintègrent les perturbations de chaque crêtes (resp. creux) sortant à l'avant du groupe, à la crête (resp. creux) entrant à l'arrière du groupe.

Remarquons que ces deux types de perturbations apportent un surplus ou un déficit d'action à l'ensemble du groupe, action associée à des fréquences plus élevées que celle du train d'ondes contrôlant le groupe : typiquement des fréquences doubles. Ainsi, en jouant sur ces perturbations, on peut modifier la quantité d'action située dans les hautes fréquences d'un groupe.

8.2.2.1 Perturbations en amplitude δH

Dans l'équation de l'enveloppe (équation 8.3) d'un train d'ondes, la hauteur locale $H(\vec{u}, t)$ est la somme de deux termes. Le premier H_n est global. Le second est une perturbation locale attachée aux vagues $\delta H(\chi(\vec{x}_0, t))$, avec $\vec{x}_0 = \vec{u} + \vec{X}$.

$$H(\vec{u}, t) = H_n + \delta H(\chi(\vec{u} + \vec{X}, t)) \quad (8.7)$$

avec $|\delta H| < H_n$ de sorte que $H(\vec{u}, t)$ soit toujours positif. δH est interpolé entre des points de contrôle situés aux crêtes et aux creux des vagues. Chaque crête $\chi = \pi_{\text{mod}(2\pi)}$ et chaque creux $\chi = 0_{\text{mod}(2\pi)}$ transporte un ensemble de points de contrôle définissant latéralement au déplacement du groupe des splines $\delta H(\chi = 0_{\text{mod}(\pi)})$ le long de chaque crête et le long de chaque creux. Dans le sens longitudinal du déplacement du groupe, les interpolations sont linéaires entre les creux $\delta H(\chi = 0_{\text{mod}(2\pi)})$ et les crêtes $\delta H(\chi = \pi_{\text{mod}(2\pi)})$.

Ces perturbations en amplitude seront utilisées après avoir modifié les caractéristiques moyennes du train d'ondes, pour tenir compte de l'hétérogénéité d'un groupe participant à des déferlements localisés ou subissant les effets d'une profondeur et d'un courant anisotropes.

8.2.2.2 Perturbations en phase ϕ

La perturbation de la phase peut être vue comme la notion de phase instantanée [Meyers et al. 93]. C'est une modulation de la phase χ (équation 8.6) dépendant de la position relative des crêtes et

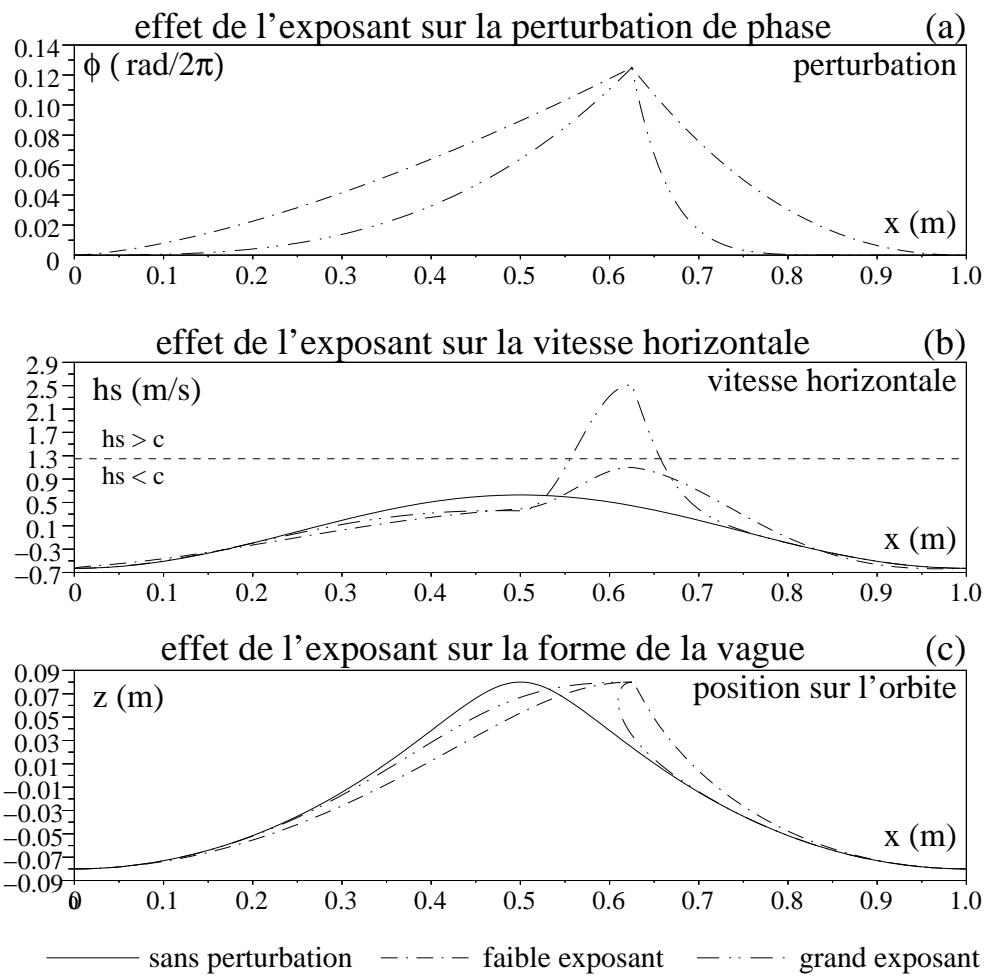
des creux. Cette modulation modélise les notions d'avance de crête, de retard de creux, de forme asymétrique des vagues et du parcours orbital des particules à vitesse non constante; toutes ces caractéristiques s'adressent à des vagues très cambrées, associées à des moments bien plus importants que ce que prévoit les théories linéaires ou quasi-linéaires.

Chaque point d'une crête (resp. d'un creux) est associé à une avance de crête ϕ_{\max} , $0 \leq \phi_{\max} \leq \frac{\pi}{3}$ (resp. un retard de creux ϕ_{\min} , $-\frac{\pi}{3} \leq \phi_{\min} \leq 0$), et en chaque point d'une crête sont associés deux exposants ρ_{front} et ρ_{rear} .

Que ce soit pour les exposants, les retards de creux ou les avances de crête, la détermination de leur valeur, latéralement dans la largeur du groupe, est obtenue par des splines caractérisés par un certain nombre de points de contrôle, typiquement.

L'interpolation longitudinale entre une crête et un creux suit une fonction puissance dont l'exposant $\rho > 1$ dépend de quel côté de la crête est situé le point étudié, selon qu'il se trouve en avant de la crête ρ_{front} , ou en arrière de la crête ρ_{rear} .

Lors de l'animation des points de référence à la manière de Gerstner (sous-section 8.2.4), la valeur des exposants modifie la forme de la surface et la vitesse orbitale à la surface. Nous choisissons $\rho_{\text{rear}} \in [1, 3]$ et $\rho_{\text{front}} \in [1, 9]$. L'effet des exposants est illustré par la figure 8.4 : de grandes valeurs de ρ_{rear} augmentent la quantité d'eau en arrière de la vague; de grandes valeurs de ρ_{front} augmentent considérablement les accélérations verticales et horizontales en avant de la vague, et déforment la surface jusqu'aux prémisses d'un déferlement plongeant.



Cette vague présente une longueur de 1 m et une hauteur de 18 cm. L'avance de crête est $\phi_{\max} = \pi/4$, et $\phi_{\min} = 0$ [graphique (a)]. En trait plein, aucune perturbation n'est utilisée pour animer les points de la surface directement selon la phase χ dans un modèle de Gerstner aux orbites circulaires. Les deux autres lignes représentent le même modèle de Gerstner, mais en utilisant la phase perturbée $\chi - \phi$ à la place de χ , où ϕ est la perturbation de phase (équation 8.8). En tireté-pointillé, l'exposant arrière est de 1,5 tandis qu'à l'avant il est de 2,25. En tireté-double-pointillé, l'exposant arrière est 3 et il est de 9 à l'avant. De plus grands exposants augmentent la vitesse orbitale au voisinage des crêtes [graphique (b)], et la probabilité d'observer un déferlement s'approche de 1 [graphique (c)].

FIGURE 8.4 : Interpolations non-linéaires et leurs effets sur la forme des vagues

Plus précisément, l'interpolation entre les crêtes $m, m+1$ et le creux $m+1/2$ obéit aux équations suivantes :

$$\left| \begin{array}{l} \phi(\xi) = (\phi_{\max}^{[m]} - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]}) \left(\frac{\xi - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]}}{\phi_{\max}^{[m]} - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]} - \pi} \right)^{\rho_{\text{front}}^{[m]}} + \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]} \quad , \quad \text{si} \quad -\pi + \phi_{\max}^{[m]} \leq \xi < \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]} \\ \phi(\xi) = (\phi_{\max}^{[m+1]} - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]}) \left(\frac{\xi - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]}}{\pi + \phi_{\max}^{[m+1]} - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]}} \right)^{\rho_{\text{rear}}^{[m+1]}} + \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]} \quad , \quad \text{si} \quad \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]} \leq \xi < \pi + \phi_{\max}^{[m+1]} \end{array} \right. \quad (8.8)$$

où $\xi = \chi \bmod(2\pi)$ est entre la crête $\chi = \pi + \phi_{\max} \bmod(2\pi)$ et le creux $\chi = \phi_{\min} \bmod(2\pi)$.

L'avant de la crête est caractérisé par :

$$-\pi + \phi_{\max} \leq \xi < \phi_{\min}$$

Tandis que l'arrière de la crête vérifie :

$$\phi_{\min} \leq \xi < \pi + \phi_{\max}$$

Cette définition de ϕ assure la continuité de la phase en chaque crête $\pi + \phi_{\max}$ et en chaque creux ϕ_{\min} . Le choix des exposants strictement plus grand que 1, $\rho > 1$, assure que ϕ est dérivable en chaque creux ϕ_{\min} , mais ce n'est pas le cas pour les crêtes $\pi + \phi_{\max}$.

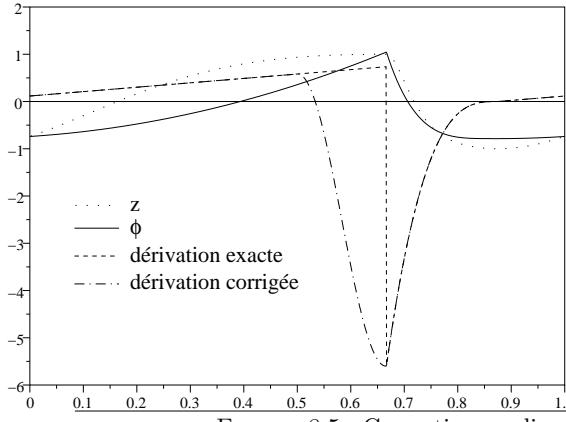


FIGURE 8.5 : Correction appliquée au calcul de $\frac{d\phi}{d\xi}$

Ici, une perturbation de phase avec $\phi_{\max} = \pi/3$, $\phi_{\min} = -\pi/4$, $\rho_{\text{rear}} = 2$ et $\rho_{\text{front}} = 4$ est dessinée en trait plein (relativement à une vague d'une longueur d'1 m et dont la hauteur z exprimée en coordonnées réduites est en pointillés). La ligne en tiretés représente le calcul différentiel exact de ϕ présentant une discontinuité au niveau de la crête, tandis que les tiretés-pointillés montrent la correction appliquée pour calculer ϕ' .

Nous modifions alors artificiellement le calcul de la dérivée ϕ' en arrière des crêtes sur chaque intervalle $[\pi, \pi + \phi_{\max}] \bmod(2\pi)$ par l'équation suivante :

$$\phi'(\xi) = \begin{cases} \frac{d\phi}{d\xi} , \quad \text{si} \quad -\pi + \phi_{\max}^{[m-1]} < \xi < \pi \\ \frac{d\phi}{d\xi} + (\phi'_{\text{front}} - \phi'_{\text{rear}}) \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\xi - \pi}{\phi_{\max}^{[m]}} \right) , \quad \text{si} \quad \pi \leq \xi \leq \pi + \phi_{\max}^{[m]} \end{cases} \quad (8.9)$$

$$\text{où } \phi'_{\text{front}} = \frac{\rho_{\text{front}}^{[m]} (\phi_{\max}^{[m]} - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]})}{\phi_{\max}^{[m]} - \phi_{\min}^{[m+\frac{1}{2}]} - \pi} \text{ et } \phi'_{\text{rear}} = \frac{\rho_{\text{rear}}^{[m]} (\phi_{\max}^{[m]} - \phi_{\min}^{[m-\frac{1}{2}]})}{\phi_{\max}^{[m]} - \phi_{\min}^{[m-\frac{1}{2}]} + \pi}$$

Cette modification ajoute systématiquement un surplus de vitesse horizontale aux particules situées au voisinage des crêtes, ce qui peut s'interpréter comme le début d'un courant de dérive (Stokes drift). Cela rend également le modèle plus robuste à la détection des déferlements basée sur l'observation de la vitesse orbitale en les points de référence, puisque la durée pendant laquelle un point de référence mesure une vitesse horizontale importante est accrue par cette définition de ϕ' .

Dans la suite de cette section, nous utiliserons les notations suivantes :

$\frac{d\phi}{d\xi}$ pour désigner la dérivée exacte prolongée par continuité à gauche en chaque $\pi + \phi_{\max}$.

ϕ' pour désigner la dérivée corrigée selon l'équation 8.9.

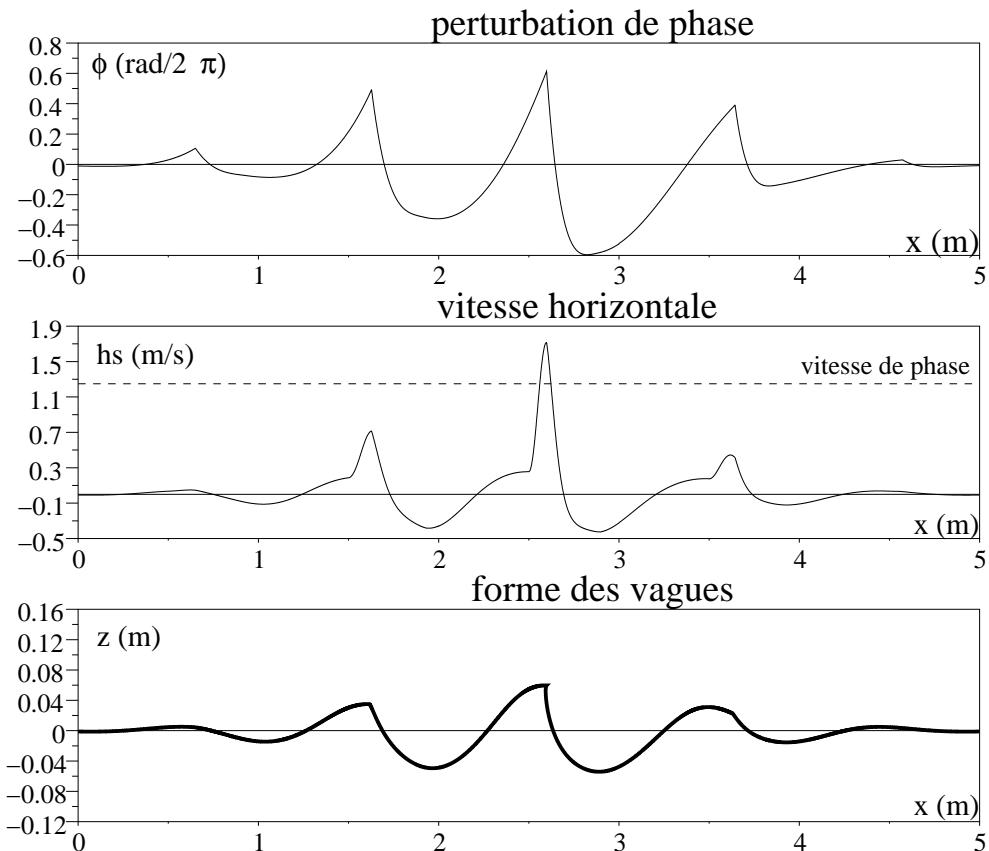
Ces deux manières de calculer la dérivée de la perturbation de phase est illustrée par la figure 8.5.

La perturbation de phase définie précédemment correspond à un maximum de perturbation, atteint uniquement au centre du groupe. En effet, la perturbation maximum est multipliée par la lentille gaussienne pour obtenir la perturbation effective qui va se retrancher à la phase χ pour donner la phase modifiée $\chi^{[\phi]}$:

$$\chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t) = \chi(\vec{x}_0, t) - \phi(\chi(\vec{x}_0, t)) \cdot e^{-(\vec{x}_0 - \vec{X})' A(\vec{x}_0 - \vec{X})} \quad (8.10)$$

avec $\chi(\vec{x}_0, t)$ donné par l'équation 8.6 et ϕ par l'équation 8.8.

Quand une vague progresse dans le groupe, elle gagne de l'avance de crête jusqu'à ce qu'elle ait atteint le centre du groupe, puis perd cette avance au fur et à mesure qu'elle continue de progresser dans la deuxième moitié du groupe jusqu'à disparaître à l'avant du groupe (figure 8.6).



Caractéristiques d'un groupe vu dans le plan vertical contenant son vecteur d'onde \vec{K} et sa position \vec{X} . Ici, $K = 2\pi \text{ rad m}^{-1}$, $\Omega = 7.85 \text{ rad s}^{-1}$, $N = 5$, $X = 2.5 \text{ m}$ et $H = 0.12 \text{ m}$ (pour une longueur d'onde $\lambda = 1 \text{ m}$).

En haut ϕ : perturbation effective de la phase, avec $0 \leq \phi_{max} < \pi/3$, $-\pi/6 < \phi_{min} \leq 0$, $\rho_{front} = 4$ et $\rho_{rear} = 2$.

Au milieu hs : vitesse horizontale en les points de la surface uniquement due à ce groupe seul, en utilisant le modèle de Gerstner pour l'animation des points tournant sur leurs orbites circulaires selon la phase perturbée $\chi^{[\phi]}$; Les tirets indiquent la vitesse de phase $c = \Omega/K$, comme un critère possible de détection d'un déferlement lorsque $hs > c$.

En bas z : position des points animés selon ce modèle non-linéaire. Lorsqu'une vague entre dans le groupe, sa perturbation de phase et son amplitude augmentent jusqu'à atteindre leur maximum au milieu du groupe, puis ces deux paramètres caractéristique de la vague diminuent dans la seconde partie du groupe.

FIGURE 8.6 : Coupe longitudinale d'un groupe de 5 vagues avec ses perturbations de phase

Ainsi, ces perturbations en amplitude et en phase sont toutes deux enveloppées par la lentille gaussienne du train d'onde. Ces perturbations permettent de contrôler chaque vague du groupe en ajoutant des comportements non-linéaires aux vagues du train d'ondes contrôlant le groupe en moyenne et qui évoluent en intégrant l'histoire des vagues au cours de leurs parcours dans le groupe.

8.2.3 Autres paramètres et savoir-faire internes du groupe

En plus du train d'ondes et des perturbations en phase et en amplitude, le groupe possède d'autres paramètres internes (section 8.2.3.1) qu'il manipule par ses savoir-faire internes (section 8.2.3.2) pour déterminer son comportement. Aussi, nous distinguons parmi les savoir-faire internes ceux qui sont directement reliés à des *poiesis*, de ceux qui ont lieu indépendamment de ces activités de perception. Nous ne considérons dans cette sous-section que les savoir-faire internes du second type. Ceux qui sont attachés à des *poiesis* seront étudiés dans le chapitre 9 sur les interactions.

8.2.3.1 Paramètres internes

Les paramètres internes que nous présentons ici sont le nombre d'onde lagrangien K_n^∞ et la hauteur H_n^∞ en profondeur infinie, les vitesses de phase \vec{c}_n et c_n^∞ , le vent moyen instantané $\bar{\vec{w}}_n$, le stress du vent $\langle \bar{w} \rangle_n$, l'âge α_n du groupe et la profondeur moyenne \bar{h} vue par le groupe.

Le **nombre d'onde lagrangien** K^∞ correspond au nombre d'onde qu'aurait le groupe en profondeur infinie dans les mêmes conditions de courant ; il caractérise la longueur d'onde $\lambda^\infty = 2\pi/K^\infty$ qu'auraient les vagues en profondeur infinie. K^∞ est insensible aux effets de la bathymétrie ; il n'est modifié que par les variations du courant vu par le groupe et les déferlements.

La **hauteur** H^∞ correspond à la hauteur qu'aurait le centre du groupe en profondeur infinie dans les mêmes conditions de courant. H^∞ est insensible aux effets de la bathymétrie. En revanche, cette hauteur est modifiée par les variations du courant vu par le groupe, les déferlements et les vents.

La **vitesse de phase** \vec{c} correspond à la notion océanographique de vitesse de l'onde et vérifie l'équation 3.28 page 50, *i.e.* :

$$\vec{c} = \frac{\Omega \vec{K}}{K^2}$$

La **vitesse de phase lagrangienne** c^∞ serait la vitesse de phase du même groupe dans les mêmes condition de courants, mais en profondeur infinie et exprimée dans un repère lié à l'eau. Nous la définissons par

$$c^\infty = \frac{\Omega}{K^\infty} \quad (8.11)$$

Le **vent moyen instantané** $\bar{\vec{w}}$ correspond à un instant donné à la moyenne des vecteurs vents perçu par le groupe. Ce vecteur est utilisé pour déterminer le **stress du vent** $\langle \bar{w} \rangle$ qui est une moyenne sur une minute de $\bar{\vec{w}}$ projeté dans la direction du vecteur d'onde \vec{c} , moyenne mise à jour à chaque nouvelle information de vent moyen instantané provenant indirectement d'une *poiesis*.

$$\langle \bar{w} \rangle_{n+1} = \frac{1}{\sum_{j=n-k, \dots, n} \delta t_j} \cdot \sum_{j=n-k, \dots, n} \delta t_j \frac{\bar{\vec{w}}_j \cdot \vec{c}_j}{c_j^2} \quad (8.12)$$

où $k < n$ est le premier entier tel que $\sum_{j=n-k, \dots, n} \delta t_j \geq 60 \text{ s}$, avec δt_j le temps écoulé entre $\bar{\vec{w}}_{j-1}$ et $\bar{\vec{w}}_j$.

L'**âge** α d'un groupe est le quotient de la vitesse de phase c^∞ qu'il aurait au large en l'absence de courant, par la moyenne $\langle \bar{w} \rangle$ de la vitesse du vent moyen instantané $\bar{\vec{w}}$ projetée sur le vecteur d'onde \vec{K} du groupe, moyenne intégrée sur 1 min de la trajectoire du groupe.

$$\alpha = \frac{c^\infty}{\bar{w}} = \frac{\Omega}{\langle \bar{w} \rangle K^\infty} \quad (8.13)$$

Ne pouvant correctement évaluer la vitesse de friction u_* dans la définition océanographique de l'âge d'un groupe (équation 3.38 page 54), nous avons choisi de prendre la vitesse du vent en altitude w qui est bien plus grande que u_* , mais dont les variations sont qualitativement du même ordre. L'âge d'un groupe dans notre modèle est donc beaucoup plus faible que l'âge au sens océanographique

[Janssen 94], mais il traduit une notion qualitativement de même nature. Ainsi, à vent constant, plus les vagues vont vites (proportionnellement à la racine carrée de leur longueur d'onde), et plus le groupe est vieux. Aussi, pour une longueur d'onde donnée des vagues d'un groupe, plus le vent est fort dans la direction de déplacement du groupe, plus le groupe est jeune.

La profondeur moyenne \bar{h} correspond à un instant donné à la moyenne des profondeurs perçues par le groupe. Cette profondeur est utilisée pour mettre à jour la vitesse de groupe.

8.2.3.2 Savoir-faire internes

Les savoir-faire internes d'un groupe que nous étudions ici sont l'allongement de la longueur d'onde à une vitesse proportionnelle à la cambrure, la répartition des perturbations en phase et en amplitude sur chaque crête et chaque creux du groupe, la mise à jour du déphasage χ_n et de la vitesse de groupe C_{g_n} lors d'une modification du vecteur d'onde \vec{K} ou de la pulsation Ω et la mise à jour de la hauteur H_n lors d'une modification de H^∞ ou de K^∞ .

L'allongement de la longueur d'onde d'un groupe peut être considérée au large et en l'absence de déferlement comme ayant lieu à une vitesse proportionnelle à la cambrure $H^\infty/\lambda^\infty = H^\infty K^\infty/2\pi$. Ce qui se traduit par une modification de K_n^∞ , de Ω_n , de H^∞ pour conserver l'action, et de \vec{K}_n .

$$K_{n+1}^\infty = K_n^\infty (1 - \alpha_{\text{auto-downshift}} H_n^\infty K_n^\infty \delta t) \quad (8.14)$$

$$\Omega_{n+1} = \sqrt{g K_{n+1}^\infty} \quad (8.15)$$

$$H_{n+1}^\infty = H_n^\infty \sqrt{\frac{\Omega_{n+1}}{\Omega_n}} \quad (8.16)$$

$$\vec{K}_{n+1} = \vec{K}_n \cdot \frac{K_{n+1}^\infty}{K_n^\infty} \quad (8.17)$$

où $\alpha_{\text{auto-downshift}}$ est le coefficient de proportionnalité de la vitesse d'allongement et δt la durée séparant deux activités consécutives de ce savoir-faire.

Afin de conserver les propriétés géométriques de l'enveloppe, l'action moyenne totale du groupe, les bonnes positions pour les crêtes et respecter la vitesse de groupe, il faudra aussi mettre à jour L_n, l_n, H_n et χ_n, C_{g_n} comme précisé ci-après.

La répartition des perturbations associées aux crêtes et aux creux est réalisée pour toutes les nouvelles crêtes et les nouveaux creux qui entrent à l'arrière d'un groupe. Le nombre de crêtes ou de creux sortant à l'avant est exactement égale au nombre de crêtes et de creux entrant à l'arrière du groupe. Etudions par exemple les crêtes, sachant que pour les creux, ce sera la même chose. Au moment où la crête passe de l'avant à l'arrière du groupe, les perturbations qui lui sont attachées subissent une transformation laissant invariante la moyenne des perturbations le long de la crête, mais lissant celles-ci par une moyenne glissante sur les points de contrôle de la spline. En ce qui concerne les perturbations en hauteur uniquement, leur moyenne est ramenée à cette occasion à zéro sur chaque crête, et le ΔH correspondant à chaque crête est réparti sur tout le groupe au niveau de H^∞ .

$$H_{n+1}^\infty = H_n^\infty \left(1 + \frac{\Delta H}{2N_n H_n} \right) \quad (8.18)$$

Nous divisons par $2N_n$ car il y a potentiellement N_n crêtes et N_n creux, et que cette opération doit globalement conserver l'énergie du groupe. La mise à jour de H_n sera alors effectuée comme précisé ci-après.

La mise à jour du déphasage χ_n lors d'une modification du vecteur d'onde \vec{K} ou de la pulsation Ω doit permettre une continuité dans les positions des crêtes. Cette mise à jour est réaliser pour conserver la phase principale (sans le profil) de l'intant t_n au centre \vec{X}_n du groupe que la formule utilisée soit celle avec les anciennes valeurs \vec{K}_n, Ω_n et χ_n , ou celle avec les nouvelles valeurs $\vec{K}_{n+1}, \Omega_{n+1}$ et χ_{n+1} . Il faut pour cela avoir mémorisé les anciennes valeurs qui ont été utilisées pour le précédent calcul de χ_n .

$$\chi_{n+1} = \chi_n + (\vec{K}_n - \vec{K}_{n+1}) \cdot \vec{X}_n - (\Omega_n - \Omega_{n+1}) t_n \quad (8.19)$$

si la continuité des positions de crêtes est bien assurée au centre du groupe, c'est de moins en moins précis au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Cependant, plus l'on s'éloigne, et plus on est soumis à l'influence de l'enveloppe, donc moins l'erreur de continuité est importante. Aussi, on peut toujours discréteriser le passage de K_n, Ω_n à K_{n+1}, Ω_{n+1} en augmentant l'activité de ce savoir-faire et de la mise à jour de la vitesse de groupe, avec un pas de temps suffisamment faible pour que l'impression de continuité subsiste.

La mise à jour de la vitesse de groupe \vec{C}_{g_n} lors d'une modification du vecteur d'onde \vec{K} ou de la pulsation Ω est réalisé selon la formule suivante, qui dépend non seulement de K et Ω , mais également de la profondeur moyenne \bar{h} . Lorsque \bar{h} est grand devant la longueur d'onde la vitesse de groupe vaut la moitié de la vitesse de phase \vec{c} . En revanche, lorsque \bar{h} devient faible, la vitesse de groupe devient sensiblement égale à la vitesse de phase ; on parle alors de dégroupage des vagues. Lorsque la profondeur h est constante et les courants nuls, les équations eikonales (3.34) disent que le vecteur d'onde moyen \vec{K} et la vitesse de groupe \vec{C}_g sont constants. L'équation de dispersion (équation 3.42 page 57) donne alors une expression de la vitesse de groupe généralisant l'équation 8.4 :

$$\vec{C}_g = \frac{d\vec{X}}{dt} = \nabla_K \Omega = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Omega \vec{K}}{K^2} \cdot \left(1 + \frac{2Kh}{\sinh(2Kh)} \right) = \frac{1}{2} \cdot \vec{c} \cdot \left(1 + \frac{2Kh}{\sinh(2Kh)} \right) \quad (8.20)$$

Nous utilisons alors cette équation avec $h = \bar{h}$ pour mettre à jour la vitesse de groupe C_{g_n} :

$$\vec{C}_{g_{n+1}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Omega \vec{K}}{K^2} \cdot \left(1 + \frac{2K\bar{h}}{\sinh(2K\bar{h})} \right)$$

où \vec{K} et Ω sont les nouvelles valeurs du vecteur d'onde et de la pulsation.

La mise à jour de la hauteur H lors d'une modification de H^∞ ou de K^∞ .

$$H_n = H^\infty \cdot \frac{K}{K^\infty} \quad (8.21)$$

où K est le nombre d'onde courant du groupe. Si le groupe évolue par profondeur infinie, $H_n = H^\infty$.

Les activités de ces savoir-faire internes, sont liées pour la plupart aux activités de *poiesis* du groupe. Cependant, l'allongement des vagues et la répartition des perturbations ont leurs activités propres. Pour l'**allongement** des vagues, l'activité est proportionnelle à l'âge du groupe. Plus le groupe est vieux, et moins il verra sa cambrure en mer profonde modifiée par le vent (un délai d'une minute suffit pour correctement calculer l'allongement). Tandis que dans le cas d'un groupe jeune, intensément forcé par le vent, sa cambrure est modifiée rapidement, et il faut pouvoir en tenir compte dans la vitesse de l'allongement (un délai de dix secondes permet de suivre correctement l'évolution de la vitesse d'allongement). Pour la **répartition** des perturbations, il convient de ne pas attendre le dernier moment pour effectuer le calcul de toutes les nouvelles vagues, il paraît donc judicieux d'exécuter cette méthode une à deux fois par période de vague, c'est à dire avec un délai d'inhibition compris entre π/Ω et $2\pi/\Omega$. Ainsi, à chaque activité de ce type, entre au moins une et au plus deux splines sont prises en charge.

8.2.4 Propriétés expérimentables et praxis du groupe

C'est le groupe de vagues qui est le responsable principal de l'animation des points de la surface de la mer. La manière dont est réalisée l'animation s'inscrit dans l'approche particulière (section 4.2 du chapitre 4), donnant directement accès aux mouvement des éléments de fluide. Les compétences d'un groupe de vagues sont alors basées sur un modèle inspiré des travaux de Gerstner et Biesel [Gerstner 1804, Biesel 52], imaginant des particules de fluides qui se déplacent à vitesse constante le long d'orbites circulaires en fonction de leur phase. Les propriétés expérimentables avec un groupe de vagues en une position de référence \vec{x}_0 sont : la position orbitale $\vec{\Delta x} \in \mathbb{R}^3$, la vitesse orbitale $\vec{s} \in \mathbb{R}^3$, la normale géométrique à la surface $\vec{n} \in \mathbb{R}^3$, la liste \mathcal{I} des groupes influents, et la liste \mathcal{C} des crêtes situées à proximité de \vec{x}_0 pour chaque groupe de \mathcal{I} . Pour un groupe seul dont l'enveloppe serait infinie et les perturbations nulles, en haute mer et en l'absence de courant, le vecteur $\vec{\Delta x}$ est la position de la

particule qui serait au repos en \vec{x}_0 selon le modèle de Gerstner, le vecteur \vec{s} serait sa vitesse de norme constante et orthogonale à $\vec{\Delta x}$, le vecteur \vec{n} serait la normale à la nappe trochoïdale en $\vec{x}_0 + \vec{\Delta x}$, la liste \mathcal{I} serait réduite au nom de ce groupe, et la liste \mathcal{C} est soit vide, soit constituée du couple (nom de ce groupe, numéro de la crête), si la crête est située à proximité de \vec{x}_0 , propriété établie d'après le critère $\chi \approx \pi_{\text{mod}(2\pi)}$.

Nous faisons l'hypothèse que lorsque plusieurs groupes influencent un même point expérimental, la contribution de chaque groupe $\vec{\Delta x}^+, \vec{s}^+, \vec{n}^+$ s'ajoute linéairement aux propriétés déjà partiellement expérimentées $\vec{\Delta x}, \vec{s}, \vec{n}$. Si cette hypothèse est habituellement liée à la description des états de mer calmes dans l'approche par système linéarisé d'équations différentielles, n'oublions pas que dans notre modèle, les bilans physiques sont réalisés au niveau des entités phénoménologiques, et pas au niveau des points expérimentaux. Une telle hypothèse n'empêche donc pas *a priori* la simulation des états de mer modérés à forts. Bien sûr, lorsqu'il sera question de faire de l'hydrographie pour étudier, par exemple, les impacts des vagues sur une infrastructure ou un navire, il faudra certainement dans un premier temps revoir la manière de peuvent se combiner les contributions de groupes très cambrés, car avec les méthodes hydrographiques actuelles, les bilans sont réalisés sur les maillages utilisés pour résoudre les équations de la dynamique des fluides.

Pour décrire les vecteurs $\vec{\Delta x}^+, \vec{s}^+, \vec{n}^+$, nous utilisons les deux notations suivantes :
 $[A]_{(\vec{v}, \vec{w})}$, où $A \in \mathcal{C}$ est un complexe et (\vec{v}, \vec{w}) un couple de deux vecteurs unitaires orthogonaux, représente le vecteur \vec{u} du plan (\vec{v}, \vec{w}) dont l'affixe complexe est $A : \vec{u} = \Re(A)\vec{v} + \Im(A)\vec{w}$.
 $\mathbf{I}_{\vec{N}}$, où \vec{N} est un vecteur de \mathbb{R}^3 , représente le vecteur $\vec{N}/\|\vec{N}\|$ de norme 1, ayant le même sens et la même direction que \vec{N} .

Etant donné un point de référence à la surface de la mer $M = (\vec{x}_0, 0, t) \in \mathbb{R}^4$, nous considérons un groupe défini à l'instant t par son enveloppe Γ , son vecteur d'onde moyen \vec{K} , sa pulsation moyenne Ω , sa position moyenne \vec{X} , sa hauteur au centre H , sa phase initiale χ_0 , et ses perturbations en phase ϕ et en amplitude δH .

Le groupe offre alors la praxis suivante regroupant les cinq propriétés expérimentables préalablement décrites selon les formules qui suivent, dans lesquelles $a = a(\vec{x}_0 - \vec{X}, t)$ est l'amplitude locale de la vague avec sa perturbation d'amplitude comme définies par les équations 8.3 et 8.7, $e^{-\vec{u}' \cdot A \cdot \vec{u}}$ est le coefficient dû à l'enveloppe gaussienne en $\vec{u} = \vec{x}_0 - \vec{X}$, χ est la phase principale respectant l'équation 8.6, $\chi^{[\phi]}$ la phase avec sa perturbation locale selon l'équation 8.10, ϕ' la dérivée corrigée de la phase (équation 8.9) et \vec{z} le vecteur normé pointant vers le zénith.

1. Pour la position orbitale $\vec{\Delta x}^+$.

Si $\vec{x}_0 \notin \Gamma$ alors $\vec{\Delta x}^+ = \vec{0}$.

Sinon :

$$\vec{\Delta x}^+ = a \cdot \left[e^{i\chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t)} \right]_{(-\vec{z}, \vec{K})} \quad (8.22)$$

C'est l'application du modèle de Gerstner, en utilisant la phase perturbée $\chi^{[\phi]}$ pour le positionnement d'une particule sur son orbite cirulaire, qui serait au repos en \vec{x}_0 .

Lorsque plusieurs groupes interviennent en \vec{x}_0 :

$$\vec{\Delta x} = \sum \vec{\Delta x}^+ \quad (8.23)$$

l'effet de tous les groupes sur la position orbitale est la simple somme vectorielle des positions orbitales données par chaque groupe.

2. Pour la vitesse orbitale \vec{s}^+ .

Si $\vec{x}_0 \notin \Gamma$ alors $\vec{s}^+ = \vec{0}$.

Sinon :

$$\vec{s}^+ = -a\Omega \cdot \left(1 - e^{-\vec{u}' \cdot A \cdot \vec{u}} \phi'(\chi(\vec{x}_0, t)) \right) \cdot \left[i e^{i\chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t)} \right]_{(-\vec{z}, \vec{K})} \quad (8.24)$$

Cette formule est obtenue à partir de l'hypothèse que l'enveloppe du groupe vue depuis \vec{x}_0 varie très lentement dans le temps par rapport aux mouvements orbitaux du fluide : $\partial a(\vec{u}, t)/\partial t \approx 0$.

Avec cette hypothèse et l'utilisation de la dérivée corrigée ϕ' pour la perturbation de phase, le calcul de $\vec{s}^+ = d\vec{\Delta x}^+ / dt$ se simplifie en :

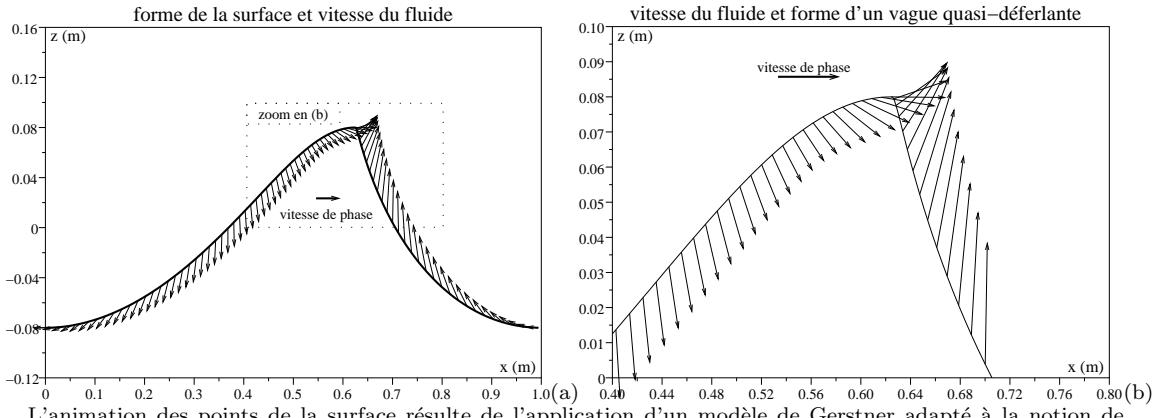
$$\vec{s}^+ \approx a(\vec{u}, t) \cdot [i \frac{\partial \chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t)}{\partial t} e^{i\chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t)}]_{(-\vec{z}, \vec{K})} \text{ avec } \partial \chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t) / \partial t \approx -\Omega \cdot (1 - e^{-\vec{u}' \cdot A \cdot \vec{u}} \phi'(\chi_{(\vec{x}_0, t)}))$$

Lorsque plusieurs groupes interviennent en \vec{x}_0 :

$$\vec{s} = \sum \vec{s}^+ \quad (8.25)$$

l'effet de tous les groupes sur la vitesse orbitale est la simple somme vectorielle des vitesses dues à chaque groupe.

Ces deux compétences sur la forme de la surface et la vitesse orbitale aux points de cette surface sont illustrées par la figure 8.7.



L'animation des points de la surface résulte de l'application d'un modèle de Gerstner adapté à la notion de groupe et dans lequel des perturbations de phase et d'amplitude sont introduites. Ici, 100 points de référence d'altitude 0 et caractérisés des \vec{x}_0 dans $[0, 1] \times \{0\}$ sont animés par un positionnement orbital pour former la surface (équation 8.22) et auxquels sont définies des vitesses orbitales (équation 8.24), ces vecteurs étant représentés par des flèches. Cette animation est due à un unique groupe se propageant dans la direction de la première coordonnée. Ce groupe forme une crête zoomée à droite, avec une longueur d'onde $\lambda = 1 \text{ m}$, une amplitude locale $a = 8 \text{ cm}$ maintenue constante sur toute la vague, et une perturbation de phase définie par $\phi_{\max}^{[m]} = \pi/4$, $\phi_{\min}^{[m \pm 1/2]} = 0$ et des exposants ($\rho_{\text{rear}} = 1.5$, $\rho_{\text{front}} = 2.25$). La forme de la vague fait penser à une crête à la limite du déferlement, comme le confirme la comparaison entre la vitesse de phase $c = \Omega/K$ et la vitesse orbitale.

FIGURE 8.7 : Position et vitesse orbitales déterminées par un groupe de vagues

3. La normale à la surface \vec{n}^+ .

Si $\vec{x}_0 \notin \Gamma$ alors $\vec{n}^+ = \vec{z}$.

Sinon :

$$\vec{n}^+ = \mathbb{I} \left[1 + aK \cdot \left(1 - e^{-\vec{u}' \cdot A \cdot \vec{u}} \left(\frac{d\phi(\xi)}{d\xi} \right)_{[\xi = \chi(\vec{x}_0, t)]} \right) \cdot i e^{i\chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t)} \right]_{(\vec{K}, \vec{z})} \quad (8.26)$$

Cette formule est obtenue à partir de l'hypothèse que l'enveloppe du groupe vue depuis \vec{x}_0 varie très lentement dans l'espace par rapport aux mouvements orbitaux du fluide : $\partial a(\vec{u}, t) / \partial x \approx 0$, quelle que soit la direction horizontale \vec{x} du calcul de cette dérivée partielle. Avec cette hypothèse, le vecteur normal \vec{n}^+ dû à un unique groupe est dans le plan contenant la verticale \vec{z} et le vecteur d'onde \vec{K} . Aussi, dans le plan complexe associé au repère orthogonal $(-\vec{z}, \vec{K})$, il fait un angle de $+\pi/2$ avec le vecteur d'affixe

$$1 + a \partial e^{i\chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t)} / \partial x_0 \approx 1 + aK \left(1 - e^{-\vec{u}' \cdot A \cdot \vec{u}} \frac{d\phi}{d\xi} \right)_{(\xi = \chi(\vec{x}_0, t))} i e^{i\chi^{[\phi]}(\vec{x}_0, t)}$$

Lorsque plusieurs groupes interviennent en \vec{x}_0 , on ne peut pas simplement ajouter vectoriellement chacune des normales $\vec{n}_1^+ \dots \vec{n}_N^+$; cela n'aurait pas de sens. En revanche, en considérant l'équation

d'un plan obtenu comme la somme linéaire des équations de chacun des plans de vecteurs normaux respectifs $\vec{n}_{1\dots N}^+$, nous combinons les normales de la façon suivante :

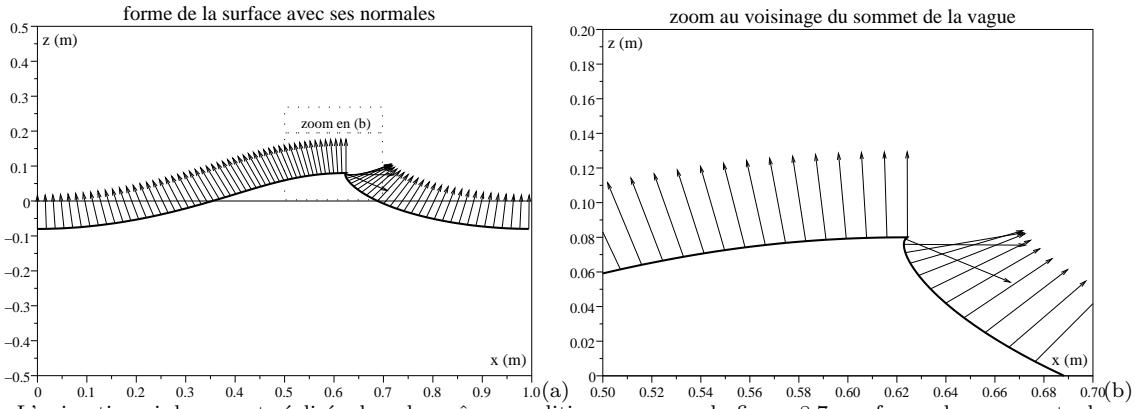
Si $\forall j \in \llbracket 1, N \rrbracket$, $\vec{n}_j^+ \cdot \vec{z} \neq 0$, c'est à dire qu'aucune normale n'est horizontale :

$$\vec{n} = \mathbb{I} \left(\begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{N} \end{array} \right) \cdot \vec{n}_1^+ \cdots \vec{n}_N^+ \cdot \left(\begin{array}{c} 1/|\vec{n}_1^+ \cdot \vec{z}| \\ \vdots \\ 1/|\vec{n}_N^+ \cdot \vec{z}| \end{array} \right) \quad (8.27)$$

Sinon, la normale résultante est horizontale et est la somme normée des normales horizontales

$$\vec{n} = \mathbb{I} \left| \sum_{\{j \in \llbracket 1, N \rrbracket, \vec{n}_j^+ \cdot \vec{z} = 0\}} \vec{n}_j^+ \right| \quad (8.28)$$

Les effets de la praxis d'un groupe sur la forme de la surface et le calcul analytique des normales aux points de cette surface sont illustrées par la figure 8.7.



L'animation ci-dessus est réalisée dans les mêmes conditions que pour la figure 8.7, sauf pour les exposants des perturbations de phase : $(\rho_{\text{rear}} = 2, \rho_{\text{front}} = 4)$. Aussi, ce sont les normales à la surface (équation 8.26) qui sont représentées sous la forme de flèches. La forme de la vague illustre une crête qui doit être active dans un déferlement, comme le confirme les orientations vers le bas des normales sur l'avant de la vague.

FIGURE 8.8 : Forme de la surface et normales analytiques dues à la praxis d'un groupe de vagues

4. Le nom du groupe s'ajoute à la liste \mathcal{I} déjà existante en \vec{x}_0 , à condition que le point de référence soit dans la zone d'influence du groupe : $\vec{x}_0 \in \Gamma$. Sinon, la liste \mathcal{I} n'est pas modifiée.
5. La présence d'une crête n'est abordée que si $\vec{x}_0 \in \Gamma$. La notion de voisinage de crête est caractérisé par la phase uniquement. Etre exactement sur une crête demande de vérifier : $\chi^\phi(\vec{x}_0, t) = \pi \bmod(2\pi)$. Nous définissons alors une constante de précision $\varepsilon_{\text{crest}} > 0$ exprimée en radians permettant de caractériser la présence d'une crête à proximité d'un point de référence. La réponse sera positive et le couple formé du nom du groupe et du numéro de la crête concernée, sera ajouté à la liste \mathcal{C} si la condition suivante est vérifiée :

$$\exists k \in \mathbb{Z}, (2k+1)\pi - \varepsilon_{\text{crest}} < \chi^\phi(\vec{x}_0, t) < (2k+1)\pi + \varepsilon_{\text{crest}} \quad (8.29)$$

Ainsi, la praxis d'un groupe permet de réaliser les expériences liées à la position orbital d'un point de référence, à la vitesse orbitale et à la normale à la surface en cette position. Aussi, le groupe peut fournir des informations comme son nom, sa vitesse de phase et dire s'il possède une crête à proximité du point de référence. En fonction des propriétés expérimentables par les groupes et souhaitées par les balises expérimentales, chaque groupe exécutera sa praxis selon les cinq points spécifiant le calcul de la propriété due à ce groupe et selon des combinaisons linéaires avec les résultats expérimentaux partiels.

Ainsi, un groupe de vagues est contrôlé par une ondelette dynamique dit “train d’ondes”. Il transporte des perturbations aléatoires en phase et en amplitude, des particules lui permettant de décider des modifications de son comportement spécifié par le train d’onde et les perturbations. Ses praxises sur les points expérimentaux permettent de caractériser l’animation géométrique et dynamique des points de références selon un modèle particulier inspiré des vagues de Gersner, puis adapté à la description des vagues d’un groupe pouvant présenter des comportements fortement non-linéaires.

Le second agent physique d’IPAS s’inspirant de modèles océanographiques est le déferlement.

8.3 Déferlement

L’expertise océanographique des déferlements scinde la phénoménologie du déferlement en deux phases : l’une active associée à la propagation du front déferlant, l’autre passive expliquant la disparition de la mousse selon une relaxation par turbulences. Les entités *déferlements* sont responsables de la quantification et de la représentation de ces deux phénomènes.

Nous présentons tout d’abord la structure des données dans un *déferlement* (section 8.3.1). Puis nous voyons comment une entité *déferlement* détermine l’activité d’un front déferlant (section 8.3.2). Après cela, nous précisons la manière dont elle gère la relaxation de la mousse afin de pouvoir mettre à jour de l’épaisseur de mousse des points expérimentaux qu’elle influence (section 8.3.3). Enfin, nous présentons les aspects graphiques d’un déferlement (section 8.3.4) ; la phase active est représentable par un système de particules dépendant de l’intensité du déferlement et la phase passive est représentée par une texture de mousse dépendant de son épaisseur.

8.3.1 Structure des données

Une entité déferlement est constitué d’un certain nombre de points expérimentaux, regroupées par voisinage en des représentants afin de ne pas multiplier les calculs. Un représentant s’occupe d’un élément de surface carré, dont les cotés font de 50 cm à 5 m selon la précision recherchée pour le plus petit déferlement et orientés Nord-Sud ou Est-Ouest (axes \vec{a} et \vec{b} du repère associé au plan d’eau), et dont le centre est à coordonnées entières (exprimées en multiple de la longueur du côté de base fixant la précision du modèle entre 50 cm et 5 m). L’ensemble des représentants est organisé en un dictionnaire dans lequel la clé est le couple de coordonnées entières du centre du représentant.

Chaque représentant ne possède qu’un point expérimental principal et éventuellement un point secondaire. Les points des représentants sont associées à un état pouvant être **actif**, **passif** ou **inconnu**. Ces états correspondent respectivement au fait que le point participe au front actif du déferlement (état **actif**), que le point a quitté le front actif et est entré dans la phase passive du déferlement (état **passif**), ou que le point n’a pas encore été étudié par le déferlement (état **inconnu**).

Le domaine d’influence d’une entité déferlement est la réunion de tous ses représentants **actifs** ou **passifs**. La méthode topologique permettant de savoir si un point expérimental est influencé par le déferlement est la suivante :

La position du point expérimental permet de connaître le représentant éventuel auquel il appartientrait, simplement en prenant la partie entière des coordonnées horizontales de la position du point expérimental à laquelle est additionné préalablement le vecteur $\frac{\vec{a}}{2} + \frac{\vec{b}}{2}$, afin d’avoir accès à l’entier le plus proche ; les coordonnées étant exprimées en nombre de fois la longueur d’un représentant. Pour savoir si un point expérimental est déjà représenté dans un déferlement, il suffit alors de vérifier si ces parties entières correspondent ou non à une clé du dictionnaire des représentants. Et pour savoir si ce point expérimentale est influencé, il convient de vérifier si le représentant correspondant est **actif** ou **passif**.

Un déferlement peut alors donner les propriétés suivantes aux points expérimentaux demandant sa praxise :

1. nom du déferlement s'ajoutant dans une liste des déferlements, si le point expérimental est dans un de ses représentants.
2. état du représentant en question (actif, passif, inconnu)
3. épaisseur de mousse (non nulle dans le cas d'un représentant actif ou passif)
4. nom de l'éventuel générateur de particules si le représentant est actif (il n'y a qu'un déferlement actif par représentant)

8.3.2 Front actif d'un déferlement

Nous décrivons ici le processus permettant de déterminer l'activité (au sens océanographique) d'un point expérimental dans un représentant ; l'ensemble des représentants actifs forme alors le front actif du déferlement. Ce processus est une interaction² avec les groupes de vagues et les vents par l'intermédiaire de leurs praxis sur ce point expérimental ; cette interaction traduit l'action fournie au déferlement par les groupes de vagues et les vents.

Imaginons donc que le déferlement possède une balise expérimentée, constitué des points expérimentaux de ses représentants **actifs** ou **inconnus**, dont les expériences ont portés sur la praxis des groupes présents (la position orbitale n'étant pas nécessaire) et sur les praxis des vents et des courants. La bathymétrie n'est pas utilisée directement par l'entité déferlement, cependant puisqu'elle interagit avec les groupes, la bathymétrie est indirectement utilisée dans notre modèle de déferlement. En chacun de ces points, le déferlement connaît la vitesse du vent \vec{W} et du courant \vec{U} , la vitesse orbitale \vec{s} , la normale à la surface \vec{n} , le nom des groupes agissant sur ce point \mathcal{I} , ainsi que la présence d'une crête de vague pour chacun de ces groupes influents \mathcal{C} .

Le déferlement calcule alors son activité (au sens océanographique) en chacun des points de ses représentants. L'estimation du taux d'activité β au point \vec{x}_0 appartenant potentiellement au front actif est défini par des équations s'inspirant des travaux de [Rapp et Melville 90, Reul et Chapron 04]. S'il y a au moins une crête à proximité de ce point de référence, *i.e.* $\mathcal{C} \neq \emptyset$:

$$\forall j \in \mathcal{C}, \quad \vec{C}_j = \left(1 - \alpha(\vec{W}, \vec{c}_j)\right) \cdot \vec{c}_j + \alpha(\vec{W}, \vec{c}_j) \cdot (\vec{C}_{g_j} - \vec{c}_j) \quad (8.30)$$

avec $\alpha(\vec{W}, \vec{c}) = \begin{cases} 0 & , \text{ si } (\vec{W} - \vec{c}) \cdot \vec{c} \leq 0 \\ 0 & , \text{ si } (\vec{W} - \vec{c}) \cdot \vec{n} \leq 0 \\ \frac{(\vec{W} - \vec{c}) \cdot \vec{n}}{\|\vec{W} - \vec{c}\|} & , \text{ sinon.} \end{cases}$

$$\lambda = \begin{cases} 0 & , \text{ si } \forall j \in \mathcal{C}, \vec{s} \cdot \vec{C}_j \leq C_j^2 \\ \frac{\sum_{j \in \mathcal{C}, \vec{s} \cdot \vec{C}_j > C_j^2} (\vec{s} \cdot \vec{C}_j - C_j^2) \lambda_j}{\sum_{j \in \mathcal{C}, \vec{s} \cdot \vec{C}_j > C_j^2} (\vec{s} \cdot \vec{C}_j - C_j^2)} & , \text{ sinon.} \end{cases} \quad (8.31)$$

$$\beta = 9.9 \times 10^{-2} \lambda^{1/2} \quad (8.32)$$

où \vec{W} est la vitesse du vent, \vec{s} la vitesse orbitale, \vec{n} la normale à la surface, \mathcal{C} les indices des groupes ayant une crête à proximité de \vec{x}_0 , et pour un groupe j : \vec{c}_j sa vitesse de phase, \vec{C}_{g_j} sa vitesse de groupe et λ_j sa longueur d'onde. La fonction $\alpha(\vec{W}, \vec{c})$ prenant ses valeurs dans $[0, 1]$ reflète la probabilité de décollement de l'air au voisinage de la crête, favorisant un déferlement précoce [Liu et al. 95]. La vitesse \vec{C}_j (équation 8.30) est alors entre la vitesse de groupe ($\alpha = 1$) et la vitesse de phase ($\alpha = 0$). La longueur d'onde λ (équation 8.31) peut se voir comme une longueur d'onde moyenne, obtenue à partir des longueurs d'onde des groupes transférant de l'action dans ce déferlement et pondérées par les activités de chaque groupe actif [Duncan 81]. Le taux d'activité β (équation 8.32) correspond au taux d'accroissement de l'épaisseur de mousse, mais aussi à l'accroissement de l'intensité du déferlement [Melville et Matusov 02] (chapitre 3 section 3.3.4).

² Cette interaction étant intimement liée à l'existence même du déferlement, elle est traitée dans cette section plutôt que dans la section sur les interactions.

Si aucun groupe ne possède de crête à proximité de \vec{x}_0 ($\mathcal{C} = \emptyset$), ou si le taux d'activité β donné par l'équation 8.32 est nul, le point passe en mode **passif** s'il était préalablement **actif**, ou est détruit s'il était **inconnu**.

Si le taux d'activité β n'est pas nul et que le point était dans l'état **inconnu**, il passe en mode **actif**. L'éventuel second point de ce représentant est alors détruit, en ajoutant linéairement l'épaisseur de mousse du point détruit s'il était **passif**. Le représentant ne contient alors plus que le point **actif**, comme point principal.

Aussi, l'entité déferlement construit une liste \mathcal{L} de couples (*groupe actif*, $\{(activité, instant)\}$) qui, à chaque groupe actif j associe la succession de ses activités $r^j = \vec{s} \cdot \vec{C}_j - C_j^2 > 0$ avec leurs instants correspondant. Le déferlement vide alors régulièrement sa liste \mathcal{L} en envoyant un message à chacun des groupes ayant participé au front actif depuis le dernier envoi ; le message pour un groupe j est composé de la liste des r^j avec leurs instants respectifs. Lorsqu'un déferlement ne possède plus de représentant actif, il envoie de suite les messages aux groupes consérnés selon la liste \mathcal{L} , afin de pouvoir respecter un bilan d'action.

Remarquons que ces messages passent par un autre espace que l'espace topologique annoncé au départ de ce chapitre. C'est que l'espace topologique utilisé est plus complexe qu'un simple compact de \mathbb{R}^4 . Il faut y ajouter la topologie particulière des boîtes aux lettres des groupes auxquels peuvent s'adresser directement les déferlements (tout ce qui est associé aux messages entre objets actifs est déjà implémenté dans ARéVi). Les groupes examineront régulièrement leur boîte à lettre à l'occasion de *poiesis* spécifiques définies au chapitre 9, la boîte aux lettres étant la balise expérimentale générée par l'*aisthesis* correspondant à cette mise à disposition d'une boîte à lettres. La durée de vie d'un front actif et son étendue spatiale sont toutes deux très faibles devant les caractéristiques d'un groupe. Demander au groupe de chercher dans l'espace topologique les fronts actifs auxquels il peut participer serait très consommateur de ressources, si l'on veut pouvoir garantir le bilan d'action entre les groupes et les déferlements. La solution par la topologie élémentaire des boîtes à lettres permet d'assurer le bilan d'action entre les groupes et les déferlements à moindre coût.

Ainsi, un agent déferlement est constitué d'un ensemble de représentants dont certains appartiennent au front actif. En même temps que la phase active du déferlement calcule la qualité d'action reçue par le déferlement grâce aux informations données par les groupes, la phase passive du déferlement s'installe.

8.3.3 Phase passive et mort d'un déferlement

Chaque représentant du déferlement reçoit initialement pendant sa phase active une certaine épaisseur de mousse dépendant de l'activité et de l'âge du front déferlant en s'inspirant de l'équation 3.54 page 64. Si le déferlement commence à l'instant t_0 pour un représentant initial a quittant le front actif à l'instant t_1 avec taux de croissance moyen de $\bar{\beta}_a$ entre t_0 et t , il reçoit une épaisseur de mousse de $\bar{\delta}_a(t) = \bar{\beta}_a(t - t_0)$ pour $t < t_1$. Si le front reste actif en t_1 , un représentant voisin b entre alors dans le front à l'instant t_1 qu'il quittera à l'instant t_2 avec un taux de croissance moyen de $\bar{\beta}_b$ entre t_1 et t , il reçoit une épaisseur de mousse de $\bar{\delta}_b(t) = \bar{\delta}_a^{max} + \bar{\beta}_b(t - t_1)$ pour $t_1 < t < t_2$, et ainsi de suite jusqu'à l'arrêt de l'activité du front déferlant, sachant que ce sont toujours les représentants actifs qui choisissent leurs voisins, afin d'éviter les conflits.

Dès qu'un représentant quitte le front actif du déferlement, il entre dans une phase de relaxation exponentielle. Son épaisseur de mousse vérifie alors, selon [Reul et Chapron 04], l'équation de relaxation 3.55 page 64, avec τ^* l'instant où le représentant sort du front actif avec une épaisseur de mousse $\bar{\delta}_{max}$ et en prenant $\tau' \approx 3.8s$ pour la durée de vie des bulles en eau salée.

Un agent déferlement est constitué de représentants qui après la phase active relaxent progressivement leur qualité de mousse. Quand l'épaisseur de mousse d'un représentant est devenue inférieure à un certain seuil, ce représentant se détruit. Lorsqu'un agent déferlement est vide, il disparaît.

Un déferlement peut mettre à jour l'épaisseur de mousse d'une particule d'eau. Il lui suffit de prendre les parties entières les plus proches des coordonnées de la position de référence de la particule

pour en déduire s'il influence ou non cette particule en regardant si son dictionnaire possède cette clé. Si c'est le cas, selon que le représentant correspondant possède ou non soit une particule active, soit une particule passive, il pourra mettre à jour l'épaisseur de mousse de la particule demandée ou la laissera inchangée si le représentant est dans un état inconnu. La manière dont se comportent les déferlements assure qu'il n'existe qu'un unique déferlement possédant un représentant actif ou passif donné.

8.3.4 Aspects graphiques et sonores d'un déferlement

Chaque représentant appartenant au front actif peut potentiellement générer un système de particules. La vitesse initiale des particules est \vec{C} et l'ouverture du "tuyau" est une ellipse suivant le front déferlant, dont la normale est \vec{C} , la largeur celle du représentant et la hauteur est proportionnelle au λ estimé par l'équation (8.31). La divergence du flux de particules dépend du vent soufflant sur le déferlement. Le nombre de particules impliquées par système sera fonction du nombre global maximum de particules contrôlables en temps réel pour l'ensemble des systèmes de particules et inversement proportionnel à la distance du système à la caméra : en dessous d'un certain seuil, le système correspondant n'est pas instancié.

Le front actif du déferlement peut également diffuser un son préenregistré dont le spectre de fréquences et le volume initiaux dépendent de l'intensité du front actif global (somme des taux d'activité des représentants actifs) : plus le déferlement est important et plus le son s'enrichit en basses fréquences et plus il est fort. Un agent "son" pourrait alors emporter ce bruit dans le vent et disparaître lorsqu'il devient inaudible.

Dans leur phase passive ou active, les représentants utilisent tous une même texture dynamique qu'ils modulent par leur épaisseur de mousse. Nous générerons la texture dynamiquement en nous inspirant du *pixel shader* basé sur un bruit de Perlin et proposé dans les exemples du SDK³ offert par la librairie graphique Cg_toolkit⁴. Cette image de base présente des pixels blancs avec un canal de transparence α_0 vérifiant : $0.6 < \alpha \leq 1$. L'épaisseur de mousse vient moduler le canal alpha des pixels par une fonction dépendant de l'épaisseur de mousse δ du représentant selon l'équation :

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0^{0.15/\delta} & , \text{ si } \delta > 0.02 \\ 10^2(\delta - 0.01)\alpha_0^{7.5} & , \text{ si } 0.01 \geq \delta \leq 0.02 \\ 0 & , \text{ si } \delta < 0.01 \end{cases} \quad (8.33)$$

Au dessus de 15 cm d'épaisseur de mousse, cette texture devient de plus en plus uniformément blanche. En dessous et jusqu'au double du seuil de destruction des représentants (le seuil de destruction est de 1 centimètre), la diminution de l'épaisseur de mousse δ augmente progressivement la transparence de la texture selon une fonction puissance permettant d'obtenir des tâches de plus en plus éparcues. Dans la dernière phase, avant la destruction, l'ensemble de l'image disparaît progressivement en devenant globalement de plus en plus transparente. Lorsqu'un déferlement est sur la grille géométrique du visualisateur (chapitre 9 section 9.4), les coordonnées de texture sont calculées sur les positions de référence et la texture est plaquée sur les positions orbitales des points constituant la géométrie.

Ainsi, les déferlements sont constitués de points expérimentaux regroupées en des représentants structurés en un dictionnaire. Cette structure permet de proposer un modèle temps réel pour la détermination de l'activité d'un déferlement. Une fois passif, le déferlement relaxe la mousse. Pour ces deux phases du déferlement, notre modèle cherche à respecter au mieux dans les contraintes de temps réel les modèles océanographiques théoriques et empiriques. Nous verrons au chapitre 9 comment le front actif d'un déferlement peut se propager de manière autonome en fonction d'*aisthesis* spécifiques.

Voyons maintenant les modèles descriptifs définissant les autres entités d'IPAS.

³ Software Development Kit. <http://developer.nvidia.com/page/nv sdk.html>

⁴ Langage haut niveau de programmation graphique. http://developer.nvidia.com/object/cg_toolkit.html

8.4 Vents, courants et bathymétrie

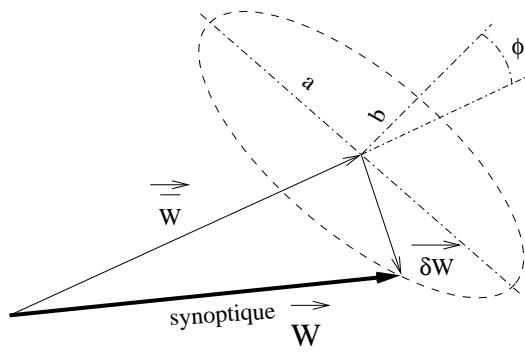
Nous décrivons ici les entités permettant de spécifier dynamiquement les vents soufflants sur le plan d'eau, les courants à la surface de la mer et les profondeurs d'eau.

8.4.1 Vents

Pour représenter le vent, deux types d'agents sont disponibles : un pour le vent synoptique et un pour des vents locaux venant s'ajouter vectoriellement au vent synoptique.

8.4.1.1 Synoptique

Le vent synoptique affecte tout le plan d'eau. Il est caractérisé par un vecteur vitesse moyen \vec{W} , et un vecteur de perturbation pseudo-périodique $\delta\vec{W}(t)$ dont l'extrémité se déplace lentement sur une ellipse dont les axes font un angle ϕ avec le vent moyen, comme illustré sur la figure 8.9. La pseudo-période p est définie par la donnée d'une période moyenne \bar{p} et d'un taux de variabilité τ . A la fin de chaque tour, un tirage aléatoire d'un nombre ρ compris entre -1 et 1, fixe la durée de la prochaine oscillation : $p = \bar{p}(1 + \rho\tau)$. Le vecteur vitesse moyen du vent synoptique et les caractéristiques des oscillations de la perturbation peuvent évoluer lentement au cours du temps de manière linéaire entre deux valeurs extrêmes. Cela permet de modéliser le passage d'un phénomène météorologique comme un front ou une dorsale, qui à l'échelle d'un plan d'eau d'une dizaine de kilomètres de rayon génère des vents assimilables à un vent homogène sur tout le plan d'eau.



Le vent synoptique \vec{W} présente des oscillations autour d'un vecteur vitesse moyen \vec{W} . La durée d'une oscillation est définie à la fin de chaque oscillation par le tirage aléatoire ($-1 \leq \rho \leq 1$) d'une pseudo-période p variant autour d'une période moyenne \bar{p} . Lors d'une oscillation, le vecteur de perturbation décrit une ellipse caractérisée par ses demi-axes et l'angle des axes avec le vent moyen. Ces propriétés sont résumées dans les équations suivantes :

$$\vec{W}(t) = \vec{W} + \delta\vec{W}(t) \quad \text{où} \quad \vec{W} = \bar{W} e^{i\theta\bar{W}} \quad (8.34)$$

$$p = \bar{p}(1 + \rho\tau) \quad \text{et} \quad r(\theta) = \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \quad (8.35)$$

$$\delta\vec{W}(t) = r \quad \frac{2\pi t}{p} - \theta\bar{W} + \phi \quad e^{i\frac{2\pi t}{p} - \theta\bar{W}} \quad (8.36)$$

FIGURE 8.9 : Agent vent synoptique

8.4.1.2 Vent local

Le vent local est positionné sur le plan d'eau et n'en affecte qu'une zone limitée. En plus de caractéristiques similaires à celles du vent synoptique, un vent local possède une zone d'influence finie. Cette zone d'influence joue comme une enveloppe sur la vitesse du vent local la rendant nulle sur les bord et à l'extérieur de la zone. La forme de cette enveloppe est une demi-sphère déformée par les transformations habituelles du plan (translation, rotation, homothétie, affinité, projection). Cette enveloppe évolue dynamiquement : chaque transformation possède sa propre dynamique linéaire en fonction du temps et transporte le vent local sur le plan d'eau. La translation permet de positionner la zone d'influence, la rotation d'orienter l'enveloppe, l'homothétie ou l'affinité de déterminer sa taille et la projection de concentrer le vent local par exemple à l'avant de l'enveloppe afin de rendre compte de "bouffées de vent". L'évolution d'un vent local à l'intérieur de l'enveloppe est caractérisée par des valeurs extrêmes et une durée pour passer d'un extrême à l'autre, mais peut aussi boucler entre ces extrêmes de manière pseudo-périodique. Pour cela, des durées associées aux conditions extrêmes permettent de réaliser un "plateau" sur ces conditions, et des durées "montante" et "descendante" quantifient les vitesses de variation vers ces plateaux. Chacunes de ces durées sont modifiées à chaque cycle par un taux de bruit aléatoire.

Les entités vent synoptique et vents locaux s'ajoutent vectoriellement pour mettre à jour la propriété `vent` des points expérimentaux qui l'ont demandée.

8.4.1.3 Textures

Les solutions de texture proposées ici ne sont données qu'à titre indicatif pour leur utilisation dans un environnement virtuel de formation à la lecture d'un plan d'eau : il s'agit de pouvoir lire les risées ou les rafales dues aux vents locaux. Ces solutions ne correspondent pas à une étude physique du problème de l'interaction des ondes électromagnétiques avec la surface de la mer, même si l'on se restreint au domaine visible sans polarisation. D'autre part, ces propositions ne sont pas associées à une instrumentation en réalité virtuelle.

Le vent synoptique peut être représenté par une technique à base de bump-mapping [Maillot et al. 93] généré selon un modèle spectral spécifique aux longueurs d'ondes inférieures aux plus petites longueurs d'ondes des groupes peuplant le plan d'eau, interactivement selon le point de vue de la caméra. On pourra alors s'inspirer des travaux de [Cox et Munk 54a, Cox et Munk 54b] pour les spectres, et des travaux de [Hinsinger et al. 02] pour l'interactivité des niveaux de détail avec le point de vue.

Aussi, chaque vent local, en interaction avec les vagues, favorisera ou non les déferlements selon qu'il renforce ou diminue le synoptique. Si ce phénomène peut être suffisant pour les conditions modérées à fortes où les déferlement sont fréquents, ça n'est pas suffisant par vent calme où les déferlements sont absents. Dans tous les cas, un vent local transporte une texture évoluant dynamiquement, foncée dans le cas d'un renforcement du synoptique, claire dans le cas contraire (l'image pouvant être une couleur uniforme) dont le canal alpha de transparence est réglé proportionnellement à W_{local}/W , W étant la vitesse du vent synoptique, la valeur de W_{local} tenant compte de l'enveloppe du vent local.

8.4.2 Courants et bathymétrie

Les entités courant et bathymétrie permettent de définir respectivement un champ de courant, et une carte des profondeurs en utilisant le formalisme habituel des cartes marines. Ces deux entités utilisent un temps de référence t compris entre -6 et $+6$ heures par rapport à l'heure locale de la pleine mer t_{PM} et le coefficient α de l'onde de marée associée à cette pleine mer. Elles sont constituées de points clés à partir desquels l'information peut être reconstruite en tout point du plan d'eau, en introduisant une variabilité plus ou moins aléatoire (selon les contraintes d'utilisation).

8.4.2.1 Courants

Pour les courants, en un point clé, on exprime le vecteur vitesse moyen \vec{v}_c en fonction de α et t . Usuellement, la vitesse est minimale pour $t = 0, \pm 6h$, maximale à la mi-marée pour $t = \pm 3h$ et cette vitesse maximale est une fonction affine du coefficient de marée α ; la direction du vecteur, elle, tourne au cours du temps dans un sens constant entre les deux directions associées aux vitesses maximales et qui sont généralement opposées : les courants sont grossièrement inversés entre le flux ($t_{PM} - 3h$) et le jusant ($t_{PM} + 3h$). Chaque point clé est associé à un degré d'influence selon son étendue spatiale. Le calcul du courant en un point M quelconque du plan d'eau est réalisé par une interpolation linéaire avec les coordonnées barycentriques de M dans la base formée des trois points clés du triangle contenant M et affectés de leurs degrés d'influence respectifs.

Remarquons que pour suivre la trajectoire d'un élément de fluide à la surface de la mer en l'absence de déferlement situé à un instant t_0 sur la position orbitale d'un point de référence \vec{x}_0 , il faut déplacer le point de référence \vec{x}_0 permettant d'obtenir la position orbitale, à la vitesse du courant \vec{U} en ce point, vitesse à laquelle on doit ajouter la projection sur le plan horizontal de la somme des différences entre les vitesses orbitales calculées avec la modification de la dérivée de la perturbation

de phase ϕ' et celles calculées sans cette modification. Cette correction sur \vec{U} est nulle dans le cas où les perturbations en phase des groupes sont toutes nulles.

8.4.2.2 Bathymétrie

Pour la profondeur, en un point clé, on exprime la hauteur d'eau h_{120} (négativement pour l'altitude d'un relief non immergé) correspondant à une marée basse de coefficient 120 (c'est un coefficient exceptionnellement grand), ainsi que la direction et la valeur de la plus grande pente $\vec{u}_{\nabla h}$ orientée vers les plus faibles profondeurs. Aussi, on donne les hauteurs d'eau minimale h_{min} et maximale h_{max} pour la marée de coefficient α , en référence au zéro de la marée basse de coefficient 120. La hauteur d'eau h au point de référence, au temps t en heures par rapport à la pleine mer est donnée par l'équation :

$$h(t) = h_{120} + h_{min} + (h_{max} - h_{min}) \frac{1 + \cos(\pi t/6)}{2} \quad (8.37)$$

Comme pour les courants, les points clés bathymétriques sont affectés d'un degré d'influence. Le calcul de h et $\vec{u}_{\nabla h}$ en un point M quelconque du plan d'eau est obtenu en coordonnées barycentriques à partir des sommets clés du triangle contenant M .

8.5 Conclusion

Les phénomènes naturels primitifs choisis comme les *affordances* communes aux marins et aux océanographes sont les groupes de vagues, les déferlements, les vents, les courants et la bathymétrie. Ces phénomènes naturels que l'on cherche à simuler sont réifiés en des *entités physiques* autonomes situées dans l'environnement. Les points expérimentaux sont situés à la surface de la mer et les différentes expériences réalisables sont les mesures des propriétés dues à la praxis de ces entités physiques.

Le groupe de vagues est la primitive principale pour l'animation géométrique et dynamique des points de la surface, en leur conférant, selon un modèle de Gerstner adapté aux groupes, une position orbitale, une vitesse orbitale et une normale à la surface. La liste des groupes influents et la présence d'une crête sont des propriétés utilisées par les déferlements pour déterminer l'activité des vagues dans un front actif.

Le déferlement fabrique de la mousse dans son front actif et relaxe cette quantité de mousse exponentiellement dans sa phase passive. Il donne aux points expérimentaux une épaisseur de mousse et envoie des messages aux groupes ayant perdu de l'action dans l'activité d'un déferlement. La boîte à lettres d'un groupe peut alors être vue comme un point expérimental qui appartient à un espace topologique trivial et différent de l'espace topologique usuel de la surface de la mer, et qui est sensible aux messages des déferlements.

Les vents synoptiques et locaux donnent la vitesse du vent en altitude, les courants donnent la vitesse du courant, et la bathymétrie donne la profondeur et les directions orthogonales aux isobathes et orientées dans le sens des profondeurs décroissantes. Ces quatre type d'entités permettent de spécifier interactivement un environnement hétérogène dynamique.

Ainsi, nous avons défini les modèles d'action des différentes entités physiques d'IPAS permettant l'animation phénoménologique d'un plan d'eau hétérogène. Ces entités ont été définis isolement les unes des autres, à l'exception de la phase active d'un déferlement dont l'existence même dépend explicitement d'une interaction avec les vents et les groupes.

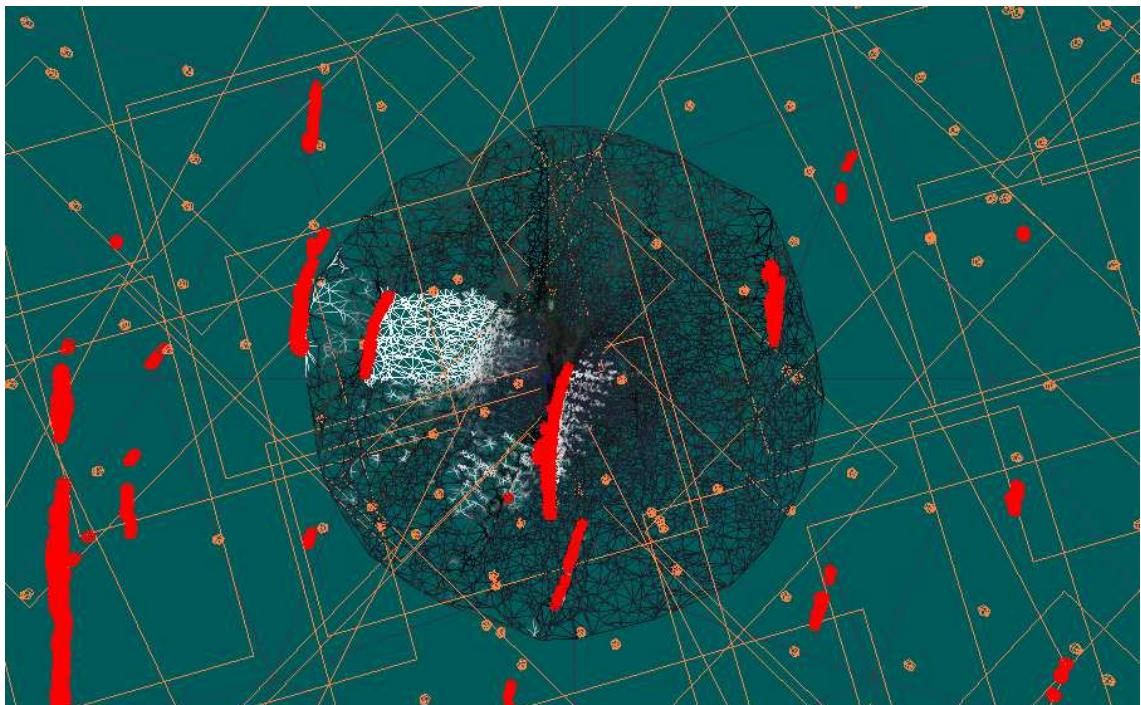
L'expertise océanographique (figure 3.13 page 65) met en évidence de nombreuses interactions complexes reliant ces différents phénomènes naturels et le chapitre suivant propose de définir comment une partie de ces interactions sont modélisées dans IPAS.

Références

- [Biesel 52] Biesel, F. (1952). *Gravity waves*, volume 521, chapitre Study of wave propagation in water of gradually varying depth, pages 243–253. National Bureau of Standards Circular.
- [Cox et Munk 54a] Cox, C. et Munk, W. (1954a). Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter. *J. Opt. Soc. Am.*, 44 :838–850.
- [Cox et Munk 54b] Cox, C. et Munk, W. (1954b). Statistics of the sea surface derived from sun glitter. *J. Mar. Res.*, 13 :198–227.
- [Duncan 81] Duncan, J. (1981). An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil. *Proc. Roy. Soc. London*, 337 :331–348.
- [Fournier et Reeves 86] Fournier, A. et Reeves, W. (1986). A simple model of ocean wave. *Computer Graphics*, 13 :75–84.
- [Gerstner 1804] Gerstner, F. (1804). *Theorie der wellen*. Abhandlungen der koniglichen bominschen. Gesellschaft der Wissenschaften, Prague.
- [Hinsinger et al. 02] Hinsinger, D., Neyret, F., et Cani, M.-P. (2002). Interactive animation of ocean waves. In *Symposium on Computer Animation (SCA)*, pages 161–166.
- [Janssen 94] Janssen, P. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre Physical description of wave evolution ; wave growth by wind, pages 71–112. Cambridge University Press.
- [Liu et al. 95] Liu, A., Peng, C., Chapron, B., et Mollo-Christiensen, E. (1995). Direction and magnitude of wind stress over wave groups observed during SWADE. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :175–194.
- [Maillot et al. 93] Maillot, J., Yahia, H., et Verroust, A. (1993). Interactive texture mapping. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, 27 :27–34.
- [Mandelbrot et Ness 68] Mandelbrot, B. et Ness, J. (1968). Fractional brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*, 10 :422–437.
- [Mastin et al. 87] Mastin, G., Watterger, P., et Mareda, J. (1987). Fourier synthesis of ocean scenes. *Computer Graphics*, 14 :16–23.
- [Melville et Matusov 02] Melville, W. et Matusov, P. (2002). Distribution of breaking waves at the ocean surface. *Nature*, 417 :58–63.
- [Meyers et al. 93] Meyers, S., Kelly, B., et O'Brien, J. (1993). An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology : with application to the dispersion of Yanai waves. *Monthly Weather Review*, 121(10) :28–58.
- [Peachey 86] Peachey, D. (1986). Modeling waves and surf. *Computer Graphics*, 20(4) :65–74.
- [Rapp et Melville 90] Rapp, R. et Melville, W. (1990). Laboratory measurements of deep water breaking waves. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A331 :735–780.
- [Reul et Chapron 04] Reul, N. et Chapron, B. (2004). A model of sea-foam thickness distribution for passive microwave remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.
- [Yang 91] Yang, H. (1991). *Wave Packets and Their Bifurcations in Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York, USA.

Chapitre 9

Interactions phénoménologiques d'IPAS

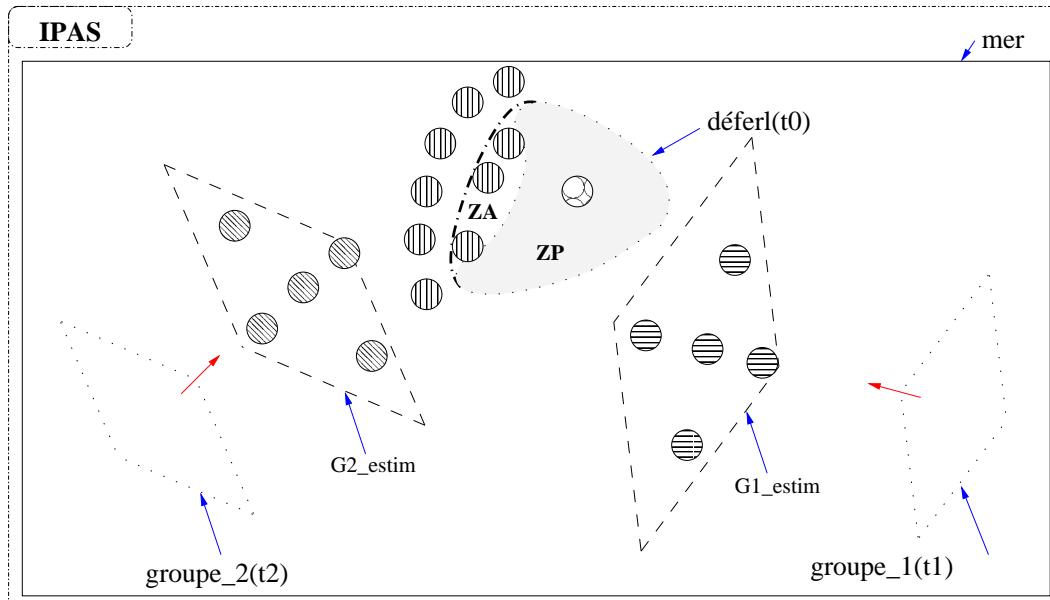


Plan d'eau virtuel de $2\text{ km} \times 3\text{ km}$, vu à 5 km d'altitude. Le milieu, support des interactions dans IPAS, est constitué de balises expérimentales générées dynamiquement par les groupes (points oranges), les déferlements (points rouges) et le visualisateur (grille géométrique), en fonction de leurs perceptions-actives respectives [Juin 2004, ©erv].

9.1 Introduction

Nous définissons dans ce chapitre comment l'on peut modéliser des interactions entre des entités énactives dans le cas de l'animation phénoménologique de la mer, afin de respecter les notions océanographique de conservation de l'action, de stress du vent et de réfraction des groupes lors des interactions groupes/déferlements/vents/courants/bathymétrie, telles qu'elles sont résumées dans le tableau de la figure 3.13, page 65. Il convient alors de caractériser les *aisthesis* spécifiant le lieu et le type d'expérience à réaliser, afin qu'une entité perçoive son environnement et puisse modifier

son comportement ou créer d'autres entités avec les *poiesis* associées à ces *aisthesis*. Le médiateur des interactions (chapitre 7 section 7.4) fait alors réaliser le protocole expérimental par les entités concernées par ces expériences localisées aux points expérimentaux des balises (figure 9.1).



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.

FIGURE 9.1 : Création de la structure spatio-temporelle du milieu par les entités énactives

Dans une organisation d'entités énactives, la modélisation informatique d'une interaction entre une entité *A* et une entité *B*, contrairement à la notion physique d'interaction, demande de spécifier les deux sens de l'interaction : que fait *A* sur *B* (action) et réciproquement (réaction). Les interactions ont lieu *via* les balises expérimentales associées aux praxis des entités du type *A*, balises créées par les *aisthesis* des entités du type *B* dont on veut modéliser la réaction aux entités du type *A*. Le médiateur des interactions résout alors les problèmes de localisation entre les besoins perceptifs des entités du type *B* réagissant aux praxis des entités du type *A*; nous respectons ainsi les principes de l'interaction des entités situées dans un environnement, tels qu'ils sont décrits par [Ferber et Müller 96]. A l'heure actuelle, les interactions modélisées dans IPAS sont résumées par le tableau de la figure 9.2.

Dans une telle approche énactive, 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 du milieu ; en fonction de ce qui est vu par l'observateur humain, ce dernier décide où il veut observer les prochains phénomènes.

Nous voyons tout d'abord comment les groupes, les déferlements, les courants et les vents agissent sur les déferlements (section 9.2). Puis nous détaillons les effets des vents, des déferlements, des courants, de la bathymétrie et des groupes sur un groupe (section 9.3). La section 9.4 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 9.5 de conclusion.

x \swarrow y	Groupe	Déferlement	Synoptique	Vent Local	Courant	Bathymétrie
Groupe	merge. <i>c.f. : 9.3.6 page 229</i>	onde, action. <i>c.f. : 9.3.5 page 226</i>	création, énergie. <i>c.f. : 9.3.4.1 page 225</i>	énergie. <i>c.f. : 9.3.4.1 page 225</i>	onde, action, transport. <i>c.f. : 9.3.3 page 222</i>	onde, énergie. <i>c.f. : 9.3.2 page 219</i>
Déferlement	création, action. <i>c.f. : 9.2.1 page 213</i>	action. <i>c.f. : 9.2.2 page 214</i>	action, transport. <i>c.f. : 9.2.3 page 216</i>	action, transport. <i>c.f. : 9.2.3 page 216</i>	transport. <i>c.f. : 9.2.3 page 216</i>	
Synoptique Vent Local Courant Bathymétrie			Ces différentes entités sont modélisées dans IPAS de manière descriptive. Nous choisissons de ne pas modéliser les effets des interactions sur ces entités.			

Le tableau ci-dessus, où il faut lire : “les entités de type x agissent sur les entités de type y ”, présente les interactions modélisées dans IPAS. Leur nature est précisée : par **onde** nous entendons une modification des paramètres ondulatoires d'un groupe de vagues, par **action** un mécanisme de transfert d'énergie des groupes et des vents vers les déferlements ou du courant vers les groupes impliquant une modification de la pulsation et de la hauteur des vagues ou d'un déferlement passif vers un déferlement actif pour l'accumulation des turbulences, par **énergie** un transfert énergétique sans modification de la pulsation, par **transport** un phénomène de modification de position autre que la propagation du train d'onde, par **merge** la fusion de deux entités, et par **création** la capacité de l'entité de type x à générer des entités de type y . Les références (numéro et page) de la section où est traitée l'interaction de x vers y sont indiquées pour retrouver rapidement la manière dont l'interaction est modélisée dans IPAS.

FIGURE 9.2 : Interactions physiques modélisées dans IPAS

9.2 Interactions entités physiques → déferlement

La naissance d'un déferlement n'est pas spontanée : elle est décidée par les groupes (section 9.2.1). Les déferlements se propagent alors de manière autonome en interaction avec les groupes et les vents à l'aide d'une estimation de la futur position du front actif, et lorsque le front actif d'un déferlement passe sur la phase passive d'un déferlement, le déferlement actif en absorbe les représentants (section 9.2.2). Le courant se contente de transporter les particules des représentants du déferlement, et le vent, lorsqu'il est suffisamment fort, vient légèrement modifier la phase passive du déferlement (section 9.2.3).

9.2.1 Crédit d'un déferlement par les groupes

Les groupes créent de nouveaux déferlements de deux manières : soit en fonction du critère limitant de Stokes (équation 3.50 page 61), soit sur un critère de pente observée d'après les normales fournies par des balises spécifiques générées par le groupe.

9.2.1.1 Critère de Stokes

Un groupe peut décider de manière autonome de générer un déferlement si sa cambrure moyenne devient trop importante. Nous choisissons d'écrire le critère de Stokes indépendamment de l'enveloppe du groupe comme suit :

$$(H + \delta H_{\max})\Omega^2 \geq g \quad (9.1)$$

où δH_{\max} est la perturbation maximale en hauteur à l'instant t .

Si ce critère n'est pas vérifié, rien ne se passe. Sinon, la décision de générer un déferlement s'effectue comme suit :

Sur chaque crête située dans sa moitié arrière, le groupe choisit aléatoirement un point de la crête \vec{x}_0

pour lequel il évalue la cambrure locale $\delta_{local} = (H + deltaH)e^{-\vec{u}' A \vec{u}} K / 2\pi$. Si cette cambrure locale δ_{local} est supérieure à 6% [Rapp et Melville 90], un déferlement est créé avec un unique représentant dans l'état `inconnu` constitué du point expérimental, situé en $\vec{x}_0 + \Delta t \vec{c}$ à l'instant $t + \Delta t$, cible de l'*aisthesis* initiale de ce déferlement, anticipant la future position de la crête, avec une *poiesis* prévue dans Δt . Le déferlement décidera de lui-même, en fonction du résultat de la *poiesis* s'il devient actif ou s'il disparaît.

9.2.1.2 Critère de pente

Le groupe génère régulièrement une balise pour laquelle il demande l'évaluation des normales. La durée d'inhibition d de cette *aisthesis* est inversement proportionnelle à $H\Omega^2$ et vaut au plus la période du groupe, et au moins le tiers de cette période. Les points d'une telle balise sont choisis aléatoirement sur chaque crête située entre la moitié arrière et la moitié avant du groupe et leur position est décalée de $d(1 + \varepsilon_{slope})\vec{c}$ afin d'anticiper le déplacement des crêtes et afin de se mettre légèrement en avant de la crête avec $0 < \varepsilon_{slope} < 1/4$.

La *poiesis* correspondante de ce groupe permet de vérifier un critère de pente basé sur la normale. Nous choisissons de définir ce critère par :

$$\vec{n} \cdot \vec{z} < 0.97 \approx \cos(14^\circ) \quad (9.2)$$

où \vec{n} est la normale et \vec{z} le vecteur unitaire pointant vers le zénith. Ce critère correspond à une pente dépassant 14° , respectant ainsi les résultats empiriques en océanographie [Bonmarin 89]. S'il est vérifié, le point expérimental est utilisé pour créer un nouveau déferlement prenant en charge cette position potentiellement déferlante dans un représentant dont l'état est `inconnu`, et la première *aisthesis* de ce déferlement demandera une *poiesis* dans $d\varepsilon_{slope}$. Le déferlement décidera de lui-même, en fonction du résultat de la *poiesis* s'il devient actif ou s'il disparaît.

9.2.2 Propagation d'un front actif et absorption

Nous détaillons comment un déferlement explore le voisinage de son front actif pour déterminer sa propagation. Puis nous précisons comment un front actif absorbe les représentants d'un éventuel déferlement.

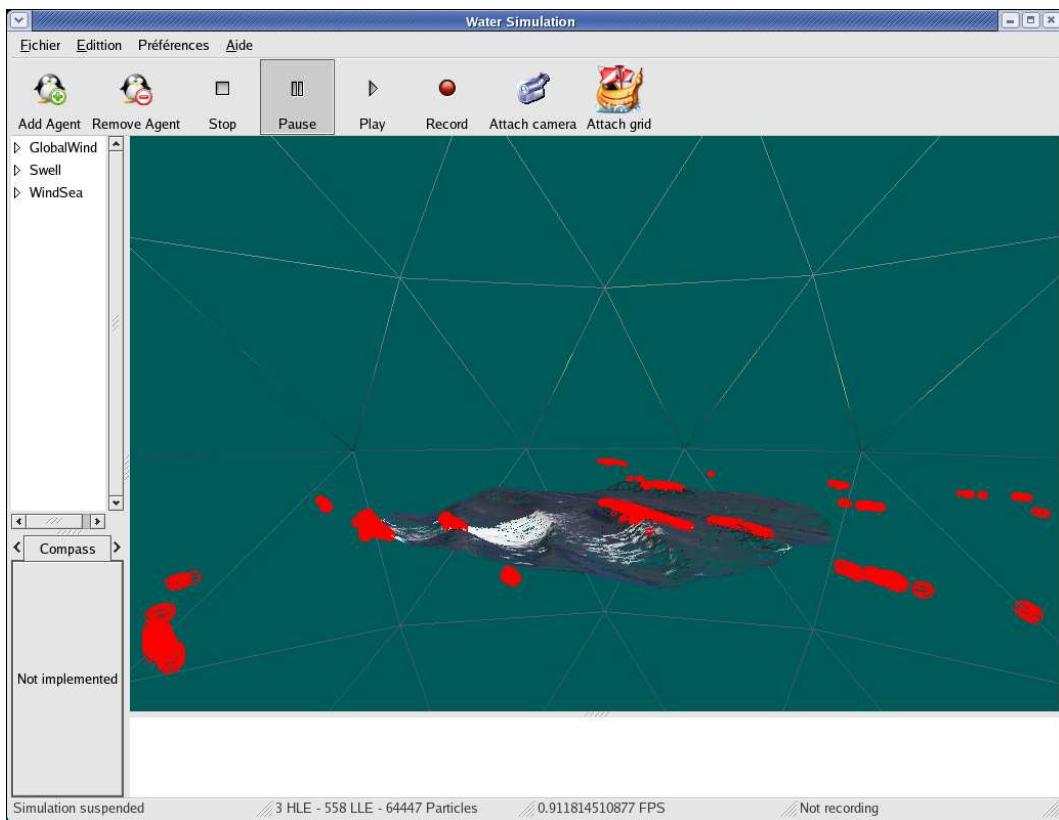
9.2.2.1 Propagation du front actif

L'ensemble des représentants actifs (c'est à dire qu'ils possède au moins une particule dans un état actif) d'un déferlement forment le front actif du déferlement. Afin de déterminer la propagation de son front actif, l'entité déferlement réalise l'*aisthesis* suivante : La balise cible de cette *aisthesis* contient un certain nombre de points expérimentaux demandant la praxis des groupes, des vents, des courants et des déferlements, et leurs positions de référence se situent au voisinage du front actif. Ces points sont déterminés pour chaque représentant actif en fonction des groupes impliqués dans l'activité du déferlement de ce représentant, *i.e.* ceux tels que $\vec{s} \cdot \vec{C}_j > C_j^2$. Nous choisissons le groupe actif $j_{fastest}$ possédant la plus grande vitesse de phase une fois projeté sur la vitesse orbitale \vec{s} : $\vec{c}_{j_{fastest}} \cdot \vec{s}$ est maximal pour les groupes actif j .

Trois nouveaux points sont alors générés sur une droite D orthogonale à la direction du vecteur de la vitesse orbitale \vec{s} et à une distance $\frac{\vec{s} \cdot \vec{c}_{j_{fastest}}}{s} \Delta t$:

- le premier est une translation du point actif courant de vecteur : $\Delta t \cdot \frac{\vec{s} \cdot \vec{c}_{j_{fastest}}}{s c_{j_{fastest}}} \cdot \vec{c}_{j_{fastest}}$
- les deux autres sur la droite D passant par ce premier point et orthogonale à \vec{s} tels que le premier point en soit le milieu et distant de : $\tan 75^\circ \cdot \Delta t \cdot \frac{\vec{s} \cdot \vec{c}_{j_{fastest}}}{s} \approx 4\Delta t \cdot \frac{\vec{s} \cdot \vec{c}_{j_{fastest}}}{s}$

Cela assure l'exploration latérale d'une activité potentielle du déferlement avec une ouverture d'environ 150° . Avant de générer la balise constituée de tous ces points exploratoires, la balise est simplifiée en éliminant toutes les positions situées dans des représentants non passifs répertoriés par le dictionnaire et en ne gardant qu'une unique particule dans chaque nouveau représentant. Cette *aisthesis* de propagation du front actif est illustrée par la figure 9.3.



Dans cette vue d'un plan d'eau virtuel de $3\text{ km} \times 2\text{ km}$, la grille de visualisation fait 1 km de rayon. Les points rouges représentent les positions des points expérimentaux générés par l'aisthesis des déferlement pour décider en autonomie de la propagation de leurs fronts actifs, une fois créés par les groupes selon le critère de Stokes ou le critère de pente.

FIGURE 9.3 : L'aisthesis de propagation des fronts actifs des déferlements créés par les groupes

9.2.2.2 Absorption de représentants par un front actif

Il peut arriver que la progression du front actif d'un déferlement le fasse passer sur un autre déferlement déjà existant. Dans ce cas, un processus permet d'assurer qu'un représentant donné ne peut appartenir à deux déferlements distincts si leur état dans chaque déferlement est actif ou passif (c'est à dire que le point principal du représentant est actif ou passif). Avant de passer dans un état passif, un représentant d'un déferlement est obligatoirement dans un état actif. C'est donc lorsqu'un représentant devient actif que le processus d'absorption est mis en œuvre. Puisqu'il devient actif, c'est qu'il contient un point expérimental qui vient d'être mis à jour par les différents groupes, vents locaux et synoptique, courant et les déferlements. Ce représentant actif sait donc quels sont les déferlements qui l'influencent, c'est à dire qu'ils ont un représentant dans leur dictionnaire contenant ce point. Ces déferlements influençant le point devenant actif sont répertoriés dans la liste des déferlement qui est une des propriétés de ce point expérimental (de même qu'il possède la liste des groupes qui l'influencent et qui ont une crête dans son voisinage). Le processus d'absorption est alors présenté par le pseudo-code `déferlement.absorption(point_actif)` dans la figure 9.4, utilisé dès que la liste des déferlements de ce point devenant actif contient plus d'un élément à savoir le déferlement auquel appartient ce point ; cette liste peut contenir plus d'un autre déferlement, mais le représentant correspondant est alors dans un état inconnu.

Ainsi, lorsqu'il existe, le seul autre déferlement possédant ce représentant dans un état actif ou passif l'élimine de son dictionnaire et sa quantité de mousse est récupérée par le déferlement pour lequel ce représentant devient actif.

déferlement.absorption(point_actif)

```

pour déferlement_dest ∈ point_actif.liste_des_déferlements\{celui_ci} faire
    si déferlement_dest.représentant(point_actif.position) est actif ou passif alors
        celui_ci.représentant(point_actif.position).épaisseur_de_mousse += 
            déferlement_dest.représentant(point_actif.position).épaisseur_de_mousse
        déferlement_dest.détruire(représentant(point_actif.position))
    fin si
fin pour

```

FIGURE 9.4 : Pseudo-code de l'absorption d'un déferlement par un front actif

9.2.3 Transport d'un déferlement par le courant et les vents

Les déferlements sont par essence liés à un repère relatif à l'eau. Aussi, pendant toute sa durée de vie, l'agent déferlement est transporté par les courants, comme le serait un bouchon posé sur l'eau. Les positions de référence des point expérimentaux appartenant à ses représentants sont translatées à la vitesse du courant par le vecteur $\Delta t \cdot \vec{U}$. Où \vec{U} est le vecteur vitesse du courant fournie par le point expérimental, et le Δt la durée d'inhibition de l'activité de transport. Cette durée doit être telle que la distance parcouru par les points entre deux activations reste inférieure à la taille des représentants. Si les positions de référence suivent le courant, ce n'est pas le cas des représentants qui eux sont liés au sol. Il arrive alors qu'un point expérimental soit amenée à changer de représentant. Le protocole de changement de représentant est alors décrit par le pseudo-code de la figure 9.5.

déferlement.transfert_particule(source, destinataire)**1. Représentant destinataire :**

```

si le destinataire est vide (pas dans le dictionnaire) alors
    le destinataire est ajouté au dictionnaire
    le point transféré devient le point principal du destinataire
sinon
    si le destinataire ne possède qu'un seul point alors
        le nouveau point en devient le point secondaire
    sinon (le destinataire possède déjà deux points)
        résoudre_conflit(point secondaire, point transféré) [c.f. tableau suivant]
    fin si
fin si

```

2. Représentant source :

```

si représentant source contenait deux points alors
    conserver point restant comme point principal
sinon
    éliminer représentant source du dictionnaire
fin si

```

résoudre_conflit(point secondaire (sec), point transféré (trans))

Cette méthode remplace le point secondaire par le point transféré selon les états respectifs de ces points dans leurs déferlements. Lorsqu'un point actif remplace un point passif, la mousse du point passif est prise en charge par le point actif.

	sec	inconnu	actif	passif
trans	inconnu	inconnu	actif	passif
inconnu	sec	sec	sec	sec
actif	trans	trans	sec	trans + mousse _{sec}
passif	trans	sec + mousse _{trans}	sec	sec

FIGURE 9.5 : Pseudo-code du transfert d'un point entre deux représentants d'un déferlement

Enfin, les vents, lorsqu'ils sont forts peuvent déplacer lentement les points **passifs** des représentants et modifier la texture de déferlement. Pour des vents supérieurs à 20 ms^{-1} (force 10 Beaufort), la position des points de l'ensemble des points des représentants du déferlement est translatée lentement par rapport aux vitesses orbitales dans la direction vers laquelle ils soufflent, afin d'introduire la notion de banc d'écume dérivant lorsque les vents soufflent en tempête (c.f. échelle Beaufort : figure 2.6 page 35). Cette opération est réalisée en ajoutant au vecteur utilisé dans le trans-

port par le courant une petite proportion du vecteur vent donné par le point principal du représentant. Un vent synoptique supérieur à $15ms^{-1}$ (force 7 Beaufort) modifient la représentation texturée de la mousse passive en envoyant son vecteur vent synoptique à la carte graphique sous la forme d'un "paramètre uniforme" ; le bruit de Perlin utilise alors une distribution non isotrope, présentant des lignes orientées dans le sens du vent synoptique et dont l'étirement dépend de sa vitesse.

Ainsi, dans notre modèle phénoménologique IPAS, les groupes ont la capacité de générer un déferlement selon des critères océanographiques expérimentaux et théoriques. Le déferlement décidera par lui-même de poursuivre sa phase active en fonction des quantités d'action qu'il recevra de chaque groupe. Il anticipe alors la future position du front actif pour générer la balise explorant la propagation de son front actif. Lorsque le front actif d'un déferlement actif passe sur un autre déferlement, il en absorbe les point actifs et passifs en prenant en charge la mousse et le taux d'activité déjà présents. Aussi, le déferlement est transporté par le courant¹.

9.3 Interactions entités physiques → groupe

Les conséquences sur les vagues des phénomènes liés aux vents, aux déferlements, aux courants et à la profondeur sont d'une importance capitale pour les marins. Il convient donc de les représenter le plus correctement possible, dans les contraintes de temps réel. Nous considérerons ces effets indépendamment les uns des autres.

Nous commençons par préciser l'*aisthesis* des groupes. Nous modélisons les effets ondulatoire et énergétique de la bathymétrie sur un groupe, puis nous décrirons les transferts d'action et les effets ondulatoires dûs au courant, puis aux déferlements, aux vents. Enfin nous évoquons des possibilités de merge entre groupes. Dans IPAS, nous considérerons que ces effets se superposent.

9.3.1 Balises enregistrées et vie du groupe

Pour percevoir son environnement (courant, bathymétrie, vents et autres groupes), le groupe utilise les informations fournies par une balise de cinq points expérimentaux situés à gauche, au centre, à droite, devant et derrière, nommés respectivement L , C , R , F et B pour "Left, Center, Right, Front" et "Back". Le quadrilatère (*LFRB*) forme un losange dont le centre est C . Avant chaque nouvelle *aisthesis*, le groupe met à jour les positions de référence de ces cinq points comme le spécifie les équations suivantes :

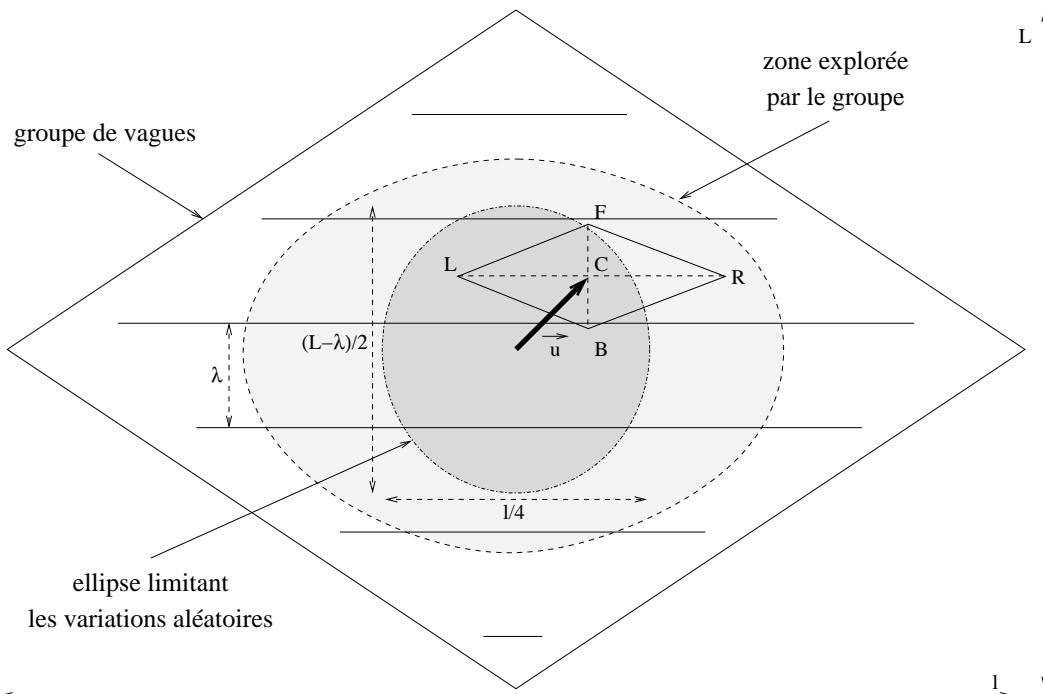
$$\vec{r} = \vec{u}_{rnd}, \quad C = O + \vec{X} + \Delta t(\vec{C}_g + \vec{U}_C) + \vec{r} \quad (9.3)$$

$$F = C + \frac{\pi \vec{K}}{K^2}, \quad B = C - \frac{\pi \vec{K}}{K^2}, \quad L = C + \vec{z} \wedge \frac{l \vec{K}}{4K}, \quad R = C - \vec{z} \wedge \frac{l \vec{K}}{4K} \quad (9.4)$$

où \vec{U}_C est le courant mesuré par la dernière *poiesis* en C , \vec{u}_{rnd} un vecteur aléatoire dont les coordonnées maximales sont dans une ellipse caractérisée par la figure 9.6, O l'origine du repère, \vec{z} le vecteur vectical de norme 1, \vec{K} le vecteur d'onde et l la largeur du groupe. C est translaté par rapport au centre \vec{X} du groupe de sa prévision de déplacement $\Delta t(\vec{C}_g + \vec{U}_C)$ et d'un vecteur aléatoire \vec{r} de direction quelconque et de norme maximale égale à la longueur d'onde du groupe ; les diagonales du losange (*LFRB*) sont parallèles aux axes du losange définissant les bords du groupe, la diagonale (B, F) étant orientée comme le vecteur d'onde du groupe et d'une longueur égale à la longueur d'onde du groupe, l'autre diagonale étant d'une longueur égale au quart de la largeur du groupe.

Au cours de sa vie, le groupe va explorer toute une zone centrale grâce à la perturbation aléatoire \vec{r} , c'est à dire là où l'action du groupe est la plus concentrée. Cette exploration permet d'obtenir un comportement pertinent, concilié avec l'utilisation d'un nombre très restreint de médiateurs d'interaction. La figure 9.7 illustre les points expérimentaux utilisés par les groupes pour percevoir leur environnement.

¹ Le transport dû au vent est souvent négligeable en présence de courant, et ce phénomène a lieu lorsque les conditions sont telles que l'eau se distingue mal de l'air à la surface de la mer



Un groupe explore son environnement avec cinq particules formant un losange avec son centre. L'axe longitudinal (resp. transversal) du losange est d'une longueur égale à la longueur d'onde $2\pi/K$ du groupe (resp. au quart de la largeur l du groupe). Ce losange est translaté par rapport au centre du groupe par un vecteur aléatoire \vec{u}_{rnd} inclu dans l'ellipse grise permettant l'exploration par les sommets du losange d'une zone en gris très clair représentant la moitié centrale du groupe, c'est à dire là où se trouve la quasi totalité de l'énergie transportée par le groupe. L'axe transversal de cette ellipse limitant les variations du vecteur aléatoire \vec{u}_{rnd} est du quart de la largeur l du groupe, et son axe longitudinal est égal à la moitié de la longueur L du groupe diminuée d'une longueur d'onde $\lambda = 2\pi/K$.

FIGURE 9.6 : Exploration aléatoire par un groupe de vagues de son environnement

La vie d'un groupe se décompose en trois étapes : sa naissance, son histoire et sa mort.

Naissance

A l'instant t_0 , la donnée d'une position initiale \vec{X}_0 , d'un vecteur d'onde moyen \vec{K} , d'un nombre N de vagues, d'une hauteur au centre H , d'une largeur l , d'une phase initiale $\forall \vec{u}, \phi(\vec{u}, t_0) = \phi_0$ et d'un temps de naissance Δt_0 permet de générer à t_0 un groupe possédant ces caractéristiques et dont la hauteur au centre passe entre t_0 et $t_0 + \Delta t_0$ de 0 à $H(t_0 + \Delta t_0)$ en appliquant à $H(t)$ un coefficient linéaire du temps passant de 0 à 1 entre t_0 et $t_0 + \Delta t_0$.

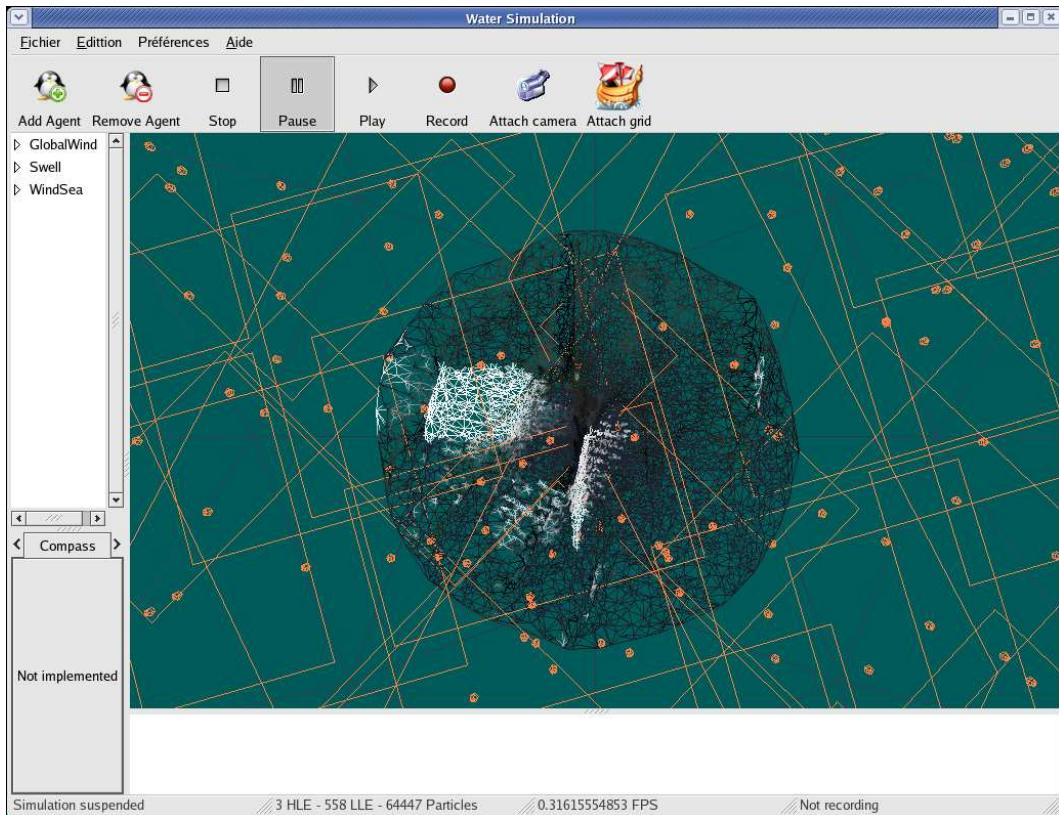
Histoire

A chaque cycle, le groupe décide de son comportement en lisant les propriétés de la balise qu'il a enregistrée sur le plan d'eau. Il modifie alors les caractéristiques de son train d'onde et de ses perturbations en phase et en amplitude en fonction des interactions avec le vent, les déferlements, le courant et la bathymétrie (c.f. 9.3 : interaction (vents, déferlement, courant, bathymétrie) → groupe, page 217). Il réalise ensuite le déplacement de son enveloppe et met à jour sa phase selon ses nouvelles caractéristiques. Il peut générer une entité déferlement (c.f. 9.2.1 : interaction groupe → déferlement, page 213) ou se scinder en deux (c.f. 9.3.5 : interaction déferlement → groupe, page 226). Avant de passer la main, le groupe prédit les nouvelles positions de références des points de sa balise, qu'il génère par son *aisthesis*, afin de préparer sa prochaine *poiesis* et adapter son comportement au cycle suivant.

Mort

En fonction de son environnement, à l'instant t_1 , un groupe peut décider de se faire disparaître d'ici un temps Δt_1 . Pour cela, il fait passer sa hauteur au centre de $H(t_1)$ à 0 entre t_1 et $t_1 + \Delta t_1$ en appliquant à $H(t)$ un coefficient linéaire du temps passant de 1 à 0 entre t_1 et $t_1 + \Delta t_1$.

Remarque : selon l'expertise océanographie sur la propagation des vagues, même en l'absence de déferlement, la longueur d'onde moyenne s'accroît selon l'interaction non-linéaire de quadruplets vérifiant la condition de résonance donnée par l'équation (3.39).



Cette vue d'un plan d'eau virtuel de $3\text{ km} \times 2\text{ km}$ est prise par une caméra virtuelle située à 5 km d'altitude. Les enveloppes des groupes sont représentées par des losanges oranges, et les boules oranges sont les points expérimentaux utilisés par les groupes pour percevoir leur environnement. Les groupes virtuels ont été générés par une houle de 230 m de longueur d'onde et une mer de vent avec deux pics énergétiques à $\pm 15^\circ$ de la direction de la houle et de longueur d'onde 90 m. La grille de visualisation fait 1 km de rayon.

FIGURE 9.7 : Balises générées dynamiquement par l'aisthesis des groupes de vagues

Dans le cas d'un seul groupe, il semble que cette remarque soit déplacée en l'absence d'interaction avec d'autres groupes. Ce serait le cas si notre groupe était l'ondelette dynamique parcourue par une nappe sinusoïdale. Mais notre groupe s'inscrit dans le modèle particulaire de Gerstner à nappe trochoïdale. A ce titre, son spectre énergétique n'est pas un Dirac en $\frac{2\pi}{\Omega}$, à moins de n'utiliser que de très petites cambrures $HK \ll 1$: il transporte de l'énergie sur une distribution continue de fréquences dont le pic est en $\frac{2\pi}{\Omega}$.

Ainsi, dans un seul groupe se propageant librement, il existe des quadruplets en résonance qui vont transférer de l'énergie des hautes fréquences vers les sous-harmoniques. Cela aura comme conséquence de diminuer globalement la cambrure des vagues et d'augmenter la longueur d'onde moyenne du groupe au court du temps.

Cet effet est modélisé par les savoir-faire internes du groupe dits *allongement* et *répartition* spécifiés dans le chapitre précédent (chapitre 8 section 8.2.3)

9.3.2 Interaction bathymétrie → groupe

Les effets de la bathymétrie sont tout d'abord moyennés sur le groupe en modifiant son vecteur d'onde moyen (en norme et en direction), ainsi que la forme de son enveloppe. La hauteur du groupe est alors ajustée pour respecter la conservation de l'action du groupe ce qui est équivalent en courant constant à la conservation de l'énergie car la pulsation demeure invariante. Ensuite, pour tenir compte de la variabilité locale de la profondeur, des perturbations localisées de la phase ϕ_b et de la hauteur δH_b sont introduites.

9.3.2.1 Modifications du train d'onde et conservation de l'énergie

Lorsque la profondeur n'est plus constante et qu'elle devient inférieure à la moitié de la longueur d'onde moyenne du groupe, les caractéristiques moyennes du groupe évoluent dynamiquement. Ces évolutions sont dirigées vers des cibles de référence mises à jour en fonction de l'état courant du groupe de vagues. Nous définissons deux cibles principales : un vecteur d'onde cible et une largeur cible.

Vecteur d'onde cible

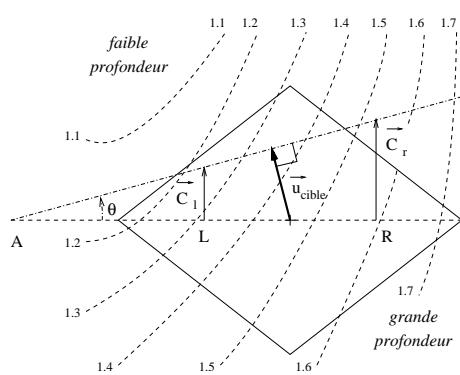
Le vecteur d'onde cible \vec{K}_{cible} est caractérisé par un nombre d'onde cible K_{cible} et une direction cible \vec{u}_{cible} . Le nombre d'onde cible K_{cible} est défini à partir de l'équation de dispersion (3.42) page 57 en sachant que la pulsation Ω est constante, il reste :

$$K_{\infty} = K_{cible} \tanh(K_{cible} \bar{h}) , \text{ avec } K_{\infty} = \frac{\Omega^2}{g} \quad (9.5)$$

où $\bar{h} = [h(L) + h(C) + h(R) + h(F) + h(B)]/5$ est la profondeur moyenne sous le groupe. Cette équation définit le nombre d'onde cible K_{cible} implicitement et n'est pas directement résolvable. Pour résoudre numériquement cette équation, nous proposons d'utiliser à chaque cycle de vie du groupe un pas dans une méthode de Newton [Kantorovich et Akilov 64] associée à la résolution de cette équation, ce qui donne l'expression suivante du nouveau nombre d'onde K_{n+1} en fonction du nombre d'onde courant K_n et du nombre d'onde en profondeur infinie K_{∞} :

$$K_{n+1} = K_n \left(1 - \frac{K_n \tanh(K_n \bar{h}) - K_{\infty}}{K_{\infty} + \bar{h}(K_n^2 - K_{\infty}^2)} \right) \quad (9.6)$$

Pour déterminer la direction cible \vec{u}_{cible} du vecteur d'onde \vec{K}_{cible} , nous utilisons deux calculs différents du vecteur vitesse de phase selon la profondeur en deux points L et R espacés d'une demi-largeur du groupe ayant le centre du groupe comme milieu. Ceci nous permet de construire une direction cible portée par un vecteur unitaire \vec{u}_{cible} comme indiqué sur la figure 9.8. Ainsi, pour déterminer la direction de réfraction du groupe \vec{u}_{cible} , nous n'avons pas besoin d'avoir précalculé de plan de vagues, *i.e.* des trajectoires pour chaque type de vagues en fonction de leur direction et période.



Les lignes en tirets représentent les isobathes, *i.e.* les lignes d'égale profondeur indiquée en mètres. A chaque cycle de vie d'un groupe, la vitesse de phase est évaluée avec des nombres d'onde K évalués selon l'équation 9.6 en deux points R et L situés de part et d'autre du centre du groupe, avec h la profondeur respective en R et L . Cela donne deux vecteurs vitesses, l'un à gauche du groupe \vec{c}_l , l'autre à droite \vec{c}_r , parallèles au vecteur d'onde courant du groupe \vec{K} . Le vecteur \vec{u}_{cible} est alors défini comme étant orthogonal à la droite reliant les points $L + \vec{c}_l$ et $R + \vec{c}_r$. Si la profondeur n'est pas constante latéralement, le vecteur situé du côté des plus faibles profondeurs sera le plus petit et le groupe tournera vers les plus faibles profondeurs et l'intersection des deux droites (LR) et ($L + \vec{c}_l, R + \vec{c}_r$) donne un point A , servant de centre de rotation pour l'ondelette dynamique contrôlant le groupe.

FIGURE 9.8 : Détermination dynamique de la direction de réfraction du groupe

Nous disposons alors pour notre groupe d'un vecteur d'onde cible $\vec{K}_{cible} = K_{cible} \vec{u}_{cible}$ et d'un centre de rotation A si l'angle formé par le vecteur d'onde courant \vec{K}_n du groupe et le vecteur d'onde cible $\theta = (\vec{K}_n, \vec{u}_{cible})$ n'est pas nul. A chaque cycle de vie du groupe, les caractéristiques de l'ondelette dynamique le contrôlant sont mises à jour, n étant l'indice du cycle courant :

- La direction du vecteur d'onde \vec{K}_{n+1} est égal à celle du vecteur cible \vec{u}_{cible} :

$$\vec{K}_{n+1} = K_{n+1} \vec{u}_{cible} \quad (9.7)$$

- Nous appliquons alors à l'enveloppe et à la nappe sinusoïdale successivement une rotation si $\theta \neq 0$ de centre A et d'angle $(\vec{K}_n, \vec{K}_{n+1})$, puis une affinité² d'axe orthogonal au nouveau vecteur d'onde \vec{K}_{n+1} passant par le centre du groupe et de rapport K_n/K_{n+1} parallèlement à \vec{K}_{n+1}

² Affinité d'axe (D), de rapport k dans la direction (Δ) : $M \mapsto M'$ avec $\overrightarrow{OM'} = k \overrightarrow{OM}$, où O est la projection de M sur (D) parallèlement à (Δ)

- La continuité des positions des crêtes est réalisée selon l'équation 8.19 et la vitesse de groupe est mise à jour selon l'équation 8.20 (chapitre 8 section 8.2.3.2)
- La longueur du groupe est modifiée dans le rapport K_n/K_{n+1} pour conserver le nombre de vagues représentées et l'énergie totale du groupe étant conservée, la hauteur moyenne du groupe doit être mise à jour ; ces relations respectent l'équation suivante :

$$L_{n+1} = L_n \cdot \frac{K_{n+1}}{K_n} , \text{ et } H_{n+1} = H_n \sqrt{\frac{K_{n+1}}{K_n}} \quad (9.8)$$

- les nouvelles vitesses de phase et de groupe sont évaluées selon les équations (3.28) et (8.20), avec le vecteur d'onde \vec{K}_{n+1} et la profondeur moyenne sous le groupe \bar{h} .

Avec ce vecteur d'onde cible, nous avons modélisé les effets principaux de la bathymétrie sur un groupe. Si la profondeur diminue, le nombre d'onde augmente, la longueur d'onde diminue, la hauteur augmente et les crêtes des vagues du groupe s'orientent parallèlement aux isobathes ; la pulsation n'est pas modifiée.

Largeur cible

La largeur cible, elle, dépend de la nature divergente du gradient du champ de profondeurs sous le groupe : si le gradient diverge, comme c'est le cas lorsqu'un groupe entre dans une baie ou remonte une vallée, le groupe s'étire en largeur et ses vagues sont moins brutales ; si au contraire le gradient converge, comme c'est le cas lorsqu'un groupe s'approche d'un cap sur une dorsale sous-marine, le groupe se concentre et ses vagues sont plus aggressives. Pour estimer cette divergence, le groupe récupère la direction horizontale du gradient maximal $\vec{u}_{\nabla h}|_{xy}$ de profondeur aux deux points L et R présentés sur la figure 9.8 en interrogeant l'entité de bathymétrie. Si les droites $(L, \vec{u}_{\nabla h}^L|_{xy})$ et $(R, \vec{u}_{\nabla h}^R|_{xy})$ se coupent en un point D , selon que D est en avant (resp. en arrière) du groupe, le gradient converge (resp. diverge). La largeur cible l_{cible} est définie à partir de la largeur courante l , de la distance d de D à la droite (LR) et de la position de D par rapport au groupe suivant l'équation :

$$l_{cible} = l \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon(d/\lambda)}{1 + (d/\lambda)^2} \right) \quad (9.9)$$

où $\varepsilon < 0$ si D est en avant du groupe, $\varepsilon > 0$ si D est en arrière du groupe et $\varepsilon < 2$ pour garder une largeur cible positive. Les effets sont maxima lorsque d est égal à la longueur d'onde moyenne du groupe $\lambda = 2\pi/K$. La mise à jour de la largeur courante de l_n à l_{n+1} et la modification H_{n+1} de la hauteur du groupe H_n afin de respecter la conservation de l'énergie est réalisée selon l'équation en minorant la largeur du groupe par sa longueur d'onde λ :

$$l_{n+1} = \max[(1 - \alpha)l_n + \alpha l_{cible}, \lambda] \quad \text{et} \quad H_{n+1} = H_n \sqrt{\frac{l_n}{l_{n+1}}} \quad (9.10)$$

où $0 < \alpha \leq 1$ est un paramètre permettant de régler la vitesse de transition qui dépend de la durée du cycle précédent.

9.3.2.2 Modifications locales des phases et amplitudes

A ces modifications globales du groupe sont ajoutés des effets supplémentaires sur le profil des crêtes et les perturbations en phase et en amplitude pour tenir compte des variations à une échelle plus fine que la taille d'un groupe, qui vont s'ajouter aux perturbations déjà existantes en faisant l'hypothèse que l'action totale du groupe n'est pas modifiée par ces perturbations. Ses perturbations vont suivre les vagues et évoluer en fonction de la différence entre la profondeur locale et la profondeur moyenne sous le groupe. Le principe est simple : si la profondeur locale h est plus faible (resp. plus grande) que la profondeur moyenne \bar{h} sous un groupe, la vague est localement ralentie et amplifiée

(resp. accélérée et aplatie). La mise à jour du profil et des perturbations obéit aux équations suivantes :

$$P^{\text{crest}}(v, t + 1) = P^{\text{crest}}(v, t) + \alpha_{P_b} \frac{K}{K_\infty} \cdot \frac{\bar{h} - h}{\bar{h}} \quad (9.11)$$

$$\rho_{\text{rear}}(\vec{u}, t + 1) = \rho_{\text{rear}}(\vec{u}, t) + \alpha_{\rho_b} \frac{K}{K_\infty} \cdot \frac{\bar{h} - h}{\bar{h}} \quad (9.12)$$

$$\phi_{\text{min}}(\vec{u}, t + 1) = \phi_{\text{min}}(\vec{u}, t) + \alpha_{\phi_b} \frac{K}{K_\infty} \cdot \frac{\bar{h} - h}{\bar{h}} \quad (9.13)$$

$$\delta H(\vec{u}, t + 1) = \delta H(\vec{u}, t) + \alpha_{\delta H_b} H \cdot \frac{\bar{h} - h}{\bar{h}} \quad (9.14)$$

où \vec{u} est la position relative au centre du groupe déterminant une position sur une crête du train d'onde non modifié par P^{crest} à l'instant t , v la projection de \vec{u} orthogonalement à \vec{K} , h la profondeur locale sous le groupe en \vec{u} , \bar{h} la profondeur moyenne, K le nombre d'onde moyen courant, K_∞ le nombre d'onde moyen en profondeur infinie, H la hauteur du groupe et $(\alpha_{P_b}, \alpha_{\rho_b}, \alpha_{\phi_b}, \alpha_{\delta H_b})$ un quadruplet de paramètres strictement positifs réglant l'importance de l'effet en fonction de la durée d'inhibition de l'*aisthesis*.

Ainsi, les effets de la bathymétrie sur les vagues sont modélisés dans IPAS afin de rendre compte des phénomènes physiques de réfraction de vagues et de modification de la hauteur locale des vagues. Les marins pourront alors lire le plan d'eau virtuel pour y trouver des informations bathymétriques à partir de la forme des vagues.

9.3.3 Interaction courant → groupe

Les effets du courant sur un groupe se déclinent en une translation du groupe à la vitesse du courant et des modifications des caractéristiques du groupe si le courant vu par le groupe n'est pas constant. Dans cette étude, la profondeur est considérée constante. Les caractéristiques du groupe sont définies dans un repère lié localement à la mer : cela correspond à ce qu'observe un bouchon posé sur l'eau à un instant t donné au centre du groupe et qui, emporté par le courant local, mesure à l'instant t le vecteur d'onde moyen \vec{K} , la pulsation moyenne Ω , les phases ϕ et les amplitudes a du groupe. Les équations définissant un groupe utilisent, elles, des coordonnées liées au sol, elles seront donc modifiées en tenant compte de ce changement de repère et en respectant les lois de conservation de l'action totale du groupe.

Le groupe mesure le vecteur vitesse du courant en C : \vec{U}_C , et en déduit un vecteur vitesse de translation égal à la vitesse du courant. Pour connaître le vent apparent soufflant effectivement sur le groupe, il faudra enlever au vecteur vent défini par rapport au sol ce vecteur \vec{U}_C de manière à ce que le groupe tienne compte de la vitesse du vent relative à la mer lors de son interaction avec le vent.

Si le courant vu par le groupe est constant entre t_0 et $t = t_0 + \delta t$: $\forall \tau \in [t_0, t]$, $\vec{U}(\vec{X}_{(\tau)}, \tau) = \vec{U}$, on supposera que c'est le cas lorsque tous les vecteurs \vec{U}_{BLFRC} sont égaux à un même vecteur \vec{U} , cette vitesse de translation est elle aussi constante et les caractéristiques du groupe sont invariantes. Le vecteur d'onde moyen \vec{K} et la pulsation moyenne Ω étant définis relativement à la mer, il faut modifier l'équation (8.10) en conséquence pour intégrer le déplacement du repère lié au courant vu par le groupe :

$$\chi(\vec{x}_0, \vec{X}, t) = \vec{K} \cdot \left(\vec{x}_0 - \int_{t_0}^t \vec{U}(\vec{X}_{(\tau)}, \tau) d\tau \right) - \Omega t + \phi(\vec{x}_0 - \vec{X}, t) \quad (9.15)$$

$$\int_{t_0}^t \vec{U}(\vec{X}_{(\tau)}, \tau) d\tau = \vec{U} \cdot \delta t \quad (9.16)$$

La perturbation de phase ϕ comme l'enveloppe des amplitudes (équation 8.3) ne sont pas changées car elles sont définies relativement au centre du groupe. Ainsi, que l'observateur soit lié à la mer ou au sol, à un instant donné, le groupe présente toujours des vagues d'une longueur d'onde $2\pi/K$. Si l'observateur est lié au sol, au cours du temps, il verra des vagues qui allant très vite si le courant les emporte ou au contraire très lentement si le courant est contre, voire immobiles si le courant est

exactement opposé à la vitesse de phase et même reculant si le courant est plus rapide que la vitesse de phase (relative à la mer) des vagues. Aussi, si le courant est plus rapide que la vitesse de groupe mais moins rapide que la vitesse de phase, l'observateur verra des vagues qui avancent alors que leur enveloppe recule. Tous ces phénomènes sont utilisés par les marins pour caractériser les directions et vitesses des courants d'après l'observation des propagations relatives des vaguelettes, car leurs courtes longueurs d'onde font que leurs vitesses sont du même ordre de grandeur que les courants. A titre d'exemple, une vitesse de quatre mètres par seconde est celle d'un groupe de longueur d'onde moyenne en eau profonde d'une dizaine de mètre et de période deux secondes et demi.

Si le courant vu par le groupe n'est pas constant, trois effets sont pris en compte : les changements dûs à une variation des courants dans le sens de déplacement du groupe, la réfraction et la divergence du groupe.

- Si le courant présente un gradiant non nul dans le sens de déplacement du groupe $\vec{U}_F \neq \vec{U}_B$, alors le nombre d'onde en profondeur infinie K^∞ , la pulsation moyenne Ω et la hauteur en profondeur infinie H^∞ du groupe sont modifiés en respectant successivement les équations océanographiques 3.43, 3.41 et 3.44.

$$K_{n+1}^\infty = K_n^\infty \cdot \left(1 - \frac{\vec{K}_n}{K_n} \cdot \frac{\vec{U}_F - \vec{U}_B}{FB} \right) \quad (9.17)$$

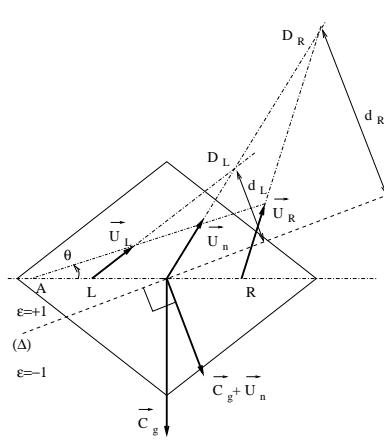
$$\Omega_{n+1} = \sqrt{g K_{n+1}^\infty} \quad (9.18)$$

$$H_{n+1}^\infty = H_n^\infty \cdot \sqrt{\frac{K_{n+1}^\infty \Omega_{n+1}}{K_n^\infty \Omega_n}} \quad (9.19)$$

$$\vec{K}_{n+1} = \vec{K}_n \cdot \frac{K_{n+1}^\infty}{K_n^\infty} \quad (9.20)$$

$$L_{n+1} = L_n \cdot \frac{K_n}{K_{n+1}} \quad \text{et} \quad H_{n+1} = H_{n+1}^\infty \cdot \frac{K_{n+1}}{K_{n+1}^\infty} \quad (9.21)$$

- Des différences de vitesses du courant latéralement à un groupe peut faire tourner celui-ci. Le courant est mesuré en deux points L et R distants de la moitié de la largeur l du groupe et tels que le segment $[LR]$ ait pour médiatrice la droite passant par le centre du groupe et le vecteur d'onde comme vecteur directeur (voir figure 9.9). Le courant est évalué en ces deux points et cela nous donne deux vecteurs de courant \vec{U}_L et \vec{U}_R . Si la droite $(L + \vec{u}_L, R + \vec{u}_R)$ coupe la droite (LR) en un point A , le groupe va alors tourner à une vitesse angulaire proportionnelle à θ (ramené dans $]-\pi, \pi]$).



Le courant est mesuré au centre du groupe, en L et en R . L'existence du point A signifie que le groupe est réfracté à cause de la différence des courants à gauche et à droite du groupe ; dans le cas de cette figure, le groupe tourne dans le sens trigonométrique. Aussi, le courant est sans cisaillement $\vec{U}_C \cdot \vec{U}_L > 0$ et $\vec{U}_C \cdot \vec{U}_R > 0$ est présent sous un groupe qui s'oppose à ce courant $\vec{U}_C \cdot \vec{C}_g < 0$. Le point D_L (resp. D_R) est défini comme intersection de la droite passant par le centre du groupe avec (L, \vec{U}_L) (resp. (R, \vec{U}_R)). Ces points étant du côté du sens du courant, cela signifie que les lignes de courant se resserrent tant à gauche qu'à droite du groupe (elles sont convergeantes). La vitesse de groupe est telle que le groupe remonte le courant $\vec{U}_C \cdot (\vec{C}_g + \vec{U}_C) < 0$, chaque côté du groupe voit donc les lignes de courant s'espacer ; les deux points D_L et D_R sont du côté de (Δ) opposé au vecteur $\vec{C}_g + \vec{U}_C$: $\varepsilon_L = +1$ et $\varepsilon_R = +1$. Ce groupe va donc augmenter sa largeur de chaque côté du groupe ($\varepsilon_L = +1$ et $\varepsilon_R = +1$) dans des proportions certainement un peu plus grande à gauche qu'à droite ($d_L < d_R$) selon une équation similaire à (9.9), l'influence étant d'autant plus importante que les "d" sont de l'ordre de la longueur d'onde du groupe. Cela a comme conséquence d'élargir ce groupe et de décaler son enveloppe certainement sur la gauche.

FIGURE 9.9 : Influence du courant : réfraction et divergence d'un groupe

- La divergence du courant peut modifier la largeur du groupe et décaler l'enveloppe orthogonalement au vecteur d'onde ou scinder le groupe en deux. Le courant mesuré au deux points L et R donne les deux vecteurs de courant \vec{U}_L et \vec{U}_R en plus du courant \vec{U}_C mesuré en C . Plusieurs cas peuvent alors se présenter :

- Si $\vec{U}_C \cdot \vec{U}_L > 0$ et $\vec{U}_C \cdot \vec{U}_R > 0$, le courant sous le groupe va grossièrement dans une même direction. En suivant les lignes de courants dans le sens du courant, elles peuvent se resserrer et l'on parle de convergence ou s'espacer et l'on parle de divergence. Un groupe suffisamment grand peut voir une convergence sur sa gauche alors qu'une divergence est sur son côté droit. Selon sa vitesse relative au courant, le groupe va suivre ces lignes dans le sens du courant ou au contraire les remonter. La figure 9.9 présente les termes utilisés pour l'estimation de la convergence ou divergence du courant et la quantification des effets sur la largeur du groupe selon son côté observé. Une différence entre les deux cotés se traduit par une translation du centre du groupe orthogonalement au courant \vec{U}_C pour recentrer l'enveloppe sans modifier les caractéristiques du groupe. Sa largeur suit grossièrement les lignes de courant (en restant minorée par la longueur d'onde λ du groupe), son enveloppe est recentrée et sa hauteur est modifiée pour conserver l'action totale du groupe selon les équations :

$$\tau_{L/2} = 1 + \frac{\varepsilon_L(d_L/\lambda)}{1 + (d_L/\lambda)^2} \quad \text{et} \quad \tau_{R/2} = 1 + \frac{\varepsilon_R(d_R/\lambda)}{1 + (d_R/\lambda)^2} \quad (9.22)$$

$$\vec{X}_{n+1} = \vec{X}_n + \frac{\tau_{R/2} - \tau_{L/2}}{2} \cdot l_n \cdot \frac{\vec{K} \wedge \vec{z}}{K} \quad (9.23)$$

$$l_{n+1} = \max \left[l_n \cdot \frac{\tau_{L/2} + \tau_{R/2}}{2}, \lambda \right] \quad (9.24)$$

$$H_{n+1} = H_n \sqrt{\frac{l_n}{l_{n+1}}} \quad (9.25)$$

où $(d, \varepsilon)_{L,R}$ sont définis sur la figure 9.9, \vec{z} un vecteur unitaire vertical et les termes d'indice n (resp. $n+1$) : les caractéristiques courantes (resp. modifiées). Les taux ε sont plus grands (resp. plus petit) que un lorsque les moitiés du groupe sont étirées (resp. comprimées) [équation (9.22)], le centre de l'enveloppe s'ajuste en conséquence [équation (9.23)] et l'énergie du groupe est conservée [équation (9.25)].

- Si $\vec{U}_n \cdot \vec{U}_L \leq 0$ ou $\vec{U}_n \cdot \vec{U}_R \leq 0$, le courant présente un cisaillement sous le groupe du côté où le produit scalaire est négatif (et ça peut avoir lieu simultanément des deux cotés). Si le groupe est suffisamment large il se scinde en deux, sinon il disparaît en une période dans les turbulences associées au cisaillement du courant qui sont alors de son ordre de grandeur. La condition de largeur est $l \geq \frac{3\lambda}{2}$. L'ancien groupe disparaît en une période, tandis que les deux nouveaux groupes apparaissent eux aussi en une période. Ces nouveaux groupes ont les mêmes caractéristiques que l'ancien hormis leurs largeurs qui vaut les deux tiers de l'ancienne largeur et la position de leur centre qui est initialisé lors de leur création à un sixième de l'ancienne largeur de part et d'autre du centre de l'ancien groupe (latéralement). De l'énergie semble ainsi créée mais cela compense en partie les groupes disparaissant dans les turbulences.
- Sinon, seule la variation de la vitesse du courant au centre du groupe est prise en compte. La continuité des positions des crêtes est réalisée selon l'équation 8.19 et la vitesse de groupe relative à l'eau est mise à jour selon l'équation 8.20 (chapitre 8 section 8.2.3.2)

Ainsi, les principaux effets des courants sur un groupe sont modélisés dans IPAS afin de représenter la physique des phénomènes observés par les marins lors de la lecture d'un plan d'eau. Des barres se forment lorsque de la houle rencontre un courant contraire assez fort, les groupes sont réfractés par les gradients de courants, les zones de cisaillements absorbent l'énergie des groupes, les vagues sont transportées par les courants et leurs formes évoluent selon les interactions des groupes avec les courants.

9.3.4 Interaction vents → groupe

Les interactions énergétiques des vents sur un groupe déjà existant sont déclinées en une interaction du synoptique sur la hauteur H du groupe et une interaction du vent total somme du synoptique et des vents locaux sur la phase ϕ du groupe. Le synoptique crée régulièrement de jeunes groupes.

9.3.4.1 Transferts d'énergie

Le vent synoptique transmet de l'énergie aux vagues en augmentant progressivement la cambrure moyenne des groupes se déplaçant dans le même sens que le vent. On a vu en océanographie physique que ce taux de transfert dépend de l'âge des vagues défini par l'équation (3.38) page 54. Ne disposant pas de données (même empiriques dans la littérature océanographique) pour vent modéré ou fort concernant des mesures de la vitesse de friction u_* , nous nous appuyons dans IPAS, sur l'étude de Sverdrup et Munk présentée par la figure 2.7 page 36. Ce diagramme nous permet notamment de déterminer pour la mer de vent du large des hauteurs $H_{\frac{1}{3}max}$ et pulsation Ω_{min} caractéristiques extrêmes atteignables en fonction de la vitesse moyenne du vent \bar{W} .

Pour un groupe donné en profondeur infinie par un vecteur d'onde \vec{K} avec une hauteur H et une pulsation Ω en interaction avec un vent synoptique de vecteur moyen \vec{W} , on utilisera la projection du vent synoptique sur la direction de propagation du groupe comme référence de vitesse de vent $\bar{W} = \vec{W} \cdot \vec{K} / K$. Si $\bar{W} < 0$, il n'y a pas d'interaction. Sinon, deux cas peuvent alors se présenter :

- Si $\Omega > \Omega_{min}$, alors un accroissement ΔH de la hauteur H du groupe est calculé proportionnellement à la différence des périodes ($\frac{2\pi}{\Omega_{min}} - \frac{2\pi}{\Omega}$), à $\max(H_{\frac{1}{3}max} - H; 0.1)$ et à la durée Δt du dernier cycle.

L'influence d'un vent de vecteur vitesse \vec{w} résultant du synoptique et de vent locaux, se traduit sur un groupe dont la vitesse de phase est \vec{c} par une accélération des crêtes. Nous ajoutons alors aux perturbations de phase $\phi_{max}, \rho_{front}, \rho_{rear}$ une avance de crête supplémentaire $\delta\phi_{max}$ et un accroissement d'exposants $\delta\rho_{front}, \delta\rho_{rear}$, proportionnellement à $P_\infty(\bar{w}) - 2\pi/\Omega$, où $P_\infty(\bar{w})$ est la période d'un état de mer complètement développée à cette vitesse de vent \bar{w} . Toutes ces modifications sont effectuées en restant bornée dans $[0, \pi/3]$ pour la perturbation de phase, dans $[1, 3]$ pour l'exposant arrière et dans $[1, 9]$ pour l'exposant avant.

- Si $\Omega \leq \Omega_{min}$, alors un accroissement ΔH de la hauteur H du groupe est calculé proportionnellement à $H_{\frac{1}{3}max} \cdot e^{-\gamma \frac{1}{\Omega} - \frac{1}{\Omega_{min}}}$ – H , où γ défini l'étendue de la gaussienne caractérisant l'influence du vent sur les vagues plus longues, cet accroissement étant minoré par zéro.

Cet accroissement ΔH est alors ajouté à la hauteur du groupe. Cette croissance est exclusivement réalisée sur la hauteur des vagues. Lorsqu'on est loin de l'équilibre, la croissance du groupe est très rapide et les cambrures dépassent vite les cambrures limites du déferlement. Nous verrons dans l'étude sur l'interaction d'un déferlement actif sur un groupe (*c.f.* 9.3.5 page 226) une proposition de modélisation de l'accroissement de la longueur d'onde impliquant une interaction couplée entre les vents, les déferlements et les groupes de vagues.

9.3.4.2 Crédit de groupes par le synoptique

A partir du moment où le vent synoptique moyen dépasse les 2.5 ms , de jeunes groupes sont générés aléatoirement selon une distribution sur le plan d'eau définie par l'opérateur humain. Ils sont tous générés avec une hauteur nulle $H_0 = 0$, une pulsation moyenne correspondant à celle qu'il devra avoir au bout du temps minimal d'une minute en fonction du vent synoptique moyen d'après le diagramme de Sverdrup et Munk (figure 2.7 page 36) $\Omega_0 = 2\pi/P(\bar{W}, 1\text{ min})$, un nombre d'onde moyen $K_0 = \Omega_0^2/g$, un vecteur d'onde moyen ayant la même direction que le vecteur vent synoptique courant $\vec{K}_0 = K_0 \frac{\vec{W}_{syn}(t)}{W_{syn}(t)}$, un nombre de vagues $N_0 = 3$ et une largeur l_0 égale à la longueur $L_0 = 6\pi/K_0$. Une fois créés, ces groupes évoluent sur le plan d'eau comme tous les autres groupes ; ils vont accroître leur hauteur en fonction du vent, être transportés et réfractés par les courants, générer des déferlements... La position initiale \vec{X}_0 est obtenue par un tirage aléatoire homogène sur l'ensemble du plan d'eau. A chaque cycle de vie du vent synoptique, la décision de générer ou non un nouveau groupe dépend, d'une part du rapport entre la surface S du plan d'eau et la surface occupée par ces groupes pendant leur première minute de vie estimée à $36n\pi^2/K_0^2$ où n est le nombre de groupes à créer en une minute, d'autre part d'un coefficient $\tau(\vec{X}_0)$, $0 \leq \tau \leq 1$ défini par l'opérateur humain caractérisant la densité de recouvrement du plan d'eau par ces nouveaux groupes. Nous définissons alors le nombre n_{cycle} de groupe à créer lors de ce cycle à partir de la durée Δt du cycle précédent :

$$n_{cycle} = \tau \times \Delta t \times \frac{SK_0^2}{2160\pi^2} \quad (9.26)$$

La partie entière de n_{cycle} définit un certain nombre de groupes à créer et la partie décimale est traitée par le tirage aléatoire d'un nombre dans $[0, 1[$ qui, s'il est plus petit que cette partie décimale, va générer un groupe. La spécification de la distribution de ces nouveaux groupes sur le plan d'eau est réalisée par un éditeur de la densité de recouvrement héritant de la même classe que les éditeurs de courant ou de bathymétrie, et proposant de rentrer des points clé avec un taux de référence associé à un degré d'influence, le taux en un point quelque $\tau(\vec{X}_0)$ étant calculé en coordonnées barycentriques à partir des sommets clé du triangle contenant \vec{X}_0 .

Ainsi, l'interaction du vent sur les groupes modifie l'amplitude et la forme des vagues dans un groupe, favorisant ainsi dans les deux cas les déferlements tant que le groupe n'a pas atteint les caractéristiques d'un état de mer complètement développée, en ce qui concerne sa hauteur et sa période. Le synpotique, lui, crée constamment de jeunes groupes qui évoluent librement sur le plan d'eau. L'action du vent sur un groupe est alors représenté dans notre modèle phénoménologique IPAS en utilisant des modèles océanographiques empiriques.

9.3.5 Interaction déferlement → groupe

Malgré la complexité des phénomènes physiques impliqués dans l'évolution des états de mer [Miles 57], que ce soit par des mécanismes cinématiques des déferlements [Banner et Phillips 74] ou par des couplages résonant [Hasselmann 62, Benney et Saffman 66], tous les modèles expliquent l'allongement progressifs des vagues [Donelan et Yuan 94, Drennan et Donelan 96] et leur organisation en groupes de vagues [Banner et Tian 98], en accord avec les observations maritimes. Nous nous intéressons ici à un modèle d'allongement des vagues par déferlements. Il existe deux types d'interactions d'un déferlement vers un groupe, l'un est associé à la phase active du déferlement et peut impliquer plusieurs groupes et le vent, l'autre à la phase passive.

9.3.5.1 Interaction active

Lorsqu'un déferlement est actif, il envoie un message dans la boîte à lettres des groupes ayant perdu de l'action dans le déferlement. Lorsqu'un groupe j regarde sa boîte à lettres et qu'elle n'est pas vide, cela signifie qu'il a transmis de l'action au déferlement, action qu'il doit alors se prélever pour respecter la conservation de l'action selon l'équation 3.48 page 61 dans l'interaction entre ce groupe et le déferlement. Le groupe j récupère alors son taux d'activité $r_n^j = \vec{s}_n \cdot \vec{C}_j - C_j^2$ pour chaque point expérimental n , et la position p de sa crête.

Si la vague déferlante p se situe après ou au milieu du groupe, elle va naturellement perdre de l'énergie en avançant vers l'avant du groupe. Pour modéliser le phénomène physique du transfert d'action du groupe vers le déferlement, nous choisissons de diminuer localement les taux de perturbations aléatoires en phase et en amplitude $\tau_{\phi_{rnd}}$ et $\tau_{\delta H_{rnd}}$, qui suivent la crête tant qu'il y a activité du déferlement au voisinage de cette crête. La vitesse de variation de ces taux est proportionnelle à $1 - \vec{s} \cdot \vec{C}_j / C_j^2$ qui est négatif : plus la différence entre la vitesse de la particule déferlante et la vitesse du groupe est importante et plus le groupe perd vite de son énergie. Cette quantité d'action prélevée au groupe doit être théoriquement égale à celle prise par le déferlement selon l'équation (3.48) page 61. Dans IPAS, elle n'est pas forcément exactement égale à celle qui est utilisée en moyenne par le déferlement en provenance de ce groupe pour estimer son taux de croissance β [équation (8.31) page 203]. Le réglage empirique du coefficient de proportionnalité dans la vitesse de modification des taux de perturbations aléatoires devrait permettre de faire coïncider en moyenne ces deux quantités d'action par des méthodes d'analyse océanographique.

Si la vague déferlante p se situe avant le milieu du groupe de N vagues, alors c'est l'ensemble du groupe qui sera modifié, jusqu'à ce que cette vague disparaisse s'arrête de déferler vers l'avant du groupe. En effet, cette vague en présentant un déferlement alors qu'elle est dans une phase de croissance dans le groupe va certainement déferler tant qu'elle n'aura pas atteint une amplitude à nouveau inférieure à celle qu'elle a actuellement et il est probable que ce phénomène soit également lié à un décollement de l'air sur la crête [Longuet-Higgins 69]. Si le groupe n'est pas modifié, ce sont toutes ses futures vagues qui sont concernées : *tout se passe comme si* les crêtes voulaient aller plus

vite. La modification du groupe concerne alors deux paramètres : sa hauteur H_j diminue car de l'action passe dans le déferlement, mais également son nombre d'onde moyen K^j car une partie de l'action est fournie par le vent au profit des sous-harmoniques.

- *Diminution de la hauteur H_j* : la particule déferlante à t_0 est positionnée par \vec{u} sur une crête p . On définit la distance d_p de cette crête p au centre du groupe et sa hauteur H^{0p} ramenée au centre de p par :

$$d_p = \frac{\vec{u}_p \cdot \vec{K}^j}{K^j} \quad \text{et} \quad H^{0p} = [H_n^j + \delta H^j(\vec{u}_p, t_n)] e^{-d_p^2 \frac{\vec{K}^j}{K^j} A \frac{\vec{K}^j}{K^j}} \quad (9.27)$$

où $\vec{u}_p = \vec{x}_p - \vec{X}$ est la position de la particule relative au centre \vec{X} du groupe et t_n l'instant du $n^{\text{ème}}$ cycle. Si $H^{0p} > H_n^j$, rien ne se passe avant que la crête ne soit arrivée au milieu du groupe. Sinon $H^{0p} < H_n^j$ et tant que cette crête est déferlante, elle contribue à diminuer H^j à la vitesse $\tau_{Hjp} < 0$ suivante :

$$\tau_{Hjp} = \frac{1}{N} (C_j^2 - \vec{s} \cdot \vec{C}_j) \Lambda(C_j) (H_n^j - H^{0p}) \quad (9.28)$$

où N est le nombre de vagues du groupe et $\Lambda [m^{-2}s]$ la distribution de la largeur des fronts déferlants dépendant de la vitesse du vent définie empiriquement par l'équation (3.53) page 63 : $\Lambda(c) = \left(\frac{U_{10}}{10}\right)^3 \times 3.3 \times 10^{-4} e^{-0.64c}$ [Melville et Matusov 02]. $|\tau_{Hjp}|$ est d'autant plus grand que la largeur moyenne du front est grande, que le déferlement est intense pour ce groupe et qu'il a lieu tôt dans la progression de la vague vers le centre du groupe. Si plusieurs déferlements ont lieu simultanément sur cette crête p , on choisit dans cette formule le plus petit H^{0p} et la plus grande vitesse relative de particule $\max(\vec{s} \cdot \vec{C}_j / C_j^2)$ et la plus petite pseudo-vitesse C_j . Si plusieurs vagues déferlent simultanément dans un même groupe j , la vitesse de variation de H^j est la somme des contributions de chaque vague comme le précisent les équations :

$$\tau_{Hjp} = \frac{1}{N} \left(\min_{\text{particule} \in p} \{C_j^2 - \vec{s} \cdot \vec{C}_j\} \right) \cdot \Lambda \left(\min_{\text{particule} \in p} C_j \right) \cdot \left(H_n^j - \min_{\text{particule} \in p} H^{0p} \right) \quad (9.29)$$

$$\tau_{Hj} = \sum_{p \in \{\text{crêtes déferlantes}\}} \tau_{Hjp} \quad (9.30)$$

$$H_{n+1}^j = H_n^j \cdot \max[(1 + \tau_{Hj} \Delta t), 0] \quad (9.31)$$

où $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ est la durée du cycle précédent, τ_{Hjp} le résultat de l'activité déferlante de la crête p et τ_{Hj} la traduction de l'activité déferlante de tous les déferlements sur l'ensemble du groupe j . Si $H^j = 0$, cela signifie qu'il subit un déferlement si intense qu'il disparaît dans les turbulences et passe alors dans une état de **Mort** ; il sera détruit par la mer au prochain cycle.

- *Diminution du nombre d'onde moyen K^j* : en nous basant sur l'équation de dispersion des ondes de gravité (3.42) page 57 et la définition de la vitesse de phase c_j , on trouve : $\partial K / \partial c \approx -2g/c^3$. Notre idée est alors de faire varier K^j pour rapprocher la pseudo-vitesse C_j tenant compte d'un phénomène de décollement de l'air, de la "vraie" vitesse de phase c_j avec un gain $\tau_{Kjp} < 0$ par unité de temps vérifiant l'équation :

$$\tau_{Kjp} = -\frac{2}{N} \left| \frac{\tau_{Hjp}}{\tau'_H} \right| \cdot \frac{g}{c_j^3} (c_j - \min_{\text{particule} \in p} C_j) \quad (9.32)$$

où τ'_H est un coefficient interne propre au groupe et calculé dynamiquement par chaque groupe afin de respecter les expériences de Sverdrup et Munk [Sverdrup et Munk 47] comme expliqué à la fin de ce paragraphe. Si plusieurs déferlements ont lieu simultanément sur cette crête p , cette formule choisit le plus petit C_j . Lorsque plusieurs vagues déferlent simultanément dans un même groupe j , le gain $\tau_{Kj} < 0$ est la somme des contributions de chaque vague et le nombre d'onde K^j est alors déterminé par les équations suivantes :

$$\tau_{Kj} = \sum_{p \in \{\text{crêtes déferlantes}\}} \tau_{Kjp} \quad (9.33)$$

$$K_{n+1}^j = \max[(1 + \tau_{Kj} \Delta t) \cdot K_n^j, \varepsilon] \quad , \quad \text{où} \quad \varepsilon = 6 \cdot 10^{-4} \quad (9.34)$$

où $\Delta t = t_{n+1} - t_n$. La valeur minimale, $K^j = \varepsilon$, correspond à des longueurs d'ondes de plus de dix kilomètres, ce qui reste exceptionnel pour des vagues d'origine éolienne ; un avertissement

est écrit sur la console si cela se produit. Pour chaque nouvelle valeur de K^j ainsi déterminée à chaque cycle de vie d'un groupe, la pulsation moyenne Ω^j et la vitesse de groupe C_g^j sont mises à jour selon les équations de dispersion et eikonales comme décrit par les formules (9.7) page 220 et (9.18) page 223. En diminuant K^j , on diminue Ω^j et on augmente la longueur L^j du groupe ; cela correspond à une certaine quantité d'action ; c'est l'action transmise au groupe par le vent en interaction avec les déferlements. Chaque groupe de vagues cherche à respecter les expériences de Sverdrup et Munk, en partie résumées dans la figure 2.7 page 36 présentant des périodes caractéristiques des groupes en fonction de la durée d'action et de la vitesse du vent soufflant dans la direction du vecteur d'onde du groupe. Pour cela, il règle son coefficient τ'_H , en l'augmentant (resp. diminuant) si son nombre d'onde est inférieur (resp. supérieur) au nombre d'onde caractéristique d'un groupe ayant la même durée de vie avec un vent efficace³ V égal au vent synoptique \vec{W} projeté dans la direction du vecteur d'onde : $V = \vec{W} \cdot \vec{K}^j / K^j$.

9.3.5.2 Interaction passive

Un groupe entre en interaction avec la phase passive d'un déferlement dès qu'un des points de ses balises donne une valeur non nulle pour l'épaisseur de mousse. Le groupe connaît alors par l'intermédiaire de la liste des déferlements de chacun de ses points expérimentaux le nombre de représentants constitutifs de ces déferlements ; il se contente de compter tous les représentants et n'utilise que l'information de mousse donnée par ses propres points expérimentaux. Pour un point expérimental, le nombre total de représentants multiplié par la surface d'un représentant est une estimation de l'étendue surfacique S du déferlement. Le groupe se modifie alors en fonction des épaisseurs de mousse données par ses points et des surfaces occupées par les déferlements qui sont des caractéristiques de l'intensité des turbulences à l'arrière des fronts déferlants.

Pour rendre compte des phénomènes océanographique d'absorption des hautes fréquences due à l'épaisseur de mousse (équation 3.57 page 64), seuls les exposants des perturbations de phase sont modifiés. En effet, leur effets présentent des fréquences plus élevées que le groupe qui les transporte. La diminution locale de ces exposants suivant les crêtes représente ainsi une perte d'action locale sur une vague lui donnant moins de chance de déferler à cet endroit par la suite lors de sa progression dans le groupe. Ces effets turbulents absorbant les hautes fréquences doivent être d'autant plus important que la cambrure est élevée (les trochoïdes présentant alors de l'énergie dans les hautes fréquences), que les turbulences sont épaissees par rapport à l'amplitude locale de la vague, et que la surface du déferlement est grande devant la longueur d'onde fois la largeur du groupe $(2\pi/K) \times l$; nous proposons de régler localement la variation des taux selon l'équation suivante :

$$v_{\tau_{\phi_{rnd}}} = v_{\tau_{\delta H_{rnd}}} = -\alpha \cdot \left(\frac{a(\vec{x} - \vec{X})K}{\pi} \right)^m \cdot \frac{\delta}{H} \cdot \frac{SK}{2\pi l} \quad (9.35)$$

où α et m sont des paramètres de réglage, δ l'épaisseur de mousse locale connue du déferlement, $\vec{x} - \vec{X}$ la position relative du point de référence au centre du groupe.

Aussi, pour modéliser dans IPAS l'accroissement en largeur des groupes et l'augmentation du nombre de vagues par groupe, nous proposons d'utiliser le processus suivant dépendant du rapport de la surface du déferlement S_d sur celle du groupe S_g et conservant en moyenne l'action totale de l'ensemble des groupes. Deux cas se présentent selon la valeur du quotient S_d/s_g :

- Si $\frac{S_d}{S_g} \geq 1$, le groupe peut décider soit de disparaître, soit de multiplier sa largeur par 2 d'ici qu'il soit sorti du déferlement passif. Cette transformation n'a lieu qu'une fois par couple (déferlement, groupe) et doit conserver l'action, c'est à dire l'énergie car la pulsation moyenne n'est pas modifiée.
- Si $\frac{S_d}{S_g} < 1$, le groupe ne risque plus de mourir. A chaque nouvelle interaction entre un groupe et un déferlement passif, le groupe accroît sa largeur proportionnellement à $\frac{S_d}{S_g}$. Lorsque le rapport largeur/longueur devient trop grand, une vague peut être ajoutée au groupe [Donelan et Yuan 94] dont la largeur est modifiée en conséquence.

³ Si $V = \vec{W} \cdot \vec{K}^j / K^j \leq 2.5 \text{ ms}^{-1}$, le groupe ne modifie pas son coefficient τ'_H .

Dans le premier cas, un tirage aléatoire donne une chance sur deux de mourir. Ensuite, s'il vit, il va progressivement multiplier sa largeur par deux. Un groupe qui meurt fait disparaître une énergie E . Vu qu'un groupe sur deux meurt, celui qui reste voit son énergie passer à $2E$. Il doit répartir cette énergie dans une largeur deux fois plus grande. L'énergie étant extensive, il est acceptable de considérer qu'un groupe de largeur $2l$ transporte deux fois plus d'énergie qu'un groupe de largeur l en tout autre point identique au premier.

Dans le second cas, l'apport d'énergie du à l'allongement des crêtes doit être compensé par une perte de la hauteur. Le taux d'allongement τ_{dl} et de perte de hauteur τ_{dH} sont données par :

$$\tau_{dl} = \frac{\delta l}{l} = \xi \cdot \frac{S_d}{S_g} \quad \text{et} \quad \tau_{dH} = \frac{\delta H}{H} = (1 + \tau_{dl})^{-\frac{1}{2}} - 1 \approx -\frac{\tau_{dl}}{2} = -\frac{\xi}{2} \cdot \frac{S_d}{S_g} \quad (9.36)$$

où $\xi << 1$ règle la vitesse moyenne d'allongement. L'ajout d'une vague dans un groupe est décidé selon un tirage aléatoire de probabilité nulle si le rapport largeur/longueur est inférieur à un certain seuil pouvant dépendre de la longueur d'onde (par défaut, il est fixé à cinq dans IPAS). Tout d'abord, la nouvelle longueur L_{N+1} est calculée selon l'équation (8.1), mais l'enveloppe du groupe caractérisée par la matrice définie positive A n'est pas modifiée. Ensuite, en même temps que la largeur est progressivement diminuée jusqu'à atteindre une largeur égale à $\frac{N}{N+1}$ fois la largeur initiale, le vecteur propre de la matrice A situé dans la direction du (respectivement orthogonalement au) vecteur d'onde diminue (respectivement augmente) dans les mêmes proportions pour atteindre sa valeur correspondant à $N + 1$ vagues. L'énergie totale n'est donc pas modifiée et la hauteur de groupe reste identique avant et après cette transformation. Remarquons que contrairement aux apparences, l'ajout d'une vague ne met pas en défaut l'équation de conservation des crêtes (3.41). En effet, notre modèle de groupe limite l'étendue en longueur de l'enveloppe d'un groupe en fonction du nombre de vagues transportée par le groupe afin de négliger les vagues d'une amplitude très faible. Le passage de N à $N+1$ vagues ne fait que modifier la longueur de l'enveloppe : les vagues étaient déjà implicitement présentes dans la nappe sinusoïdale de l'ondelette dynamique, mais non représentées par le modèle informatique.

Ainsi, l'ensemble des phénomènes physiques de l'action d'un déferlement sur un groupe résumés dans le tableau de la figure 3.13 page 65 sont représentés de manière qualitative (nombre de vagues par groupe, allongement des crêtes) et quantitative (conservation d'action totale) dans notre modèle phénoménologique IPAS. Aussi, notre modèle intègre le phénomène d'allongement des crêtes observé par les marins lorsque les déferlements deviennent fréquents et plus intenses (figure 2.6 page 35) : les vagues s'allongent et deviennent progressivement des *lames* si les vents sont suffisamment forts.

9.3.6 Interaction groupes → groupe

Nous avons au chapitre précédent qu'un groupe seul allonge sa longueur d'onde à une vitesse proportionnelle à sa cambrure (chapitre 8 section 8.2.3). Ici, nous étudions comment deux groupes peuvent décider de fusionner en un seul groupe.

Pour cela, toutes les N^j périodes, un groupe j génère une balise formée des sommets d'un losange centré en la position estimée \vec{X}^j de son centre dans $1s$ et dont la forme est son enveloppe réduite par une homothétie de rapport $1/4$. L'expérience demandée est la liste \mathcal{I} des groupes influençant les quatre points de cette balise. Une seconde plus tard, il récupère le résultat, puis extrait les groupes ayant agi simultanément sur les quatre points : $\cap_{k=1 \dots 4} \mathcal{I}_k$. Parmi ces groupes i , il mémorise une première fois ceux pour lesquels le vecteur d'onde est proche de son propre vecteur d'onde : $\vec{K}^i \approx \vec{K}^j$.

Si le résultat n'est pas vide, lors de la prochaine expérience de ce type, le groupe j compare la nouvelle liste des groupes ayant agi sur les quatre points et dont le vecteur d'onde est proche de son propre vecteur d'onde. Si un même groupe i est à nouveau identifié, alors le groupe j envoie un message au groupe i de demande de merge.

Le groupe i répond en créant un groupe k et prévient j . Le groupe k respecte la conservation de l'action globale de i et de j du point de vue des trains d'ondes, et reprend au mieux les profils des crêtes et les perturbations afin que la praxis du groupe k soit la plus proche possible de la réunion des praxis de i et j .

La notion de "plus proche" est associée au choix d'une mesure pondérant l'importance de chacunes

des 3 praxis géométriques et dynamiques d'un groupe. La transition i, j vers k prend une période, pendant laquelle les groupes i et j diminuent linéairement leur hauteur jusqu'à l'annuler à la fin de cette période, tandis que le groupe k augmente linéairement sa hauteur jusqu'à atteindre sa hauteur nominale à la fin de cette période. A la fin de cette transition, les groupes i et j se détruisent.

Toute cette procédure reliant i, j et k est simulée par une entité du second ordre prenant en charge les trois groupes ; elle est créée par le groupe i qui y entre en y créant le groupe k . Tant que le groupe j n'est pas entré dans cette entité du second ordre, le groupe k "reste à zéro" et le comportement de l'entité du second ordre est identique à une indirection près au comportement du groupe i qui l'a créé.

On peut également imaginer des regroupements temporaires de groupes en entités du second ordre, par exemple lorsque l'enveloppe d'un petit groupe est inclue dans l'enveloppe d'un gros groupe ; le gros groupe prendrait alors en charge le petit groupe. Ce genre d'idée peut diminuer la complexité des interactions comme indiqué dans la section 7.4.2 du chapitre 7.

9.4 Epiphénomène 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 [Albrechtsen et al. 01, Moreau 03]. 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 [Mestre 02, Tyndiuk et al. 03]. 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.

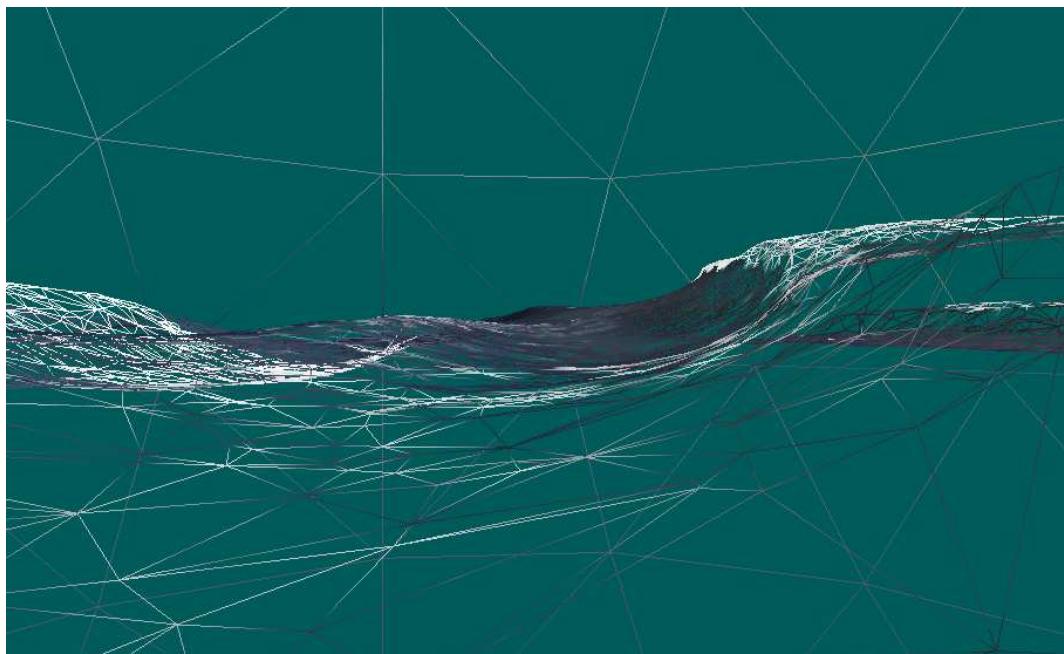
Une fois spécifié un modèle de perception contrôlé à partir des propriétés fournies par l'IHM, la mer peut être instrumentée par une entité visualisateur qui a la charge de structurer le milieu en fonction de ce modèle de perception et de récupérer les propriétés pertinentes pour la visualisation de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

9.4.1 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 [Castro-Diaz et al. 95] 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 [Lindstrom et al. 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 [Hinsinger et al. 02] 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 $10^{ièmes}$ 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 particules⁴ [Gareau 97], au vent pour paramétriser la divergence de ce générateur de particules et la texture des vaguelettes avec du *bump-map* [Maillet et al. 93], 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.



Cette grille géométrique constituée de 6000 points, est extraite d'une simulation proche du 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 90 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 230 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 aplatiser localement l'état de mer limitant ainsi les possibilités de déferlement.

FIGURE 9.10 : Animation de la géométrie de l'aisthesis de l'entité visualisateur

L'ensemble des particules constituant l'élément topologique d'un visualisateur (figure 9.10) 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* [Klinger et Dyer 76] (figure 7.6 du chapitre 7) est utilisé afin de simplifier la complexité de cette opération. La fabrication de l'arbre est réalisée à

⁴ Un 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.

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.

9.4.2 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 9.11). Cette révélation dépend des caractéristiques de la carte graphique du périphérique de visualisation et de la finesse du grain du maillage géométrique.



Grâce à la géométrie du visualisateur (figure 9.10), chaque triangle est un lieu de réflexion/réfraction qui se combinent selon l'indice de frenet établit d'après la normale à ce triangle. La réflexion est une partie de l'image du ciel selon des rayons qui vont du ciel à la caméra en se réfléchissant sur le triangle. La réfraction est une partie du fond de la mer selon des rayon qui vont du fond de l'eau à la caméra en se réfractant sur le triangle. Un "zodiac", contrôlé interactivement par un opérateur humain, évolue sur ce plan d'eau de 4 km^2 , en générant un "sillage" constitué par des groupes autonomes. La caméra, attachée ou non en translation au zodiac, est également contrôlé par l'opérateur.

FIGURE 9.11 : Révélation de la mer *via* les observations de l'entité visualisateur

Le matériel utilisé⁵ pour la simulation quasi temps-réel ($\sim 9 \text{ fps}$) illustrée par la figure 9.11 est une carte graphique supportant les `vertex` et `pixel shader` version 2.0, et un processeur principal à $1,4 \text{ GHz}$; seuls quelques mégaoctets 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.

Ainsi, la 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 la simulation. En effet, la visualisation doit passer par une entité visualisateur qui demande l'animation

⁵ La carte graphique est une GeForce FX de chez Nvidia et le CPU un Pentium IV de chez Intel.

d'une grille géométrique et participe ainsi à la création du milieu. Le visualisateur est un 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.

9.5 Conclusion

Ainsi, nous avons précisé comment les groupes et les déferlements modifient leurs comportements lors des interactions entre eux ou avec les vents, les courants et la bathymétrie. Différents choix ont été faits pour les modèles océanographiques utilisés lors de la modélisation de l'adaptation du comportement des entités *groupe* et *déferlement* et pour la manière dont ces entités utilisent des prédictions pour réaliser des perceptions les mieux appropriées à leur besoins perceptifs. Toutes les interactions passent par la médiation d'un milieu qui est structuré par ces activités de perception active et façonné par les praxis des entités présentes. Lorsque les échelles temporelles sont très différentes d'un phénomène à l'autre, comme c'est le cas pour la phase active d'un déferlement vis à vis de la vie d'un groupe, l'espace topologique seul n'est pas suffisant pour assurer le respect des lois physiques avec des entités énactive asynchrones ; en revanche, l'utilisation de boîtes à lettres permet de remédier à ce problème et de simuler correctement des transferts d'action entre les groupes et les déferlements. L'ensemble des entités physiques et de leurs interactions forment alors le socle océanographique d'IPAS. Ce sont elles qui assurent la crédibilité physique de l'animation phénoménologique.

Nous avons modélisé les interactions sur les groupes et les déferlements, simultanément selon les notions de conservation de l'action, de stress du vent, de réfraction des groupes, d'allongement et d'organisation des vagues. Les choix effectués sont fort heureusement discutables et l'avantage énorme d'IPAS est qu'il est relativement aisé de modifier le comportement sur tel ou tel point, de bloquer telle ou telle compétence pour réaliser des expériences mesurant les effets des différents modèles expérimentés. C'est là tout l'intérêt de la modélisation énactive, où le modélisateur, impliqué dans une démarche constructive, peut modifier à tout moment les modèles avec lesquels il interagit, en fonction de résultats expérimentaux.

Nous pensons qu'avec cette approche phénoménologique de la mer, nous avons mis en évidence les possibilités offertes par la démarche énactive pour la modélisation des systèmes complexes comme peuvent l'être les environnements naturels, démarche selon laquelle l'individu est au même niveau conceptuel que les entités qui réalisent la simulation. Aussi, le visualisateur est un exemple d'instrument réalisant la médiation d'un modèle de perception humaine et permettant l'immersion visuelle de l'utilisateur dans l'organisation énactive des entités physiques simulant les phénomènes océanographiques.

Remarquons qu'il serait fastidieux de spécifier une simulation en générant "à la main" chacune de ces entités physiques de bas niveau. Cette spécification est réalisée dans IPAS par des entités de haut niveau permettant la médiation d'un langage maritime métier, dont nous n'évoquons que les noms : houle, mer de vent, sillage ou vague scélérate pour les générateurs de groupes, et front froid, front chaud ou cellule convective pour les générateur de vents.

Références

- [Albrechtsen et al. 01] Albrechtsen, H., Andersen, H., Bodker, S., et Pejtersen, A. (2001). Affordances in activity theory and cognitive systems engineering. Rapport Technique Riso-R-1287(EN), Riso National Labolatoty, Roskilde.
- [Banner et Phillips 74] Banner, M. et Phillips, O. (1974). On the incipient breaking of small scale waves. *Fluid Mech.*, 65 :647–656.
- [Banner et Tian 98] Banner, M. et Tian, X. (1998). On the determination of the onset of breaking for modulating surface gravity water waves. *Fluid Mech.*, 367 :107–137.
- [Benney et Saffman 66] Benney, D. et Saffman, P. (1966). Nonlinear interactions of random waves in a dispersive medium. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 289 :301–380.

- [Bonmarin 89] Bonmarin, P. (1989). Geometric properties of deep water breaking waves. *J. Fluid Mech.*, 209 :405–433.
- [Castro-Diaz et al. 95] Castro-Diaz, M., Hecht, F., et Mohammadi, B. (1995). New progress in anisotropic grid adaptation for inviscid and viscous flows simulations. Rapport Technique 2671, INRIA.
- [Donelan et Yuan 94] Donelan, M. et Yuan, Y. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre Physical description of wave evolution ; wave dissipation by surface processes, pages 143–155. Cambridge University Press.
- [Drennan et Donelan 96] Drennan, W. et Donelan, M. (1996). Nonlinear coalescing wave groups. In Donelan, M., Hui, W., et Plant, W., éditeurs, *Symposium on The Air Sea Interface*, pages 127–132.
- [Ferber et Müller 96] Ferber, J. et Müller, J. (1996). Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, pages 72–79, Kyoto.
- [Gareau 97] Gareau, A. (1997). *Utilisation des systèmes de particules pour la simulation de phénomènes naturels, présentation d'une architecture permettant l'intégration de systèmes animés hétérogènes*. Mémoire de Thèse, Université de Lyon 1.
- [Hasselmann 62] Hasselmann, K. (1962). On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1 : general theory. *Fluid. Mech.*, 12 :481–501.
- [Hinsinger et al. 02] Hinsinger, D., Neyret, F., et Cani, M.-P. (2002). Interactive animation of ocean waves. In *Symposium on Computer Animation (SCA)*, pages 161–166.
- [Kantorovich et Akilov 64] Kantorovich, L. et Akilov, G. (1964). *Functional Analysis in Normed Spaces*. Pergamon Press, Elmsford, New York.
- [Klinger et Dyer 76] Klinger, A. et Dyer, C. (1976). Experiments on picture representation using regular decomposition. *Computer Graphics and Image Processing*, 5 :68–105.
- [Lindstrom et al. 96] Lindstrom, P., Koller, D., Ribarsky, W., Hodges, L., Faust, N., et Turner, G. (1996). Real-time continuous level of detail rendering of height fields. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, 30 :109–118.
- [Longuet-Higgins 69] Longuet-Higgins, M. (1969). On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves. *Proc. Roy. Soc. London*, A310 :151–159.
- [Maillot et al. 93] Maillot, J., Yahia, H., et Verroust, A. (1993). Interactive texture mapping. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, 27 :27–34.
- [Melville et Matusov 02] Melville, W. et Matusov, P. (2002). Distribution of breaking waves at the ocean surface. *Nature*, 417 :58–63.
- [Mestre 02] Mestre, D. (2002). Interactions entre réalité virtuelle et neurosciences comportementales. In *Virtual Concept*, Biarritz, France. ESTIA.
- [Miles 57] Miles, J. (1957). On the generation of surface waves by shear flows. *Fluid Mechanics*, 3 :185–204.
- [Moreau 03] Moreau, G. (2003). Interaction in virtual environments. In *Virtual Concept*, pages 264–270, Biarritz, France. ESTIA.
- [Rapp et Melville 90] Rapp, R. et Melville, W. (1990). Laboratory measurements of deep water breaking waves. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A331 :735–780.
- [Sverdrup et Munk 47] Sverdrup, H. et Munk, W. (1947). Wind, sea, and swell : theory of relations for forecasting. Rapport Technique H.O. Pub. 601, U.S. Navy Hydrographic Office.
- [Tyndiuk et al. 03] Tyndiuk, F., Schlick, C., Claverie, B., et Thomas, G. (2003). Modèles et facteurs humains en IHM - application à la réalité virtuelle. In Herzig, A., Chaid-draa, B., et Mathieu, P., éditeurs, *Modèles Formels de l'Interaction (MFI)*, pages 301–306, Lille, France. Cépaduès.

Conclusion de la partie III

Nous avons appliqué l'hypothèse énactive pour la réalisation d'une animation interactive de la surface de la mer. Le système de réalité virtuelle, générant les états de mer, est basé sur des affordances communes aux marins et aux océanographes : les groupes de vagues, les déferlements, les vents, les courants et la bathymétrie. Ces phénomènes ont été modélisés en tant qu'entités énactives selon des modèles océanographiques pour les vagues et les déferlements, et des modèles descriptifs pour les vents, les courants et la bathymétrie.

Le groupe de vagues est la primitive principale pour l'animation géométrique et dynamique des points de la surface, en leur conférant, selon un modèle de Gerstner adapté aux groupes, une position orbitale, une vitesse orbitale et une normale à la surface. La liste des groupes influents et la présence d'une crête sont des propriétés utilisées par les déferlements pour déterminer l'activité des vagues dans un front actif.

Le déferlement fabrique de la mousse dans son front actif et relaxe cette quantité de mousse exponentiellement dans sa phase passive. Il donne aux points expérimentaux une épaisseur de mousse et envoie des messages aux groupes ayant perdu de l'action dans l'activité d'un déferlement. La boîte à lettres d'un groupe peut alors être vue comme un point expérimental qui appartient à un espace topologique trivial et différent de l'espace topologique usuel de la surface de la mer, et qui est sensible aux messages des déferlements.

Les vents synoptiques et locaux donnent la vitesse du vent en altitude, les courants donnent la vitesse du courant, et la bathymétrie donne la profondeur et les directions orthogonales aux isobathes et orientées dans le sens des profondeurs décroissantes. Ces quatre types d'entité permettent de spécifier interactivement un environnement hétérogène dynamique.

Nous avons modélisé les interactions sur les groupes et les déferlements, simultanément selon les notions de conservation de l'action, de stress du vent, de réfraction des groupes, d'allongement et d'organisation des vagues. Le modèle obtenu se nomme IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) et permet l'animation interactive d'un plan d'eau hétérogène de plusieurs kilomètres carrés, en tant réel pour des états de mer modérés et en un temps tout à fait raisonnable pour les états de mer jeunes intensément forcé par le vent présentant de nombreux déferlements. L'ensemble des entités physiques et de leurs interactions forment alors le socle océanographique d'IPAS. Ce sont elles qui assurent la crédibilité physique de l'animation phénoménologique.

Nous pensons qu'avec cette approche phénoménologique de la mer, nous avons mis en évidence les possibilités offertes par la démarche énactive pour la modélisation des systèmes complexes comme peuvent l'être les environnements naturels, en vue de leur simulation ; démarche selon laquelle l'individu est au même niveau conceptuel que les entités qui réalisent la simulation.

Chapitre 10

Conclusion

Un univers numérique est peuplé de modèles autonomes en interaction où tout se passe comme si les modèles étaient réels car ils proposent la triple médiation de la perception, de l'expérimentation et de la modélisation. L'utilisateur d'un système de réalité virtuelle peut être représenté par un avatar, modèle numérique qui dispose de capteurs et d'actionneurs virtuels pour permettre à l'utilisateur de percevoir et d'agir dans cet univers. L'utilisateur est placé au même niveau conceptuel que les modèles numériques qui composent ce monde virtuel. Il peut s'insérer ou s'extraire à tout moment de la boucle de contrôle/commande du système, lui autorisant l'exploitation en ligne des modèles. La véritable autonomie de l'utilisateur réside alors dans son autonomie de décision [Tisseau 01].

Jacques Tisseau, *Réalité virtuelle — autonomie in virtuo —*

Ce chapitre de conclusion dresse un bilan du travail effectué et ouvre des voies de recherche en guise de perspectives. La première section donne une vision globale de l'approche énactive pour l'animation de la mer (section 10.1). La seconde section offre des perspectives de recherche selon les trois axes humain, physique et informatique liés à la modélisation énactive (section 10.2).

10.1 Bilan

Nous avons abordé le problème de la modélisation de la mer pour son animation en réalité virtuelle par une approche énactive. L'éaction caractérise le fait que le monde résulte d'un couplage entre des entités autonomes qui le structurent et le façonnent de part leurs propres activités.

10.1.1 Les affordances de la mer

Le modèle de mer doit pouvoir être structuré et façonné par les **individus** qui vont l'expérimenter en réalité virtuelle. Nous avons choisi comme individus un marin, un océanographe et un infographiste. Ainsi, avant de faire des hypothèses scientifiques, nous avons étudié comment ces individus considèrent la mer.

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 et les déferlements, ils en déduisent des propriétés de l'environnement localisées sur le plan d'eau, à savoir les vents, les courants et la profondeur principalement. L'observation de ces phénomènes est la base des stratégies d'action, guidant le choix de la trajectoire à suivre en navigation. 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..

Le **océanographes** abordent la mer selon deux approches complémentaires. La première, théorique, s'appuie sur les lois physiques de conservations et l'hypothèse de continuité pour établir les équations de la dynamique des fluides. Si les équations de Navier-Stokes décrivent théoriquement les états de mer, elles ne permettent pas de simuler en temps réel une mer jeune présentant de nombreux déferlements. La seconde approche est plus phénoménologique et se fonde sur des résultats expérimentaux. les phénomènes principaux sont les groupes de vagues et les déferlements. Ces deux phénomènes interagissent entre eux et avec l'environnement (vent, courant, profondeur) pour générer un état de mer hétérogène, et l'on dispose de formules théoriques et/ou empiriques permettant de réaliser la conservation de l'action dans ces mécanismes d'interaction. La modélisation océanographique des états de mer est la superposition de plusieurs modèles physiques de phénomènes considérés indépendamment les uns des autres.

Les **infographistes** modélisent l'animation interactive de la mer principalement avec 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 avec 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 des groupes de vagues et des déferlements sur un plan d'eau hétérogène. Aucun modèle ne tient compte simultanément à l'échelle d'un plan d'eau hétérogène d'une dizaine de kilomètres carrés 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 ait du sens pour les marins et soit expérimentable par des océanographes.

Publications connexes : [Parenthoën et al. 03].

10.1.2 La méthode de modélisation énactive

Le modèle de mer doit pouvoir être structuré et façonné par la **méthode** qui va le générer pour son expérimentation en réalité virtuelle. Nous avons donc recherché une démarche permettant de modéliser de manière constructive un système complexe où de nombreux modèles interagissent de multiples façons.

Nous avons alors **conceptualisé** l'hypothèse énactive, fondée sur les principes d'autonomie, de perception active, d'enaction et de clôture sous causalité efficiente, pour proposer une méthode énactive pour la modélisation des systèmes complexes. Cette méthode s'articule autour des trois concepts suivants :

1. La modélisation est une activité humaine qui traduit implicitement, et doit traduire explicitement, une certaine praxis humaine.
2. Les phénomènes naturels sont modélisés *en tant qu'entités autonomes*, et ceci demande d'autonomiser les modèles associés.
3. Les interactions entre entités autonomes passent par la médiation d'un milieu structuré et façonné par les entités elles-mêmes.

Puis nous avons **formalisé** le modèle généré par cette méthode, afin de guider le modélisateur à concevoir des entités énactives représentant des phénomènes naturels. Cette formalisation d'un modèle énactif ne contient plus l'homme en tant qu'individu ; elle formalise le résultat de son activité de modélisation selon les principes de l'hypothèse énactive. L'homme n'est plus représenté que par la médiation de ses modèles. Le modèle formel d'organisation d'entités énactives est clos sous causalité efficiente et s'appuie sur le triplet — *expériences, phénomènes, prévisions* — devant être caractérisé pour chaque entité énactive faisant vivre le modèle d'un phénomène naturel dans la simulation. Pour

une entité énactive, ce triplet prend la forme de trois types d'objet actif, chaque type étant spécifié par un couple (paramètre, savoir-faire).

prédiction : (expérimentation, aisthesis),

action : (phénomène, praxis et savoir-faire internes)

adaptation : (prévision, poiesis).

Les entités, situées dans l'espace et le temps, interagissent *via* des balises expérimentales permettant de définir et de localiser les interactions dans l'espace et dans le temps. L'ensemble des *balises* d'une entité énactive correspond au milieu perceptif de cette entité. Les aisthesis structurent le milieu selon un principe prédictif, basé sur des résultats expérimentaux précédents. Les praxis agissent sur le milieu créé par les aisthesis en réalisant les expériences sur le milieu. Les poiesis récupèrent les résultats expérimentaux pour créer de nouvelles entités ou pour modifier les phénomènes. Les savoir-faire internes transforment les phénomènes eux-mêmes. Toutes ces fonctions demandent l'utilisation d'un mécanisme matériel comme support de leurs activités.

Enfin, nous avons **instrumenté** le modèle énactif en proposant l'expérimentation du modèle par une simulation des entités faisant vivre les modèles phénoménologiques en un système de réalité virtuelle, de sorte que le modèle soit expérimentable tout au long de sa création. Nous avons défini les interactions ordinateur-entité virtuelle par une représentation informatique des entités en énaction facilitant l'immersion participative de l'utilisateur, et l'invitant à respecter le formalisme du modèle énactif par la médiation d'un langage orienté *entités énactives*, s'appuyant sur le moteur de simulation d'objets actifs et de rendu 3D ARéVi, développé au CERV. Les activités des entités énactives sont ordonnancées par la machine qui les supporte selon des itérations asynchrones et chaotiques et leurs interactions sont assurées au sein de l'ordinateur par un médiateur des interactions, spécifié en tant qu'*objet actif*.

Publications connexes :

[Kerdelo et al. 02] [Parenthoën et al. 02a] [Parenthoën et al. 02b] [Parenthoën et al. 02c]

[Morineau et Parenthoën 03]

[Parenthoën et al. 04c] [Tisseau et al. 04a] [Tisseau et al. 04b]

10.1.3 Les entités énactives de la mer

Le modèle de mer doit pouvoir être structuré et façonné par les **entités** qui vont le simuler en réalité virtuelle. Nous avons appliqué la méthode de modélisation énactive pour l'animation de la mer en réalité virtuelle, selon les *affordances* communes aux marins et aux océanographes.

Les **phénomènes naturels** sont réifiés en des entités physiques dont nous avons spécifié les modèles d'action. Le groupe de vagues est la primitive principale pour l'animation géométrique et dynamique des points de la surface, en leur conférant, selon un modèle de Gerstner adapté aux groupes, une position orbitale, une vitesse orbitale et une normale à la surface. La liste des groupes influents et la présence d'une crête sont des propriétés utilisées par les déferlements pour déterminer l'activité des vagues dans un front actif. Le déferlement fabrique de la mousse dans son front actif et relaxe cette quantité de mousse exponentiellement dans sa phase passive. Il donne aux points expérimentaux une épaisseur de mousse et envoie des messages aux groupes ayant perdu de l'action dans l'activité d'un déferlement. La boîte à lettres d'un groupe peut alors être vue comme un point expérimental qui appartient à un espace topologique trivial et différent de l'espace topologique usuel de la surface de la mer, et qui est sensible aux messages des déferlements. Les vents synoptiques et locaux donnent la vitesse du vent en altitude, les courants donnent la vitesse du courant, et la bathymétrie donne la profondeur et les directions orthogonales aux isobathes et orientées dans le sens des profondeurs décroissantes. Ces quatre type d'entités permettent de spécifier interactivement un environnement hétérogène dynamique.

Les **interactions** entre ces phénomènes sont réifiées par les modèles de prédiction et d'adaptation des entités physiques, selon les notions de conservation de l'action, de stress du vent, de

réfraction des groupes, d'allongement et d'organisation des vagues. Le modèle obtenu se nomme IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) et permet l'animation interactive d'un plan d'eau hétérogène de plusieurs kilomètres carrés, en tant réel pour des états de mer modérés et en un temps tout à fait raisonnable pour les états de mer jeunes intensément forcé par le vent présentant de nombreux déferlements. L'ensemble des entités physiques et de leurs interactions forment alors le socle océanographique d'IPAS. Ce sont elles qui assurent la crédibilité physique de l'animation phénoménologique.

Publications connexes : [Parenthoën et al. 04a] [Parenthoën et al. 04b] [Parenthoën et al. 04c]

10.2 Perspectives

Loin d'être terminé, le travail effectué peut être poursuivi selon de multiples voies de recherche. A titre d'exemples, nous évoquons des directions possibles, selon l'axe humain des environnements virtuels de formation, selon l'axe physique de la modélisation de la mer et selon l'axe méthodologique pour la simulation informatique des systèmes complexes naturels.

10.2.1 Vers la formation maritime en environnement virtuel

La qualité, reconnue par les initiés à la mer, de la géométrie des vagues permet d'envisager d'utiliser IPAS comme moteur de simulation des états de mer dans un environnement virtuel de formation maritime. Les buts peuvent être l'entraînement à la micro-météo d'un site particulier difficilement accessible en dehors de la réalité virtuelle, la préparation à des opérations de sécurité maritime, l'apprentissage des dangers des hauts-fonds ou des courants contraires pour les petits navires.

Afin de permettre tout ceci, il faudra enrichir le modèle d'une texture pour les vagues de capillarité, faciliter la définition d'une situation micro-météorologique et attacher des cellules convectives à des nuages, et des effets du relief sur l'écoulement du vent.

10.2.2 Vers l'acceptation d'un modèle physique

Il reste beaucoup de travail à faire pour convaincre la communauté scientifique de la validité physique d'un tel modèle énactif.

Nous sommes en cours de validation océanographique du modèle IPAS. La démarche engagée consiste à vérifier que les évolutions spectrales des états de mer virtuels coïncident avec des données théoriques ou empiriques fournies par les océanographes, afin de déterminer le domaine de validité d'IPAS. On pourra tester et enrichir le modèle avec d'autres modèles de phénomènes océanographiques.

Ensuite, on pourra étudier le problème d'un couplage d'IPAS avec les techniques d'hydrodynamique existantes, voire d'aborder l'hydrodynamique par une approche énactive. On pourra transposer la méthode de modélisation pour d'autres phénomènes ondulatoires que ceux de l'océanographie, comme par exemple la propagation des ondes électromagnétiques, où l'on retrouve les notions de train d'ondes et de déferlement. On pourra également travailler sur les vagues courtes et les vagues capillaires, et leurs interactions avec des ondes électromagnétiques : que ce soit pour la lumière visible, pour des radars terrestres ou aéroportés, ou des observations satellites des états de mer.

Dans l'optique d'une validation formelle, on prouvera son équivalence formelle avec les méthodes numériques classiques de résolution des systèmes d'équations différentielles, lorsque les entités sont des interactions entre des volumes élémentaires devant respecter les mêmes lois physiques que celles ayant permis d'établir les équations.

10.2.3 Vers une méthodologie de modélisation

On en est pas encore au stade de la méthodologie, mais la modélisation énactive peut certainement s'appliquer en géosismique pour suivre, comprendre, prédire les tsunamis. On pourra également s'intéresser à l'air et caractériser un modèle atmosphérique de météorologie ou de micro-météorologie et le coupler avec le modèle océanographique. L'introduction dans un tel modèle météorologique de phénomènes comme le feu sera particulièrement intéressant pour la sécurité civile. Dans un tout autre domaine, l'approche énactive semble naturellement bien adaptée à la modélisation des systèmes distribués, où chaque ordinateur est de fait une entité autonome en énaction par des entrées/sorties. On pourra aussi utiliser la méthode de modélisation dans les domaines de la biochimie, la biologie, la psychologie, la pédagogie, la sociologie ou l'économie.

Bref, il faudra une armée de collaborateurs pour mener à bien tous ces projets.

Références

- [Kerdelo et al. 02] Kerdelo, S. and Abgrall, J., Parenthoën, M., et Tisseau, J. (2002). In vitro blood coagulation versus in silico blood coagulation : an individual-centered approach. In *IEEE Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, volume 1, page MA1B3, Hammamet, Tunisia.
- [Morineau et Parenthoën 03] Morineau, T. et Parenthoën, M. (2003). Une présentation de l'approche écologique en psychologie ergonomique. *Psychologie Française*, 48(2) :77–88.
- [Parenthoën et al. 02a] Parenthoën, M., Buche, C., et Tisseau, J. (2002a). Action learning for autonomous virtual actors. In *International Symposium on Robotics and Automation (ISRA)*, pages 549–554, Toluca, Mexico.
- [Parenthoën et al. 03] Parenthoën, M., Gourrion, J., et Tisseau, J. (2003). Les états de mer : un état de l'art ; le marin, l'océanographe et l'infographiste. In *Actes des 16^{ème} journées de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pages 129–140, Paris, France. Université de Paris VIII.
- [Parenthoën et al. 04a] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004a). IPAS : Interactive Phenomenological Animation of the Sea. In *International Society of Offshore and Polar Engineering (ISOPE)*, pages 2004–JSC–386, Toulon, France.
- [Parenthoën et al. 04b] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004b). IPAS : Interactive Phenomenological Animation of the Sea. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, à paraître.
- [Parenthoën et al. 04c] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004c). Visualisation de la mer : un épiphénomène maritime. In *Actes du Groupe de Travail Rendu et Visualisation (GTRendu)*, Poitier, France.
- [Parenthoën et al. 02b] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002b). Believable decision for virtual actors. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE-SMC)*, volume 3, page MP2R3, Tunisia.
- [Parenthoën et al. 02c] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002c). Perception active pour acteurs virtuels/active perception for virtual actors. In *Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA)*, pages 219–226, Montpellier, France.
- [Tisseau 01] Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle : autonomie in virtuo. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), document de synthèse, Université de Rennes 1. <http://www.enib.fr/~tisseau/>.
- [Tisseau et al. 04a] Tisseau, J., Parenthoën, M., Buche, C., et Reignier, P. (2004a). Comportements perceptifs d'acteurs virtuels autonomes – une application des cartes cognitives floues. *Technique et Science Informatiques*, à paraître.
- [Tisseau et al. 04b] Tisseau, J., Parenthoën, M., et Jourdan, T. (2004b). Animation phénoménologique d'un environnement virtuel — application à la mer —. In *Actes du Groupe de Travail Animation et Simulation (GTAS)*, Reims, France.

Glossaire

affordance : Concept de psychologie expérimentale. Mot anglais n'ayant pas de traduction officielle en français. Les affordances sont des informations fournies par l'environnement immédiat reliant perception et action, perçues sans effort cognitif et qui contrôlent les modalités de l'action [Gibson 79].

aisthesis : Mot grec. Faculté de sentir ou perception, mais aussi faculté de pressentir. Dans le cadre de la modélisation énactive, l'aisthesis est le rôle de prévision perceptive d'une entité qui va structurer le milieu qui lui est nécessaire pour réaliser ses expériences perceptives [chapitres 5_(concept) et 6_(modèle)].

autopoïèse : Capacité caractéristique du vivant à s'auto-produire continuellement. L'autopoïèse est le modèle d'organisation d'un réseau de processus de production de composants qui régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produit, et qui constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique (la structuration de cet espace) où il se réalise comme réseau [Varela 79].

causalité : Rapport de cause à effet. La philosophie d'Aristote distingue quatre causes, toujours présentes dans l'explication totale d'un effet : s'agissant d'une statue, le marbre est la cause matérielle, le projet est la cause formelle, le sculpteur est la cause efficiente et la représentation, la beauté ou la rémunération est la cause finale [Dictionnaire de l'Académie française¹].

clôture autopoïétique : Dans une organisation autopoïétique, certains des composants forment une frontière ou clôture opérationnelle, qui circonscrit le réseau de transformations tout en continuant de participer à son auto-production. La clôture autopoïétique désigne la capacité d'un système à s'auto-produire, en tant que système, le système se distinguant par l'organisation des composants de sa frontière et ceux de son intérieur [Varela 79].

clôture sous causalité efficiente : Propriété structurelle d'un système défini par des relations du type $A \xrightarrow{f} B$, où A est la cause matérielle de B et f la cause efficiente de B . Un système est dit clos sous causalité efficiente lorsque la génèse de chaque cause efficiente est elle-même expliquée comme le résultat d'une autre causalité efficiente en œuvre à l'intérieur du système [Rosen 91].

énaction : Nom du paradigme épistémologique qui se dégage de la théorie de l'autopoïèse appliquée aux neurosciences. Il vise à souligner la conviction selon laquelle la cognition, loin d'être la représentation d'un monde prédonné, est le résultat d'un couplage structurel entre un monde et un esprit, à partir de l'histoire des diverses actions qu'accomplit un être dans le monde [Maturana et Varela 80].

¹ Dictionnaire de l'Académie française, 9^{ème} édition, <http://www.academie-francaise.fr/dictionnaire>

hypothèse énactive : Paradigme épistémologique de la méthode de modélisation énactive des phénomènes naturels pour leur simulation en un système de réalité virtuelle. Ce paradigme s'appuie sur trois hypothèses principales :

1. La modélisation est une activité humaine qui traduit implicitement [Vallée 97], et doit traduire explicitement [Gibson 79], une certaine praxis humaine.
2. Les phénomènes naturels sont modélisés *en tant qu'entités autonomes* [Varela 79], et ceci demande d'autonomiser les modèles associés [Tisseau et Harrouet 03].
3. Les interactions entre entités autonomes passent par la médiation d'un milieu structuré par les entités elles-mêmes : selon les principes de *perception active* [Berthoz 97] et d'*énaction* [Maturana et Varela 80].

L'hypothèse énactive est présentée dans l'introduction de ce document et dans le chapitre sur les fondements conceptuels [chapitres 1 et 5].

modèle : Un modèle scientifique est une représentation, physique, graphique, ou plus généralement, mathématique, qui formalise les relations unissant les différents éléments d'un système, d'un processus, d'une structure, en vue de faciliter la compréhension de certains mécanismes ou de permettre la validation d'une hypothèse [Dictionnaire de l'Académie française²].

modèle énactif : Modèle scientifique d'un système complexe résultant de la formalisation de l'hypothèse énactive et dont les composants sont des entités autonomes interagissant par la médiation d'un milieu structuré et façonné par les entités elles-mêmes [chapitre 6].

modélisation : La modélisation est l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène, raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles [Le Moigne 90].

modélisation énactive : C'est une modélisation selon le paradigme de l'hypothèse énactive, dont les modèles respectent le formalisme d'un modèle énactif [chapitre 6].

perception active : La perception active est une simulation interne de l'action et une anticipation des conséquences de cette action simulée ; elle ne se résume pas à une interprétation des messages sensoriels [Berthoz 97].

poiesis : Mot grec. Fabrication, création, production ou réparation. Dans le cadre de la modélisation énactive, la poiesis est le rôle qui récupère le résultat d'une expérience perceptive ; elle modifie la zone sensorielle d'une entité ou crée une nouvelle entité [chapitres 5_(concept) et 6_(modèle)].

praxis : Mot grec. Action chargée d'un projet, activité en vue d'un résultat. Dans le cadre de la modélisation énactive, la praxis est le rôle d'action d'une entité qui va façonner le milieu en contribuant à la réalisation du protocole expérimental de la mesure d'une propriété du milieu [chapitres 5_(concept) et 6_(modèle)].

système complexe : La complexité d'un système provient essentiellement de la diversité des composants, de la diversité des structures et de la diversité des interactions mises en jeu. Un système complexe est alors *a priori* un système ouvert (apparition/disparition dynamique de composants), hétérogène (morphologie et comportements variés) et formé d'entités composites, mobiles et distribuées dans l'espace, en nombre variable dans le temps. Ces composants, parmi lesquels l'homme avec son libre arbitre joue souvent un rôle déterminant, peuvent être structurés en différents niveaux connus initialement ou émergeants au cours de leur évolution du fait des multiples interactions entre ces composants. Les interactions elles-mêmes peuvent être de nature différentes et opérer à différentes échelles spatiales et temporelles [Tisseau 01].

² ibid note 1

Références

- [Adabala et Manohar 02] Adabala, N. et Manohar, S. (2002). Techniques for realistic visualisation of fluids : a survey. *Computer Graphics*, 21(1) :65–81.
- [Albrechtsen et al. 01] Albrechtsen, H., Andersen, H., Bodker, S., et Pejtersen, A. (2001). Affordances in activity theory and cognitive systems engineering. Rapport Technique Riso-R-1287(EN), Riso National Labolatoty, Roskilde.
- [Andersen et al. 99] Andersen, G., Cisneros, J., Atchley, P., et Saidpour, A. (1999). Speed, size and edge-rate information for the detection of collision events. *Journal of Experimental Psychology : Human, Perception and Performance*, 25 :256–269.
- [Andronache et Scheutz 02] Andronache, V. et Scheutz, M. (2002). Contention scheduling : a viable action-selection mechanism for robotics ? In *Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference (MAICS)*. AAAI Press.
- [Apostel et al. 67] Apostel, L., de Broglie, L., Costa de Beauregard, O., Desanti, J., Dubarle, D., Goldmann, L., Granger, G., Gréco, P., Grize, J., Ladrière, J., Leray, J., Lichnerowicz, A., Mandelbrot, B., Matalon, B., Meyr, F., Nowinski, C., Papert, S., Piaget, J., et Ullmo, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*. Encyclopédie de la Pléiade, nrf Gallimard édition.
- [Arbib 72] Arbib, M. (1972). *The metaphorical brain : an introduction to cybernetics as artificial intelligence and brain theory*. Wiley Interscience, New York, USA.
- [Ardhuin 01] Arduhin, F. (2001). *Swell across the continental shelf*. Mémoire de Thèse, Naval Post-graduate School, Monterey, CA. http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/vagues/MODELES/crest_f.html.
- [Arnaldi 94] Arnaldi, B. (1994). Modèles physiques pour l'animation. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université de Rennes 1, Rennes, France.
- [Arneodo et al. 95] Arneodo, A., Argoul, F., Bracy, E., Elezgaray, J., et Muzy, J. (1995). *Ondelettes, multifractales et turbulences*. Diderot, Art et Sciences, Paris.
- [Asperti et Longo 91] Asperti, A. et Longo, G. (1991). *Categories, types and structures : an introduction to category theory for the working computer scientist*. Foundations of computing. MIT Press.
- [Badler et al. 93] Badler, N., Phillips, C., et Webber, B. (1993). *Simulating humans : computer graphics animation and control*. Oxford University Press, New York.
- [Bailly 03] Bailly, F. (2003). Invariances, symétries et brisures de symétries. In Boi, L., éditeur, *New Interactions of Mathematics with Natural Sciences and the Humanities*. Springer, Berlin.
- [Bailly et Longo 03] Bailly, F. et Longo, G. (2003). Objective and epistemic complexity in biology. In *International Conference on Theoretical Neurobiology*, pages 1–18, New Delhi, Inde. National Brain Research Centre.
- [Bailly et Longo 04a] Bailly, F. et Longo, G. (2004a). Causalités et symétries dans les sciences de la nature. Le continu et le discret mathématique. In Joinet, éditeur, *Logique et interaction : pour une géométrie de la cognition*, volume numéro spécial de la Revue de Philosophie, page A paraître. Presses de la Sorbonne.

- [Bailly et Longo 04b] Bailly, F. et Longo, G. (2004b). Espace, temps et cognition. A partir des mathématiques et des sciences de la nature. *Revue de Synthèse*, 1 :1–44.
- [Ballaz et al. 01] Ballaz, C., Marendaz, C., Chauvin, A., et Peyrin, C. (2001). L'orientation canonique comme déterminant de la saillance perceptive. *InCognito*, 22 :37–46.
- [Banner et al. 89] Banner, M., Jones, I., et Trinder, J. (1989). Wavenumber spectra of short gravity waves. *Fluid. Mech.*, 198 :321–344.
- [Banner et Phillips 74] Banner, M. et Phillips, O. (1974). On the incipient breaking of small scale waves. *Fluid. Mech.*, 65 :647–656.
- [Banner et Tian 98] Banner, M. et Tian, X. (1998). On the determination of the onset of breaking for modulating surface gravity water waves. *Fluid. Mech.*, 367 :107–137.
- [Barnett et Wilkerson 67] Barnett, T. et Wilkerson, J. (1967). On the generation of ocean wind waves as inferred from airborne radar measurements of fetch-limited spectra. *Marine Res.*, 25(3) :292–328.
- [Barto et Sutton 81] Barto, A. et Sutton, R. (1981). Landmark learning : an illustration of associative search. *Biological Cybernetics*, 42 :1–8.
- [Bates 92] Bates, J. (1992). Virtual reality, art, and entertainment. *Presence*, 1(1) :133–138.
- [Bates 94] Bates, J. (1994). The role of emotion in believable agents. *Communications of the ACM*, 37(7) :122–125.
- [Baudet 78] Baudet, G. (1978). Asynchronous iterative methods for multiprocessors. *Journal of the association for computing machinery*, 25 :226–244.
- [Beer 90] Beer, R. (1990). *Intelligence as adaptive behavior : an experiment in computational neuroethology*. Academic Press, San Diego.
- [Bennett 96] Bennett, A. (1996). Do animals have cognitive maps ? *Experimental Biology*.
- [Benney et Saffman 66] Benney, D. et Saffman, P. (1966). Nonlinear interactions of random waves in a dispersive medium. *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 289 :301–380.
- [Bernstein 67] Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movement*. Pergamon Press, New York.
- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Biesel 52] Biesel, F. (1952). *Gravity waves*, volume 521, chapitre Study of wave propagation in water of gradually varying depth, pages 243–253. National Bureau of Standards Circular.
- [Boden 94] Boden, M. (1994). Precis of the creative mind : myths and mechanisms. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(3) :519–570.
- [Bohr 22] Bohr, N. (1922). The structure of the atom. *Nobel Lectures, Physics 1922-1941* :7–43.
- [Boissier et al. 99] Boissier, O., Guessoum, Z., et Occello, M. (1999). Plateformes de développement de systèmes multi-agents. *Groupe ASA, Bulletin de l'AFIA* n°39.
- [Bonmarin 89] Bonmarin, P. (1989). Geometric properties of deep water breaking waves. *J. Fluid Mech.*, 209 :405–433.
- [Brenner et al. 98] Brenner, C., Marzo, I., Zamzami, N., Susin, S., Vieira, H., et Kroemer, G. (1998). Coopération mortelle entre la protéine pro-apoptotique Bax et le translocateur à adénine nucléotidique pour le contrôle mitochondriale de l'apoptose. *Med. Sci.*, 14 :1399–1401.
- [Bretherton et Garrett 69] Bretherton, F. et Garrett, C. (1969). Wave trains in inhomogeneous moving media. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 302 :529–554.
- [Brooks 91] Brooks, R. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47 :139–159.
- [Brunia 99] Brunia, C. (1999). Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, 101 :213–242.
- [Buche et al. 04] Buche, C., Querrec, R., De Loor, P., et Chevaillier, P. (2004). MASCARET : A pedagogical multi-agent system for virtual environment for training. *International Journal of Distance Education Technologies*, 2(4) :41–61.
- [Burdea et Coiffet 93] Burdea, G. et Coiffet, P. (1993). *La réalité virtuelle*. Hermès, Paris.
- [Buser et Imbert 75] Buser, P. et Imbert, M. (1975). *Neurophysiologie fonctionnelle*. Hermann, Paris.
- [Butz et Hoffmann 03] Butz, M. et Hoffmann, J. (2003). Anticipations control behavior : Animal behavior in an anticipatory learning classifier system. *Adaptive Behavior*, à paraître.

- [Buzsaki et al. 92] Buzsaki, G., Horvath, Z., Urioste, R., Hetke, J., et Wise, K. (1992). High frequency network oscillations in the hippocampus. *Science*, 256 :1025–1027.
- [Byrne et Russon 98] Byrne, R. et Russon, A. (1998). Learning by imitation : a hierarchical approach. *Behavioral and Brain Sciences*, 21 :667–721.
- [Cadoz 94] Cadoz, C. (1994). Le geste, canal de communication homme/machine : la communication instrumentale. *Technique et Science Informatiques*, 13(1) :31–61.
- [Carey 97] Carey, G. F. (1997). *Computational Grids : Generation, Adaption, and Solution*. Taylor & Francis.
- [Castro-Diaz et al. 95] Castro-Diaz, M., Hecht, F., et Mohammadi, B. (1995). New progress in anisotropic grid adaptation for inviscid and viscous flows simulations. Rapport Technique 2671, INRIA.
- [Chang et Liu 98] Chang, K.-A. et Liu, P. (1998). Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave. *Phys. Fluid.*, 10(1) :327–329.
- [Chapron et al. 95] Chapron, B., Liu, A., Peng, C., et Mollo-Christiensen, E. (1995). Higher order spectral and scale analysis of surface height fluctuations. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :151–173.
- [Chareix 01] Chareix, F. (2001). Le temps et sa mesure, quatre leçons : Aristote, Augustin, Huygens, Einstein. *Documents, Archives de Travail et Arguments (D.A.T.A.)*, 48 :1–66. <http://www.cerphi.net/public/data.htm>.
- [Chauvet 98] Chauvet, G. (1998). *La vie dans la matière - Le rôle de l'espace en biologie*. Champs Flammarion.
- [Chen et al. 99] Chen, G., Kharif, C., Zaleski, S., et Li, J. (1999). Two-dimensional Navier-Stokes simulation of breaking waves. *Physic of Fluids*, 11(1) :121–134.
- [Chen et Da Vitoria Lobo 95] Chen, J. et Da Vitoria Lobo, N. (1995). Toward interactive rate simulation of fluids with moving obstacles using Navier-Stokes equations. *Graphical Models and Image Processing*, 57(2) :107–116.
- [Chomsky 65] Chomsky, N. (1965). *Cartesian Linguistics*. Harper and Row, New York.
- [Christoffersen et al. 98] Christoffersen, K., Hunter, C., et Vicente, K. (1998). A longitudinal study of the effects of ecological interface design on deep knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 48 :729–762.
- [Cieutat et al. 01] Cieutat, J., Gonzato, J., et Guitton, P. (2001). A new efficient wave model for maritime training simulator. *Computer Graphics*, 17 :202–210.
- [Cieutat et al. 03] Cieutat, J., Gonzato, J., et Guitton, P. (2003). A general ocean waves model for ship design. In *Virtual Concept*, pages 187–194, Biarritz, France. ESTIA.
- [Cliff et al. 93] Cliff, D., Harvey, I., et Husbands, P. (1993). Explorations in evolutionary robotics. *Adaptive Behavior*, 2(1) :73–110.
- [Colby et al. 96] Colby, C., Duhamel, J., et Goldberg, M. (1996). Multiple parietal representations of space. In *Brain theory : Biological Basis and Computational Principles*, pages 37–52. Elsevier.
- [Conrad 06] Conrad, J. (1906). *Le Miroir de la mer*. Gallimard.
- [Cooper et Shallice 00] Cooper, R. et Shallice, T. (2000). Contention scheduling and the control of routine activities. *Cognitive Neuropsychology*, 17 :297–338.
- [Cornwell et al. 03] Cornwell, J., O'Brien, K., Silverman, B., et Toth, J. (2003). Affordance theory for improving the rapid generation, composability, and reusability of synthetic agents and objects. In *Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS)*, pages 50–63. SISO. <http://www.sisostds.org/conference/index.cfm?conf=03BRIMS>.
- [Coupez 96] Coupez, T. (1996). Parallel adaptive remeshing in 3d moving mesh finite element. In Soni, B. et al., éditeurs, *Numerical Grid Generation in Computational Field Simulation*, volume 1, pages 783–792. Mississippi University.
- [Courty et al. 03] Courty, N., Marchand, E., et Arnaldi, B. (2003). A new application for saliency maps : synthetic vision of autonomous actors. In *International Conference on Image Processing (ICIP)*, Barcelona, Spain. IEEE.

- [Cox et Munk 54a] Cox, C. et Munk, W. (1954a). Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter. *J. Opt. Soc. Am.*, 44 :838–850.
- [Cox et Munk 54b] Cox, C. et Munk, W. (1954b). Statistics of the sea surface derived from sun glitter. *J. Mar. Res.*, 13 :198–227.
- [Cozot 96] Cozot, R. (1996). *Environnement de simulation des systèmes physiques*. Mémoire de Thèse, Université de Rennes 1.
- [Craik 43] Craik, K. (1943). *The nature of explanation*. Cambridge University Press.
- [Dautray et Lions 87] Dautray, R. et Lions, J. (1987). *Analyse mathématique et calcul numérique pour les sciences et les techniques*. Masson, Paris.
- [Davenas et al. 88] Davenas, E., Beauvais, F., Arnara, J., Oberbaum, M., Robinzon, B., Miadonna, A., Tedeschi, A., Pomeranz, B., Fortner, P., Belon, P., Sainte-Laudy, J., Poitevin, B., et Benveniste, J. (1988). Human basophil triggered by very dilute antiserum against ige. *Nature*, 333 :816–818.
- [Davis et al. 87] Davis, S., Fox, A., et Neidjie, B. (1987). *Australia's Kakadu Man*. Terra Nova.
- [De Giacomo et al. 00] De Giacomo, G., Léspérance, Y., et Levesque, H. (2000). ConGolog : a concurrent programming language based on situation calculus. *Artificial Intelligence*, 121(1-2) :109–169.
- [Dennett 89] Dennett, D. (1989). The origins of selves. *Cogito*, 3 :163–173. Reprinted in Kolak D. and R. Martin, eds., *Self and Identity : Contemporary Philosophical Issues*, Macmillan, 1991.
- [Dennett 96] Dennett, D. (1996). *Kinds of Minds : Towards an Understanding of Consciousness*. Science Masters Series. Basic Books.
- [Devillers et al. 02] Devillers, F., Donikian, S., et Lamarche, F. (2002). A programming environment for behavioral animation. *Visualisation and Computer Animation*, 13 :263–274.
- [Dewey 1896] Dewey, J. (1896). The reflex arc concept in psychology. *Psychological Review*, 3 :357–370.
- [Di Marzo Serugendo et al. 96] Di Marzo Serugendo, G., Muhugusa, M., Tschudin, C., et Harms, J. (1996). Formalisation of agents and multi-agent systems – The special case of category theory – Working paper. Rapport Technique CUI-109, Centre Universitaire d’Informatique, Université de Genève.
- [Dias 03] Dias, F. (2003). Le déferlement. *Pour la Science*, 303.
- [Donelan et Drennan 96] Donelan, M. et Drennan, W. (1996). Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves. *Journal of Physical Oceanography*, 26(9) :1901–1914.
- [Donelan et Yuan 94] Donelan, M. et Yuan, Y. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre Physical description of wave evolution ; wave dissipation by surface processes, pages 143–155. Cambridge University Press.
- [Doyle 02] Doyle, P. (2002). Believability though context : using "knowledge in the world" to create intelligent characters. In *International Joint Conference on Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*, pages 342–349. ACM Press.
- [Doyle et Hayes-Roth 97] Doyle, P. et Hayes-Roth, B. (1997). Agents in annotated worlds. Rapport Technique KSL-97-09, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University.
- [Drennan et Donelan 96] Drennan, W. et Donelan, M. (1996). Nonlinear coalescing wave groups. In Donelan, M., Hui, W., et Plant, W., éditeurs, *Symposium on The Air Sea Interface*, pages 127–132.
- [Drennan et al. 98] Drennan, W., Graber, H., Donelan, M., et Terray, E. (1998). Directional wave measurements from the ASIS (Air-Sea Interaction Spar) buoy. In *Oceans*, pages 414–418.
- [Droulez et Berthoz 88] Droulez, J. et Berthoz, A. (1988). Servo-controlled (conervative) versus topological (projective) modes of sensory motor control. In Bles et Brandt, T., éditeurs, *Disorders of Posture and Gait*, pages 83–97. Elsevier, Amsterdam.
- [Dubos 73] Dubos, R. (1973). *L'homme et l'adaptation au milieu*. Payot, Paris.
- [Duchon et al. 98] Duchon, A., Warren, W., et Kaelbling, L. (1998). Ecological robotics. *Adaptive Behavior*, 6(3/4) :471–507.

- [Duchon et Warren 94] Duchon, A. P. et Warren, W. H. (1994). Robot navigation from a gibsonian viewpoint. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pages 2272–2277, San Antonio, TX, USA.
- [Duncan 81] Duncan, J. (1981). An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil. *Proc. Roy. Soc. London*, 337 :331–348.
- [Duval et al. 97] Duval, T., Morvan, S., Reignier, P., Harroeut, F., et Tisseau, J. (1997). ARéVi : une boite à outils 3d pour des applications coopératives. *Revue Calculaterus Parallèles*, 9(2) :239–250.
- [Ehresmann et Vanbremersch 87] Ehresmann, A. et Vanbremersch, J. (1987). Hierarchical evolutive systems. *Bul. Math. Bio.*, 49(1) :13–50.
- [Ehresmann et Vanbremersch 02] Ehresmann, A. et Vanbremersch, J. (2002). Emergence processes up to consciousness using the multiplicity principle and quantum physics. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 627 :221–233.
- [Enright et al. 02] Enright, D., Marschner, S., et Fedkiw, R. (2002). Animation and rendering of complex water surfaces. *ACM Trans. on Graphics (SIGGRAPH 2002 Proceedings)*, 21 :736–744.
- [Escande 99] Escande, J. (1999). *La vie, mystère et raison - Comprendre l'infection, comprendre le cancer*. Les Empêcheurs de Penser en Rond.
- [Fechner 1860] Fechner, G. (1860). *Elemente der psychophysik*. Leipzig : Breitkopf und Härtel.
- [Fedkiw 03] Fedkiw, R. (2003). Simulating natural phenomena for computer graphics. In Osher, S. et Paragios, N., éditeurs, *Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics*, pages 461–479. Springer Verlag, New York.
- [Ferber 95] Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris.
- [Ferber 97] Ferber, J. (1997). Les systèmes multi-agents : un aperçu général. *Technique et Science Informatique*, 16(8) :979–1012.
- [Ferber et Müller 96] Ferber, J. et Müller, J. (1996). Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, pages 72–79, Kyoto.
- [Fisher 94] Fisher, M. (1994). A survey of concurrent metatem : the langage and its applications. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 827 :480–505.
- [Flach et Holden 98] Flach, J. et Holden, J. (1998). The reality of experience : Gibson's way. *Presence*, 7(1) :90–95.
- [Fodor 75] Fodor, J. (1975). *The Language of Thought*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Fourier 1822] Fourier, J. (1822). *Théorie analytique de la chaleur*. Firmin Didot, Père et Fils, Paris.
- [Fournier et Reeves 86] Fournier, A. et Reeves, W. (1986). A simple model of ocean wave. *Computer Graphics*, 13 :75–84.
- [Fuchs 96] Fuchs, P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. Presses de l'Ecole des Mines, Paris, AJIIMD édition.
- [Fuchs et al. 03] Fuchs, P., Arnaldi, B., et Tisseau, J. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1, chapitre La réalité virtuelle et ses applications. Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- [Gabor 46] Gabor, D. (1946). Theory of communication. *Inst. Electr. Engeg.*, 93(3) :429–457.
- [Gallese 00] Gallese, V. (2000). The inner sense of action : agency and motor representations. *Journal of Consciousness Studies*, 7(10) :23–40.
- [Gardner 85] Gardner, H. (1985). *The mind's new science : a history of the cognitive revolution*. Basic Book Inc., New York.
- [Gareau 97] Gareau, A. (1997). *Utilisation des systèmes de particules pour la simulation de phénomènes naturels, présentation d'une architecture permettant l'intégration de systèmes animés hétérogènes*. Mémoire de Thèse, Université de Lyon 1.
- [Gaussier et al. 02] Gaussier, P., Revel, A., Banquet, J., et Babeau, V. (2002). From view cells and place cells to cognitive map learning : processing stages of the hippocampal system. *Biological Cybernetics*, 86 :15–28.

- [George Lee 02] George Lee, C. (2002). Structure and learning of self-adaptative neuro-fuzzy systems. In *International Symposium on Robotics and Automation (ISRA) – Toward metabotics and novel fields and areas*, pages 5–6, Toluca, Mexico.
- [Gerard 60] Gerard, R. (1960). Neurophysiology : an integration (molecules, neurons and behavior). In Field, J., Magoun, H., et Hall, V., éditeurs, *Handbook of Physiology, section 1 : Neurophysiology*, volume 3, chapitre 81, pages 1919–1965. American Physiological Society, Washington DC.
- [Gerstner 1804] Gerstner, F. (1804). *Theorie der wellen*. Abhandlungen der koniglichen bominschen. Gesellschaft der Wissenschaften, Prague.
- [Gibson 58] Gibson, J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, 49 :182–194.
- [Gibson 77] Gibson, J. (1977). The theory of affordances. In Shaw, R. et Bransford, J., éditeurs, *Perceiving, acting and knowing - toward an ecological psychology*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Gibson 79] Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, London.
- [Gomez 00] Gomez, M. (2000). Interactive simulation of water surfaces. In *Games Programming Gems*, pages 185–193. Charles River Media.
- [Gonzato et Saëc 00] Gonzato, J. et Saëc, B. (2000). On modelling and rendering ocean scenes. *Computeur Animation*, 11(1) :27–37.
- [Grilli et al. 01] Grilli, S., Guyenne, P., et Dias, F. (2001). A fully non-linear model for the three-dimensional overtuning waves over arbitrary bottom. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 35 :829–867.
- [Grossmann et Morlet 84] Grossmann, A. et Morlet, J. (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, 15(4) :723–736.
- [Guessoum et Briot 99] Guessoum, Z. et Briot, J. (1999). From active objects to autonomous agents. *IEEE Concurrency*, 7(3) :68–76.
- [Guilbaud 02] Guilbaud, C. (2002). *Modélisation et visualisation de phénomènes naturels simulé par système physique particulaire*. Mémoire de Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG).
- [Guillot et Meyer 00] Guillot, A. et Meyer, J. (2000). From sab94 to sab2000 : what's new, animat ? In *From Animals to Animats (SAB)*, volume 6, pages 1–10.
- [Guyon et al. 91] Guyon, E., Hulin, J., et Petit, L. (1991). *Hydrodynamique physique*. InterEditions/Editions du CNRS.
- [Hafez et Oshima 98] Hafez, M. M. et Oshima, K., éditeurs (1998). *Computational Fluid Dynamics Review 1998*. World Scientific Pub Co.
- [Harrouet 00] Harrouet, F. (2000). *oRis : s'immerger par le langage pour le prototypage d'univers virtuels à base d'entités autonomes*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France.
- [Harrouet et al. 99] Harrouet, F., Reignier, P., et Tisseau, J. (1999). Multiagent systems and virtual reality for interactive prototyping. In *(ISAS)*, volume 3, pages 50–57, Orlando (USA).
- [Harrouet et al. 02] Harrouet, F., Tisseau, J., Reignier, P., et Chevailler, P. (2002). oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents. *Technique et Science Informatiques (RSTI-TSI)*, 21(4) :499–524.
- [Hasselmann 62] Hasselmann, K. (1962). On the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, part 1 : general theory. *Fluid. Mech.*, 12 :481–501.
- [Hasselmann et al. 73] Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., et Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, A8(12) :1–95.

- [Hasselmann et Hasselmann 85] Hasselmann, S. et Hasselmann, K. (1985). 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.
- [Hasselmann et al. 85] Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., et Barnett, T. (1985). 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.
- [Hauser et al. 00] Hauser, D., Dupuis, H., Durrieu De Madron, X., Estournel, C., Flamant, C., Pelon, J., Queffeulou, P., et Lefèvre, J. (2000). La campagne FETCH : étude des échanges océan/atmosphère dans les conditions côtières du Golfe du Lion. *La Météorologie*, 8(29) :14–31.
- [Havelange et al. 02] Havelange, V., Lenay, C., et Stewart, J. (2002). Les représentations : mémoire externe et objets techniques. *Intellectica*, 35 :115–129.
- [Hayes-Roth et Van Gent 96] Hayes-Roth, B. et Van Gent, R. (1996). Story-making with improvisational puppets and actors. Rapport Technique KSL-96-05, Stanford University, Stanford, CA, USA.
- [Hebb 49] Hebb, D. (1949). *The organization of behaviour*. John Wiley and Sons, New York, USA.
- [Heidegger 64] Heidegger, M. (1964). "Zur Sache des Denkens", Translated as "On Time and Being" by Joan Stambaugh. Contains : "Time and Being", "The End of Philosophy and the Task of Thinking", and "My Way to Phenomenology". New York : Harper and Row, 1972.
- [Heinze et Gross 01] Heinze, A. et Gross, H. (2001). Anticipation-based control architecture for a mobile robot. In *International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN)*, pages 899–905.
- [Herrmann et Luding 98] Herrmann, H. et Luding, S. (1998). Review article : Modeling granular media on the computer. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 10(4) :189–231.
- [Hinsinger et al. 02] Hinsinger, D., Neyret, F., et Cani, M.-P. (2002). Interactive animation of ocean waves. In *Symposium on Computer Animation (SCA)*, pages 161–166.
- [Hoc et Amalberti 95] Hoc, J. et Amalberti, R. (1995). Diagnosis : some theoretical questions raised by applied research. *Current Psychology of Cognition*, 14 :73–101.
- [Hokari 01] Hokari, M. (2001). Gurindji perspectives on history : body, place, memory and mobility. In *The Power of Knowledge, the Resonance of Tradition - Indigenous Studies (AIATSIS)*, page C6 :3, Australian National University, Canberra. Australian Institute of Aboriginal and Torres Strait Islander Studies. <http://www.aiatsis.gov.au/rsrch/conf2001/PAPERS/HOKARI.pdf>.
- [Hubel et Wiesel 62] Hubel, D. et Wiesel, T. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*, 160 :106–154.
- [Husserl 36] Husserl, H. (1936). Die Krisis der europäischen wissenschaften und die transzentale phänomenologie : Eine einleitung in die phänomenologische philosophie. *Philosophia*, 1 :77–176.
- [Iachkine 00] Iachkine, P. (2000). Étude du plan d'eau de Sydney : identification des courants de marées et des effets du relief dans la baie de Sydney. Rapport technique, Ecole Française de Voile (ENV).
- [Iglesias et al. 98] Iglesias, C., Garijo, M., et Gonzalez, J. (1998). A survey of agent-oriented methodologies. In *Proceedings ATAL*, pages 317–330.
- [Jacob 70] Jacob, F. (1970). *La Logique du vivant, une histoire de l'hérité*. Gallimard, Paris.
- [Janssen 94] Janssen, P. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre Physical description of wave evolution ; wave growth by wind, pages 71–112. Cambridge University Press.
- [Janssen 03] Janssen, P. (2003). Nonlinear four wave interactions and freak waves. In Abstract, G. R., éditeur, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, volume 5, page 02768, Nice, France.
- [Jensen et Golias 01] Jensen, L. et Golias, R. (2001). Deep-water animation and rendering. In *Game Developer 's Conference (Gamasutra)*.
- [Jeschke et al. 03] Jeschke, S., Birkholz, H., et Schmann, H. (2003). A procedural model for interactive animation of breaking ocean waves. *Computer Graphics Posters Proceedings*.

- [Kantorovich et Akilov 64] Kantorovich, L. et Akilov, G. (1964). *Functional Analysis in Normed Spaces*. Pergamon Press, Elmsford, New York.
- [Kass et Miller 90] Kass, M. et Miller, G. (1990). Rapid, stable fluid dynamics for computer graphics. *Computer Graphics*, 24(4) :49–57.
- [Kerdelen et al. 02] Kerdelen, S. and Abgrall, J., Parenthoën, M., et Tisseau, J. (2002). In vitro blood coagulation versus in silico blood coagulation : an individual-centered approach. In *IEEE Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, volume 1, page MA1B3, Hammamet, Tunisia.
- [Kesner et Rolls 01] Kesner, R. et Rolls, E. (2001). Role of long-term synaptic modification in short-term memory. *Hippocampus*, 11 :240–250.
- [Klinger et Dyer 76] Klinger, A. et Dyer, C. (1976). Experiments on picture representation using regular decomposition. *Computer Graphics and Image Processing*, 5 :68–105.
- [Kodjabachian et Meyer 98] Kodjabachian, J. et Meyer, J. (1998). Evolution and development of neural controllers for locomotion, gradient-following, and obstacle-avoidance in artificial insects. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9 :796–812.
- [Koestler 67] Koestler, A. (1967). *The ghost in the machine*. Hutchinson, London.
- [Komen et al. 94] Komen, G., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., et Janssen, P. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press.
- [Komen et Hasselmann 94] Komen, G. et Hasselmann, K. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*, chapitre The action balance equation and the statistical description of wave evolution, pages 5–48. Cambridge University Press.
- [Kosko 86] Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24 :65–75.
- [Lahlou 00] Lahlou, S. (2000). Attracteurs cognitifs et travail de bureau. *Intellectica*, 30 :75–113.
- [Lamb 32] Lamb, H. (1932). *Hydrodynamics*, volume 6. Dover, New York.
- [Landau et Lifshitz 60] Landau, L. et Lifshitz, E. (1960). *Mechanics*. Pergamon Press, Addison-Wesley édition.
- [Lawvere 66] Lawvere, F. (1966). The category of categories as a foundation for mathematics. In *La Jolla Conference on Categorical Algebra*, pages 1–20. Springer.
- [Le Moigne 77] Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris.
- [Le Moigne 90] Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Collection AFCET Systèmes, Bordas, Paris.
- [Lenay et Sebbah 01] Lenay, C. et Sebbah, F. (2001). La constitution de la perception spatiale. approches phénoménologique et expérimentale. *Intellectica*, 32.
- [Liakos 99] Liakos, T. (1999). *Weak imposition of boundary conditions in the Stokes problem*. Mémoire de Thèse, University of Pittsburg, PA.
- [Lindblom et Ziemke 03] Lindblom, J. et Ziemke, T. (2003). Social situatedness of natural and artificial intelligence : Vygotsky and beyond. *Adaptive Behavior*, 11(2) :to appear.
- [Lindstrom et al. 96] Lindstrom, P., Koller, D., Ribarsky, W., Hodges, L., Faust, N., et Turner, G. (1996). Real-time continuous level of detail rendering of height fields. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, 30 :109–118.
- [Lisman et Idiart 95] Lisman, J. et Idiart, M. (1995). Storage of short term memories in oscillatory subcycles. *Science*, 267 :1512–1515.
- [Liu et al. 95] Liu, A., Peng, C., Chapron, B., et Mollo-Christiensen, E. (1995). Direction and magnitude of wind stress over wave groups observed during SWADE. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :175–194.
- [Lombardo et Puech 95] Lombardo, J. et Puech, C. (1995). Modélisation d'objets déformables avec un système de particules orientées. *Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 10(4) :337–354.
- [Longo 97] Longo, G. (1997). De la Géométrie à la Cognition. 1/ Introduction : est-ce que les calamars font de la Géométrie? Compte rendu de [Prochiantz 97], 2/ Géométrie, Mouvement, Espace : Cognition et Mathématiques. À partir de [Berthoz 97]. <ftp://ftp.di.ens.fr/pub/users/longo/PhilosophyAndCognition/cogni-geometrie.pdf>. 1/ Soumis à *Les Archives de la Philosophie*, 2/ Soumis à *Intellectica*.

- [Longo 02a] Longo, G. (2002a). Laplace, Turing et la géométrie impossible du "jeu de l'imitation" : aléas, déterminisme et programmes dans le test de Turing. *Intellectica*, 35(2) :131–162.
- [Longo 02b] Longo, G. (2002b). Réponse : continu *vs.* discret, mathématiques et régimes de causalité. *Intellectica*, 35(2) :199–215.
- [Longo 03] Longo, G. (2003). Computer modelling and natural phenomena. *SIGSOFT Software Engineering Notes*, 28(5) :1–5.
- [Longuet-Higgins 57] Longuet-Higgins, M. (1957). 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.
- [Longuet-Higgins 69] Longuet-Higgins, M. (1969). On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves. *Proc. Roy. Soc. London*, A310 :151–159.
- [Longuet-Higgins 86] Longuet-Higgins, M. (1986). Wave group statistics. In Monahan, E. et Mac Nio-cail, G., éditeurs, *Oceanic Whitecaps*, pages 15–35. Reidel, D. Publishing Compagny.
- [Longuet-Higgins 94] Longuet-Higgins, M. (1994). A fractal approach to breaking waves. *Journal of Physical Oceanography*, 24 :1834–1838.
- [Loviscach 03] Loviscach, J. (2003). Complex water effects at interactive frame rates. *Computer Graphics (WSCG)*, 11(1).
- [Lubin et al. 03] Lubin, P., Vincent, S., Caltagirone, J., et Abadie, S. (2003). Three-dimensional numerical simulation of plunging breaking waves. In *Euromech Fluid Mechanics Conference*.
- [Luciani 00] Luciani, A. (2000). From granular avalanches to fluid turbulences through oozing pastes - a mesoscopic physically-based particle model. In *GraphiCon*, volume 10, pages 282–289, Moscou, Russie.
- [Lévy 91] Lévy, P. (1991). *L'idéographie dynamique. Vers une imagination artificielle ?* La Découverte.
- [Mac Lane et Birkhoff 67] Mac Lane, S. et Birkhoff, G. (1967). *Algebra*. Mac Millan, New York.
- [Machrouh et al. 01] Machrouh, Y., Liénard, J., et Tarroux, P. (2001). Multiscale feature extraction from visual environment in an active vision system. In *Fourth International Workshop on Visual Form (VF)*, pages 388–397, Capri, Italy. Springer Verlag.
- [Maffre et al. 01] Maffre, E., Tisseau, J., et Parenthoën, M. (2001). Virtual agents self-perception in virtual storytelling. In *International Conference on Virtual Storytelling (ICVS)*, numéro 2197 in *Lecture Notes in Computer Science*, pages 155–158. Springer.
- [Maillot et al. 93] Maillot, J., Yahia, H., et Verroust, A. (1993). Interactive texture mapping. *Computer Graphics (SIGGRAPH)*, 27 :27–34.
- [Mandelbrot 67] Mandelbrot, B. (1967). Some noises with 1/f spectrum, a bridge between direct current and white noise. *IEEE Transactions on Information Theory*, 13 :289–298.
- [Mandelbrot 75] Mandelbrot, B. (1975). *Les objets fractals - forme, hasard et dimension*. Flammarion, Paris.
- [Mandelbrot et Ness 68] Mandelbrot, B. et Ness, J. (1968). Fractional brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*, 10 :422–437.
- [Marr 79] Marr, D. (1979). Representing and computing visual information. In Winston, P. et Brown, R., éditeurs, *Artificial Intelligence : An MIT Persepctive*, volume 2 de *Understanding Vision, Manipulation, Computer Design, Symbol Manipulation*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Marvie 04] Marvie, J. (2004). *Visualisation Interactive d'Environnements Virtuels Complexes à travers des Réseaux et sur des Machines à Performances Variables*. Mémoire de Thèse, Université de Rennes, IRISA/SIAMES.
- [Mastin et al. 87] Mastin, G., Watterger, P., et Mareda, J. (1987). Fourier synthesis of ocean scenes. *Computer Graphics*, 14 :16–23.
- [Mataric 02] Mataric, M. (2002). Visuo-motor primitives as a basis for learning by imitation : linking perception to action and biology to robotics. In Dautenhahn, K. et Nehaniv, C., éditeurs, *Imitation in Animals and Artifacts*, pages 392–422. MIT Press.
- [Mateas 02] Mateas, M. (2002). *Interactive drama, art, and artificial intelligence*. Rapport technique, cmu-cs-02-206, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.

- [Maturana 87] Maturana, H. (1987). Everything said is said by an observer. In Thompson, W., éditeur, *Gaia : A way of knowing*, pages 65–82. Lindisfarne Press, Hudson, NY.
- [Maturana et Varela 80] Maturana, H. et Varela, F. (1980). *Autopoiesis and cognition : The realization of the living*. Reidel, D., Boston.
- [Maturana et Varela 87] Maturana, H. et Varela, F. (1987). *The tree of knowledge : the biological roots of human understanding*. Shambhala Press, Boston.
- [Max 81] Max, N. (1981). Vectorized procedural models for natural terrain : waves and islands in the sunset. *Computer Graphics*, 8 :317–324.
- [Mayençon 92] Mayençon, R. (1992). *Météorologie marine*. EMOM, Edilarge.
- [McCulloch 65] McCulloch, W. (1965). *Embodiments of mind*. MIT Press, Cambridge, MA, USA. For a review by Seymour Papert, see <http://www.papert.org/articles/embodiments.html>.
- [Meltzoff 95] Meltzoff, A. (1995). Understanding the intentions of others : re-enactement of intended acts by 18-month-old children. *Developmental Psychology*, 31 :838–850.
- [Melville et Matusov 02] Melville, W. et Matusov, P. (2002). Distribution of breaking waves at the ocean surface. *Nature*, 417 :58–63.
- [Merleau-Ponty 45] Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard, Paris.
- [Mestre 02] Mestre, D. (2002). Interactions entre réalité virtuelle et neurosciences comportementales. In *Virtual Concept*, Biarritz, France. ESTIA.
- [Meyer et Guillot 91] Meyer, J. et Guillot, A. (1991). Simulation of adaptative behavior in animats : review and prospect. In *From Animals To Animats (SAB'91)*, volume 1, pages 2–14.
- [Meyers et al. 93] Meyers, S., Kelly, B., et O'Brien, J. (1993). An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology : with application to the dispersion of Yanai waves. *Monthly Weather Review*, 121(10) :28–58.
- [Miellou 74] Miellou, J. (1974). Itérations chaotiques à retard, étude de la convergence dans le cas d'espace partiellement ordonnés. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série A*, 278 :957–960.
- [Miles 57] Miles, J. (1957). On the generation of surface waves by shear flows. *Fluid Mechanics*, 3 :185–204.
- [Minsky 85] Minsky, M. (1985). *The society of mind*, chapitre 5.) Individualité : 5.1) Causalité circulaire, page 76. Simon and Schuster.
- [Mitsuyasu 68] Mitsuyasu, H. (1968). On the growth of the spectrum of wind-generated waves. 1. *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, 16 :251–264.
- [Mitsuyasu 69] Mitsuyasu, H. (1969). On the growth of the spectrum of wind-generated waves. 2. *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, 17 :235–243.
- [Moitessier 71] Moitessier, B. (1971). *La longue route*. Arthaud.
- [Mollo-Christensen et Ramamonjariisoa 82] Mollo-Christensen, E. et Ramamonjariisoa, A. (1982). Subharmonic transitions and group formation in a wind wave field. *Journal of Geophysical Research*, 87(C8) :5699–5717.
- [Monahan et Zietlow 69] Monahan, E. et Zietlow, C. (1969). Laboratory comparisons of fresh-water and salt-water whitecaps. *Geophys. Res.*, 74 :6961–6966.
- [Moreau 03] Moreau, G. (2003). Interaction in virtual environments. In *Virtual Concept*, pages 264–270, Biarritz, France. ESTIA.
- [Morin 77] Morin, E. (1977). *La méthode, Tome 1 : la nature de la nature*. Editions du Seuil, Paris.
- [Morin 90] Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. ESF Editeur, Paris.
- [Morineau 00] Morineau, T. (2000). Context effect on problem solving during a first immersion in virtual environment. *Current Psychology of Cognition*, 14 :73–101.
- [Morineau 04] Morineau, T. (2004). L'émergence d'une perspective écologique en psychologie ergonomique, à ravers la distinction entre différents niveaux de contrôle cognitif dans l'activité. In *Colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCo)*, pages J3–S1, Compiègne, France.
- [Morineau et al. 01] Morineau, T., Chedmail, P., et Parenthoën, M. (2001). An affordance-based model to support simulation in virtual environment. In *Virtual Reality International Conference (VRIC)*, pages 19–26, Laval, France.

- [Morineau et al. 03] Morineau, T., Hoc, J.-M., et Denecker, P. (2003). Cognitive levels of control in air-traffic radar controller activity. *International Journal of Aviation Psychology*, 13 :107–130.
- [Morineau et Parenthoën 03] Morineau, T. et Parenthoën, M. (2003). Une présentation de l'approche écologique en psychologie ergonomique. *Psychologie Française*, 48(2) :77–88.
- [Newell et Simon 72] Newell, A. et Simon, H. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall.
- [Nwana et al. 99] Nwana, H., Nduma, D., Le, L., et Collis, J. (1999). ZEUS : a toolkit for building distributed multiagent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 13(1-2) :129–185.
- [Padberg et al. 92] Padberg, J., Ehrig, H., et Ribeiro, L. (1992). *Recent trends in data type specification*, volume LNCS 785, chapitre Algebraic Petri nets – Petri nets revisited, pages 188–206. Springer-Verlag.
- [Paillard 86] Paillard, J. (1986). Système nerveux et fonction d'organisation. In Piaget, J., Mounoud, P., et Bronckart, J., éditeurs, *Encyclopédie de la Pléïade*, chapitre Psychologie, pages 1378–1441. Gallimard, Paris.
- [Paillard 90] Paillard, J. (1990). Réactif et prédictif : deux modes de gestion de la motricité. In *Pratiques sportives et modélisation du geste*, pages 13–56. Nougier, V. and Bianch, J.P., Grenoble, UFRAPS.
- [Paillard 94] Paillard, J. (1994). L'intégration sensori-motrice et idéomotrice. In Richelle, M., Requin, J., et Robert, M., éditeurs, *Traité de psychologie expérimentale*, chapitre III.6, pages 925–961. Press Universitaires de France, Paris.
- [Parenthoën et al. 01] Parenthoën, M., Reignier, P., et Tisseau, J. (2001). Put fuzzy cognitive maps to work in virtual worlds. In *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz-IEEE)*, volume 1, pages 252–255, Melbourne, Australia.
- [Parenthoën 02] Parenthoën, M. (2002). Autonomie et perception proactive pour des acteurs virtuels. In *Journée d'Information sur la Commande et le Diagnostic (JICD)*, Rennes, France. INSA.
- [Parenthoën et al. 02a] Parenthoën, M., Buche, C., et Tisseau, J. (2002a). Action learning for autonomous virtual actors. In *International Symposium on Robotics and Automation (ISRA)*, pages 549–554, Toluca, Mexico.
- [Parenthoën et al. 03] Parenthoën, M., Gourrion, J., et Tisseau, J. (2003). Les états de mer : un état de l'art ; le marin, l'océanographe et l'infographiste. In *Actes des 16^{ème} journées de l'Association Française d'Informatique Graphique*, pages 129–140, Paris, France. Université de Paris VIII.
- [Parenthoën et al. 04a] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004a). IPAS : Interactive Phenomenological Animation of the Sea. In *International Society of Offshore and Polar Engineering (ISOPE)*, pages 2004–JSC–386, Toulon, France.
- [Parenthoën et al. 04b] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004b). IPAS : Interactive Phenomenological Animation of the Sea. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, à paraître.
- [Parenthoën et al. 04c] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004c). Visualisation de la mer : un épiphénomène maritime. In *Actes du Groupe de Travail Rendu et Visualisation (GTRendu)*, Poitier, France.
- [Parenthoën et al. 01] Parenthoën, M., Morineau, T., et Tisseau, J. (2001). Affordances implemented by fuzzy cognitive maps for believable agents ; virtual helmsman prototyping by sailing affordances. In *European Operational Research Conference (EURO)*, page 146, Rotterdam, NetherLand.
- [Parenthoën et al. 02b] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002b). Autonomy and proactive perception for virtual actors. In *Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI)*, volume 13, pages 359–364, Orlando, Florida.
- [Parenthoën et al. 02c] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002c). Believable decision for virtual actors. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE-SMC)*, volume 3, page MP2R3, Tunisia.

- [Parenthoën et al. 02d] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002d). Perception active pour acteurs virtuels/active perception for virtual actors. In *Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA)*, pages 219–226, Montpellier, France.
- [Parunak 99] Parunak, H. (1999). *Multiagent systems : a modern approach to distributed artificial intelligence*, chapitre Industrial and practical application of DIA, pages 377–421. MIT Press, Cambridge, weiss, g. édition.
- [Peachey 86] Peachey, D. (1986). Modeling waves and surf. *Computer Graphics*, 20(4) :65–74.
- [Peeters 98] Peeters, H. (1998). Fiche de lecture sur *l'idéographie dynamique* de pierre lévy. Groupe de Recherche en Médiation des Savoirs, <http://www.comu.ucl.ac.be/reco/grems/hugoweb/levy91.htm>.
- [Peng et al. 95] Peng, C., Liu, A., Chapron, B., et Mollo-Christiensen, E. (1995). Wavelet analysis of sea surface flux and wave by swell. *Global Atmosphere and Ocean System*, 3 :195–208.
- [Perlin 85] Perlin, K. (1985). An image synthesizer. *Computer Graphics*, 12 :287–296.
- [Phillips 58] Phillips, O. (1958). The equilibrium range in the spectrum of wind-generated water waves. *Fluid Mechanics*, 4 :426–434.
- [Phillips 77] Phillips, O. (1977). *The dynamics of the upper ocean*. Cambridge University Press.
- [Phillips 85] Phillips, O. (1985). Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. *Fluid Mechanics*, 156 :505–531.
- [Piaget 67] Piaget, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*, chapitre Nature et méthodes de l'épistémologie, pages 1–132. Encyclopédie de la Pléiade, nrf Gallimard édition.
- [Piaget et Inhelder 75] Piaget, J. et Inhelder, B. (1975). *La psychologie de l'enfant*, volume 369 de *Que Sais-je ?* PUF, Paris.
- [Pierson et al. 92] Pierson, W., Donelan, M., et Hui, W. (1992). Linear and nonlinear propagation of water wave groups. *Journal of Geophysical Research*, 97(C4) :5607–5621.
- [Pierson et Moskowitz 64] Pierson, W. et Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69 :5181.
- [Poincaré 14] Poincaré, H. (1914). *La science et l'hypothèse*. Flammarion, Paris, Le Bon édition. <http://www.univ-nancy2.fr/ACERHP/bhp/sh.html>.
- [Premože et Ashikmin 01] Premože, S. et Ashikmin, M. (2001). Rendering natural waters. *Computer Graphics*, 20(4) :189–199.
- [Prochiantz 97] Prochiantz, A. (1997). *Les anatomies de la pensée*. Odile-Jacob.
- [Pylyshyn 99] Pylyshyn, Z. (1999). Is vision continuous with cognition ? the case for cognitive impenetrability of visual perception. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(3) :341–423.
- [Quéau 93] Quéau, P. (1993). *Le virtuel, vertus et vertiges*. Collection Milieux, Champ vallon, Seyssel.
- [Rapp et Melville 90] Rapp, R. et Melville, W. (1990). Laboratory measurements of deep water breaking waves. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A331 :735–780.
- [Redou 02] Redou, P. (2002). Itérations chaotiques et asynchrones. Rapport technique, Laboratoire d'Ingénierie Informatique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest, France.
- [Reignier et al. 98] Reignier, P., Harrouet, F., Morvan, S., Tisseau, J., et Duval, T. (1998). ARéVi : a virtual reality multiagent plateform. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1434 :229–240.
- [Reul et Chapron 04] Reul, N. et Chapron, B. (2004). A model of sea-foam thickness distribution for passive microwave remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.
- [Richalet 98] Richalet, J. (1998). *Pratique de l'identification*. Hermès.
- [Robin 89] Robin, P. (1989). *Vagues, l'énergie magnifique*. AGEP.
- [Rodin et Nédélec 00] Rodin, V. et Nédélec, A. (2000). oRis : an agent communication langage for distributed virtual environment. In *IEEE Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pages 955–960.
- [Rose 96] Rose, D. (1996). *Nourishing terrains : australian aboriginal views of landscape and wilderness*. Australian Heritage Commission, Canberra, Autralie. <http://www.ahc.gov.au/infores/publications/generalpubs/nourishing/index.html>.

- [Rosen 85] Rosen, R. (1985). *Anticipatory systems*. Pergamon.
- [Rosen 91] Rosen, R. (1991). *Life itself : a comprehensive enquiry into the nature, origin and fabrication of life*. Columbia University Press, New York.
- [Saury et al. 97] Saury, J., Durand, M., et Theureau, J. (1997). 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.
- [Sawnhey 62] Sawnhey, M. (1962). A study of ocean wave amplitudes in terms of the theory of runs of a Markov train process. Rapport technique, New York University.
- [Segal 01] Segal, L. (2001). *The dream of reality : Heinz Von Foerster's constructivism*. Springer.
- [Sharkov 95] Sharkov, Y. (1995). Expérimental investigations of the lifetime for breaking wave dispersive zone. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 30 :808–811.
- [Shaw 92] Shaw, C. (1992). *Using computational fluid dynamics*. Prentice Hall.
- [Shaw 03] Shaw, R. (2003). The agent-environment interface : Simon's indirect or gibson's direct coupling ? *Ecological Psychology*, 15(1) :37–106.
- [Shepard 84] Shepard, R. (1984). Ecological constraints on internal representation : resonant, kinematics of perceiving, imagining, thinking and dreaming. *Psychological Review*, 91 :417–447.
- [Sims 94] Sims, K. (1994). Evolving 3d morphology and behavior by competition. *Artificial Life*, 4 :28–39.
- [Singhal et Zyda 99] Singhal, S. et Zyda, M. (1999). *Networked Virtual Environments – Design and Implementation*. ACM Press, addison-wesley édition.
- [Smith 80] Smith, R. (1980). The Contract Net protocol : high level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, 29(12) :1104–1113.
- [Smolin 04] Smolin, L. (2004). Des atomes d'espace et de temps. *Pour la Science*, 316 :46–55.
- [Snyder et Cox 66] Snyder, R. et Cox, C. (1966). A field study of the wind generation of ocean waves. *Mar. Res.*, 24(2) :141–178.
- [StAmant 99] StAmant, R. (1999). User interface affordance in a planning representation. *Human Computer Interaction*, 14 :317–354.
- [Stewart 02] Stewart, J. (2002). La modélisation en biologie. In *Enquête sur le concept de modèle, Partie I - Logique et sciences de la nature*, pages 43–66. PUF.
- [Stoffregen et Bardy 01] Stoffregen, T. et Bardy, B. (2001). On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1) :195–261.
- [Sutton 88] Sutton, P. (1988). *Dreamings ; the art of aboriginal australia*, chapitre Dreamings, pages 13–32. Penguin Books.
- [Sverdrup et Munk 47] Sverdrup, H. et Munk, W. (1947). Wind, sea, and swell : theory of relations for forecasting. Rapport Technique H.O. Pub. 601, U.S. Navy Hydrographic Office.
- [Szwarcman et al. 01] Szwarcman, D., Feijó, B., et Costa, M. (2001). Goal-oriented dead reckoning for autonomous characters. *Computers and Graphics*, 25 :999–1011.
- [Temam 84] Temam, R. (1984). *Navier-Stokes equations : theory and numerical analysis*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam.
- [Tessendorf 01] Tessendorf, J. (2001). Simulating ocean water. In *SIGGRAPH, Courses Notes*, pages 3–1–3–18, 45–62.
- [Thalmann 96] Thalmann, D. (1996). A new generation of synthetic actors : the interactive perceptive actors. In *Pacific Graphics*, pages 200–219.
- [Thomas et Donikian 00] Thomas, G. et Donikian, S. (2000). Virtual humans animation in informed urban environments. In *Computer Animation*, pages 129–136, Philadelphie, USA. IEEE.
- [Thon et al. 00] Thon, S., Dischler, J., et Ghazanfarpour, D. (2000). Ocean waves synthesis using a spectrum-based turbulence function. In *IEEE-Computer Graphics International (CGI)*, pages 65–74, Suisse. IEEE Computer Society.
- [Tisseau 01] Tisseau, J. (2001). Réalité virtuelle : autonomie in virtuo. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), document de synthèse, Université de Rennes 1. <http://www.enib.fr/~tisseau/>.

- [Tisseau 04] Tisseau, J. (2004). Manifeste de la réalité virtuelle – le virtuoscope. Rapport Technique CERV-2004-001, Centre Européen de Réalité Virtuelle, Brest, France.
- [Tisseau et Harrouet 03] Tisseau, J. et Harrouet, F. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 2, chapitre Autonomie des entités virtuelles. Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- [Tisseau et al. 04a] Tisseau, J., Parenthoën, M., Buche, C., et Reignier, P. (2004a). Comportements perceptifs d'acteurs virtuels autonomes – une application des cartes cognitives floues. *Technique et Science Informatiques*, à paraître.
- [Tisseau et al. 04b] Tisseau, J., Parenthoën, M., et Jourdan, T. (2004b). Animation phénoménologique d'un environnement virtuel — application à la mer —. In *Actes du Groupe de Travail Animation et Simulation (GTAS)*, Reims, France.
- [Tisseau et al. 98] Tisseau, J., Reignier, P., et Harrouet, F. (1998). Exploitation de modèles et réalité virtuelle. In *Actes des 6èmes journées du Groupe de Travail Animation et Simulation (GT-AS)*, volume 6, pages 13–22.
- [Tolman 48] Tolman, E. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4) :189–208.
- [Tolman 89] Tolman, H. (1989). The numerical model WAVEWATCH : a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Rapport Technique DUT-CHGE-89-2, ISSN 0169-6548, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft Univ. of Techn.
- [Tricot et al. 03] Tricot, A., Détienne, F., et Bastien, C. (2003). Recherches en psychologie ergonomique – introduction. *Psychologie Française*, 48(2) :1–8.
- [Trullier et Meyer 00] Trullier, O. et Meyer, J. (2000). Animat navigation using a cognitive graph. *Biological Cybernetics*, 83 :271–285.
- [Ts'o et Barsky 87] Ts'o, P. et Barsky, B. (1987). Modeling and rendering waves : wave-tracing using beta-splines and reflective and refractive texture mapping. *Computer Graphics*, 6(3) :191–214.
- [Turing 50] Turing, A. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236) :433–460.
- [Turvey et al. 81] Turvey, M., Shaw, R., Reed, E., et Mace, W. (1981). Ecological laws of perceiving and acting : in reply to fodor and pelyshyn. *Cognition*, 9 :237–304.
- [Tyndiuk et al. 03] Tyndiuk, F., Schlick, C., Claverie, B., et Thomas, G. (2003). Modèles et facteurs humains en IHM - application à la réalité virtuelle. In Herzig, A., Chaid-draa, B., et Mathieu, P., éditeurs, *Modèles Formels de l'Interaction (MFI)*, pages 301–306, Lille, France. Cépaduès.
- [Vallée 97] Vallée, R. (1997). Théorisation de la perception-action et autonomie de Vendryès. *Revue Internationale de Systémique*, 11(5) :445–454.
- [Varela 79] Varela, F. (1979). *Principles of biological autonomy*. Elsevier, New York.
- [Varela 87] Varela, F. (1987). Laying down a path in walking. In Thompson, W., éditeur, *Gaia : A way of knowing*, pages 48–64. Lindisfarne Press, Hudson, NY.
- [Varela et al. 91] Varela, F., Thompson, E., et Rosch, E. (1991). *The embodied mind : cognitive science and human experience*. MIT Press, Cambridge.
- [Vicente et Wang 98] Vicente, K. et Wang, J. (1998). An ecological theory of expertise effects in memory recall. *Psychological Review*, 105 :33–57.
- [Vygotsky 35] Vygotsky, L. (1935). *Mental development of children during education*. Uchpedzig.
- [Waldrop 92] Waldrop, M. (1992). *Complexity : The emerging science at the edge of order and chaos*. Touchstone, New York.
- [WAMDI-group 88] WAMDI-group : Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P., Komen, G., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V., Greenwood, J., Reistad, M., Zambresky, L., et Ewing, J. (1988). The WAM model - a third generation ocean wave prediction model. *Phys. Oceanogr.*, 18 :1775–1810.
- [Ward et Dubos 72] Ward, B. et Dubos, R. (1972). *Only One Earth — The Care and Maintenance of a Small Planet*. Norton, New York.
- [Warren et Whang 87] Warren, W. et Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures : body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology : Human, Perception and Performance*, 13 :371–383.

- [Weiss 61] Weiss, P. (1961). Self-differentiation of basic patterns of coordination. *Comparative Psychological Monographs*, 77 :1–96.
- [Wells 99] Wells, G. (1999). *Dialogic inquiry : towards a sociocultural practice and theory of education*, chapitre The zone of proximal development and its implications for learning and teaching. Cambridge University Press, New York. <http://www.oise.utoronto.ca/~gwellls/resources/ZPD.html>.
- [Whitham 74] Whitham, G. (1974). *Linear and nonlinear waves*. Wiley, New York.
- [Widyanto et al. 91] Widyanto, T., Marriot, A., et West, M. (1991). Applying a virtual perception model to behavioral animation system. In *Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, pages 89–98, Vienne, Autriche.
- [Willebrand 75] Willebrand, J. (1975). Energy transport in a nonlinear and inhomogeneous random gravity wave field. *J. Fluid Mech.*, 22 :113–126.
- [Wilson 85] Wilson, S. (1985). Knowledge growth in an artificial animal. In *Genetic Algorithms and their Applications*, pages 16–23.
- [Yang 91] Yang, H. (1991). *Wave Packets and Their Bifurcations in Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York, USA.

Résumé étendu, abstract et résumé

Résumé étendu (3 pages)

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la modélisation des phénomènes naturels pour une instrumentation en un système de réalité virtuelle. Un tel système est *par essence* un univers de modèles, incluant l'Homme dans la boucle. Les modèles sont des idées humaines sur les phénomènes naturels ; les modèles ne sont pas et ne peuvent pas être les phénomènes naturels. L'utilisateur d'un système de réalité virtuelle, immergé dans cet espace par la triple médiation des sens (observation), de l'action (expérimentation) et de l'esprit (modélisation) peut être spectateur, acteur et/ou créateur. Ainsi, la participation active de l'utilisateur à cet univers de modèles place la réalité virtuelle comme un outil de simulation pour la cybernétique moderne qui inclut l'*Homme dans la boucle*, permettant de mieux appréhender la complexité de ces modèles.

 Nous avons donc recherché une **démarche permettant de modéliser de manière constructive un système complexe où de nombreux modèles interagissent de multiples façons, via leur expérimentation en des simulations participatives**. Une étude des *affordances* de l'activité de modélisation d'un système complexe multi-modèles, va nous conduire à proposer une méthode de modélisation consistant à autonomiser les modèles des phénomènes en des *entités énactives* en interaction entre elles et avec des opérateurs humains. Le terme *éaction* vise à souligner la conviction croissante selon laquelle la cognition, loin d'être la représentation d'un monde prédominant, est l'avènement conjoint d'un monde et d'un esprit à partir de l'histoire des diverses actions qu'accomplit un être dans le monde.

Nous avons alors **conceptualisé** (B) une méthode selon ce que nous appelons l'*hypothèse énactive*, fondée sur les principes d'autonomie, de perception active, d'éaction et de clôture sous causalité efficiente, pour proposer une méthode constructive de modélisation dite *modélisation énactive*. Nous avons **formalisé** (A) le modèle généré par cette méthode, afin de guider le modélisateur à concevoir des *entités énactives*, i.e. : les modèles représentant des phénomènes naturels dans le système de réalité virtuelle. Puis nous avons **instrumenté** (BA) le modèle énactif en proposant l'expérimentation du modèle par une simulation participative des entités faisant vivre les modèles phénoménologiques, de sorte que le modèle soit expérimentable tout au long de sa création. Enfin, nous avons **appliqué** (BÉA-BA) cette méthode pour réaliser une animation interactive de la mer en surface expérimentable par des marins ou des océanographes.

 (B) L'**hypothèse énactive** porte sur trois idées principales :

1. La modélisation est une activité humaine qui traduit implicitement et doit traduire explicitement une certaine praxis humaine, c'est à dire une action attachée à une intention.
2. Les phénomènes naturels sont modélisés *en tant qu'entités autonomes*, et ceci demande d'autonomiser les modèles associés.
3. Les interactions entre entités autonomes passent par la médiation d'un milieu structuré par les entités elles-mêmes : selon les principes de *perception active* et d'*éaction*.

Premièrement, l'individu humain est abordé par l'éclairage de l'ergonomie cognitive. L'approche écologique en psychologie — ou ergonomie cognitive — propose d'**observer ce sur quoi s'appuie et émerge l'adaptation d'un être vivant en analysant l'interaction entre l'individu et son environnement, avant de formuler des modèles scientifiques (donc hypothétiques) sur comment l'information est intégrée par l'individu**. En cela, elle s'inspire du courant phénoménologique de la philosophie présupposant une relation perceptive originelle à toute construction scientifique. Les recherches de cette branche de la psychologie ont pour but d'utiliser cette connais-

sance particulière du sujet humain pour améliorer la situation ou l'outil de travail. Dans ce cadre, il est nécessaire de présenter à l'utilisateur du système de réalité virtuelle, ses *affordances* naturelles, afin d'améliorer l'efficacité de son activité. Ces *affordances*, vues comme **des interactions entre l'environnement et l'acteur, vont définir explicitement les phénomènes naturels qu'il faut modéliser**. En ce qui concerne l'activité de modélisation elle-même, l'objet de cette thèse est de fournir une méthode établie d'après ces notions psychologiques d'*affordances*, illustrant un exemple pragmatique d'*épistémo-praxéologie* pour la modélisation interactive des systèmes complexes *via* le système de réalité virtuelle.

Deuxièmement, les phénomènes naturels sont modélisés *en tant qu'entités autonomes*. L'autonomisation d'un modèle, consiste à lui donner des capacités de perception, d'action et d'adaptation ; **la raison d'être de l'autonomisation n'est pas forcément conceptuelle, mais toujours pragmatique en vue de l'instrumentation**. L'autonomisation d'un modèle apparaît comme une contrainte nécessaire pour la modélisation interactive d'un système complexe, *via* sa simulation informatique. En effet, le travail effectué pour décrire un phénomène par un modèle autonomisé n'a pas à être remis en cause lors de l'introduction d'un nouveau modèle phénoménologique dans le système. Cela facilite la construction itérative du système multi-modèles en offrant la possibilité de ne travailler que sur l'un des modèles à la fois, sans s'occuper des autres, ou la possibilité d'introduire à tout moment un nouveau modèle. **Autonomiser le modèle ne demande pas de considérer le phénomène naturel comme ayant ces capacités**. Le phénomène réel est naturellement inscrit dans un monde physique contraignant son évolution et il n'y a pas de raison nécessaire à supposer, par exemple, qu'un phénomène physique perçoive quoi que ce soit, ce serait lui donner des intentions anthropomorphiques qui n'ont pas lieu d'être dans le cas d'un phénomène physique. Par contre, en réalité virtuelle, le modèle d'un tel phénomène n'est pas inscrit dans un monde physique et **il faut reconstituer le monde virtuel dont a besoin le modèle du phénomène pour agir dans le système**.

Troisièmement, les interactions entre ces entités sont basées sur un principe de *perception active*, principe selon lequel les entités autonomes ont une démarche active et prédictive dans la perception de leur environnement ; ce sont ces actes de perception qui vont créer les expériences à partir desquelles des interactions peuvent avoir lieu. **L'organisation énactive résultante de la modélisation est alors composée d'entités autonomes en interaction via le milieu qu'elles créent et façonnent elles-mêmes**. En déléguant aux modèles la fabrication du milieu dont ils ont besoin pour déterminer leurs interactions, nous pouvons simuler dans un même environnement virtuel des modèles liés à des échelles phénoménologiques très différentes les unes des autres, sans passer par un maillage *a priori* de l'espace-temps, et tout en respectant, par exemple, les lois de conservation en physique.



(A) La formalisation d'un **modèle énactif** ne contient plus l'Homme en tant qu'individu ; elle formalise le résultat de son activité de modélisation selon les principes de l'*hypothèse énactive*. L'Homme n'est plus représenté que par la médiation de ses modèles. Les briques de base du modèle formel sont des *objets actifs*. **Un objet actif est un triplet constitué d'une structure paramétrique, d'une structure des savoir-faire et d'une structure des activités**. On distingue trois types d'objet actifs, chaque type étant spécifié par un couple (paramètre, savoir-faire).

objet actif *prédition* : (milieu-expérimentation, aisthesis),
objet actif *action* : (phénomène, praxis et savoir-faire internes)
objet actif *adaptation* : (milieu-prévision, poiesis).

Une *entité énactive* est alors constituée d'un triplet d'objets de chaque type et d'une horloge interne devant être caractérisés pour chaque entité énactive faisant vivre le modèle d'un phénomène naturel dans la simulation. Les entités, situées dans l'espace et le temps, interagissent *via* des balises expérimentales permettant de définir et de localiser les interactions dans l'espace et le temps. L'ensemble des balises d'une entité énactive correspond au milieu perceptif de cette entité. Les *aisthesis* structurent le milieu selon un principe prédictif, en se basant sur des résultats expérimentaux précédents. Les *praxis* agissent sur le milieu créé par les *aisthesis* en réalisant les expériences sur le milieu. Les *poiesis* récupèrent les résultats expérimentaux pour créer de nouvelles entités ou pour modifier les phénomènes. Les *savoir-faire internes* transforment leur propre phénomène. Toutes ces fonctions demandent l'utilisation d'un mécanisme matériel comme support de leurs activités. Le modèle formel d'organisation d'entités énactives obtenu est clos sous causalité efficiente.



(BA) Les interactions ordinateur-entité virtuelle définissent une **représentation informatique** des entités en énaction facilitant l'immersion participative de l'utilisateur, et l'invitant à respecter le formalisme du modèle énactif par la médiation d'un *langage orienté entités énactives*. Ce langage s'appuie sur le moteur de simulation d'objets actifs et de rendu 3D ARéVi, développé au CERV. Les activités des entités énactives sont ordonnancées par la machine qui les supporte selon des *itérations asynchrones et chaotiques* et leurs interactions sont assurées au sein de l'ordinateur par un *médiateur des interactions*, spécifié en tant qu'objet actif.



(BÉA-BA) Nous appliquons ces idées (la méthode “B-A-BA”) pour réaliser une **animation interactive de la mer**. Le système de réalité virtuelle générant les états de mer doit pouvoir être expérimentable par des océanographes et des marins. Le modèle obtenu se nomme IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) et permet l'animation d'un plan d'eau de plusieurs kilomètres carrés. **IPAS intègre, d'une part les notions marines de groupe de vagues, de déferlement, de vent synoptique, de vent local, de courant et de bathymétrie, comme phénomènes modélisés en tant qu'entités énactives, d'autre part les notions physiques de conservation de l'action, de stress du vent, de réfraction des vagues de gravité lors des interactions vagues/déferlements/vents/courants/bathymétrie.** Les simulations ont lieu en temps réel et ne nécessitent aucun pré-calcuL.



Ainsi, notre contribution consiste à définir une nouvelle approche pour la modélisation des phénomènes naturels, en vue de leur simulation en un système de réalité virtuelle. Selon cette approche, les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes interagissant par la médiation d'un milieu qu'elles structurent et façonnent elles-mêmes. Nous appelons cette nouvelle approche incluant l'Homme dans la boucle : la méthode de modélisation énactive. Cette méthode participative de modélisation est conceptualisée, formalisée, instrumentée et appliquée dans le cas de l'animation de la mer au voisinage de la surface pour des marins et des océanographes. Cette thèse fournit les prémisses d'une **méthodologie constructive de modélisation des systèmes complexes incluant l'Homme dans la boucle, permettant l'expérimentation des modèles tout au long de la modélisation par leur simulation participative**. Cette méthodologie place la réalité virtuelle comme une discipline charnière entre les sciences humaines, les sciences du vivant, les sciences exactes et les sciences de l'ingénieur.

Cette thèse sur la manière de simuler des phénomènes naturels, ouvre de nombreuses perspectives à venir. On pourra, par exemple,

- utiliser le modèle de mer IPAS pour la réalisation d'un environnement virtuel dédié à la sécurité civile en mer ou à la pratique de la compétition en voile,
- consolider la validité océanographique d'IPAS en réalisant des expériences virtuelles d'évolution d'états de mer et les comparer avec des résultats théoriques ou expérimentaux, tester et enrichir le modèle avec d'autres modèles de phénomènes océanographiques,
- transposer la méthode de modélisation pour d'autres phénomènes ondulatoires que ceux de l'océanographie, comme par exemple la propagation des ondes électromagnétiques, où l'on retrouve les notions de train d'ondes et de déferlement,
- prouver son équivalence formelle avec les méthodes numériques classiques de résolution des systèmes d'équations différentielles, lorsque les entités sont des interactions entre des volumes élémentaires devant respecter les mêmes lois physiques que celles ayant permis d'établir les équations,
- utiliser la méthode de modélisation pour d'autres phénomènes que ceux de l'océanographie, comme par exemple l'hydrologie, la météorologie, la sismologie, la biochimie, la biologie, la psychologie, la pédagogie, la sociologie ou l'économie.

Specific keywords : *active object, phenomenon, forecast-medium, experimentation-medium, aisthesis, praxis, poiesis, prediction, action, adaptation, enactive entity, enactive modeling, enactive assumption.*

Abstract

This thesis lies within the framework of the modeling of natural phenomena for an instrumentation in a virtual reality system. A virtual reality system is a world of models, including human in the simulation loop. It can be seen as a tool for modern cybernetics. We then **conceptualized** a method according to what we call the *enactive assumption*, founded on the principles of autonomy, active perception, enactment and closure under efficient causality, to propose a constructive method of modeling known as *enactive modeling*. We **formalized** the model generated by this method, in order to guide the modelisator to conceive enactive entities, e.g. : models representing natural phenomena in the system of virtual reality. Then we **instrumented** the enactive model by proposing the experimentation of the model. This leads to the participative simulation of entities making live the phenomenologic models, so that the model is experimentable throughout its creation. Lastly, we **applied** this method to carry out an interactive animation of the sea experimentable by sailors or oceanographers.

The enactive assumption which we defend gathers three principal ideas :

1. modeling translates a human praxis.
2. the phenomena are modelled as autonomous entities.
3. the interactions between entities pass by a medium which is created and worked by the entities themselves.

Firstly, modeling is a human activity which translates implicitly and must explicitly translate a modeling final cause. The modelled phenomena are the affordances of a user of the model.

Secondly, the autonomisation of the models, consisting in giving to the model of the natural phenomenon capacities of perception, action and adaptation, is an effective pragmatic solution for the modeling of a complex system where many models must interact in multiple ways.

Thirdly, by delegating to the models the manufacture of the medium which they need to determine their interactions, we can simulate in the same virtual environment, the models related to phenomenologic scales very different from the others, without passing by an apriori grid of the time-space, while respecting, for example, the conservation laws of physics.

These conceptual assumptions are translated into a pragmatic formal model, in which we formalize concepts like active object, phenomenon, medium, aisthesis, praxis, poiesis, prediction, action, adaptation, enactive entity and second order organization. Formalization provides a method of natural phenomena modeling. Instrumentation of these models makes it possible to the originator to actually simulate the multi-model system at any time of its creation.

We apply these ideas to carry out an interactive animation of the surface of the sea. The model obtained is named IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) and allows the animation of a water surface of several square kilometres. IPAS deals, on the one hand with the marine concepts of wave group, breaking, synoptic wind, local wind, current and bathymetry, on the other hand with the physical concepts of action conservation, wind stress, gravity wave refraction for their interactions. Simulations take place in real time and do not require any precalculation.

It provides the premises of a modeling methodology for the participative simulation of complex systems. This thesis on the manner of simulating natural phenomena, opens many prospects to come. One will try, for example,

- to consolidate the oceanographical validity of IPAS and to enrich the model by carrying out virtual experiments by evolution of state of sea and to compare them with theoretical or experimental results,
- to prove his formal equivalence with the traditional numerical methods for PDE solving, when the entities are interactions between elementary volumes having to respect the same physical laws as those having made it possible to establish the equations.
- to use this modeling method for other phenomena than the surface of the sea (hydrology, meteorology, sismology, biochemistry, biology, pedagogy, sociology, economy),

Mots clés spécifiques : *objet actif, phénomène, milieu-prévision, milieu-expérimentation, aïs-thesis, praxis, poiesis, prédiction, action, adaptation, entité énactive, modélisation énactive, hypothèse énactive.*

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la modélisation des phénomènes naturels pour une instrumentation en un système de réalité virtuelle. Elle fournit les prémisses d'une méthodologie de modélisation des systèmes complexes en vue de leur simulation, dite modélisation énactive. La thèse que nous défendons porte sur trois idées principales :

1. la modélisation traduit une praxis humaine.
2. les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes.
3. les interactions entre les entités passent par un milieu qui est créé et façonné par les entités elles-mêmes.

Premièrement, la modélisation est une activité humaine qui traduit implicitement et doit traduire explicitement une cause finale à la modélisation. Les phénomènes modélisés sont les affordances d'un utilisateur du modèle.

Deuxièmement, l'autonomisation des modèles, consistant à donner au modèle du phénomène naturel des capacités de perception, d'action et d'adaptation, est une solution pragmatique efficace pour la modélisation d'un système complexe où de nombreux modèles doivent interagir de multiples façons.

Troisièmement, en déléguant aux modèles la fabrication du milieu dont ils ont besoin pour déterminer leurs interactions, nous pouvons simuler dans un même environnement virtuel des modèles liés à des échelles phénoménologiques très différentes les unes des autres, sans passer par un maillage a priori de l'espace-temps, tout en respectant, par exemple, les lois de conservations en physique.

Ces hypothèses conceptuelles sont traduites en un modèle formel pragmatique, dans lequel nous formalisons des notions d'objet actifs, d'entité autonome et d'organisation énactive. La formalisation fournit une méthode de modélisation des phénomènes naturels et d'instrumentation de ces modèles permettant au concepteur de simuler en réalité virtuelle le système multi-modèles à tout moment de la création.

Nous appliquons ces idées pour réaliser une animation interactive de la surface de la mer. Le système de réalité virtuelle générant les états de mer doit pouvoir être utilisable par des marins et être crédible aux yeux des océanographes. Le modèle obtenu se nomme IPAS (Interactive Phenomenological Animation of the Sea) et permet l'animation d'un plan d'eau de plusieurs kilomètres carrés. IPAS intègre, d'une part les notions marines de groupe de vagues, de déferlement, de vent synoptique de vent local, de courant et de bathymétrie, d'autre part les notions physiques de conservation de l'action, de stress du vent, de réfraction des vagues de gravités lors des interactions vagues/déferlements/vents/courants/bathymétrie. Les simulations ont lieu en temps réel et ne nécessitent aucun pré-calcul.

Cette thèse sur la manière de simuler des phénomènes naturels, ouvre de nombreuses perspectives à venir. On pourra, par exemple,

1. utiliser le modèle de mer IPAS pour la réalisation d'un environnement virtuel dédié à la sécurité civile (maritime) ou à la pratique de la compétition en voile,
2. consolider la validité océanographique d'IPAS et enrichir le modèle en réalisant des expériences virtuelles d'évolution d'états de mer et les comparer avec des résultats théoriques ou expérimentaux,
3. prouver son équivalence formelle avec les méthodes numériques classiques de résolution des systèmes d'équations différentielles, lorsque les entités sont des interactions entre des volumes élémentaires devant respecter les mêmes lois physiques que celles ayant permis d'établir les équations.
4. utiliser la méthode de modélisation pour d'autres phénomènes que la surface de la mer (hydrologie, météorologie, sismologie, biochimie, biologie, pédagogie, sociologie, économie)