



Architecture multi-agents pour le pilotage automatique des voiliers de compétition et Extensions algébriques des réseaux de Petri

Goulven Guillou

► To cite this version:

Goulven Guillou. Architecture multi-agents pour le pilotage automatique des voiliers de compétition et Extensions algébriques des réseaux de Petri. Informatique [cs]. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2010. Français. <tel-00559442>

HAL Id: tel-00559442

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00559442>

Submitted on 25 Jan 2011

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



THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ EUROPÉENNE DE BRETAGNE

Mention : Informatique

École Doctorale SICMA

présentée par

Goulven GUILLOU

Préparée au Centre Européen
de Réalité Virtuelle

Architecture multi-agents
pour le pilotage automatique
des voiliers de compétition

Et

Extensions algébriques
des réseaux de Petri

Soutenue le 3 novembre 2010

devant le jury composé de :

Franck CASSEZ

Chargé de recherches HDR, IRCYNN Nantes / *rapporteur*

Jean-Louis BOIMOND

Professeur, Université d'Angers / *rapporteur*

Paul CRUBILLE

Ingénieur de Recherches, UTC Compiègne / *examineur*

Dominique DUHAUT

Professeur, Université de Bretagne Sud / *examineur*

Marc PARENTHOEN

Maître de conférences, ENI de Brest / *examineur*

Jacques TISSEAU

Professeur, ENI de Brest / *examineur*

Bernard SIMON

Professeur, Université de Bretagne Occidentale / *invité*

Table des matières

Table des matières	3
Table des figures	9
Remerciements	15
1 Introduction	17
1.1 Positionnement de la thèse	17
1.2 Organisation du mémoire	20
Bibliographie	23
I Architecture multi-agents pour le pilotage automatique des voiliers en compétition	25
2 Le pilotage automatique des voiliers	27
2.1 Introduction	27
2.2 Présentation du domaine	28
2.2.1 Le voilier	28
2.2.2 Les allures	28
2.2.3 Les polaires	30
2.2.4 Les besoins du skipper	32
2.3 La barre des physiciens	34
2.3.1 Mécanique du point	35
2.3.2 Mécanique des fluides	39
2.4 La barre des automaticiens	41

2.4.1	Régulation PID	41
2.4.2	Linéarisation par bouclage	43
2.4.3	Contrôleurs flous et Microtransat	43
2.5	La barre des informaticiens	46
2.6	Conclusion	47
Bibliographie		49
3 Expertise		51
3.1	Introduction	51
3.2	La description de la technique de barre : une nouveauté!	52
3.3	Les systèmes de pilotage	52
3.3.1	Les systèmes de pilotage non électriques	53
3.3.2	Les pilotes électriques	56
3.3.3	Systèmes de pilotage : comparaison	61
3.4	L'homme fait-il du PID?	61
3.5	Différents modes de barre	63
3.5.1	La notion d'échelles de temps déagée par les coureurs	63
3.5.2	Les modes de barre dans les locutions marines	64
3.5.3	Barrer, un mélange des genres?	66
3.6	Les grands principes	66
3.6.1	Un coup de barre est un coup de frein	66
3.6.2	Être dans son assiette	67
3.6.3	Être bien réglé	68
3.7	Les informations	68
3.7.1	Les signaux visuels	69
3.7.2	Les signaux auditifs	69
3.7.3	Les signaux tactiles	70
3.7.4	Les signaux haptiques	70
3.7.5	Les signaux vestibulaires	70
3.7.6	Les capteurs du bord	71
3.8	La nécessaire hiérarchisation des données	71
3.8.1	Les informations primaires	72
3.8.2	Les informations complémentaires	73
3.8.3	Les informations : hiérarchie et utilité	75

3.9	La technique de barre	75
3.9.1	Les grands équilibres	76
3.9.2	Les principes fins ou les accidents	78
3.10	Le barreur et sa représentation du monde	83
3.10.1	Le dialogue barreur/équipage	83
3.10.2	La mer du barreur	84
3.10.3	Le vent du barreur	84
3.10.4	Le bateau du barreur	85
3.11	Mesurer la performance d'un barreur	86
3.11.1	Position du problème et styles de barre	86
3.11.2	Approche statistique	89
3.11.3	Réalité virtuelle	89
3.11.4	L'avis d'un expert	90
3.12	Conclusion	90
	Bibliographie	92
4	Modélisation et implémentation	95
4.1	Multi-agents et réseaux de Petri	95
4.2	Agent actif et agent réactif	96
4.3	Le système global	98
4.3.1	Le bus	99
4.3.2	Les capteurs	100
4.3.3	Les agents « concepts »	102
4.3.4	La communication	105
4.3.5	Les agents Sea, Wind et Polar	106
4.3.6	L'IHM	110
4.4	Le barreur	110
4.4.1	Architecture générale du barreur	110
4.4.2	Le barreur réactif	111
4.4.3	Le barreur expert	115
4.4.4	Le barreur adaptatif	120
4.5	Vers un barreur réactif/prédictif	121
4.6	Conclusion	124
	Bibliographie	125

5	Expérimentation	127
5.1	Introduction	127
5.2	L'IHM	127
5.3	Table de mixage	129
5.4	Quelques scénarios	130
5.4.1	Intérêt de la suppression du terme intégral	130
5.4.2	Rafale	131
5.4.3	Molle	133
5.4.4	Refus	135
5.4.5	Molle refusante	136
5.4.6	Clapot	137
5.4.7	Groupe de vagues isolé	138
5.4.8	Départs en surf	139
5.5	Conclusion	141
II	Quelques extensions algébriques des réseaux de Petri	143
6	Réseaux de Petri et extensions algébriques	145
6.1	Introduction	145
6.2	Préliminaires	145
6.2.1	Un peu d'algèbre	145
6.2.2	Langages et image de Parikh	146
6.2.3	Systèmes de transitions étiquetées	146
6.3	Les réseaux de Petri places/transitions	147
6.3.1	Définitions et représentation	147
6.3.2	Comportement d'un réseau de Petri	148
6.4	Les réseaux de Petri comme outil graphique	150
6.5	Expressivité et décidabilité	151
6.6	La synthèse	153
6.7	Les extensions	154
6.7.1	Les abréviations	154
6.7.2	Les extensions	155
6.7.3	Les extensions algébriques	155
6.8	Des outils	157
6.9	Conclusion	158

Bibliographie	159
7 Group-nets	163
7.1 Introduction	163
7.2 Préliminaires	164
7.3 Strict-Group-nets	165
7.3.1 Motivation initiale et définitions	165
7.3.2 Strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets	168
7.3.3 Strict- \mathbb{Z} -nets	170
7.3.4 Arbre et graphe de couverture pour les strict- \mathbb{Z} -nets	172
7.4 Group-nets	176
7.4.1 Définitions	176
7.4.2 \mathbb{Z} -nets	177
7.4.3 $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -nets	178
7.5 Group ₂ -nets et Group _{<i>n</i>} -nets	179
7.5.1 Group ₂ -nets	180
7.5.2 \mathbb{Z}_2 -nets	180
7.5.3 G_2 -nets et G -nets	181
7.5.4 Les group _{<i>n</i>} -nets	182
7.6 Conclusion et perspectives	183
Bibliographie	184
8 Réseaux lexicographiques	185
8.1 Introduction	185
8.2 Algèbres de Petri	185
8.3 Définitions	186
8.4 Un peu d'algèbre linéaire	189
8.5 Réseaux lexicographiques et machines de Turing	190
8.6 Réseaux lexicographiques bornés	192
8.7 Conclusion et perspectives	194
Bibliographie	197

9 Deux problèmes de synthèse	199
9.1 Introduction	199
9.2 Synthèse des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets	200
9.2.1 Régions	200
9.2.2 Réseaux flip-flop et réseaux élémentaires	201
9.2.3 Problème de synthèse pour les réseaux de type \mathcal{T}	203
9.2.4 Exemple	206
9.3 Meilleure approximation d'un langage par un réseau lexicographique	208
9.3.1 Réseaux lexicographiques et langages	208
9.3.2 Meilleure approximation d'un langage	209
9.3.3 Régions d'un langage	209
9.3.4 Régions d'un langage de réseau lexicographique	210
9.3.5 Cas des langages réguliers	212
9.4 Conclusion	213
Bibliographie	215
10 Conclusion	217
10.1 Bilan	217
10.1.1 Du pilotage automatique des voiliers de course	217
10.1.2 Des extensions algébriques des réseaux de Petri	218
10.2 Perspectives	218
10.2.1 Vers un meilleur modèle de bateau	218
10.2.2 Vers un meilleur modèle de vent	219
10.2.3 Vers un meilleur pilote	219
10.2.4 Vers une utilisation réelle	220
Annexe A	221
Annexe B	245
Bibliographie	257

Table des figures

2.1 Anatomie d'un 60 pieds open IMOCA (source IMOCA)	29
2.2 Le voilier et les <i>allures</i>	30
2.3 Polaires de l'Aphrodite 101	31
2.4 Routage par la méthode des isochrones.	33
2.5 Attitude d'un bateau.	35
2.6 Définitions des mouvements d'un bateau.	36
2.7 Les différentes forces s'appliquant à un voilier.	37
2.8 Le voilier virtuel sur la mer virtuelle.	39
2.9 Régulation PID par boucle fermée.	41
2.10 Réponse d'un système à un échelon.	42
2.11 Polaire de voile typique d'un bateau de course moderne.	45
2.12 Architecture proposée par Abril, Salom et Calvo [Abril 97].	46
2.13 Hiérarchie des principaux agents de l'architecture Avalon.	47
3.1 Régulateur d'allures avec ses principaux constituants	55
3.2 Pilote de cockpit	57
3.3 La façade du Gyropilot graphic de nke	58
3.4 Petite taxinomie des systèmes de pilotage	61
3.5 Homme et pilote sur ARÉVi. Mini Transat 1997	62
3.6 Les écoulements le long de la coque en surface	66
3.7 Déformation de la carène à la gîte	68
3.8 Hiérarchisation des données et leur utilité	75
3.9 Mouvements des particules d'eau dans une vague. Figure tirée de [Gutelle 01]	79
3.10 Concepts liés à la mer du barreur	84

3.11 L'échelle de Douglas décrivant l'état de la mer	84
3.12 Positions du bateau par rapport à une vague	85
3.13 Concepts liés au vent	86
3.14 Concepts liés au bateau	87
3.15 La route d'un voilier dépend de multiples considérations stratégiques ou tactiques	88
3.16 Le bateau virtuel et son clone	90
4.1 Modèle d'agent réactif et actif	97
4.2 Strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net simulant le contrôle d'horloge d'un agent actif	97
4.3 MT-net modélisant l'agent actif de la figure 4.1	98
4.4 Vue simplifiée du système global environnement/pilote virtuel	99
4.5 Modélisation du bus	100
4.6 Présentation UML d'un agent capteur	100
4.7 Les états d'un capteur	101
4.8 Modélisation de l'agent capteur	101
4.9 Modélisation simplifiée de l'agent capteur	102
4.10 Graphe des marquages simplifié du réseau capteur	102
4.11 Quatre groupes d'agents concepts	103
4.12 Les allures du voilier vues comme ensembles flous	103
4.13 Ensembles flous décrivant la position de la barre et les efforts sur la barre	104
4.14 Modèle générique d'un agent concept	104
4.15 L'agent concept amure	105
4.16 L'agent concept allure	105
4.17 Les différentes manières de communiquer	106
4.18 Les caractéristiques du vent à la fois en force et en direction pour l'agent Wind	107
4.19 La mer vue du barreur	107
4.20 Modèle commun aux agents Sea et Wind	108
4.21 Modèle partiel de l'agent Mer	109
4.22 Modélisation par strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net d'un des cycles de l'agent Mer	109
4.23 Modèle de comportement de l'agent polar	110
4.24 Architecture générale du barreur	112
4.25 Le barreur réactif	113
4.26 Les différents modes de barre de la bibliothèque du barreur réactif	113
4.27 Modèle simplifié du barreur réactif	115
4.28 Le barreur expert	116

4.29	Les ensembles flous pour la variable bornes de cap	116
4.30	Règles floues	116
4.31	Modèle de barre à l'allure de près	117
4.32	Contrôle des modes de barre par le barreur expert	118
4.33	Comparaison des stratégies pour différents pilotes	119
4.34	Le barreur adaptatif	120
4.35	Le barreur réactif/prédictif	122
4.36	Simulation dans la simulation pour l'anticipation	123
5.1	Répétiteur pour différentes données du bord	128
5.2	L'interface du barreur virtuel	129
5.3	Table de mixage employée pour le réglage des PID	130
5.4	Influence du terme intégral sur la commande de barre	131
5.5	Trajectoires	131
5.6	Trajectoires réelles des deux voiliers lors d'une rafale	132
5.7	Trajectoires déformées des deux voiliers lors d'une rafale	132
5.8	Evolution des angles de barre lors d'une rafale	133
5.9	Evolution des vitesses lors d'une rafale	133
5.10	Trajectoires lors d'une molle	134
5.11	Angles de barre lors d'une molle	134
5.12	Vitesses lors d'une molle	135
5.13	Trajectoires lors d'un refus	135
5.14	Vitesses lors d'un refus	136
5.15	Trajectoires lors d'une molle refusante	136
5.16	Vitesses lors d'une molle refusante	137
5.17	Trajectoires dans du clapot	137
5.18	Vitesses dans du clapot	138
5.19	Angles de barre lors de la négociation de vagues isolées	139
5.20	Vitesses lors de la négociation de vagues isolées	139
5.21	Angles de barre lors de départs en surf	140
5.22	Trajectoires lors de départs en surf	140
5.23	Vitesses lors de départs en surf	141
6.1	Exemple de réseau de Petri	148
6.2	Graphe des marquages.	149

6.3	Réseaux de Petri et modélisation graphique	150
6.4	Réseau étiqueté dont le langage ne peut être celui d'un réseau non étiqueté	154
6.5	Réseau sur l'algèbre $(2^P, \cup)$	156
6.6	Graphe des marquages du réseau 6.5	157
7.1	Deux RdP ayant même langage mais dont les graphes de marquages ne sont pas isomorphes	164
7.2	Type des réseaux élémentaires	165
7.3	Action du virement sur l'amure d'un voilier	166
7.4	Solution au problème du virement par un RdP étiqueté	166
7.5	Un strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net	167
7.6	Strict- $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ -net modélisant l'action d'un virement sur l'amure d'un voilier	167
7.7	Deux cycles imbriqués	167
7.8	RdP étiqueté ayant le comportement de la figure 7.7	168
7.9	Strict- $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ -net ayant le comportement de la figure 7.7	168
7.10	Type des strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets noté $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})$	168
7.11	RdP dont le graphe des marquages est isomorphe à $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})$	169
7.12	Strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -net dont le graphe des marquages est isomorphe à $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})$	169
7.13	Strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -net ayant un comportement cyclique	170
7.14	Un strict- \mathbb{Z} -net sans réseau de Petri équivalent	171
7.15	Réseau de Petri et son strict- \mathbb{Z} -net équivalent	171
7.16	RdP non modélisable par strict- \mathbb{Z} -net	172
7.17	Une première classification	172
7.18	Graphe de couverture du réseau de la figure 7.14	175
7.19	Un \mathbb{Z} -net	177
7.20	Réseau de Petri et son \mathbb{Z} -net équivalent	177
7.21	Graphe de couverture pour les \mathbb{Z} -nets	178
7.22	Réseau avec arc inhibiteur non modélisable par \mathbb{Z} -net	178
7.23	Type des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets	179
7.24	Group-nets et réseaux de Petri	179
7.25	Exemple de \mathbb{Z}_2 -net	180
7.26	Passage d'un group $_n$ -net à un group $_2$ -net	182
8.1	Réseau lexicographique	187
8.2	Réseau sur $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$ non modélisable par un réseau sur $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$	187
8.3	Réseau lexicographique sans RdP à arcs inhibiteurs équivalent	191

8.4	RdP à arcs inhibiteurs et son réseau lexicographique équivalent	196
9.1	Type des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets dit type \mathcal{T}	200
9.2	Type des réseaux élémentaires.	201
9.3	Type des réseaux à bascule ou flip-flop.	201
9.4	$\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net synthétisé à partir du type des réseaux flip-flop.	202
9.5	$\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net non simulable par réseau flip-flop.	202
9.6	Graphe des marquages du réseau de la figure 9.5.	203
9.7	Automate et un de ses arbres couvrants.	206
9.8	Réseau obtenu par résolution du système $S_{\varepsilon,a}^1$	206
9.9	Réseau obtenu après résolution du problème 9.2.1	207
9.10	Réseau final ayant le comportement spécifié figure 9.7	207
9.11	Réseau lexicographique dont le langage ne peut être celui d'un RdP.	208
9.12	Exemple de réseau lexicographique ayant un langage qui ne peut être celui d'un réseau de Petri.	209
9.13	Strict- \mathbb{Z} -net dont le langage ne peut être celui d'un réseau lexicographique.	209
9.14	Réseau infini ayant un langage qui ne peut être celui d'un réseau fini	212
9.15	Réseau lexicographique dont le langage est la meilleure approximation de $pr(a + bba)$. . .	214
9.16	Réseau de Petri ayant même langage que le réseau de la figure 9.15	214

Remerciements

Une thèse semble être à première vue l'œuvre d'un seul. Pourtant, comme tout travail de longue haleine, elle est le fruit de nombreuses interactions à la fois techniques, scientifiques, personnelles ou encore familiales. Il s'agit avant tout d'une aventure qui doit beaucoup à de nombreuses personnes que je tiens à remercier ici.

En premier lieu, merci à Elisabeth, ma femme, pour accepter de me partager avec la rédaction de ce mémoire et, depuis fort longtemps, avec la mer qui régulièrement m'appelle vers des horizons toujours renouvelés.

Merci à Annaïg, Pierrick et Cécile mes trois merveilleux moussaillons pour leur soif de découvertes, leur enthousiasme et leur vivacité, ils représentent pour moi un vrai dopage quotidien !

Merci à Marc Parenthoën (LISyC/CERV) de m'avoir proposé ce sujet de thèse ainsi que pour sa gentillesse, sa disponibilité et ses qualités de marin.

Merci à Jacques Tisseau (LISyC/CERV), directeur de cette thèse, pour m'avoir trouvé un mouillage au *Centre Européen de Réalité Virtuelle* (CERV) quelques milles à l'ouest de Brest alors que depuis quelques temps déjà je tirais des bords quelque peu hasardeux dans l'océan tumultueux de la recherche.

Merci aux autres membres du jury - Bernard Simon (GGB/UBO-Brest) invité, Paul Crubillé (HEUDIASYC/UTC) et Dominique Duhaut (VALORIA/UBS-Vannes) examinateurs ainsi qu'aux rapporteurs Franck Cassez (IRCCyN/CNRS) et Jean-Louis Boimond (LISA/ISTIA).

Merci à Zacharia Belemaalem, Manuel Combes et Sylvain Chenu qui partagent le même bureau que moi au CERV pour les bons moments que l'on passe ensemble et les retours en vélo le soir vers Brest. Merci à tous les membres du CERV pour l'ambiance agréable qu'ils y font régner.

Merci à Jean-Philippe Babau (LISyC/UBO) pour tout l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et ses marques d'encouragement.

Merci à Philippe Darondeau et Eric Badouel (IRISA Rennes) pour m'avoir initié aux subtilités des réseaux de Petri, de la théorie des régions et de la synthèse, pour le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer et pour les idées qu'ils ont bien voulu partager.

Une partie de ce mémoire est consacrée à la technique de barre sur les voiliers car mon histoire personnelle est étroitement liée à la mer et aux bateaux. Aussi, j'adresse un grand merci à tonton Yves et à tante Denise pour m'avoir fait découvrir l'aventure qu'est la mer et pour m'avoir ensuite encouragé dans mes projets de courses au large. Merci à mes parents qui m'ont donné le goût du travail et de la persévérance, qualités importantes que ce soit en mer ou en recherche !

Merci à Yvan Jaffrezic, excellent marin mais avant tout merveilleux compagnon à la fois en mer et à terre pour tout ce qu'il m'a appris, sa générosité et son incroyable résistance physique.

Merci aux coureurs Christophe Cudennec, Gildas Morvan, Philippe Legros, Jacques Caraës, Hugues Destremau, Jean-Yves Le Déroff et Gaël Le Cléach pour avoir bien voulu me faire bénéficier de leurs lumières sur la manière de barrer un engin de compétition à une, deux ou trois coques.

Merci à Roland Jourdain, alias Bilou, pour les navigations sur son superbe 60 pieds open et son intérêt pour mes travaux.

Merci à Thomas Coville pour m'avoir fait découvrir l'incroyable monde des géants de la G-classe sur son trimaran de 100 pieds et les exigences toutes particulières du pilotage sur ces engins d'exception.

Un merci particulier à Michel Desjoyeaux, grand marin s'il en est, pour m'avoir ouvert les portes de son hangar à Port La Forêt et permis d'utiliser son matériel, pour m'avoir fait goûter aux griseries de la navigation sur multicoque high-tech de 60 pieds et pour m'avoir plus généralement beaucoup appris dans toutes les régates au cours desquelles j'ai eu la chance de l'avoir comme adversaire.

Merci à Mathieu Simonnet (CERV) pour son mémoire sur la voile et la cécité et les nombreuses discussions que nous avons eues.

Merci aux sociétés *Mer agitée* et *Micrel-NKE* pour leur soutien financier sur le projet « pilote intelligent ».

Chapitre 1

Introduction

1.1 Positionnement de la thèse

Cette thèse s'articule autour de deux parties distinctes, la première s'attaque au problème du pilotage des voiliers de course *via* une approche multi-agents alors que la seconde propose quelques extensions algébriques des réseaux de Petri, explore leur expressivité et étudie la décidabilité de propriétés classiques afférentes au domaine des réseaux.

Le succès grandissant des courses au large en solitaire comme le Vendée Globe, la Route du Rhum ou encore la course en solitaire du Figaro met en lumière tout l'intérêt de disposer d'un pilote automatique sûr et performant pour pouvoir manœuvrer, régler, manger ou tout simplement dormir. En effet, l'utilisation des pilotes automatiques commerciaux qui sont de simples régulateurs dépourvus de toute capacité de raisonnement ou de toute connaissance du milieu marin induit des pertes de performance et conduit parfois à des situations critiques pouvant occasionner des dégâts irréversibles comme des démâtages ou des chavirages. L'amélioration de ces pilotes est donc une demande forte des coureurs ainsi que des industriels les concevant.

Dans la première partie de cette thèse nous nous intéressons au contrôle et à la commande de la barre d'un voilier de compétition. Les notions de contrôle et de commande sont comprises dans leur sens usuel en automatique c'est-à-dire qu'il s'agit ici de maintenir un système, un voilier, dans un état donné en commandant la barre¹. Le contrôle est une prise de décision alors que la commande est une action. Le comportement de notre voilier dépend de la mer sur laquelle il repose et du vent qu'il subit. L'ensemble du système mer/vent/voilier est clairement un système complexe et le problème de contrôle et de la commande devient difficile car la solution envisagée doit répondre simultanément à un ensemble de contraintes liées au temps-réel, à la réactivité, à la sûreté, à la robustesse ou encore à l'adaptabilité, le tout dans un environnement par nature aléatoire et délicat à appréhender. Ce problème n'est pas nouveau et a été attaqué avec de multiples outils issus d'autant de disciplines différentes. En mathématiques, nous pouvons citer les théories de la commande optimale [Pontryagin 65, Vans 00] et des systèmes dynamiques [Hinrichsen 05], en mécanique la régulation et le traitement du signal [Prouvost 03], en informatique les langages réactifs [Roux 00] et la synthèse de contrôleurs [Achour 05] ou encore les architectures logicielles en robotique [Ingrand 03]. Une des caractéristiques essentielle des voiliers et plus particulièrement des voiliers de course est que les forces en jeu peuvent rendre physiquement impossible toute correction de trajectoire à l'aide du seul safran² donc de la barre. Les théories évoquées sont alors de peu d'utilité car il ne s'agit plus d'essayer de contrecarrer coûte que coûte les effets de ces forces mais plutôt de composer avec elles dans une stratégie de sauvegarde. Il se trouve que l'homme fait cela à merveille et nous nous sommes naturellement intéressés à sa pratique pour concevoir et construire notre pilote en effectuant une expertise de la technique de barre auprès

¹ Pour des questions pratiques et de coût, le pilote que nous proposons, à l'instar des pilotes commerciaux, agit uniquement sur la barre afin de pouvoir se substituer directement à eux.

² Terme désignant le gouvernail d'un bateau.

de coureurs de haut niveau.

L'expertise est destinée à servir à l'homme et s'attache à expliciter comment et pourquoi ce dernier agit face à son environnement. Les coureurs ont accepté de participer à cette expertise car je suis moi-même un coureur en solitaire, ancien membre de l'équipe *Finistère Course Au Large* basée dans la célèbre « vallée des fous » à Port-La-Forêt, creuset d'un nombre impressionnant de champions très connus aujourd'hui tels Michel Desjoyeaux, Jean Le Cam ou encore Roland Jourdain. Une telle position présente bien évidemment de multiples avantages parmi lesquels la connaissance des acteurs de la course au large d'aujourd'hui, la pratique et la capacité d'analyse en particulier des techniques de barre, la connaissance d'industriels liés au milieu du nautisme et notamment des équipementiers en électronique, capteurs et pilotes automatiques. On trouvera dans cette thèse une description des techniques de barre de haut niveau. Une telle étude n'avait, à notre connaissance, jamais été réalisée et constitue donc une nouveauté en soi. Un des propos de cette thèse va être l'intégration d'une expertise dans une architecture de contrôle, c'est-à-dire une implémentation informatique d'un modèle dédié au contrôle.

L'implémentation, le réglage et le test d'un pilote sur un bateau de compétition réel se heurtent à de nombreuses difficultés. En effet, ces engins sont la plupart du temps en chantier donc peu disponibles sur l'eau, exigent un équipage complet pour la manœuvre et sont en perpétuelle évolution technique ce qui impose de fréquentes recalibrations. Pour des raisons de coût et de gain de temps nous choisissons de simuler l'ensemble de l'environnement mer/vent/voilier *via* une plate-forme de *réalité virtuelle* tout en veillant à préserver une certaine compatibilité avec le monde réel en respectant notamment les protocoles de communication techniquement en usage sur la plupart des unités de course. Ce choix est délibérément fait afin de faciliter la portabilité de notre pilote sur un voilier réel en le substituant par exemple au boîtier de commande des pilotes commerciaux. La réalité virtuelle en tant que représentation de notre expérience sensorimotrice de la réalité qui nous entoure peut être vue comme un espace d'expérimentation de modèles. En étant accessible à nos propres sens, en réagissant à nos sollicitations et en permettant une modification aisée des modèles testés, elle permet de mieux appréhender la complexité de tels systèmes. Dans cette thèse nous proposons une architecture dédiée au contrôle et à la commande de la barre d'un voilier de compétition puis nous l'implémentons dans un système de réalité virtuelle et l'expérimentons par simulation. Ce dernier point permet de tester, corriger puis valider de manière incrémentale par expertise humaine les modèles implémentés. Il permet en particulier de faire varier à loisir les conditions de vent et de mer rencontrées par le navire et d'éprouver pour le pilote à la fois ses capacités, le caractère récurrent de son comportement et l'adéquation de son comportement avec l'expertise sur laquelle il s'appuie.

Au CERV³, lieu où se sont déroulés les travaux de cette thèse, un modèle de mer et accessoirement de vent appelé IPAS avait été développé par Marc Parenthoën à l'occasion de sa thèse [Parenthoën 04]. Un voilier y a été adjoint par la suite dans l'optique du développement du pilote automatique. L'implémentation de ces modèles a été effectuée dans le langage ARéVi⁴ développé au Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (LISyC-EA3883) de Brest qui offre toutes les fonctionnalités rêvées pour faire de la simulation de systèmes multi-agents évoluant dans un environnement de réalité virtuelle. Il était alors naturel de poursuivre avec ce même langage pour l'implémentation de notre pilote. Au sein du modèle IPAS la mer est vue comme un système peuplé d'entités autonomes en interaction caractérisant l'état de mer et permettant d'obtenir la position et la vitesse des fluides (eau et air) au voisinage de la surface. Dans l'architecture globale de notre pilote, chaque capteur correspondant grossièrement à un capteur physique disponible sur un voilier réel est un agent ainsi que chaque concept utile à la technique de barre et extrait de l'expertise effectuée. Le barreur lui-même, c'est-à-dire celui qui commande la barre, s'articule autour de trois agents dits barreur réactif, barreur expert et barreur adaptatif qui fonctionnent de manière asynchrone et parallèle. Notre pilote est donc de manière très claire un système multi-agents. Il s'agit également d'un système réactif dans le sens où il doit réagir aux sollicitations de son environnement. Le principe de fonctionnement du barreur est le suivant. Le barreur réactif, à une fréquence relativement élevée, interroge les agents capteurs et s'appuie sur une bibliothèque de lois de commande de type PID, dits « modes de barre » pour déterminer la commande de barre à appliquer. Cette approche a l'avantage de s'appuyer sur l'existant, les régulations industrielles ayant fait leurs preuves et étant relativement bien cernées en termes

³ Centre Européen de Réalité Virtuelle

⁴ ARéVi (Atelier de Réalité Virtuelle) est une bibliothèque de simulation et de rendu 3D, disponible selon la licence LGPL sur <http://www.enib.fr/~harrouet/>

de conditions d'utilisation. Le barreur expert utilise les agents capteurs ainsi que des agents dits « concepts » afin de déterminer le contexte dans lequel il se trouve. En cas de nécessité, il applique une stratégie de barre définie par une séquence de postures sensorimotrices attendues et traduite par une succession de modes de barre qui seront imposés au barreur réactif. Le barreur expert est contrôlé par un automate (modélisé par un réseau de Petri) qui veille également au bon déroulement des stratégies de barre en réagissant aux événements indiquant que les postures attendues sont atteintes afin de passer à l'étape suivante de la stratégie en cours. L'intérêt d'un tel contrôle est d'être universel pour un certain type de voiliers, en l'occurrence ici les monocoques de course, car basé sur un modèle générique de comportement décrit qualitativement par expertise. Ainsi pour relancer un bateau, c'est-à-dire lui redonner une vitesse normale, on cherchera par exemple à abattre⁵ tant que la vitesse souhaitée n'est pas atteinte, ni l'angle ni la durée de l'abattée n'étant *a priori* définis. Enfin, le barreur adaptatif est chargé, à basse fréquence, d'ajuster les paramètres généraux du pilotage en s'appuyant en particulier sur des agents lui fournissant des modèles de son environnement, c'est-à-dire, des modèles de mer, de vent et du bateau.

La taille et la complexité de tels systèmes les rendent difficile à appréhender et nécessitent leur abstraction, c'est-à-dire la construction d'une représentation réduite permettant leur conception et leur analyse. L'abstraction d'un système réactif est généralement axée sur l'enchaînement des événements et leurs branchements. Dans notre cas, le choix d'une abstraction capable de rendre compte de comportements concurrents plutôt que séquentiels s'impose d'une part parce que le système réel est intrinsèquement concurrent et d'autre part parce que les abstractions obtenues sont généralement à la fois plus compactes et décomposables naturellement en entités communicantes. Nous proposons donc une modélisation de notre architecture multi-agents par réseaux de Petri car ils sont considérés comme l'outil le plus puissant pour modéliser le parallélisme [Sassone 96] et sont très largement utilisés pour le contrôle [Ghaffari 02]. Il y a de nombreux phénomènes cycliques en mer (variations du vent, houle ...) qui sont perçus par le barreur notamment *via* des changements d'attitude du voilier. Ces événements perçus par le barreur peuvent être aussi bien distingués ou confondus à partir du moment où on est sûr de leur cyclicité. D'où l'idée d'utiliser des groupes cycliques en guise d'algèbre des places d'un réseau de Petri plutôt que l'habituel monoïde \mathbb{N} des entiers naturels. Ces extensions algébriques présentées en détail dans la seconde partie de cette thèse apparaissent de manière anecdotique dans notre modélisation car le gain obtenu en termes de taille est largement oblitéré par le fait que leur construction n'est ni naturelle, ni intuitive donc délicate à mettre en œuvre.

Dans la deuxième partie de cette thèse nous nous sommes intéressés aux *réseaux de Petri* car dans la littérature sur les systèmes réactifs, les propriétés les plus souvent citées (vivacité, consistance, blocage ...) sont décidables pour cette classe de réseaux. Ils permettent de plus le *Model-Checking* c'est-à-dire la vérification automatique de propriétés *a posteriori* et la *synthèse* c'est-à-dire la construction automatique d'un réseau vérifiant un ensemble de propriétés. La synthèse permet généralement d'exhiber le parallélisme sous-jacent d'un système. En fonction d'exigences diverses, de nombreux modèles de réseaux de Petri ont été imaginés (réseaux de Petri temporisés, réseaux de Petri continus, réseaux de Petri à arcs inhibiteurs ...). Ceux que nous décrivons dans cette thèse font partie de la classe dite des *généralisations algébriques* car ils sont obtenus en modifiant l'algèbre des places tout en adaptant, en conséquence, la règle de tir et étendent les réseaux de Petri usuels dans le sens où tout réseau de Petri est modélisable par un de ces réseaux équivalent. Une des grandes préoccupations liées aux extensions des réseaux de Petri est d'essayer de préserver les propriétés de décidabilité des réseaux de Petri usuels. On sait par exemple que les problèmes de terminaison, de couverture, du caractère borné d'un réseau, du caractère borné d'une place, de l'accessibilité, du blocage et de la vivacité sont des problèmes ayant une solution effective dans la classe des réseaux de Petri. Nous cherchons donc à obtenir des extensions qui préservent un maximum de propriétés de décidabilité. Dans ce cadre des algorithmes de décisions sont donnés pour certaines classes de ces réseaux. Par ailleurs, afin de connaître le pouvoir d'expression de nos modèles, nous les comparons à des modèles connus. Nous ébauchons ainsi une classification de nos réseaux par rapport à des réseaux classiques comme les réseaux de Petri bornés ou les réseaux de Petri à arcs inhibiteurs et donnons, dans certains cas d'inclusion, les algorithmes permettant de passer d'un type de réseaux à un autre. On trouvera deux grands types de généralisations algébriques : les *group-nets* d'une part utilisant des groupes comme algèbres des places et les *réseaux lexicographiques* d'autre part qui sont obtenus comme cas particulier de réseaux sur des *algèbres de Petri*, algèbres qui permettent de « singer » le comportement des réseaux usuels. Tous ces

⁵ S'écarter de l'axe du vent.

modèles sont proposés en lien avec le problème de synthèse *via* la théorie des régions et excluent par conséquent l'étiquetage des transitions. Deux problèmes de synthèse sont d'ailleurs étudiés.

Ce qui motive l'introduction des *strict-group-nets* où l'algèbre des places est un groupe privé de son élément neutre est leur capacité à modéliser de façon extrêmement compacte des cycles dans des systèmes de transitions étiquetées *via* l'utilisation naturelle de groupes cycliques. Mais cette piste est rapidement délaissée car le lien de l'algèbre des réseaux de Petri avec le groupe \mathbb{Z} incite vivement à étudier les *strict- \mathbb{Z} -nets*. Nous montrons que les *strict- \mathbb{Z} -nets* étendent les réseaux de Petri purs et que les problèmes de savoir si un réseau est borné ou si une place est bornée sont décidables. Les *strict- \mathbb{Z} -nets* n'étendant pas les réseaux de Petri, nous proposons une extension commune appelée *\mathbb{Z} -net* en adjoignant aux *strict- \mathbb{Z} -nets* un arc particulier dit « inconditionnel ». Les *\mathbb{Z} -nets* conservent des propriétés intéressantes des *strict- \mathbb{Z} -nets* et ne sont pas comparables en particulier aux réseaux de Petri à arcs inhibiteurs. Le fait que la notion de ressource *stricto sensu* disparaisse rend le fonctionnement de ces réseaux peu intuitif et ils deviennent difficiles à synthétiser. Mais être capable de retrouver ou d'étendre quelques grandes classes des réseaux de Petri (réseaux de Petri, réseaux de Petri purs, réseaux de Petri bornés, réseaux élémentaires) à partir des *group-nets* pour des groupes particuliers permet d'avoir une vision uniforme de ces classes et justifie l'intérêt de ce nouveau modèle. Pour se rapprocher encore plus des réseaux de Petri où une transition s'effectue en deux phases (une phase de consommation suivie d'une phase de production), nous définissons une classe de réseaux, les *group₂ - nets*, qui permet d'obtenir une vision unifiée des *strict- \mathbb{Z} -nets* et des *\mathbb{Z} -nets*.

Nous présentons ensuite les *réseaux lexicographiques* qui sont issus d'une axiomatisation de la notion de ressource et de la règle de tir des réseaux de Petri usuels et sont censés, par conséquent, se comporter comme eux. Les réseaux lexicographiques forment également une extension algébrique des réseaux de Petri avec une notion de ressource très étrange : on peut consommer strictement indéfiniment ! Ces nouveaux réseaux ont malheureusement la puissance des machines de Turing. Cependant, nous montrons que les réseaux lexicographiques bornés sont les réseaux de Petri bornés ce qui achève d'une certaine manière leur description.

Nous montrons enfin que le problème de la synthèse pour les *$\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets* est résoluble en temps polynomial ainsi que celui de la meilleure approximation d'un langage rationnel par un réseau lexicographique.

1.2 Organisation du mémoire

Ce document s'organise autour de deux grandes parties : une **architecture multi-agents pour le pilotage automatique des voiliers de compétition** (partie I) et la proposition de **quelques extensions algébriques des réseaux de Petri** (partie II).

1. La **partie I** présente le domaine de la course au large et la problématique du pilotage automatique des voiliers dans le cadre des compétitions (chapitre 2). Une expertise (chapitre 3) fine et exhaustive de la technique de barre et de l'utilisation des systèmes de pilotage mène à la modélisation et à la construction d'une architecture pour le contrôle et la commande de la barre (chapitre 4). La phase d'expérimentation (chapitre 5) permet incrémentalement d'affiner les réglages propres du pilote tout en soulignant les apports du système dans différents contextes.
 - Ch.2** Le problème du pilotage automatique dans le domaine de la course au large en solitaire est primordial pour des raisons de performance et de sécurité car incontournable. Bien qu'en apparence simple, il est en fait lié à des systèmes complexes : la mer, le vent et le voilier qu'il convient de bien appréhender pour espérer y répondre convenablement. Un état de l'art des techniques pour contrôler et commander le système de direction d'un voilier est dressé et détaille les approches de la physique (mécanique du point et des fluides), de l'automatique (régulation de type PID implémentée dans les pilotes commerciaux actuels et contrôleurs flous) et de l'informatique.
 - Ch.3** Même si l'homme peut être ponctuellement moins performant qu'un pilote automatique, il sait généralement répondre aux sollicitations les plus extrêmes de son environnement en étant capable de déterminer les contextes dans lesquels il se trouve. Sur la base de la psychologie écologique nous menons une expertise complète de l'action de l'homme à la barre de

son voilier ainsi que de son usage des techniques de pilotage autonomes apparues au fil du temps. Nous cherchons à comprendre comment l'individu s'inscrit dans son environnement et quelles sont les réponses qu'il lui oppose. Nous dégageons ainsi un ensemble de concepts liés au métier du coureur au large et à la technique de barre, puis, nous les caractérisons et les hiérarchisons. Nous décrivons également en détail les stratégies de barre utilisées par les coureurs en fonction des contextes rencontrés. Les concepts vont permettre de définir le contexte dans lequel se situe le barreur et donc de choisir la stratégie adaptée.

- Ch.4** Nous proposons une architecture globale de *pilote virtuel* comprenant un *barreur virtuel* composé de trois processus autonomes, asynchrones, fonctionnant en parallèle et communiquant entre eux. L'un, le barreur *réactif*, fonctionnant à haute fréquence, prend en charge le contrôle temps réel de la barre en appliquant différentes lois de commande possibles. Un deuxième, le barreur *expert*, fonctionnant à moyenne fréquence, change d'état périodiquement ou sur occurrence d'événements pour identifier ainsi les contextes dans lesquels il évolue et impose au barreur réactif la loi de commande la plus adaptée. Un troisième, le barreur *adaptatif*, fonctionnant à basse fréquence, adapte les paramètres des lois en fonction des caractéristiques globales de son environnement. Une modélisation par réseaux de Petri étendus de l'ensemble du système permet de le spécifier partiellement et d'apporter une aide précieuse à son implémentation.
- Ch.5** Un des grands attraits de la réalité virtuelle est d'offrir un espace d'expérimentation pour tester nos modèles. Simuler aide dans un premier temps à choisir et à paramétrer correctement les lois de commande, à affiner l'évaluation des concepts définis lors de l'expertise ainsi qu'à traduire en termes de séquence d'applications de lois de commande les stratégies adoptées face aux situations critiques les plus répandues pointées par l'expertise. Ces réglages effectués, simuler permet de valider par retour d'expérience notre pilote virtuel en déroulant des scénarios types et en comparant le comportement du bateau à celui d'un clone contrôlé par un pilote commercial standard.
2. Dans le cadre de la modélisation, la spécification et la validation des systèmes et en particulier des contrôleurs nous nous sommes intéressés aux réseaux de Petri. Certaines caractéristiques ne peuvent être prises en compte par les réseaux usuels, aussi est-il courant de les étendre pour y répondre. Nous commençons la **partie II** par la présentation des réseaux de Petri et d'un type d'extension qui nous a particulièrement intéressé : les extensions algébriques (chapitre 6). Nous proposons ensuite un premier modèle d'extension dit *group-nets* (chapitre 7) basé sur l'utilisation de groupes. La notion de ressource devenant étrange, nous proposons un autre modèle, dit *réseaux lexicographiques* censé singer le comportement des réseaux de Petri places/transitions usuels (chapitre 8). Nous terminons cette partie par l'étude de deux problèmes de synthèse liés à ces nouveaux modèles (chapitre 9).
- Ch.6** L'utilisation des réseaux de Petri places/transitions pour modéliser et valider des systèmes concurrents est naturelle mais couvre rarement l'ensemble de leurs caractéristiques. Aussi est-il courant d'étendre le pouvoir d'expression des réseaux de Petri tout en essayant de préserver un maximum de leurs propriétés qui permettent de décider de nombreux problèmes liés au bon fonctionnement des systèmes. Ce chapitre dresse un état de l'art sur les réseaux de Petri, leurs extensions et, en particulier, leurs extensions algébriques.
- Ch.7** En mer beaucoup de phénomènes sont cycliques et entraînent un comportement cyclique du barreur. La motivation initiale des *group-nets* est de pouvoir modéliser simplement des cycles en utilisant des groupes cycliques à la place de l'algèbre en usage dans les réseaux de Petri. Leur intérêt semble cependant limité à cause notamment du caractère fini des groupes utilisés. L'utilisation du groupe \mathbb{Z} des entiers relatifs du fait de ses liens avec le monoïde des entiers naturels permet d'obtenir une extension de certaines familles de réseaux de Petri tout en préservant quelques propriétés de décidabilité intéressantes. Ce chapitre explore différentes variantes de ces réseaux en les comparant à des classes de réseaux de Petri bien connues tout en répondant à quelques problèmes de décidabilité les concernant.
- Ch.8** Dans les *group-nets* la notion de ressource disparaît et on peut se demander s'il s'agit encore de réseaux de Petri. Une autre approche consiste à caractériser les algèbres partageant les mêmes propriétés que celles sous-jacentes aux réseaux de Petri pour pouvoir ainsi singer leur comportement. Nous exhibons ainsi les *réseaux lexicographiques* qui étendent strictement les réseaux de Petri mais qui ont malheureusement la puissance des machines de Turing. Nous montrons tout de même que les réseaux lexicographiques bornés sont les réseaux de Petri bornés ce qui achève d'une certaine manière leur description.

Ch.9 Ce chapitre s'appuie sur les notions de type de réseau et de région. Le problème de synthèse consiste pour un comportement donné à décider de l'existence d'un réseau d'un certain type ayant même comportement et, dans le cas positif, de le construire. Ce problème a été résolu pour plusieurs classes de réseaux et différents comportements et permet de répondre dans certains cas au problème de la synthèse de contrôleurs. Nous montrons d'abord dans ce chapitre que ce problème est résoluble en temps polynomial pour les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets. Le problème de la synthèse des 2-structures partielles [Ehrenfeucht 90a, Ehrenfeucht 90b] a été prouvé NP-complet par Darondeau, Badouel et Bernardinello pour le cas particulier des réseaux élémentaires [Badouel 90]. Les réseaux élémentaires sont importants car on les retrouve comme sous-classe de la plupart des classes de réseaux de Petri (RdP usuels, bornés, purs ...). D'autre part le problème de synthèse est polynomial pour les réseaux de Petri bornés. L'intérêt des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets est qu'ils étendent les réseaux élémentaires tout en offrant une réponse polynomiale au problème de la synthèse. Le problème de synthèse peut être posé de manière similaire en termes de langages. Nous finissons le chapitre en montrant que le problème de la meilleure approximation d'un langage rationnel par un réseau lexicographique (au sens de l'inclusion des langages) est également résoluble en temps polynomial.

Le chapitre de conclusion dresse un bilan du travail effectué et ouvre des voies de recherche en guise de perspectives (chapitre 10).

Enfin deux annexes figurent en fin de document. La première retranscrit les propos tenus par quelques coureurs au large interrogés sur leurs pratiques de la barre dans le cadre de l'expertise du chapitre 3. Pour un lecteur avisé, habitué des régates et du vocabulaire technique des marins il représente une véritable mine d'or et figure à ce titre dans ce manuscrit. La deuxième annexe expose les travaux entrepris sur un ancien voilier de course et l'architecture logicielle du pilote commercial actuellement en place afin d'y porter notre pilote en tant que couche logicielle supplémentaire. Les essais effectués ont mis à jour des problèmes temps réels qui nécessitent d'intervenir dans du code propriétaire. Faute de temps, les essais en situation réelle ont été abandonnés pour cette thèse mais restent notre principal objectif dans un futur proche.

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

Bibliographie

- [Achour 05] Achour, Z., Rezg, N., et Xie, X. (2005). Petri net controller synthesis using theory of regions. In *1st I*PROMS Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, IPROMS 2005*.
- [Badouel 90] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1990). The synthesis problem for elementary net systems is NP-complete. *Theoretical Computer Science*, 186 :107–134.
- [Ehrenfeucht 90a] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990a). Partial 2-structures; Part I :Basic notions and the Representation Problem. *Acta Informatica*, 27 :315–342.
- [Ehrenfeucht 90b] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990b). Partial 2-structures; Part II : State Spaces of Concurrent Systems. *Acta Informatica*, 27 :343–368.
- [Ghaffari 02] Ghaffari, A. (2002). *Les réseaux de Petri pour la synthèse de contrôle des systèmes à événements discrets*. Mémoire de Thèse, Université de Metz.
- [Hinrichsen 05] Hinrichsen, D. et Pritchard, A. (2005). *Mathematical Systems Theory. Modelling, State Space Analysis, Stability and Robustness*. Springer.
- [Ingrand 03] Ingrand, F. (2003). Architectures Logicielles pour la Robotique Autonome. In *JNRR 03 Journées Nationales de Recherche en Robotique*, Clermont-Ferrand. France.
- [Parenthoën 04] Parenthoën, M. (2004). *Animation phénoménologique de la mer : une approche éactive*. Mémoire de Thèse, Université de Bretagne Occidentale.
- [Pontryagin 65] Pontryagin, L., Boltyanskii, V., Gamkrelidze, R., et Mishchenko, E. (1965). *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. CRC Press.
- [Prouvost 03] Prouvost, P. (2003). *Automatique Contrôle et Régulation*. Dunod.
- [Roux 00] Roux, O. (2000). Langages réactifs synchrones et asynchrones. *Techniques de l'ingénieur*, S8060.
- [Sassone 96] Sassone, V., Nielsen, M., et Winskel, G. (1996). Models for concurrency. *Theoretical Computer Science*, 170(1-2) :297–348.
- [Vans 00] Vans, L. (2000). *An Introduction To Mathematical Optimal Control Theory*. University of California Berkeley.

Première partie

Architecture multi-agents pour le pilotage automatique des voiliers en compétition

Chapitre 2

Le pilotage automatique des voiliers

Le voilier est un étrange véhicule. Il navigue entre deux fluides de densité différente : un gaz et un liquide.

Les Voiles Comprendre, Régler, Optimiser Bertrand Chéret [Chéret 00].

2.1 Introduction

Mener un voilier de course en solitaire impose de continuelles contraintes à son capitaine ou skipper¹ qui doit user de toute sa science de la navigation et de la barre pour tirer le meilleur parti de sa monture. Le problème, bien qu’anodin en apparence, s’avère extraordinairement complexe dès que l’on s’inscrit dans une optique de performance car le voilier, la mer et le vent forment un système complexe difficile à appréhender. Ce chapitre commence par une présentation du domaine ; le voilier, sa position par rapport au vent, ses performances et les besoins du skipper à long terme, moyen terme et court terme. Nous nous positionnons dans ce dernier cas : le pilote automatique que nous cherchons à développer prendra en charge ce que nous appelons le besoin temps réel du skipper.

La suite du chapitre propose un état de l’art des différentes approches applicables à la commande de barre d’un voilier. A notre connaissance, il existe peu de travaux dédiés aux voiliers et encore moins orientés vers la performance. A contrario, le pilotage des navires de commerce a suscité de nombreuses recherches ne serait ce que par son impact économique. Cependant cargos, méthaniers ou super tankers ont peu de choses à voir avec les voiliers. Par exemple, dans [Fossen 02], référence internationale en matière de commande de navire, se trouvent de nombreux modèles basés sur les résultats des équations de la mécanique du point et des fluides (Navier-Stockes). Ces modèles supposent d’une part des conditions idéales (c’est-à-dire un équilibre physique stable) et d’autre part ne prennent pas en compte ni les interactions vent/voilure, ni les interactions mer/appendices du type quille, dérives ou foils, ni le fait que la longueur d’un voilier contrairement aux cargos, est souvent inférieure à celle des vagues ce qui induit des comportements très différents.

Nous commençons par les approches physiques avec ce que nous appelons « la barre des physiciens ». La physique permet d’élaborer des modèles qui décrivent la dynamique du voilier. Ces modèles servent différentes préoccupations comme la simulation, l’estimation d’efforts, la comparaison de carènes ou encore la prédiction de vitesses. Bien que la barre n’y soit considérée que comme une partie du problème, il est possible de l’isoler pour en déduire des modèles. La physique employée

¹ Dans le cadre de compétitions, le terme consacré pour celui qui est en charge du bateau et de son équipage est le mot « skipper » parfois francisé en « skippeur ». Bien souvent (mais pas systématiquement) le « barreur », celui qui tient la barre donc celui qui dirige le bateau, est également le skipper. La distinction n’a évidemment plus de sens lorsque le bateau est mené en solitaire.

mêle mécanique du solide et mécanique des fluides. Elle nous permet au passage de présenter les choix effectués pour le voilier virtuel destiné au développement et à la validation de notre pilote et de définir le vocabulaire métier utile à la compréhension générale du domaine. Nous poursuivons par la barre telle quelle a été traitée par les communautés de l'automatique et de la robotique, ce que nous appelons « la barre des automaticiens » pour laquelle le pilotage des voiliers n'a pas donné lieu à des études spécifiques mais a été abordé comme domaine d'application de techniques plus ou moins éprouvées. Nous retrouvons ainsi de la régulation de type PID, de la commande par linéarisation par bouclage ou du contrôle flou. L'univers des pilotes automatiques commerciaux fait partie de ce domaine mais son étude est reportée dans le chapitre 3 car il est fortement lié aux pratiques des coureurs en solitaire et à leur représentation du problème du pilotage. Nous finissons par « la barre des informaticiens » avec, à notre connaissance, le seul travail engagé sous un angle résolument informatique : le projet RoboSail aujourd'hui arrêté.

Manque évidemment à ce chapitre la « barre des marins » c'est-à-dire la technique et l'avis des principaux intéressés que sont les coureurs de haut niveau. Notre approche s'appuyant sur une telle expertise, un chapitre spécifique lui est consacré.

2.2 Présentation du domaine

2.2.1 Le voilier

Un voilier peut se voir comme un solide flottant à la surface de séparation de deux fluides, l'air et l'eau, et se mouvant grâce à leurs différences de mouvement. En l'occurrence le bateau se déplace sous l'action du vent sur ses voiles et se dirige au moyen de la partie immergée de son gouvernail. Nous ne nous préoccupons pas ici des techniques liées à la conception et à la construction d'un voilier ; nous nous contenterons de donner le vocabulaire minimal nécessaire à la compréhension de la suite du texte.

La figure 2.1 présente un 60 pieds IMOCA (International 60 feet Monohull Open Class Association), les fameux voiliers destinés au Vendée Globe Challenge, seule course en solitaire et sans escale autour de la planète. Ces bateaux ne diffèrent guère d'un voilier de croisière standard en ce sens où ils ont une coque, un pont, une quille, un mât, des voiles ... Cependant certaines caractéristiques les rendent extrêmes. Tout d'abord, ils présentent un rapport poids/puissance élevé gage de vitesse, ensuite, des ballasts (volumes que l'on remplit d'eau de mer à la demande) permettent de gagner encore en puissance et de contrôler l'assiette du bateau. La quille peut être basculante autour d'un axe longitudinal donnant la possibilité de déporter le lest concentré dans une torpille au bout du voile de quille parfois jusqu'à 40 degrés de part et d'autre de la verticale. Quille basculée, le bateau gagne en *raideur* (capacité à porter de la toile) mais son plan antidérive constitué par le voile de quille perd alors nettement de son efficacité. Aussi est-il nécessaire de lui adjoindre des dérives. Ces voiliers disposent généralement de deux safrans plutôt que d'un seul à cause de leur grande largeur (pas loin de 6m pour 18m de long). La voile maintenue entre le mât et la bôme s'appelle la grand'voile ou GV alors que les voiles plates à l'avant sont appelées de manière générique des focs. En fonction de la force du vent et de l'allure (direction du vent par rapport à l'axe du bateau) on utilisera un foc de taille adaptée. Le plus grand est le génois, ensuite vient le solent, la trinquette et pour finir le tourmentin destiné au cas de tempête. A l'extrémité du bout-dehors on peut *frapper* un gennaker (voile d'avant plutôt creuse) ou un spinnaker (foc ballon très creux appelé également « spi ») pour les allures portantes.

2.2.2 Les allures

Dans la suite il sera souvent question d'*allure*. La figure 2.2 résume les cas les plus courants. Un voilier usant de la force vélique pour avancer, ne peut aller contre le vent. Le *près serré* consiste à mener le bateau au plus près de l'axe du vent de manière optimale (la projection du vecteur vitesse sur l'axe du vent de norme maximale). Si on *abat* (s'éloigner de l'axe du vent) un petit peu, on fait du



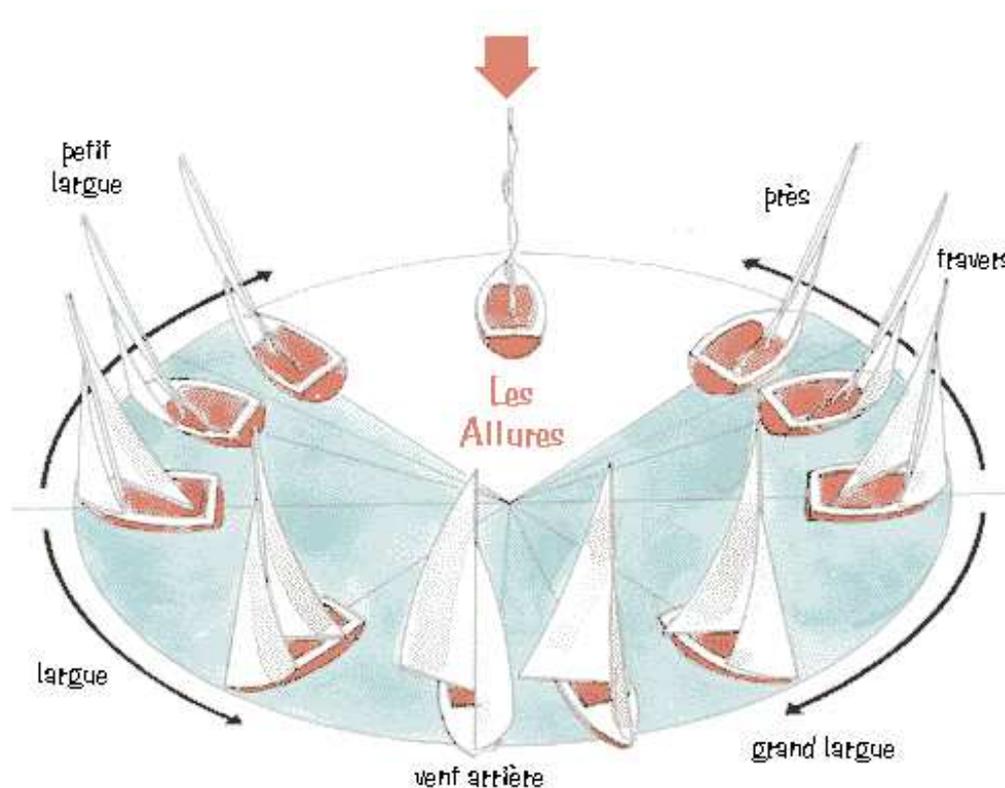
Les principaux éléments d'un voilier sont illustrés ici sur un 60 pieds open IMOCA. Ces bateaux, destinés au Vendée Globe Challenge, sont assez représentatifs vis à vis des problèmes de pilotage que peuvent rencontrer les coureurs solitaires. On retrouve 1. le mât 2. le foc 3. le gennaker 4. le bout-dehors 5. une des deux dérives 6. la quille (basculante ici) 7. un des deux safrans 8. la bôme 9. la grand'voile.

FIG. 2.1: Anatomie d'un 60 pieds open IMOCA (source IMOCA)

près puis du *près océanique* (terme qui signifie que l'on cherche plus à faire de la vitesse que du cap) pour passer ensuite au *débridé* ou *reaching*. Aux alentours de 90° du *vent réel*² on est au *largue* ou au *travers* (plus correctement *au vent de travers*). Lorsque le vent vient du trois quart arrière on parle de *grand-largue* et de *vent arrière* quand le vent vient de l'arrière. La figure 2.2 présente ces différentes allures et met en évidence une zone de part et d'autre de l'axe du vent où il est impossible d'accéder en route directe. Comme on ne peut y aller en un seul *bord*, il faut *tirer des bords* ou *lowoyer*. La figure 2.2 est symétrique, aussi on utilise les *amures* pour distinguer les cas. Lorsque le vent vient de droite pour un observateur regardant vers l'avant ou la *proue* du bateau, on dit qu'on est *tribord amure*³, et *babord amure* si le vent vient de gauche. Les allures *portantes* se situent en gros entre le *largue* et le *vent arrière*.

² Le vent *apparent* est celui qui est ressenti sur le bateau par opposition au vent *réel* qui est celui qui souffle sur le plan d'eau. Physiquement, en l'absence de courant, le vecteur vent apparent vaut la somme du vecteur vitesse du bateau et du vecteur vent réel.

³ Plus généralement, dans la bouche d'un marin *tribord* remplace *droite* et *babord* remplace *gauche*.



Les principales allures du près au vent arrière en passant par le large. Lorsque le vent vient de droite pour un observateur à bord regardant vers l'avant, le bateau est tribord amure ; s'il vient de gauche, le bateau est babord amure.

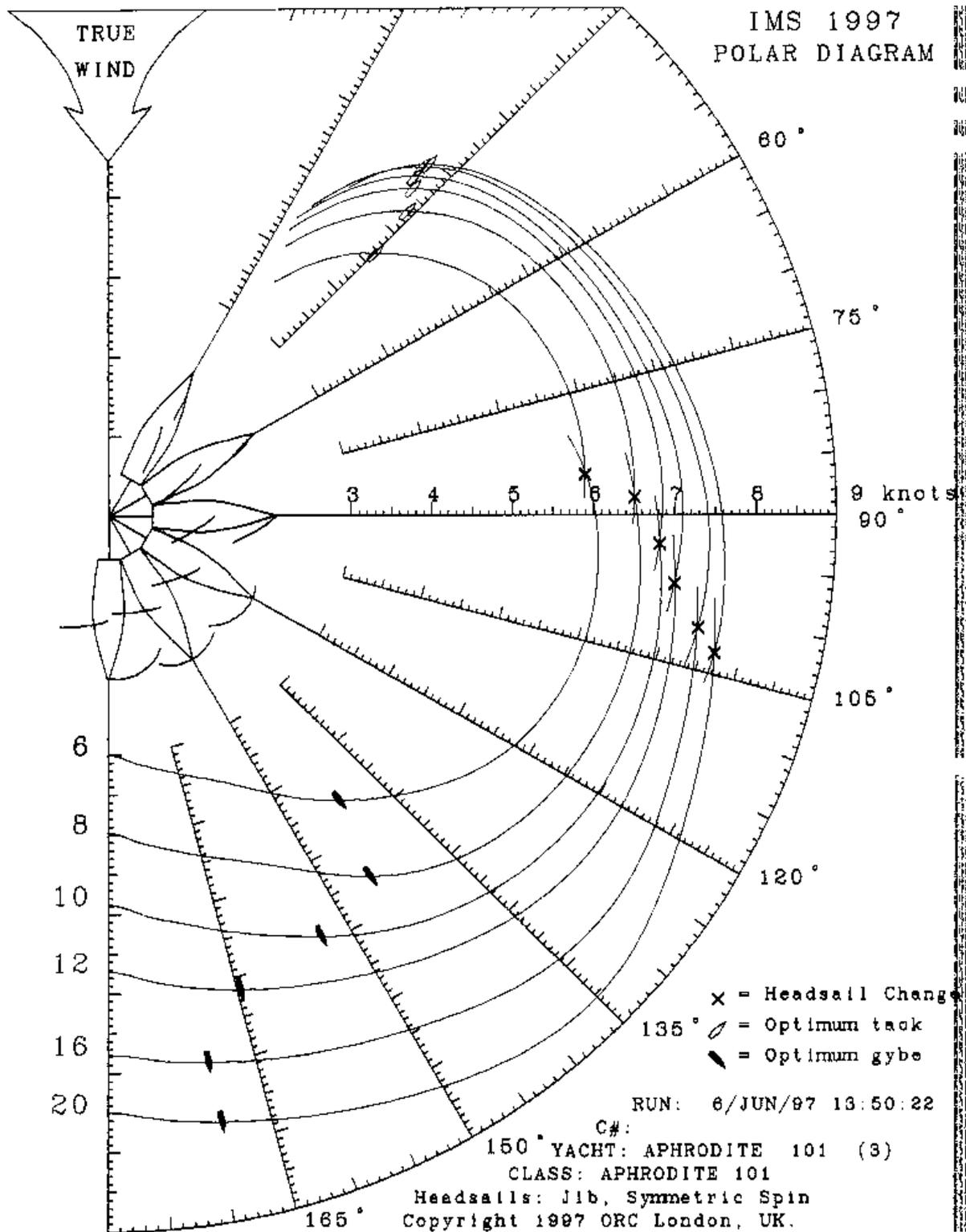
FIG. 2.2: Le voilier et les *allures*.

2.2.3 Les polaires

Les polaires de vitesse donnent les performances théoriques d'un voilier en fonction de la force du vent et de son angle par rapport à l'axe du bateau. La polaire classique dépend du vent réel c'est-à-dire du TWS (True Wind Speed) et du TWA (True Wind Angle). L'idéal est de disposer de la vitesse du bateau pour une large plage de forces de vent (entre 0 et 50 noeuds⁴ de vent) et d'allures. L'acquisition d'un tel jeu de données est longue et fastidieuse par la pratique, aussi les architectes navals utilisent des logiciels de VPP (Velocity Prediction Program) pour les obtenir. Si on représente en coordonnées polaires ces données on obtient des polaires de vitesse. La notion importante liée aux polaires est celle de *vitesse cible*. Pour le barreur la vitesse cible correspond à la vitesse optimale qu'il doit tenter d'atteindre. Généralement on représente pour une vitesse de vent donnée les vitesses cibles par rapport à chaque angle de vent réel. En l'absence de conditions particulières comme des vagues, ces courbes sont normalement symétriques comme celle de la figure 2.3 qui donne les performances de l'Aphrodite 101 pour différentes forces de vent.

En ajoutant un troisième axe portant la force du vent on obtiendrait une surface en trois dimensions. Pour une courbe donnée les points dont les tangentes sont perpendiculaires à l'axe vertical portant la vitesse du bateau (en noeuds) ont une importance particulière. En effet, ils donnent la meilleure façon de remontée (respectivement de descendre) sur l'axe du vent. On appelle cela le meilleur VMG (Velocity Made Good) c'est-à-dire la meilleure vitesse projetée sur l'axe du vent réel, soit la manière la plus rapide de rejoindre un point dans l'axe du vent ... en tirant des bords. Sur la figure 2.3 on peut constater que chaque courbe est constituée en fait de deux courbes qui se croisent à peu près à 90° du vent, donnant le *point de rupture de la polaire* qui correspond au passage du foc au spinnaker, la zone de creux (concave) entre foc et spi étant à éviter. Les polaires de la figure 2.3 sont des polaires théoriques fournies par un logiciel de VPP et sont donc symétriques. Si on décide d'enregistrer les performances du bateau et de générer ainsi des polaires dynamiques, ces dernières

⁴ Un *mille* marin vaut 1852 m. Un *noeud* est la vitesse correspondant à un mille par heure. Les marins rechignent à utiliser le système international et parlent en général en noeuds et en milles.



Chaque courbe représente les vitesses cibles du bateau (lisibles sur l'axe horizontal) pour une force de vent donnée (indiquée par sa vitesse en noeuds sur l'axe vertical). Les polaires de vitesse dépendent non seulement du vent mais également des conditions de mer et de réglages éventuels. Les petits bateaux blancs donnent les meilleurs angles de remontée au vent et la vitesse cible correspondante. Les noirs donnent la même chose mais pour « descendre » dans le vent. On remarquera qu'une courbe est en fait constituée de deux courbes, la première sous foc pour des angles en gros inférieurs à 90°, la deuxième sous spi. Le point d'intersection souligné par une croix est le *point de rupture* de la polaire et permet de décider s'il vaut mieux porter le spi ou non ainsi que des bords à tirer pour optimiser son gain par rapport à l'objectif à atteindre.

FIG. 2.3: Polaires de l'Aphrodite 101

sont alors rarement symétriques car la présence de vagues dans une direction différente de celle du vent par exemple va gêner ou favoriser la progression du bateau.

Une tendance récente est d'utiliser des polaires de vitesse « vent apparent » plutôt que « vent réel » car le calcul du vent réel est délicat. On dispose alors des vitesses cibles en fonction de la vitesse du vent apparent (AWS en anglais) et de son angle (AWA).

Généralement, les polaires ne tiennent pas compte du phénomène de *surf* qui permet sous certaines conditions de mer et de vent à un bateau de dépasser brutalement sa vitesse cible théorique. Il n'y a pas si longtemps partir en surf restait exceptionnel. Aujourd'hui la plupart des voiliers de course ont la capacité de *planer* c'est-à-dire de s'extraire en partie de la pesanteur pour *déjauger* et offrir moins de résistance à l'eau. Contrairement au surf, le *planing* est un phénomène permanent permettant des vitesses élevées sur de longues durées et les polaires en tiennent compte. Les bateaux qui ne planent pas ont des polaires « rondes » alors que les autres ont des polaires dites « en ailes de papillon ».

D'autres types de polaire peuvent s'avérer utiles notamment les polaires de gîte⁵ qui donnent les angles de gîte pour un choix de voiles et une force et un angle de vent donnés. On verra plus loin qu'un barreur est très attentif à la gîte car c'est une information essentielle à la bonne marche de son bateau.

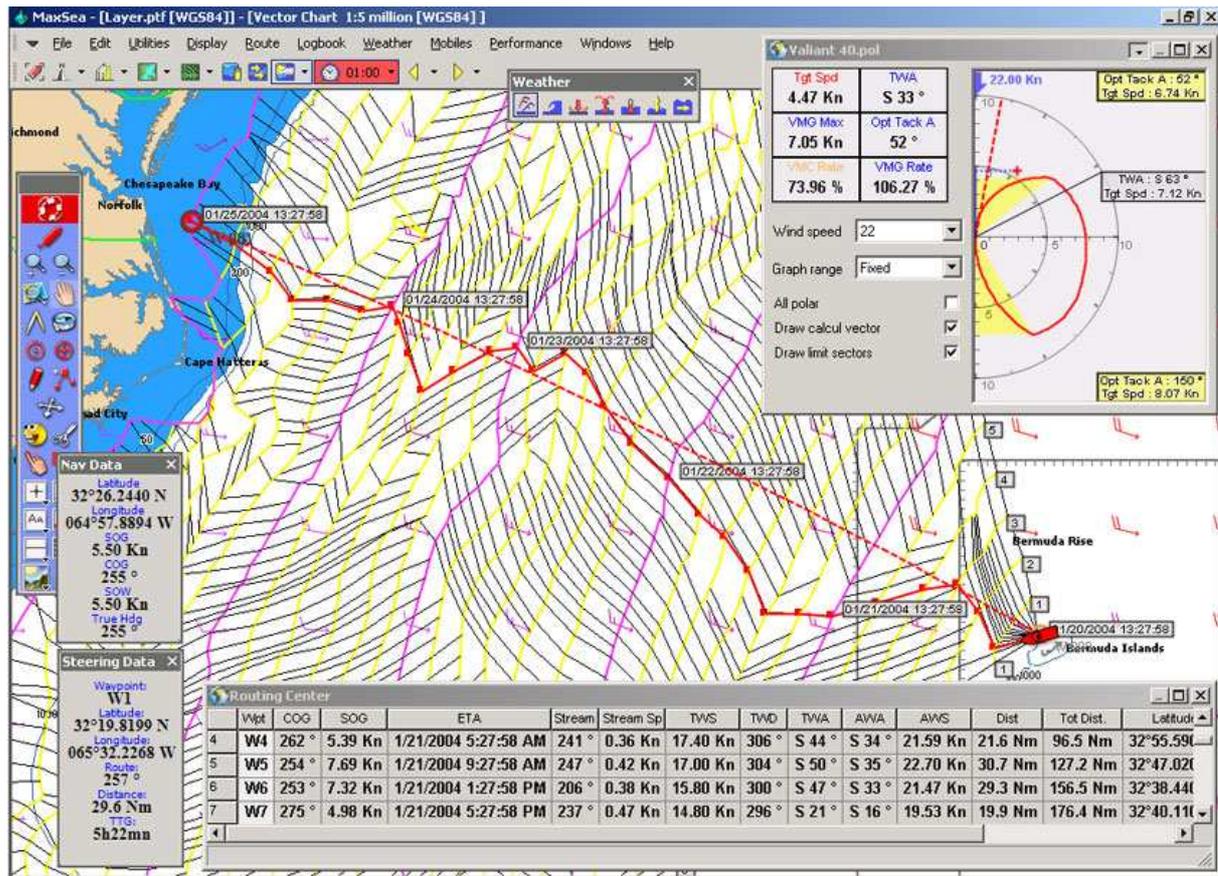
2.2.4 Les besoins du skipper

Pour ce qui est de la trajectoire de son bateau, le skipper effectue trois types d'approches chacune correspondant à une échelle bien particulière. Il doit d'abord choisir sa route, c'est-à-dire déterminer la suite des bords à tirer pour atteindre son objectif, puis optimiser le bord courant et enfin « barrer » au sens propre du terme, c'est-à-dire ajuster en permanence l'angle de barre aux « accidents de la route », vagues et fluctuations du vent. Ces tâches sont d'ailleurs dévolues à trois personnes différentes en équipage : le navigateur, le tacticien et le barreur. Le navigateur est chargé de la stratégie à l'échelle des phénomènes météorologiques (dépressions, anticyclone, thalweg, dorsale ...) et des phénomènes océaniques (systèmes de vagues, les grands courants océaniques ...). Le tacticien, en-dehors de la gestion du placement du bateau au sein de la flotte (les concurrents), doit anticiper les phénomènes à l'échelle de la micro-météo et du plan d'eau proche c'est-à-dire les rotations de vent (appelées *bascales*) à proximité des nuages ou des reliefs côtiers et les états de mer (clapot, courant ...). Il existe donc trois domaines distincts qui ont trait à la trajectoire du voilier : le premier à long terme et stratégique, le deuxième à moyen terme et tactique et le dernier à court terme et réactif temps réel. Bien que tous trois de périodicités distinctes, le skipper garde en tête les deux premiers en arrière plan tout en agissant en temps réel sur la barre.

2.2.4.1 Le besoin stratégique

Le problème stratégique est aujourd'hui traité de manière satisfaisante par informatique via des programmes de routage. Le routage permet de calculer la route optimale en déterminant les meilleurs bords à tirer. Pour que ce calcul soit possible les prévisions météorologiques ainsi que les performances théoriques du bateau sont nécessaires. D'autres paramètres comme les courants, les prévisions de vagues ou les marées peuvent intervenir. Dans la pratique, le skipper fait tourner son logiciel de routage peu avant son départ avec des prévisions météorologiques à plus ou moins longues échéances (en fonction de leur fiabilité et de la distance à parcourir). Ensuite, au fur et à mesure des acquisitions de nouvelles prévisions, il relance son routage pour affiner et corriger sa route. Ces programmes de routage, dans la mesure où le règlement de la course les autorise, sont aujourd'hui considérés comme indispensables par tout compétiteur. La méthode implémentée est celle des *isochrones* qui consiste à déterminer tous les points accessibles en un temps donné. L'ensemble de ces points forme une courbe dite isochrone et il suffit de choisir le point le plus intéressant vis à vis de l'objectif fixé pour déterminer le bord à effectuer (voir la figure 2.4).

⁵ Un bateau gîte lorsqu'il « penche » sous l'action du vent sur ses voiles.



MaxSea est le logiciel de navigation le plus populaire parmi les coureurs de haute mer. A partir des « polaires » du bateau (apparaissant en haut à droite de l'image) qui donnent ses performances théoriques et des prévisions météorologiques (les flèches sur la carte), le programme trace les isochrones (lignes jaunes et mauves ici) et donne la route optimale (en rouge ici). De nombreux paramètres supplémentaires peuvent être pris en compte, comme les courants et les prévisions de vague, mais aussi le coût des manoeuvres induites par la succession des bords ou le taux de confiance des prévisions.

FIG. 2.4: Routage par la méthode des isochrones.

2.2.4.2 Le besoin tactique

Une fois le bord choisi, le skipper en déduit un cap compas (cap magnétique) et une distance. Son rôle consiste alors à optimiser la conduite du bateau sur ce bord. Ceci se fait aussi bien au niveau du choix des voiles et de leurs réglages qu'au niveau des évolutions à court terme du courant et du vent et de la présence ou non de dévents⁶ occasionnés par d'autres bateaux concurrents. Aujourd'hui, on trouve dans le commerce plusieurs logiciels⁷ d'aide à la tactique. Ces logiciels s'appuient sur les performances théoriques du bateau et fournissent donc des outils de capture dynamique des polaires⁸. En fonction de ces polaires et du vent réel au début du bord, on peut simuler le ou les bords à tirer entre deux marques données. Notamment on dispose des angles optimum de remontée au vent et de descente, du VMG et des points de rupture de la polaire à l'envoi du spi. On peut également y intégrer les courants et afficher un historique du vent avec ses minima et maxima (en force et en direction) pour essayer d'anticiper ses bascules. Le bateau et la marque à atteindre s'affichent à l'écran et les *laylines* (lignes virtuelles à ne pas dépasser sous peine de faire de la route en trop) sont matérialisées. Le skipper visualise en temps réel l'effet d'une saute de vent sur la trajectoire de son bateau, ce qui lui fournit une aide précieuse à la décision. Il peut également quantifier de manière précise la dérive⁹

⁶ Le côté des voiles recevant le vent est dit « au vent », l'autre « sous le vent ». Un voilier perturbe fortement l'air sous son vent engendrant un « cône de déventement » dont l'influence se prolonge parfois jusqu'à plus de dix fois la hauteur de son mât.

⁷ Citons *Adrena* de loin le plus populaire, ainsi que *Deckman*.

⁸ *Optima* pour *Adrena*.

⁹ Un voilier a tendance à glisser latéralement dans le sens du vent d'où la nécessité de lui adjoindre un plan antidérive constitué généralement par le voile de quille et/ou par des dérives.

de son voilier ainsi que celle due au courant. Enfin on peut « toper » un adversaire au laser pour évaluer sa distance.

2.2.4.3 Le besoin temps réel

Si les aspects stratégiques et tactiques semblent convenablement traités aujourd'hui le côté temps réel, le système qui effectivement barre, souffre encore de faiblesses rédhibitoires. C'est le travail du *pilote automatique*, indispensable au coureur solitaire pour lui permettre de se consacrer à d'autres tâches comme aller dormir ou manger. Il doit pouvoir également affranchir le skipper de la tenue de la barre lors des deux grandes manoeuvres s'accompagnant de changements de trajectoire : le virement et l'empannage.

Piloter un voilier, en agissant uniquement sur la barre, demande beaucoup de finesse car les perturbations générées par le vent et les vagues peuvent être supérieures aux corrections physiquement applicables par le safran. Les pilotes automatiques pour voiliers d'aujourd'hui sont essentiellement des conservateurs de cap ou d'allure aux comportements parfois incohérents du point de vue du marin, aboutissant alors à une conduite peu performante et aberrante aux yeux d'un barreur humain [Gouard 99]. Un système de pilotage entre autres doit être capable de répondre à une déviation de trajectoire causée par le passage d'une vague, à un changement d'attitude du bateau induite par une rafale soudaine. Il s'agit donc d'un système réactif, littéralement embarqué, temps réel de surcroît, car la réponse doit s'inscrire dans le respect du temps de l'environnement. Les pilotes électriques modernes montrent rapidement leurs lacunes à bord des voiliers de compétition comme par exemple les 60 pieds Open, les multicoques de la classe ORMA¹⁰. Ces engins, dotés de capacités d'accélération importantes, soumettent les capteurs à rudes épreuves surtout quand ils sont placés au sommet d'un mât culminant à 30 mètres capable de tourner et de basculer... On imagine aisément la brutalité des mouvements de la tête de mât lors de passages de vagues.

Non seulement les capteurs s'affolent mais en outre le pilote n'intègre aucune notion comportementale ou de sécurité. Par exemple, sur les trimarans de 60 pieds, lofer¹¹ sous gennaker¹² alors que le bateau accélère et monte sur un flotteur conduit généralement à une catastrophe. Il faut savoir que nombre de chavirages ou démâtages sont dus à des insuffisances du pilote¹³. Aussi, en solitaire, les coureurs hésitent à user de leur pilote sans réduire la puissance du voilier, tout simplement parce qu'ils ont peur. S'ils se résolvent à l'embrayer c'est que les conditions sont stables et calmes sinon ils réduisent et/ou exigent une consigne moins pointue de leur pilote. Il faut savoir également que lors d'un tour du monde en solitaire, le pilote automatique barre 90% du temps. Autant de pertes de performance qui grèvent lourdement le résultat final. Aujourd'hui un coureur en possession d'un pilote automatique performant disposerait donc d'une espèce d'« arme fatale ».

2.3 La barre des physiciens

La physique du voilier intervient dans de nombreux cas liés à la technique de barre, que ce soit en simulation [Scarponi 07, Roncin 04], en automatique [Jaulin 04], en contrôle [Abril 97, Yeh 92] ou en calcul de prédiction de vitesse [Roux 05].

¹⁰ L'Ocean Racing Multihull Association est une structure internationale qui fédère le circuit des multicoques de 60 pieds s'alignant, notamment, sur la Route du Rhum.

¹¹ lofer : diminuer l'angle entre l'axe du voilier et le vent.

¹² Gennaker : voile d'avant triangulaire de grande surface.

¹³ Citons le démâtage d'Yves Parlier lors du Vendée Globe 2000 ou encore le chavirage du trimaran de Giovanni Soldini lors de la transat Jacques Vabre 2005.

2.3.1 Mécanique du point

2.3.1.1 Repères

Lorsqu'on aborde un problème de mécanique il convient de définir le référentiel dans lequel on se place. Soit R un repère galiléen lié à la Terre. On peut toujours choisir son origine à la surface de la mer au repos et son axe X dans la direction du nord géographique. On définit un repère R_B lié au bateau dont l'origine est placée en un point de la coque¹⁴ avec ses trois axes X_B , Y_B et Z_B dirigés respectivement dans le sens de la marche, vers le côté babord du bateau et vers le haut.

2.3.1.2 Position et attitude

Le voilier va être assimilé à un solide dont le centre de gravité sera donné par un vecteur de \mathbb{R}^3 dans n'importe quel repère. L'attitude d'un voilier est la donnée des trois angles (en radian) qui permettent de faire coïncider le repère lié au bateau R_B et le repère galiléen R . Ces trois angles sont appelés la *gîte*, l'*assiette* et le *cap* (*roll*, *pitch* et *yaw* en anglais) comme indiqués sur la figure 2.5.

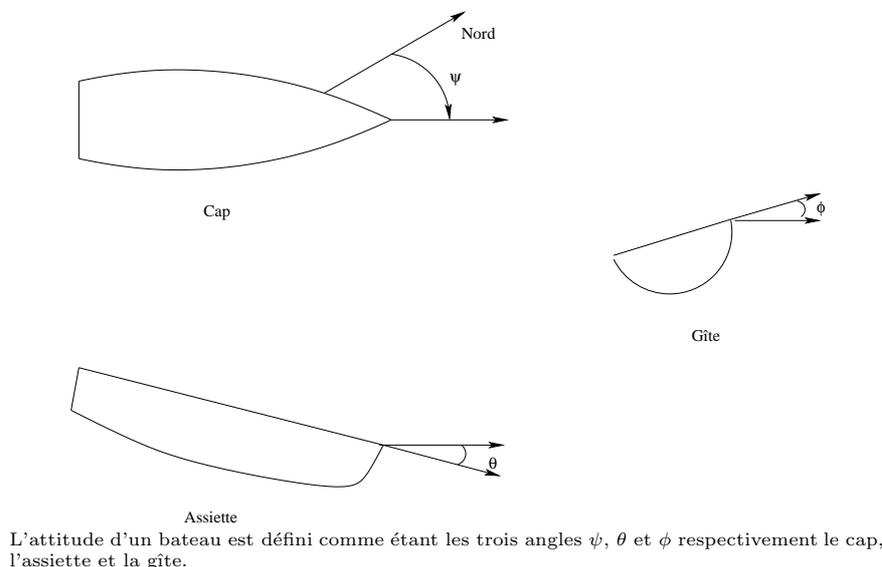


FIG. 2.5: Attitude d'un bateau.

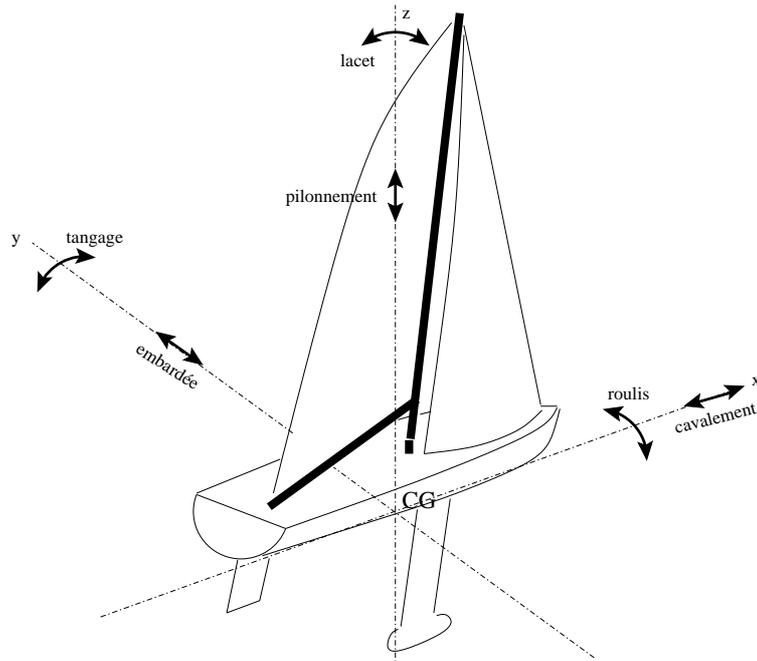
Enfin la figure 2.6 donne les termes usuellement employés pour décrire les mouvements du bateau. On obtient ainsi le *cavalement*, l'*embarquée* et le *pilonnement* pour les mouvements de translation et, le *roulis*, le *tangage* et le *lacet* pour les mouvements de rotation.

2.3.1.3 Les équations de la dynamique

Sur un voilier agissent à la fois des forces aérodynamiques, hydrodynamiques, hydrostatiques et de pesanteur. La figure 2.7 présente de manière très simplifiée les différentes forces en présence. Le voilier est soumis à la pesanteur \vec{P} qui s'applique en son centre de gravité G ainsi qu'à la poussée d'Archimède \vec{A} opposée à \vec{P} qui s'applique, elle, au centre de carène C (en général situé plus bas que G car c'est le centre de gravité du volume d'eau déplacé). Au repos, par définition, G et C se situent sur une verticale commune.

Dynamiquement, le vent exerce une force de poussée \vec{F}_P sur les voiles (et aussi sur le mât, la coque ...) en C_P . \vec{F}_P comprend une composante propulsive dirigée vers l'avant ainsi qu'une composante de dérive dirigée transversalement. \vec{F}_P modifie l'attitude du bateau (à la fois latéralement et

¹⁴ En particulier ce repère lié au bateau n'a pas nécessairement son origine placée au centre de gravité du bateau. Dans l'application utilisée pour le barreur virtuel, le repère choisi est celui du fichier VRML définissant le voilier.



Les mouvements d'un voilier sont définis selon les 3 axes x , y et z où x est l'axe principal du voilier projeté dans le plan horizontal, z la verticale orientée vers le haut et y est choisi tel que le repère $(CGxyz)$ soit direct (CG désigne ici le centre de gravité). Les mouvements de rotation sont le roulis, le tangage et le lacet alors que le cavalement, l'embardeé et le pilonnement donnent les mouvements le long des axes.

FIG. 2.6: Définitions des mouvements d'un bateau.

longitudinalement) et, du coup, déplace le centre de carène C . Les parties immergées du bateau, et en particulier sa quille, génèrent une force hydrodynamique \vec{H} . De cette dernière, on peut extraire une force antidérive qui s'oppose à celle de dérive et qui va accentuer le couple de chavirage du voilier et une force de trainée qui s'oppose à la composante propulsive. Un voilier est dit équilibré, lorsque barre fixe, son attitude est stable et sa trajectoire rectiligne, c'est-à-dire qu'il n'a ni tendance à lofer ni à abattre.

On applique le principe fondamental de la dynamique en translation :

$$m\vec{a} = \vec{F}_P + \vec{H} + \vec{A} + \vec{P}$$

et en rotation (appliqué au point O) :

$$J\frac{d\omega}{dt} = \vec{OC}_P \wedge \vec{F}_P + \vec{OH}_P \wedge \vec{H} + \vec{OC} \wedge \vec{A} + \vec{OG} \wedge \vec{P}$$

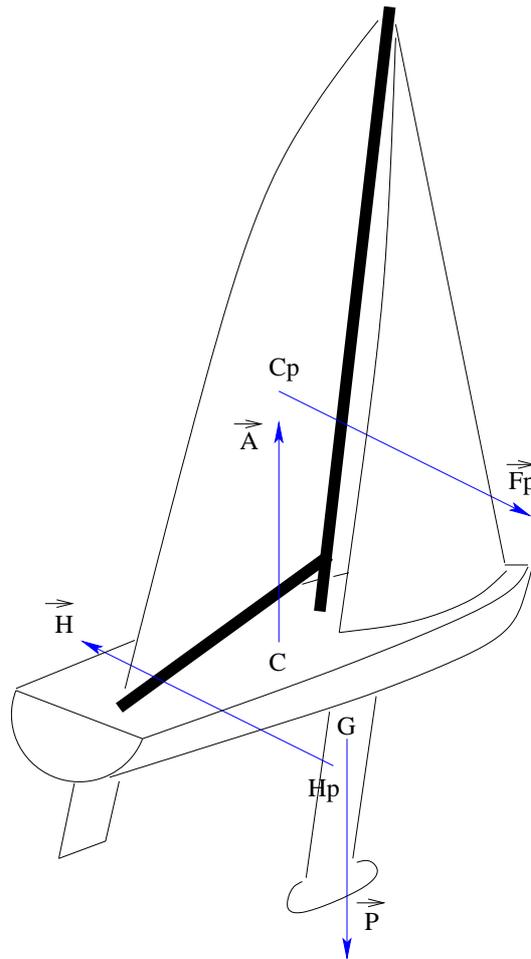
ω étant la vitesse angulaire et J le moment d'inertie du bateau.

L'air et l'eau étant deux fluides, les forces aérodynamiques et hydrodynamiques sont généralement choisies comme obéissant aux mêmes type de lois. Dans [Jaulin 04] ces forces sont supposées visqueuses donc proportionnelles à la vitesse relative du fluide par rapport à la surface sur laquelle elles s'exercent et perpendiculaires à cette surface. Elles s'expriment donc sous la forme αV , α étant la portance et V la norme de la vitesse relative du fluide. La valeur de α est déterminée expérimentalement.

Une formule plus usuelle [Hugo 75, Oossanen 81] parce qu'expérimentalement fiable, est :

$$\frac{1}{2}\rho V^2 SC$$

où V est la vitesse relative du fluide par rapport à la surface, S l'aire de cette surface, ρ la masse volumique du fluide considéré (supposé incompressible) et C un coefficient aérodynamique dit de portance. L'expression des coefficients de portance (selon que l'on considère les composantes propulsive



La force aérodynamique \vec{F}_P s'applique au centre de poussée vélique C_P , la force hydrodynamique \vec{H} s'applique au centre de poussée hydrodynamique H_P , la force de gravité \vec{P} s'oppose à la poussée d'archimède \vec{A} qui s'applique, elle, au centre de carène C .

FIG. 2.7: Les différentes forces s'appliquant à un voilier.

ou latérale) dépendent de nombreux facteurs comme l'angle d'incidence, la position du creux ou encore l'épaisseur du profil. La plupart des modèles ne font intervenir que l'angle d'incidence avec un angle limite dit angle de décrochage au-delà duquel l'expression de la force est sensiblement différente (l'écoulement passant de laminaire à turbulent). Certains modèles utilisent des paramètres de réglages. Dans [Alessandrini 93, Oliver 87] la réduction de voilure est prise en compte par le déplacement du centre de poussée et, les coefficients aérodynamiques peuvent être adaptés en fonction du réglage du creux¹⁵.

Les forces hydrostatiques (poussée d'Archimède) sont déduites d'une approximation du volume immergé et de son centre de gravité. Avancer dans l'eau revient à déranger une masse d'eau qui doit revenir à sa position initiale. Le bateau crée ainsi son propre système de vagues dont la distance entre crêtes ne peut excéder sa longueur à la flottaison. Ainsi, sauf à surfer, le voilier est enfermé dans le système qu'il génère. La *vitesse critique* ou *limite* d'une carène dépend de la racine carrée de sa longueur à la flottaison et est approximée par la formule :

$$V_c = 2.44\sqrt{L}$$

où L est la longueur à la flottaison donnée en mètres et V_c la vitesse critique en noeuds.

Lors de son déplacement, un voilier entraîne avec lui une certaine quantité d'eau dépendante essentiellement de l'état de sa carène. Dans la pratique, cette eau peut être considérée comme solidaire de la coque et sa masse doit donc être ajoutée à celle du bateau dans les équations de la dynamique. C'est le principe des *masses ajoutées* (et donc des *moments d'inertie ajoutés*) que l'on retrouve dans

¹⁵ Les marins appellent cela un réglage de *bordure*.

de nombreux modèles [Scarponi 07, E.J. de Ridder 04, Masayuma 95] car ils conduisent à de bons résultats numériques. Pour les évaluer de nombreuses formules ont été proposées [E.J. de Ridder 04, Nomoto 75, Masayuma 95] dépendant étroitement des carènes considérées.

Tenir compte de la barre revient alors à modéliser la force hydrodynamique générée par le safran. L'angle d'incidence du safran étant directement lié à l'angle de barre, on peut calculer la conséquence d'un coup de barre sur la dynamique du voilier et notamment sur sa trajectoire.

2.3.1.4 Le voilier virtuel

Développer et tester un pilote automatique pour voiliers de compétition en conditions réelles s'avère délicat et extrêmement coûteux. Par exemple, les voiliers destinés au Vendée Globe (les 60 pieds IMOCA) passent plus de temps en chantier qu'en navigation. De plus chaque sortie lorsqu'elle est techniquement possible (météo oblige) mobilise d'importants moyens humains (équipage) et matériels (zodiacs, voiles d'entraînements pour préserver celles de courses ...). Pour s'affranchir de ces contraintes un voilier virtuel type 60 pieds IMOCA a été implémenté sous ARéVi. Le choix s'est porté sur un monocoque plutôt qu'un multicoque pour des raisons à la fois matériels, commerciales et sportives. En effet, aujourd'hui le circuit des multicoques océaniques (classe ORMA) a littéralement disparu au profit de la classe IMOCA des monocoques de 60 pieds. D'autre part, la presque totalité des supports français pour la course au large, qu'il s'agisse de la Mini-Transat ou de la Solitaire du Figaro sont des monocoques. Le bateau virtuel se meut dans un environnement marin (vagues et vent) défini via le modèle IPAS (pour Interactive Phenomenological Animation of the Sea) [Parenthoën 04] lui aussi développé sous ARéVi et qui permet l'animation d'un plan d'eau hétérogène de plusieurs kilomètres carrés. Différents systèmes de vagues peuvent être générés à partir de spécifications diverses et un vent défini à partir de sa direction géographique et de sa vitesse en mètres par seconde¹⁶.

Pour obtenir un modèle cohérent et crédible d'un voilier, le modèle physique sous-jacent choisi est celui de la dynamique des solides décrit précédemment. La crédibilité impose de trouver un bon compromis entre temps de calcul et niveau de détail pour les zones d'application des forces (au niveau de la carène, des appendices et des voiles notamment). Les forces sont ainsi régulièrement évaluées en neuf parties de la coque (3/4 avant babord, avant milieu, 3/4 avant tribord, milieu babord, centre, milieu tribord, 5/6 arrière babord, arrière milieu et 5/6 arrière tribord), au niveau des deux safrans tribord et babord, de la dérive (voile de quille), du foc et de la grand'voile (voir la figure 2.8).

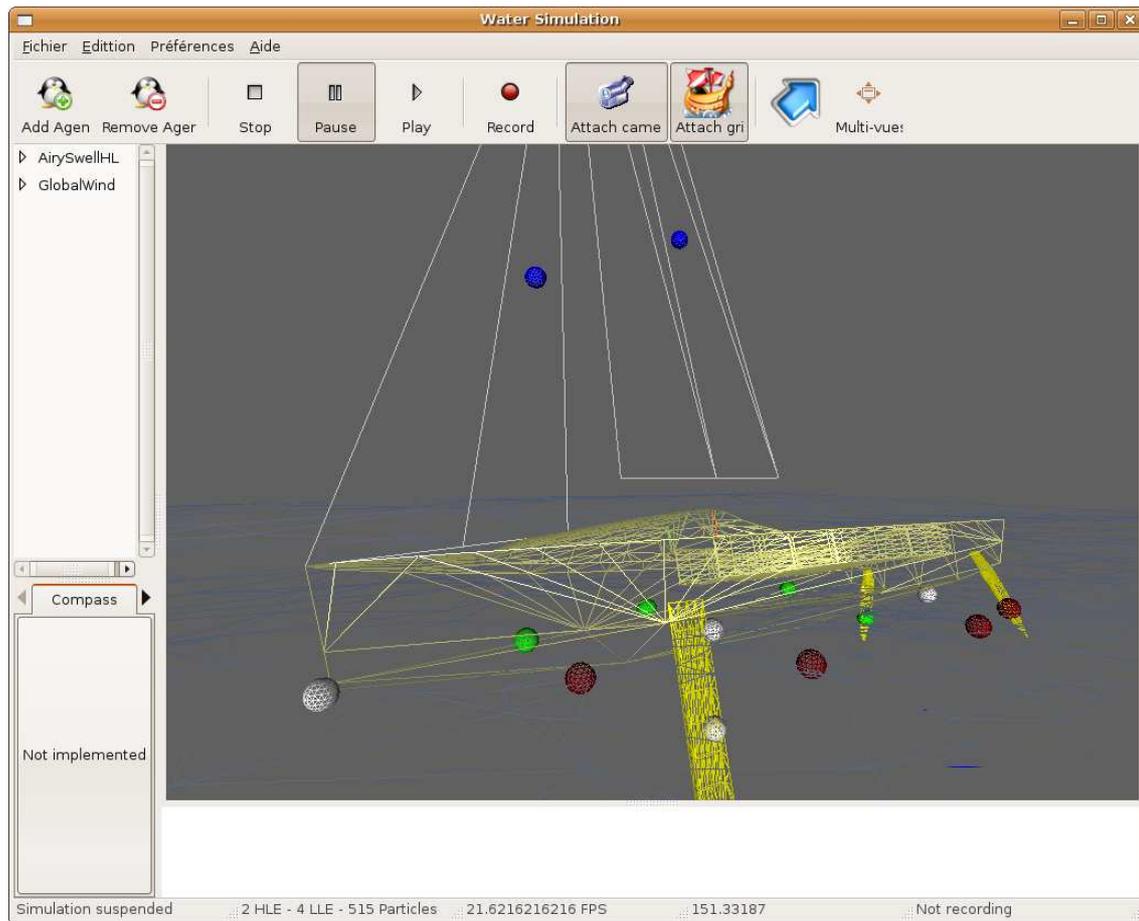
Par exemple, la force hydrodynamique sur un safran dépendra directement de sa surface immergée dépendant elle-même de l'attitude du bateau et de la présence d'une vague ou non. De même les parties immergées des différents éléments de coque sont calculées ainsi que leurs masses ajoutées associées. Une fois toutes les forces estimées, deux intégrations successives des équations de la dynamique permettent d'obtenir les nouvelles attitude et position du centre de gravité.

Graphiquement, la géométrie du voilier est définie via un fichier VRML¹⁷ qui permet un rendu de qualité. Pour un observateur non expert, c'est-à-dire sachant éventuellement naviguer mais n'ayant jamais piloté d'engin de compétition, le comportement du bateau semble très proche de la réalité. Le voilier roule sous le passage d'une vague, accélère quand il abat, gîte sous une rafale ou est capable de s'aider d'une vague pour surfer. En particulier, les polaires de vitesse obtenues s'apparentent fortement à celles d'un véritable monocoque IMOCA. Pour un expert, le comportement paraît globalement cohérent bien qu'incorrect dans certains cas particuliers (notamment, le bateau peut parfois se coucher sur l'eau sans partir au lof, c'est-à-dire sans se retrouver face au vent). En l'état, il constitue donc une plate-forme intéressante pour le développement, le test et la validation (au moins partielle) d'un pilote automatique pour voiliers de compétition.

Vis à vis du pilote il est intéressant que le voilier virtuel soit indistinguable d'un voilier réel. Ainsi le voilier virtuel est équipé d'un vérin agissant sur les safrans, doté d'une vitesse de translation constante et chargé de transmettre la commande de barre. D'autre part, les pilotes exploitent un certain nombre de données issues de capteurs. Ces données sont facilement récupérables sur le modèle virtuel en y

¹⁶ Multiplier par deux une vitesse en mètres par seconde donne une bonne approximation de la vitesse en noeuds.

¹⁷ Le VRML ou Virtual Reality Modeling Language est un langage de description d'univers 3D virtuels. Les fichiers VRML ont pour extension .wrl.



Les différents éléments pris en compte dans les calculs physiques sont matérialisés ici par des sphères de couleur (rouge à babord, vert à tribord, blanc au centre et bleu pour les voiles). Le bateau réagit comme un véritable voilier à une rafale en se couchant sur l'eau ou est capable de partir en surf sur une vague. Par défaut sa consigne de cap est fixée au 180 (plein sud), le réglage des voiles est ajusté en fonction de l'angle du vent apparent et la quille est dans l'axe. L'utilisateur peut demander de changer de cap, imposer d'autres réglages de voiles, basculer la quille et déplacer le skipper. Il peut également définir le type de mer (hauteur, longueur, cambrure ...) ou de vent (direction et force) sur le plan d'eau.

FIG. 2.8: Le voilier virtuel sur la mer virtuelle.

adjoignant si besoin est des « particules » (les sphères sur la figure 2.8). Par exemple, la vitesse est récupérée au niveau de la particule placée dans la partie avant milieu de la coque, la vitesse du vent et sa direction le sont eux au sommet du mât (place habituelle pour une girouette/anémomètre sur les voiliers) alors que l'angle de barre est déduit de la position des safrans ...

2.3.2 Mécanique des fluides

L'évaluation globale des forces hydrodynamiques et aérodynamiques par des formules empiriques comme celles que l'on vient de voir ne permet pas de quantifier de manière fiable les efforts en des endroits précis de la coque ou des voiles. Les architectes ont besoin de les connaître pour choisir les matériaux et leurs échantillonnages et pour placer les différents renforts (membrures, lisses, bouchains ...). Le maître-voilier aura le même type de préoccupations et le coureur pourra espérer un bateau à la fois solide et léger. Le dessin d'une coque ou d'une voile reste essentiellement empirique et les expériences en bassin des carènes ou en soufflerie restent longues et coûteuses. Aussi, depuis une vingtaine d'années, de nombreux et constants efforts de développement conjugués au fabuleux gain en puissance des ordinateurs ont conduit à des codes de calculs performants. La mécanique des fluides numériques, appelée CFD (Computational Fluid Dynamics), donne aujourd'hui de très bons résultats mais ne remplace toujours pas les expériences car certains phénomènes liés aux écoulements comme la turbulence, l'évaluation de la couche limite ou encore le déferlement demeurent difficiles à modéliser.

Ces codes sont tous basés sur les équations de Navier-Stokes, équations aux dérivées partielles non-linéaires, qui décrivent le mouvement des particules d'un fluide quelconque et que nous rappelons ci-dessous [Acheson 90].

L'équation dite de continuité assure la conservation de la masse, c'est-à-dire que pour un volume donné, il y a aura autant de particules entrantes que sortantes :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

où ρ désigne la masse volumique du fluide, \vec{v} la vitesse d'une particule et ∇ l'opérateur nabla.

La seconde équation est une équation de bilan de la quantité de mouvement, il s'agit donc de la seconde loi de Newton :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}$$

où p désigne la pression, $\vec{\tau}$ le tenseur des contraintes visqueuses et \vec{f} la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide.

La dernière équation est une équation de bilan d'énergie qui assure que la quantité d'énergie qui entre dans un volume est égale à celle qui en sort :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} - \nabla \cdot \vec{q} + r$$

où e est l'énergie totale par unité de masse, \vec{q} le flux de chaleur perdu par conduction thermique et r la perte de chaleur volumique due au rayonnement.

Aujourd'hui, ces équations constituent un défi pour les mathématiciens qui ne savent pas les résoudre formellement. Les codes numériques pour attaquer ce type de problème supposent un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et travaillent dans des volumes élémentaires qui doivent être judicieusement défini par un travail préalable de *maillage*. Globalement, plus le maillage sera fin plus les résultats numériques seront proches de la réalité, mais plus le coût en calculs sera élevé. La définition d'un bon maillage reste aujourd'hui du domaine de l'expérience. Intuitivement, plus les gradients de vitesse ou de pression sont importants plus le maillage doit être fin. De nombreux logiciels (ICEM Cfd, Fluent, Code_Saturne, FluiDyn, Homard ...) effectuent du maillage automatique ou apportent une assistance précieuse à l'utilisateur¹⁸. Une fois le maillage défini, les équations sont résolues pour chaque volume élémentaire par diverses méthodes dont une des plus populaires est la méthode RANS [Ferziger 02] (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Cette méthode qui nécessite un modèle de turbulence permet de simplifier les équations de Navier-Stokes en considérant chaque variable du fluide comme somme de sa partie moyenne et de sa partie variable. Une autre approche très populaire également est celle des écoulements potentiels [Ferziger 02] qui utilise une version simplifiée des équations de Navier-Stokes en supposant le fluide non visqueux, incompressible et irrotationnel. L'écoulement le long d'un profil est alors recréé par superposition d'un écoulement uniforme et d'écoulements locaux caractérisés en termes de singularités (puits, source, point d'arrêt ...).

La qualité atteinte des simulations des écoulements autour des voiles et des carènes a permis d'envisager la construction d'outils numériques [Roux 05] de prédiction de vitesse : les fameux VPP (Velocity Prediction Program). Une des principales difficulté inhérente à ce type de code est que non seulement l'écoulement autour de chacun des composants d'un voilier réel (voiles et carène) résulte d'une combinaison complexe de différents phénomènes mais, en plus, ces composants interagissent fortement entre-eux. Les premières approches réduisaient ces interactions à un simple équilibre entre forces aérodynamiques et hydrodynamiques. Cependant la présence d'une voile d'avant en sus de la grand'voile perturbe considérablement les écoulements sur cette dernière. De même, le pont du bateau entraîne un « effet de plaque » au niveau de la voile d'avant. Tenir compte de tous ces phénomènes conduirait inévitablement à un problème très complexe accompagné de temps de calculs rédhibitoires. Des simplifications sont donc introduites justifiées *a posteriori* par des données issues d'expérimentations.

¹⁸ A ce propos de nombreuses ressources sont disponibles sur <http://thcentral.com/CFDInfo/cfdweblinks.htm>.

La vitesse d'un voilier dépend fortement de différents paramètres de réglages tels le braquage des voiles, le placement des poids ou encore l'angle de barre. Un profil est considéré comme bien orienté si la condition dite de « Kutta » est satisfaite, c'est-à-dire que les vitesses d'écoulement sont identiques sur les deux faces du profil en sortie d'écoulement¹⁹. Ces contraintes déterminent le réglage optimal utilisé pour le calcul des vitesses. La résolution numérique permet alors de générer des « polaires d'angle de barre », c'est-à-dire les angles de barre théoriques en fonction de la force du vent réel et de sa direction par rapport à l'axe du bateau pour que ce dernier aille droit. Ces angles supposent un réglage de voiles adapté et des conditions de mer et de vent régulières. Ces études fournissent une idée de ce que serait le bon angle de barre dans des conditions idéales mais ne sont pas exploitables en temps réel car trop coûteuses en calculs.

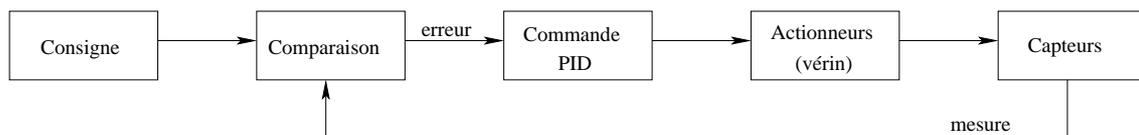
Aujourd'hui, les VPP associés à divers outils statistiques permettent de valider un certain nombre de choix techniques et architecturaux. Par exemple, il est possible de quantifier à l'échelle d'un tour du monde le gain lié à l'embarquement d'une voile supplémentaire, donc, de quantifier le prix d'une minute de gagnée sur une circumnavigation !

2.4 La barre des automaticiens

Nous nous intéressons dans cette section à la manière dont a été traité le problème du pilotage des voiliers dans le domaine de l'automatique. Nous commençons par présenter ce qui est au cœur de tous les pilotes commerciaux : la régulation PID. Comme presque aucun travail n'est spécifiquement dédié aux voiliers, la *commande par platitude* récemment proposée par Luc Jaulin [Jaulin 04] est à signaler. Nous verrons enfin des approches floues, notamment dans le cadre du challenge Microtransat, une course transatlantique réservée à de petits bateaux totalement autonomes dont la première édition attend encore de voir le jour, et qui a déjà eu le mérite d'engendrer un certain nombre de recherches sur le contrôle et la commande de barre.

2.4.1 Régulation PID

Les pilotes commerciaux sont essentiellement des régulateurs de cap ou d'allure, c'est-à-dire des systèmes censés conserver un cap magnétique ou un angle au vent apparent ou réel. La régulation utilisée est de type PID pour Proportionnelle/Intégrale/Dérivée. Le principe d'une régulation PID [Astrom 95] en boucle fermée est donné figure 2.9.



Dans une régulation PID en boucle fermée une consigne est donnée et comparée à une valeur mesurée par des capteurs. L'erreur est la différence entre la valeur mesurée et la consigne. La correction calculée par PID pour atteindre la consigne est transmise aux actionneurs (un vérin pour le cas de la barre).

FIG. 2.9: Régulation PID par boucle fermée.

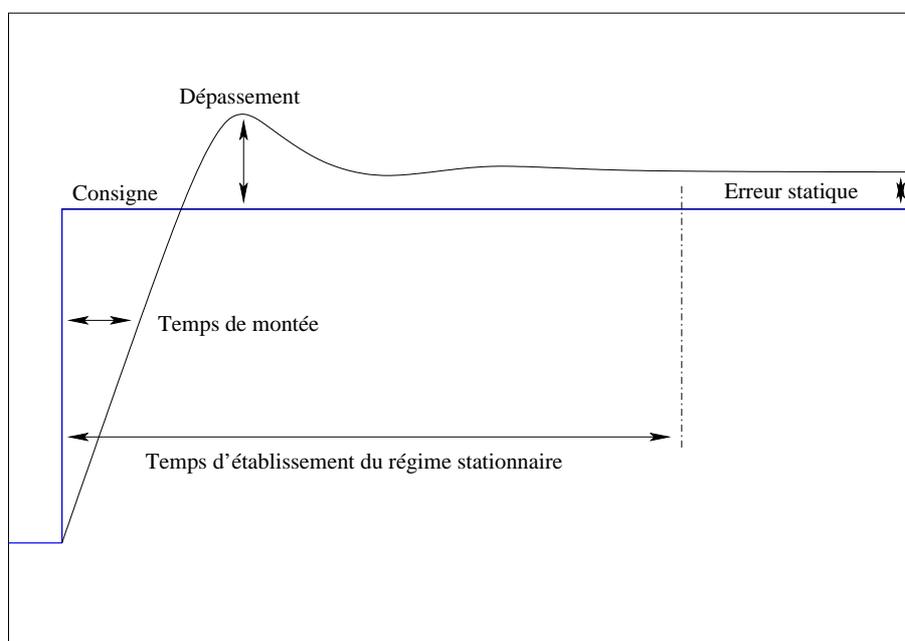
Dans le cas de la barre, une consigne possible peut être un cap compas. Le cap suivi par le bateau (appelé *cap courant*) peut être mesuré via différents capteurs comme un compas fluxgate ou une centrale inertielle (munie d'un magnétomètre). L'écart entre valeur mesurée et consigne donne l'*erreur* sur la consigne. La correction appliquée à la barre se calcule avec la formule :

$$\theta_{barre} = K(P(cap - consigne) + I \int (cap - consigne) + D \frac{d}{dt}(cap - consigne))$$

¹⁹ C'est la raison pour laquelle les marins mettent des *penons* (brins de laine ou bandes de tissus à spi) sur la chute de la grand'voile permettant ainsi de « visualiser » l'écoulement en sortie de profil.

où K est un gain global, P , I et D les coefficients donnant les poids des actions proportionnelle, intégrale et dérivée. θ_{barre} est en général un angle absolu plutôt que relatif. L'intégration de l'erreur est effectuée par exemple par méthode des rectangles (en fonction de la fréquence des capteurs). La partie dérivée peut être obtenue par accroissement fini ou par mesure via un gyromètre (généralement présent dans une centrale inertielle). Toute la difficulté consiste dans le choix de bons coefficients P , I et D dans un but de robustesse, de rapidité et de précision. Un système est dit *robuste* s'il continue à fonctionner correctement malgré des modifications de son environnement. En mer, vagues et sautes de vent sont légion et le pilote doit malgré tout tenir bon la barre. La *rapidité* dépend à la fois du *temps de montée* qui est le temps pour atteindre la valeur de la consigne²⁰ et du *temps d'établissement du régime stationnaire* (voir figure 2.10). Enfin, plus l'*erreur statique* est faible meilleure est la *précision*. Augmenter P réduit le temps de montée et l'erreur statique mais augmente le dépassement. Augmenter I réduit le temps de montée, accentue le dépassement, allonge le temps d'établissement en augmentant l'amplitude des oscillations autour de la consigne mais tend à annuler l'erreur statique. Augmenter D diminue le dépassement et réduit le temps d'établissement au régime stationnaire.

Dans la pratique, un marin veillera à ne pas dépasser la consigne pour éviter de donner des coups de barre qui, comme on le verra, sont autant de coups de frein. Pour cela, il ramènera la barre vers l'axe du bateau avant d'avoir atteint la consigne, anticipant ainsi l'inertie du bateau. Cela s'appelle de la *contre-barre* et peut apparaître comme un paramètre réglable dans certains pilotes commerciaux²¹.



Réponse typique d'un système régulé par PID à un échelon. Toute la difficulté consiste à bien choisir P , I et D dans le but de réduire le temps de montée, le dépassement, le temps d'établissement au régime stationnaire et l'erreur statique.

FIG. 2.10: Réponse d'un système à un échelon.

Le régulateur idéal n'existant pas, le problème de la synthèse d'un régulateur dépend d'un cahier des charges donnant des tolérances sur les différents paramètres. Il existe de nombreuses méthodes de synthèse [Tan 99, Yu 99] (identification par moindres carrés, méthode de Ziegler-Nichols, méthode du lieu de Nyquist inverse ...) mais aujourd'hui tout le savoir-faire des constructeurs de pilotes automatiques se résume au choix de coefficients P , I et D qui conviennent à une large gamme de conditions de vent, de mer et de voiliers (monocoques, multicoques ...). En effet, aujourd'hui, plaisanciers navigant sur bateaux lourds et lents ou coureurs menant des engins acrobatiques disposent du même pilote !

²⁰ Le temps de montée peut-être également défini comme le temps pour passer de 10% à 90% de la différence entre la consigne et la valeur avant la commande.

²¹ Dans le *gyropilot 2* de la société *nke*, régler la contre-barre revient à modifier le coefficient D .

2.4.2 Linéarisation par bouclage

Dans [Jaulin 04] Luc Jaulin propose un modèle simple de voilier et une commande menant à une stabilisation autour d'un point donné de l'océan. Le modèle est basé sur les équations fondamentales de la dynamique qui en translation et en rotation donnent :

$$\begin{aligned} m\dot{v} &= \sin\delta_v f_v - \sin\delta_g f_g - \alpha_f v \\ J\dot{\omega} &= (l - r_v \cos\delta_v) f_v - r_g \cos\delta_g f_g \end{aligned}$$

où f_v et f_g sont les forces associées aux voiles et au gouvernail, V la vitesse du vent, v celle du centre de gravité du bateau, δ_v l'angle d'ouverture de la voile, δ_g l'angle de barre et α_f le coefficient de frottement de la carène sur l'eau (les autres coefficients étant des distances diverses).

Afin d'obtenir une équation d'état, c'est-à-dire une équation différentielle du type

$$\dot{X} = f(X, U)$$

où X est un vecteur d'état et $U = (\dot{\delta}_v, \dot{\delta}_g)$ représente les entrées du système, les équations d'état ne dépendant pas linéairement de U sont dérivées autant de fois que nécessaire pour y arriver. On peut alors appliquer une méthode dite de linéarisation par bouclage. Les sorties choisies pour la linéarisation sont l'ouverture de la voile δ_v et le cap du bateau. Les deux systèmes obtenus sont alors stabilisés par des régulateurs de type P et PD^2 (proportionnel et dérivé deux fois) en fonction de leurs ordres.

Cette régulation permet de stabiliser le bateau sur un cap donné et pour une ouverture de voile fixée. Le but étant de le stabiliser non pas sur une trajectoire mais autour d'un point donné, un automate hybride capable de générer la succession des consignes de cap et de réglages de voile associés est construit. Cet automate est composé des régulateurs et d'un automate fini déterministe qui choisit un cap parmi quatre (deux de remontée au vent et deux de descente) en fonction de la position relative du voilier par rapport au point visé.

Cette approche, bien que très intéressante à première vue, semble difficile à adapter à la problématique d'une tenue de barre orientée vers la performance. En effet, le modèle physique utilisé ne prend pas en compte l'attitude du bateau (gîte et tangage) et les angles de remontée ou de descente sont fixés donc non optimaux dans le cas général.

2.4.3 Contrôleurs flous et Microtransat

Le challenge Microtransat²² est une course transatlantique internationale réservée à des voiliers robots de moins de 4 mètres totalement autonomes. Le départ, initialement prévu courant 2008, a été reporté en 2009 mais de nombreux problèmes juridiques (notamment la réglementation internationale pour prévenir les abordages en mer) bloquent pour l'instant l'organisation d'un tel événement. Il s'agit d'une première : aucun voilier dépourvu d'équipage n'a traversé l'Atlantique jusqu'à présent. Quoiqu'il en soit ce projet a suscité quelques travaux au sujet de la commande de barre que nous allons présenter rapidement.

Bien qu'il s'agisse d'une course, la préoccupation centrale des différentes équipes consiste à être déjà capable d'arriver de l'autre côté avant de chercher à gagner. Ces dernières, toutes universitaires pour l'instant, engagent des voiliers plus solides que performants et ne cherchent pas à exploiter la jauge très ouverte imposée par le règlement. Les problématiques rencontrées sont celles usuelles des systèmes embarqués telles les contraintes de poids, de consommation, de choix d'une architecture ou d'un système d'exploitation adapté ... La partie logicielle dédiée au contrôle et à la commande de la barre doit prendre en compte les trois approches décrites précédemment : la stratégie, la tactique et le produit temps réel. Sur ces projets, la stratégie se résume à mettre le bateau sur la route définie entre la position courante et le point à atteindre. Dans le cas où il s'avère nécessaire de tirer des bords (aussi bien au près qu'au vent arrière où la position est trop instable pour être tenue de manière pérenne), le produit tactique gère les *virements* ou les *empannages*²³ en fonction de critères simples

²² <http://www.microtransat.org>

comme de choisir le bord le plus rapprochant tout en imposant une hystérésis [Stelzer 07] pour éviter des changements de bord incessants. L'angle de remontée ou de descente par rapport au vent est fixé une fois pour toute comme dans les travaux de Jaulin [Jaulin 04] ou issu d'une polaire et d'un calcul de meilleur VMG [Stelzer 08]²⁴. Les manœuvres de virement et d'empannage doivent être également intégralement prise en charge pour une autonomie complète²⁵.

La partie temps réel est traitée d'une manière particulièrement intéressante car angle de barre et ouverture des voiles sont souvent réglés dans l'optique d'obtenir un régime de vitesse optimal. Cette approche emprunte beaucoup au modélisme où diverses techniques visant à commander conjointement la barre et le réglage des voiles ont été explorées. Nous verrons dans le chapitre 3 que sur des voiliers réels ces techniques nécessitent des adaptations permanentes aux variations de vent et de l'état de mer. L'adjonction de servomoteurs permet d'envisager cette adaptation à l'échelle d'une traversée de l'Atlantique sous couvert d'une autonomie d'énergie suffisante. Ainsi les voiles peuvent être réduites (par enroulement) et réglées via des *écoutes*²⁶ comme sur un bateau standard. D'autre part, la barre sera également commandée par un servomoteur comme sur un voilier mené sous pilote automatique.

Diverses méthodes ont été publiées pour le contrôle de la barre. Certaines sont floues [Vanek 97], d'autres non [Warden 91]. Mais la plupart des travaux [Abril 97, Stelzer 07, Yeh 92] estiment, du fait de la dynamique non linéaire et dépendante des conditions extérieures (vent, vagues et courants), qu'il est difficile de construire un modèle qui tienne compte des conditions réelles. Or, depuis que les voiliers existent, l'homme a toujours été capable de s'adapter à la barre de tout type de bateaux par tout type de temps. Encore aujourd'hui, le coureur prend régulièrement le relais du pilote automatique lorsqu'il a le sentiment qu'il peut y gagner en performance. Aussi, l'utilisation de la logique floue en tant qu'outil de modélisation d'expertises humaines semble naturelle et conduit à ce qu'on appelle des *contrôleurs flous* [Kosko 86].

Le réglage automatique des voiles n'a été que peu étudié du fait de l'usage exclusif du moteur dans la marine marchande. La situation est en train de changer avec la recherche d'énergies alternatives et l'urgence à réagir aux bouleversements écologiques annoncés. Les voiles redeviennent une forme complémentaire voire alternative de propulsion avec les apparitions relativement récentes des voiles rigides ou des turbo voiles. Leurs réglages sont entièrement automatisés par programme. Sur un voilier, les voiles sont souples et déformables et de nombreux paramètres peuvent intervenir dans leurs performances (notamment, il est courant de travailler le gréement pour modifier la forme de la voile). Aussi leurs réglages sont beaucoup plus difficiles à appréhender. [Abril 97] et [Yeh 92] s'appuient sur des *polaires de voile* pour déterminer l'angle optimal d'ouverture de la voile. Une polaire de voile donne la portance et la traînée en fonction de l'angle d'incidence du vent apparent par rapport à la corde de la voile (en gros la bôme). La figure 2.11 donne la polaire caractéristique d'une voile Marconi, c'est-à-dire d'une voile triangulaire à fort élancement (à peu près trois fois plus haute que large) comme le sont celles des bateaux de course modernes.

[Abril 97] et [Yeh 92] proposent après expertise différents ensembles flous pour caractériser les angles de vent apparents et pour en déduire les réglages de voile. Dans [Abril 97] l'angle d'incidence de la voile est à 15° du vent apparent pour les angles de vent apparent « faibles » puis l'angle d'ouverture de voile passe à la moitié de l'angle du vent apparent. Dans [Yeh 92] les angles d'incidences entre 35° et 60° sont évités car jugés mauvais.

Dans [Stelzer 07] le réglage est lié non seulement à l'angle du vent apparent mais aussi à la gîte du bateau. Physiquement avoir des voiles trop bordées fait gîter le bateau et, trop de gîte le rend incontrôlable à la barre car le safran a tendance à sortir de l'eau :

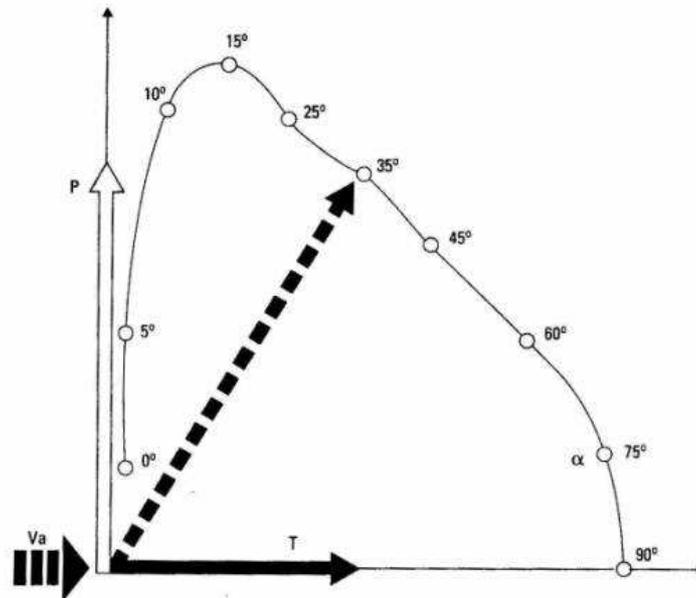
$$h = \max(0, (h_{max} - k \cdot |\alpha|) \cdot \frac{\min(v, v_{max})}{v_{max}})$$

²³ Un *virement* désigne un changement d'amure en passant face au vent alors qu'un *empannage* fait passer par le vent arrière ce qui occasionne un passage brutal de la bôme susceptible d'entraîner de la casse.

²⁴ Dans ce papier les auteurs parlent abusivement de *VMG* (Velocity Made Good) qui est défini comme le gain sur l'axe du vent alors qu'il s'agit en fait de *CMG* (Course Made Good) qui est le gain sur la route et qui nécessite également l'établissement de polaires.

²⁵ Parmi ces deux manœuvres l'empannage est de loin la plus problématique car il ne suffit pas de passer le lit du vent pour être assuré du passage de la voile sur l'autre bord. L'algorithme le plus courant consiste à aller bien au-delà du vent arrière et d'aider à l'écoute le passage de la voile.

²⁶ Une écoute est un cordage destiné à régler l'angle d'incidence de la voile par rapport au vent. Un marin *bordera* lorsqu'il tirera sur l'écoute et *choquera* lorsqu'il lâchera de l'écoute.



Une polaire de voile est toujours donnée pour une vitesse de vent apparent V_a fixée. La portance P d'une voile est définie comme une force perpendiculaire au vent apparent alors que la trainée T lui est parallèle. Sur la figure, portance et trainée sont données pour un angle d'incidence de 35° par rapport au vent apparent. Un tel graphe donne des indications sur le réglage de la voile. Au près, c'est-à-dire pour de petits angles de vent apparent l'idée générale est de maximiser la portance tout en minimisant la trainée. A 15° la portance est maximale. Cependant, entre 10° et 25° la trainée varie énormément ce qui est sensible au près. Pour un angle d'incidence de 90° la portance devient nulle et la trainée maximale car l'écoulement devient turbulent. Ce type de courbe est donc difficile à interpréter car tout dépend de la direction du bateau par rapport à la portance et à la trainée. De plus, il s'agit de courbes théoriques qui supposent un vent apparent stable en direction et en force et une voile quasi rigide.

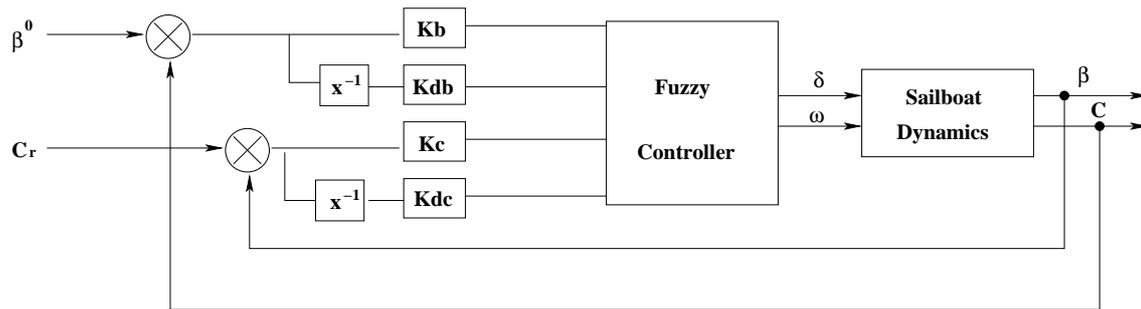
FIG. 2.11: Polaire de voile typique d'un bateau de course moderne.

où h est la gîte idéale, v et α la vitesse et direction du vent apparent et k , h_{max} et v_{max} sont des constantes spécifiques au bateau. La gîte dépend donc de la vitesse du vent apparent et ne doit pas excéder un maximum h_{max} prédéterminé.

L'écart entre la gîte mesurée et la gîte idéale est flouifié (interprété en termes de degrés d'appartenance à différents ensembles flous). Un ensemble de règles floues établit une correspondance entre ces données et des variables floues décrivant l'action sur l'écoute de grand-voile. Ces dernières sont enfin défuzzifiées par la méthode du centre de gravité (contrôleur flou dit de Mandani [Mandani 74]) pour délivrer une commande.

Dans [Stelzer 07] le contrôle de l'angle de barre est traité de manière similaire, il s'agit d'un contrôleur flou de type Mandani où sont pris en compte l'erreur de consigne de cap et la vitesse de rotation du bateau (appelée *lacet*). On est donc proche d'une régulation de type PD (proportionnelle et dérivée). Abril, Salom et Calvo [Abril 97] proposent un contrôleur flou de type Takagi-Sugeno [Takagi 83] prenant en entrée le cap du bateau et l'angle du vent apparent. Les règles floues vont permettre de distinguer deux grands cas : soit la navigation se fait près du vent (du près serré aux allures de reaching en gros) et on applique une régulation de type PD sur l'angle du vent apparent en utilisant la polaire de voile, soit l'allure est au-delà du reaching et une régulation de même type sur le cap est employée (voir la figure 2.12). Ces travaux combinent donc logique floue et régulation classique, les règles floues servant à déterminer sur quoi la régulation porte. L'approche s'avère très intéressante car elle s'appuie sur une expertise qui stipule que l'on barre de manière fondamentalement différente en fonction de l'allure. Par opposition, les autres travaux cités supposent que la technique de barre reste la même quelque soit l'allure.

Yeh et Bin [Yeh 92] décomposent en deux parties l'angle de barre à donner. D'une part, un angle est calculé pour compenser le moment des forces propulsives générées par la voile. Ce moment est normalisé et estimé de manière floue à partir de l'angle du vent apparent. D'autre part, un delta de barre est évalué en fonction de règles floues sur le lacet et l'erreur de cap et pondéré de telle sorte que les butées physiques d'angle de barre ($\pm 17^\circ$) ne soient pas dépassées. Angle de barre censé compensé



L'angle de barre δ et l'angle d'ouverture de la voile ω sont contrôlés à l'aide du cap C et de l'angle du vent apparent β ainsi que de la consigne de cap C_r et de vent apparent β^0 . Un modèle physique du voilier basé sur les équations de la dynamique permet la simulation et le retour de données alors que le contrôleur flou permet de choisir la régulation employée : PD sur le cap ou PD sur l'angle du vent apparent.

FIG. 2.12: Architecture proposée par Abril, Salom et Calvo [Abril 97].

le moment de la force générée par la voile et delta de barre sont alors sommés pour donner la nouvelle consigne.

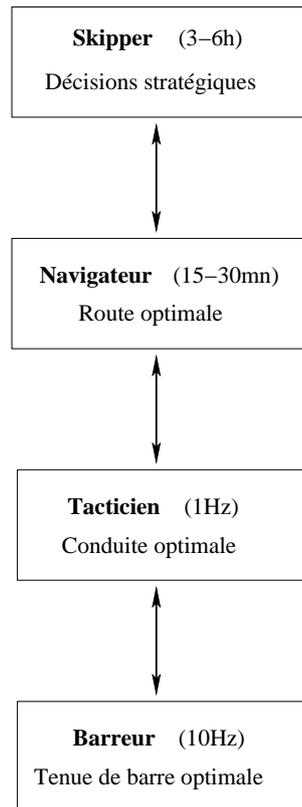
2.5 La barre des informaticiens

The RoboSail Project [van Aartrijk 03] est, à notre connaissance, la seule étude portant sur le pilotage automatique des voiliers conduite essentiellement du point de vue informatique. Ces recherches présentent l'intérêt d'avoir été initiées par un coureur et le logiciel développé fut porté sur un voilier de compétition dans l'optique de s'aligner sur des épreuves en solitaire. Le projet est aujourd'hui arrêté, le bateau vendu, et les résultats semblent mitigés. Les courses se sont soldées par des abandons et le système installé sur le monocoque KingFisher d'Ellen MacArthur fut abandonné sans doute pour des problèmes de fiabilité.

Pour ce projet, Samoocha, van Aartrijk et Adriaans [van Aartrijk 03] ont conçu l'*Avalon Hybrid Architecture* qui est une architecture hybride multi-agents qui s'inspire à la fois de la subsumption architecture de Brooks [Brooks 86] et de l'architecture Xavier de Simmons [Simmons 97] basée sur la Task Control Architecture (TCA). L'architecture est dite hybride car à la fois réactive et délibérative. La partie principale du système contient quatre agents : le skipper, le navigateur, le tacticien et le barreur. Ces rôles reprennent à peu près l'organisation hiérarchique habituelle en régates et en équipage sur un voilier de course moderne. Chacun de ces agents travaille à une échelle de temps bien distincte. Le skipper se charge des décisions stratégiques, c'est-à-dire de la route à suivre vue comme une succession de *waypoints*, et travaille à long terme sur des périodes de 3 à 6 heures. Pour ce faire, il analyse les prévisions météorologiques, les courants ou encore les états de mer. Il prend donc en charge ce qu'on a appelé, au début de ce chapitre, le besoin stratégique du skipper. Le navigateur est chargé d'atteindre le prochain waypoint tout en exploitant la polaire du bateau ainsi que la connaissance de son comportement dans différents états de mer. Un ensemble d'agents l'informe de l'état du bateau (attitude, puissance, sensations de barre ...) et l'aide ainsi à prendre des décisions à moyen terme (de l'ordre de quelques minutes). Le tacticien est chargé de prendre en compte les variations de vent et de mer à court terme (de l'ordre de quelques secondes) et envoie des commandes au barreur qui veille à leurs bonnes exécutions à une fréquence de $10Hz$ (voir la figure 2.13).

Il s'agit d'une architecture en couches dans le sens où la communication n'est possible qu'entre deux couches adjacentes. En plus de ces quatre agents principaux, d'autres agents dits *agents supports*, dotés de facultés de raisonnement propres, sont chargés d'informer l'agent navigateur du contexte défini à partir d'un ensemble de notions issues du vocabulaire métier du marin (rafale, adonnante, largue ...).

Les informations fournies par les agents supports et les données issues de capteurs (speedomètre, anémomètre, gîtomètre ...) nourrissent une base de règles permettant d'inférer des décisions. Par exemple, une de ces règles s'énonce : « Si je navigue au près et qu'une rafale survient, lofer ». Les notions « naviguer au près », « rafale » et « lofer » sont autant d'agents supports difficiles à définir car



Les quatre agents principaux ont leurs fréquences propres et sont hiérarchisés en couches du moins réactif au plus réactif. Les communications ne se font qu'entre deux couches adjacentes.

FIG. 2.13: Hiérarchie des principaux agents de l'architecture Avalon.

dépendant du bateau, du vent et de l'état de la mer. Différentes approches concernant l'apprentissage semblent avoir été tentées et paraissent basées sur des études statistiques d'enregistrements effectués sur un voilier mener par un barreur humain. D'une part il s'agit de déterminer les valeurs des capteurs qui permettent de définir les notions incarnées par les agents supports²⁷, d'autre part, il s'agit d'enrichir la base de règles via l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage d'arbres de décision [Quinlan 93].

2.6 Conclusion

Barrer un voilier de manière performante apparaît comme un challenge passionnant tant bateau, mer et vent interagissent pour définir un système complexe. Vis à vis du problème du pilotage automatique, nous nous sommes placés dans la réponse au besoin temps réel du skipper, c'est-à-dire dans la prise en charge de la trajectoire du bateau soumis aux perturbations locales dues au vent et aux vagues en dehors des préoccupations stratégiques et tactiques liées aux phénomènes météorologiques, à la présence de côtes, de courants et d'éventuels concurrents.

Un voilier est un système qui se meut à la frontière de deux fluides, l'air et l'eau, qui ont des comportements fortement non-linéaires. Les interactions entre ces deux fluides et le bateau peuvent être modélisées en termes d'équations différentielles. C'est le travail des physiciens. Pour peu qu'ils soient suffisamment précis, ces modèles sont difficiles à résoudre et, par conséquent, raisonnablement non exploitables en temps réel. D'autre part, un ensemble de données issues de capteurs ne suffira jamais à délivrer l'information nécessaire à l'analyse complète du système. Il est donc important de déterminer l'ensemble des données pertinentes par souci de simplification, d'économie et de performance.

Etant donnée la complexité des modèles physiques, la stabilisation du système n'est pas toujours garantie et, par conséquent, son contrôle non efficient. Cependant, l'homme parvient dans la grande

²⁷ Par exemple, un agent *allure* détermine pour quels angles de vent apparent on navigue au près.

majorité des cas à maîtriser son voilier. Un contrôle effectif semble donc possible. La sélection des données importantes à la bonne marche du bateau peut donc passer par une expertise humaine de la pratique de la voile. L'utilisation de la logique floue comme outil pour la traduction d'une expertise humaine dans le domaine du contrôle procède de ce type de démarche et ouvre d'intéressantes voies de recherche. Certaines informations comme la définition de ce qu'est une rafale ou une adonnante appartiennent au domaine métier du marin et doivent être traduites grâce aux capteurs disponibles. L'approche multi-agents proposée dans [van Aartrijk 03] paraît pertinente vis à vis de cette problématique.

Enfin, si on souhaite se garder la possibilité de faire de l'apprentissage, la complexité du système incite à s'appuyer sur une expertise solide afin de se garantir une certaine robustesse dans l'éventualité de la non convergence des algorithmes d'apprentissage implémentés. Le chapitre suivant propose une expertise de la technique de barre totalement nouvelle de part son étendue et son niveau de détail. Cette expertise doit beaucoup à notre pratique de la voile de haut niveau et à la connaissance personnelle de nombreux acteurs de ce milieu qui en a découlé. Elle s'attache entre autres à définir et à hiérarchiser l'ensemble des informations de nature anthropomorphique attaché à la technique de barre et à dégager les stratégies mise en œuvre pour répondre aux sollicitations de l'environnement.

Bibliographie

- [Abril 97] Abril, J., Salom, J., et Calvo, O. (1997). Fuzzy control of a sailboat. *International Journal of Approximate Reasoning*, 16(3-4) :359–375.
- [Acheson 90] Acheson, D. (1990). *Elementary Fluid Dynamics*. Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series, Oxford University Press.
- [Alessandrini 93] Alessandrini, B. (1993). *Etude numérique de l'écoulement visqueux autour d'une carène en présence d'une surface libre : résolution des équations de couche limite et de Navier-Stokes*. Mémoire de Thèse, Ecole Centrale de Nantes.
- [Astrom 95] Astrom, K. et Hagglund, T. (1995). *PID Controllers : Theory, Design and Tuning*. Research Triangle Park, NC : Instrument Society of America.
- [Brooks 86] Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, pages 14–23.
- [Chéret 00] Chéret, B. (2000). *Les Voiles*. Gallimard.
- [E.J. de Ridder 04] E.J. de Ridder, J.A; Keuning, K. V. (2004). A mathematical model for the tacking maneuver of a sailing yacht. In *International Symposium on Yacht Design and Yacht construction*.
- [Ferziger 02] Ferziger, J. et Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
- [Fossen 02] Fossen, T. I. (2002). *Marine control systems*. Marine Cybernetics AS.
- [Gouard 99] Gouard, P. (1999). *Les nouvelles stratégies en voile*. Chiron.
- [Hugo 75] Hugo, A. M. (1975). Theory of sailing applied to ocean racing yachts. *Marine Technology*, 12(3) :223–242.
- [Jaulin 04] Jaulin, L. (2004). Modélisation et commande d'un bateau à voile. In *actes de CIFA'04*, Douz Tunisie. CIFA.
- [Kosko 86] Kosko, B. (1986). Fuzzy Cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24 :65–75.
- [Mandani 74] Mandani, E. et Assilian, S. (1974). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 :1–13.
- [Masayuma 95] Masayuma, Y., Fukasawa, T., et Sasagawa, H. (1995). Tacking Simulations of Sailing Yachts - Numerical Integration of Equations of Motions and Application of Neural Network Technique. In *12th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, pages 117–131.
- [Nomoto 75] Nomoto, K. et Tatano, H. (1975). Balance of helm of sailing yachts. In *4th HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*.
- [Oliver 87] Oliver, J., Lechter, J., et Salvesen, N. (1987). Performance prediction for Stars and Stripes. In *SNAME*.
- [Oossanen 81] Oossanen, P. V. (1981). Method for the calculation of the resistance and side force of sailing yacht. In *Small Craft Group Conference*.
- [Parenthoën 04] Parenthoën, M. (2004). *Animation phénoménologique de la mer : une approche éactive*. Mémoire de Thèse, Université de Bretagne Occidentale.

- [Quinlan 93] Quinlan, J. R. (1993). *C4.5 : Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann.
- [Roncin 04] Roncin, K. et Kobus, J. (2004). Dynamic simulation of two sailing boats in match racing. *Sport Engineering*, 7(3) :139–152.
- [Roux 05] Roux, Y., Ba, M., Boin, J.-P., Guilbaud, M., Hauville, F., et Huberson, S. (2005). Sailing Boat Performance Prediction. *Ship Technology Research*, 52 :54–64.
- [Scarponi 07] Scarponi, M. (2007). *Including human performance in the dynamic model of a sailing yacht : a combined ship science - behavioural science approach towards a winning yacht-sailor combination*. Mémoire de Thèse, Università degli Studi di Perugia, Italy.
- [Simmons 97] Simmons, R., Goodwin, R., Haigh, K., Koenig, S., et O’Sullivan, J. (1997). A layered architecture for office delivery robots. In Johnson, W. et Hayes-Roth, B., éditeurs, *First International Conference on Autonomous Agents (Agents’97)*, pages 245–252, New-York.
- [Stelzer 08] Stelzer, R. et Pröll, T. (2008). Autonomous sailboat navigation for short course racing. *Robotics and Autonomous Systems*, 56 :604–614.
- [Stelzer 07] Stelzer, R., Pröll, T., et John, R. (2007). Fuzzy Logic Control System for Autonomous Sailboats. In *Fuzzy Systems Conference. FUZZ-IEEE 2007*, pages 1–6.
- [Takagi 83] Takagi, T. et Sugeno, M. (1983). Derivation of fuzzy control rules from human operator’s control actions. In *Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*.
- [Tan 99] Tan, K., Wang, Q., et Hagglund, T. (1999). *Advances in PID Control*. Springer-Verlag.
- [van Aartrijk 03] van Aartrijk, M. et Samoocha, J. (2003). Learning to Sail. In *European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their implementation on Smart Adaptive Systems (EUNITE 2003)*, Verlag Mainz, Aachen.
- [Vanek 97] Vanek, T. (1997). Fuzzy Guidance Controller for an Autonomous Boat. *IEEE Control Systems Magazine*, 17 :43–51.
- [Warden 91] Warden, W. (1991). A control system model for autonomous sailboat navigation. In *IEEE Proceedings of Southeastcon*, volume 2, pages 944–947. School of Industry and System Engineering, Georgia Inst. of Technol., Atlanta.
- [Yeh 92] Yeh, E. et Bin, J. (1992). Fuzzy Control For Self-steering Of A Sailboat. In *Singapore International Conference on Intelligent Control and Instrumentation*, volume 2, pages 1339–1344.
- [Yu 99] Yu, C. (1999). *Autotuning of PID Controllers*. Springer-Verlag.

Chapitre 3

Expertise

3.1 Introduction

Bien que barrer un voilier soit une activité extrêmement complexe (cf. chapitre 2), l'homme parvient dans presque toutes les situations à assumer cette tâche. Chercher à aborder le problème par le biais de l'expertise humaine paraît donc prometteur face à la complexité des modèles physiques. L'usage de contrôleurs flous [Abril 97, Stelzer 07, Yeh 92] ou de systèmes multi-agents [van Aartrijk 03] va d'ailleurs dans ce sens comme nous l'avons vu au chapitre 2.

Ce chapitre prétend décrire comment l'homme, dans un souci de performance, barre son voilier. Il s'attache donc à l'analyse du comportement humain, au sein d'un environnement naturel, face au problème de la conduite de son bateau même lorsqu'il doit lâcher la barre pour vaquer à d'autres occupations. Ce chapitre s'inscrit dans le domaine de la *psychologie écologique* ou de l'*ergonomie cognitive* [Gibson 77, Morineau 01] et s'appuie en partie sur les pratiques croisées de coureurs de haut niveau qui ont été interrogés et dont les dires sont retranscrits en annexe de cette thèse. Son but est de fournir et de caractériser l'ensemble des éléments essentiels à la technique de barre afin de pouvoir les implémenter dans notre futur système de pilotage.

Nous commençons par souligner l'originalité de cette étude. Aussi étonnant que cela puisse paraître, malgré l'abondance de la littérature maritime, il n'existe pas de manuel du « parfait petit barreur ». Indice supplémentaire du fait qu'il s'agit d'une activité complexe, difficile à décrire avec des mots.

L'homme, surtout en solitaire, a toujours cherché des solutions au problème de la tenue de barre. De nombreux systèmes de barre ont été élaborés au fil du temps et il serait dommage de ne pas s'y intéresser car ils sont généralement astucieux et basés sur des modèles simplifiés du comportement humain : ils cherchent à « faire comme ». La section 3.3 propose, entre autres, une navigation critique dans les pratiques d'extraordinaires pionniers au travers de leurs fabuleux écrits. Nous en profitons pour décrire en détail le pilote le plus utilisé dans le milieu de la course au large en France et pour analyser ses forces et ses faiblesses. Ceci nous conduit à comparer pilote et barreur humain et notamment à essayer de comprendre si l'utilisation de *modes* sur les pilotes commerciaux a un sens pour un marin.

La compétition étant un de nos objectifs, les grands principes de la vitesse à la voile sont abordés du point de vue du barreur dans la section 3.6. Ils traitent de l'équilibre de route et d'assiette, c'est-à-dire essentiellement des *sensations de barre*. La section 3.7 liste et analyse l'ensemble des données utilisées par le marin pour barrer. Leur abondance nécessite de les hiérarchiser et de distinguer leurs utilités respectives, ce qui est fait dans la section 3.8 à travers notamment la pratique des non-voyants et des coureurs professionnels. La technique de barre en elle-même est disséquée en deux temps dans la section 3.9 : tout d'abord les grands équilibres ou comment réagit un voilier dans un environnement stable aux actions sur la barre, ensuite les principes fins ou comment négocier une

vague ou des variations de vent. Bien barrer nécessite de se construire une bonne représentation de son environnement pour être capable de repérer les contextes dans lesquels on se situe. L'expertise permet de définir les concepts qui vont servir à déterminer les contextes en termes de vocabulaire métier, de déterminer les capteurs qui les caractérisent et de donner une idée des formules fournissant leurs valeurs. Concevoir un pilote performant impose de se donner les moyens d'évaluer le gain par rapport à la concurrence, aussi, l'expertise s'achève section 3.11 par des propositions de critères aptes à mesurer la performance d'un barreur.

Ce chapitre doit beaucoup aux propos que nous avons pu échanger avec de nombreux coureurs de tous horizons. Notre propre expérience de coureur au large (Mini-Transat, Figaro, Transat AG2R ...) intervient également régulièrement, notamment en ce qui concerne les micro-sommeils grâce au suivi de l'équipe du professeur Arbus (CHU Rangueil, Toulouse) lors de la Mini-Transat 1991.

3.2 La description de la technique de barre : une nouveauté!

On peut trouver dans les ouvrages consacrés à la voile des réponses à presque toutes les questions que l'on pourrait se poser sur la conduite d'un bateau à voiles. On dispose ainsi de guides de manœuvres très précis ([Glénans 65, Pajot 77, Régate Internationale 91, Tabarly 77]) dédiés aussi bien aux dériveurs légers, qu'aux croiseurs ou aux multicoques de sport et qui vont expliciter, décomposer étape par étape, parfois photos à l'appui, le virement de bord, l'empannage, l'envoi de spinnaker, la prise de ris ... On trouve également de nombreux éléments sur les carènes et les voiles ([Chéret 00, Finot 77]) qui nous permettent de comprendre comment travailler les plans de voilure (creux, vrillage, étarquage ...), comment placer les poids pour bien positionner la carène et donc, en particulier, comment placer l'équipage, comment régler le gréement (position du pied mâât, tension de haubanage, cintrage, rotation, basculement ...) tout ceci étant dynamique c'est-à-dire dépendant du bateau, de la mer, du vent et éventuellement du skipper. On trouve d'excellents ouvrages de météo marine ([Mayençon 82, Bernot 94, Bernot 95]), de tactique et de stratégie ([Bernot 94, Ravon 00]), de navigation en général ([Glénans 04, Asken 83]), mais étrangement, on ne trouve rien ou presque rien sur la manière de barrer un bateau. Dans la première édition du guide des Glénans [Glénans 65] en deux volumes dont le premier est rédigé par Philippe Harlé architecte naval très connu en France, l'action sur le safran est résumée en la célèbre devise « chaque coup de barre est un coup de frein ». Il y a bien quelques précisions sur la manière de négocier les vagues et sur les sensations de barre mais la conclusion de la plupart des ouvrages est que bien barrer s'acquiert par l'expérience. C'est un conseil judicieux et universel puisqu'il s'applique à la plupart des gestes techniques. « C'est en forgeant que l'on devient forgeron ». A en croire les livres, bien barrer consisterait simplement à bouger le moins possible la barre. Bien que de nombreux voiliers acceptent volontier au près d'avoir la barre amarrée, ce type de pilotage s'avère éphémère et n'est manifestement pas suffisant.

3.3 Les systèmes de pilotage

De tous temps les hommes ont cherché à s'affranchir des tâches répétitives, longues et fastidieuses. Barrer un voilier procure des sensations formidables mais pour peu qu'il pleuve, que la mer soit agitée ou que l'on soit seul pendant plusieurs jours, l'exercice devient pénible voire impossible car il faut bien aller dormir de temps en temps. L'habileté et la perspicacité de nombreux marins ont donné naissance à de multiples systèmes de pilotage automatique de voiliers. Cela va du simple amarrage de l'appareil à gouverner au pilote électronique en passant par le régulateur d'allure. Cette section propose d'en dresser un petit historique ainsi qu'une étude succincte de leurs caractéristiques techniques et de leurs qualités et défauts respectifs.

3.3.1 Les systèmes de pilotage non électriques

3.3.1.1 Amarrages

L'usage d'amarrer purement et simplement la barre semble remonter à la naissance des bateaux eux-mêmes tant il paraît naturel. Sur des bateaux lourds, munis d'énormes gouvernails, cette pratique devient une nécessité. Sur les chaloupes sardinières de la fin du XIX^{ième} siècle, l'emplacement, la forme et le poids considérable des gouvernails imposent une barre, *ar voal*, très longue allant jusqu'au tiers de la longueur du bateau. Aux allures portantes, la barre est si dure qu'il est nécessaire de gréer une *attrape* (*an attrap* en breton), un bout passé en double pour faire palan [Cadoret 03]. Les pionniers des navigateurs solitaires ont largement eu recours à ce genre de procédé. Un des premiers et plus grands d'entre-eux, Joshua Slocum, effectua un tour du monde sur son Spray voilier légendaire pour sa tenue de route. « Il ne fallait que peu de temps pour trouver l'angle de barre qui lui permettait de rester en route ; dès que je l'avais déterminé, j'amarrais la barre » [Slocum 03]. Comme sur tous les voiliers, amarrer la barre ne suffit pas, il faut encore que le réglage soit ad hoc : « La grand'voile servait alors à la propulsion, tandis que le foc, bordé soit d'un bord soit de l'autre, soit plat, apportait beaucoup à la stabilité de route » [Slocum 03]. L'inconvénient d'un système mécanique aussi élémentaire réside dans sa dépendance aux conditions extérieures : « L'angle de barre variait naturellement suivant la force et la direction du vent. Ce sont là des choses que la pratique enseigne rapidement » [Slocum 03]. Il nécessite de passer du temps sur le pont pour obtenir le bon compromis et d'effectuer de fréquents ajustements : « Si le vent venait à forcer, je montais sur le pont, [...] et donnais un rayon de barre, j'amarrais celle-ci de nouveau » [Slocum 03].

Généralement c'est à l'allure de près que naviguer barre amarrée est le plus aisé. « Normalement, on ne peut naviguer dans une direction constante avec un vent déterminé, la barre du gouvernail fixée une fois pour toutes, qu'autant que le voilier est à l'allure du « plus près », c'est-à-dire en remontant vers le vent. A la rigueur on peut le faire naviguer de la même manière par vent de travers, mais c'est déjà beaucoup plus difficile. Vent arrière cela devient presque impossible. Au lieu de s'en aller avec le vent, ce qui paraît tout naturel, un voilier cherche perpétuellement à remonter et à venir face au vent. Il n'existe pas de grément au monde qui ne produise ce résultat » [Marie 89]. Peu de bateaux conservent leur cap au portant excepté toujours celui de Slocum : « L'aisance avec laquelle le Spray restait en route vent arrière pendant des semaines et des semaines consécutives était un constant sujet d'étonnement... » [Slocum 03]. Aussi, concevoir un bateau stable de route constitue une des gageures du marin. Bernard Moitessier s'y attache à la fois dans les formes de carènes « Ce sont en général des bateaux larges, assez plats, qui gîtent peu » [Moitessier 88] et dans les plans de voilure. Ainsi il ajoute un bout-dehors pour rendre *Marie-Thérèse II* plus mou¹ et Louis Bernicot n'hésite pas à avancer son mât de 25 cm, opération pourtant lourde, au cours de son tour du monde pour une meilleure stabilité au portant [Bernicot 02]. Malgré tout, ces navigateurs mettent souvent en panne ou à la cape pour voler quelques heures de sommeil. Aussi n'ont-ils jamais eu de cesse d'essayer d'améliorer le système. Ainsi Vito Dumas [Dumas 91] explique : « Lehg II va de l'avant, tout seul, la barre amarrée avec de longues bandes de caoutchouc que j'ai découpées dans une chambre à air de voiture. Je trouve que c'est un bon système ; le meilleur à mes yeux pour laisser au gouvernail toute la souplesse nécessaire et conserver le cap comme sous la pression de la main ». Nous verrons plus loin que cette notion de souplesse est primordiale. On peut également amarrer la barre des deux côtés mais en laissant du mou sous le vent pour conserver ainsi une certaine degré de liberté : « je laisse aller Lehg II en amarrant sa barre d'un bord,, avec un noeud coulant de l'autre bord pour laisser de l'élasticité ; c'est la seule façon de faire » [Dumas 91]. Cependant ces réglages restent fragiles dans le temps et fastidieux : « le point exact d'amarrage est le résultat de quatre ou cinq heures de tâtonnement avant d'abandonner mon poste, car il suffirait de quelques centimètres de plus ou de moins pour que Lehg II, si sensible, dévie de sa route » [Dumas 91]. Sur des bateaux légers, rien que le fait de quitter son poste, provoque un changement de route à cause du déplacement du skipper donc de l'attitude du bateau. Aussi pour gagner du temps, les régatiers installent directement sur la barre de petits taquets coinces où ils frappent les bouts prévus à cet effet : « Sur Pen Duick, l'amarrage de la barre ne pose aucun problème ; j'ai un taquet coinces, mode d'amarrage très sûr [...]. Sans ce taquet, j'aurais eu beaucoup de mal à obtenir un réglage assez précis en faisant glisser des demi-clefs » [Tabarly 64]. Le réglage s'effectue avec précision, sans risque qu'un noeud en se serrant ne donne du mou. La médiocre qualité

¹ Un bateau est dit *mou* lorsqu'il a tendance à abattre tout seul.

des cordages, jusqu'au début des années 70, entraînait d'ailleurs leurs raccourcissements lorsqu'ils séchaient, modifiant ainsi le réglage de barre!

Un pilote moderne comme le Gyropilote de nke offre un mode barre qui consiste à la bloquer dans une position déterminée, contrôlée par un capteur d'angle de barre. Gildas Morvan² rapporte : « c'est rare que je le fasse. Une fois dans le gros temps à Penmarc'h le bateau était imbarrable en compas et en mode vent, je l'ai mis en mode barre de nuit à Penmarc'h. Le mode vent il n'y arrivait pas parce qu'il y avait des grosses vagues donc il n'arrêtait pas de sauter, et en mode compas c'était pareil ».

Pourquoi l'amarrage de la barre marche particulièrement bien au près? Généralement un bateau est *ardent*³ et nécessitera d'amarrer la barre au vent pour compenser cette tendance naturelle. Si le bateau abat, sa gîte s'accroît et il devient plus ardent encore et retrouve ainsi son cap initial. Si le bateau lofe, ses voiles portent moins et il devient mou, la barre se charge alors de le ramener sur le bon cap.

Pour l'automaticien, l'amarrage de barre est une régulation de type boucle ouverte donc peu robuste aux perturbations et aux évolutions.

3.3.1.2 Asservissement écoutes-barre et trinquettes jumelles

Pour pallier au problème de la conduite d'un voilier au vent arrière, Marin Marie s'est penché sur les techniques mises en œuvre en modélisme. Les constructeurs des petits bateaux modèles de compétition ont imaginé un système ingénieux : « asservir le gouvernail à la voilure, c'est-à-dire faire varier l'angle de barre suivant la pression du vent sur une voile ou sur une autre » [Marie 89]. Marin Marie pense d'abord être le premier à l'adapter sur un grand bateau, puis il découvre que le capitaine Otway Waller l'avait appliqué avant lui bien que de manière différente. Pour autant l'invention des *trinquettes jumelles* est généralement attribuée à Marin Marie : « J'avais résolu de ne pas utiliser ma grand-voile dans les alizés, et de la remplacer par deux trinquettes symétriques hissées sur deux étais séparés et tendues en croix de chaque bord, chacune sur un tangon. Les tangons seraient orientés l'un et l'autre légèrement vers l'avant, en « V » ouvert sur la proue, et les bras des tangons viendraient directement faire dormant sur la barre grâce à des poulies de retour. Avec un vent strictement de l'arrière, la traction des deux bras était égale et maintenait la barre au milieu mais, lorsque le bateau faisait une embardée à droite ou à gauche, une des voiles recevait d'avantage de vent et l'autre moins, ce qui tirait la barre du côté demandé pour ramener le bateau dans le lit du vent » [Marie 89]. Les trinquettes jumelles reçurent un large succès de la part des navigateurs en quête d'alizés. Cependant la route résultante est sinueuse, l'allongeant de manière non négligeable. En tâtonnant un peu on peut espérer s'éloigner du plein vent arrière : « Pour cela il fallait donner un peu plus de longueur à l'un des bras et raccourcir l'autre. Mais on ne pouvait pas dépasser une certaine limite. [...] Alors j'arrivai à augmenter la tendance voulue, en limitant la course de la barre d'un côté, de sorte que toutes les embardées se produisaient du même bord, jamais de l'autre. Le réglage était délicat » [Marie 89]. Dans le petit temps, la surface des trinquettes s'avérant trop faible, il arriva à améliorer son système en envoyant un spinnaker au vent des trinquettes (sans tangon, frappé sur un point fixe du pont comme le montre une très belle aquarelle de Marin Marie). Le spi fait alors naturellement lofer le bateau, tendance compensée par l'affaiblissement de la traction de la trinquette masquée par le spi. Les asservissements voiles/barre sont presque exclusivement dédiés aux allures portantes. Si aux allures proches du vent on se contente d'amarrer la barre dès que l'on dépasse le large il faut agir autrement. Dans [Tabarly 64] Eric Tabarly explique longuement son montage : « Le seul moyen est de faire manœuvrer la barre par la trinquette. Quand le bateau lofe, la pression du vent sur la trinquette est plus forte. La barre doit alors intervenir pour faire abattre le bateau et ramener la trinquette à une position dans le vent qui diminue la pression. [...] première opération : faire arriver l'écoute de trinquette par un renvoi de poulie sur la barre du côté au vent et équilibrer la traction de cette écoute par un ou deux sandows sous le vent [...] Deuxième opération : limiter le débattement de la barre à quelques degrés par des bouts tournés aux taquets du cockpit. Ainsi quand le bateau lofe, la trinquette amène la barre au vent et le bateau revient vers son cap qu'il dépassera dans l'autre sens. L'écoute de

² Les propos rapportés de coureurs non suivis de citations sont extraits d'interviews retranscrites en annexe de cette thèse

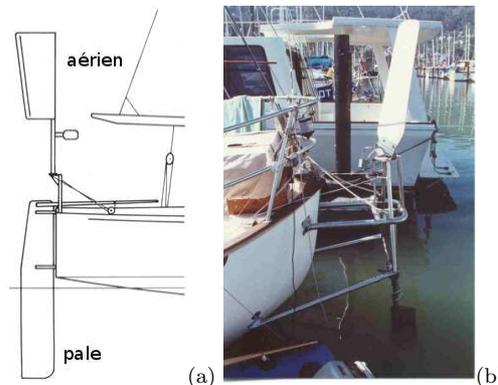
³ Un bateau ardent est un bateau qui a tendance à venir de lui-même face au vent.

trinquette mollit alors et le sandow tire la barre sous le vent et ainsi de suite ». Le résultat est loin d'être idéal : « Pen Duick marche [...] en décrivant des courbes très allongées » [Tabarly 64]. De plus un tel équilibre demeure fragile : « Si ce système ne demandait pas de surveillance, ce serait trop beau. Pour qu'il fonctionne bien, il faudrait que la brise conserve une force constante. Il est bien évident que plus elle sera forte, plus il faudra augmenter la tension du sandow pour l'équilibrer » [Tabarly 64]. Sans compter que parfois les forces en jeu empêchent ce montage : « la trinquette est trop grande, et son écoute ne peut être enlevée du winch » [Tabarly 90]. Enfin, le bateau décrivant des lacets, la voile d'avant ne porte bien qu'exceptionnellement et les pertes de performance sont considérables.

Les asservissements écoutes/barre s'apparentent à une régulation proportionnelle à la puissance des voiles transmise par les écoutes. Cette mesure étant relativement décorrélée du cap ou de l'angle du vent apparent, on peut considérer que nous sommes en présence d'une régulation en boucle ouverte, par conséquent, très sensible aux perturbations et variations de l'environnement.

3.3.1.3 Les régulateurs d'allures

Avec les régulateurs d'allures le voilier garde un angle de vent apparent constant si bien que les voiles restent pleines. La paternité de cette invention semble revenir encore à Marin Marie qui, étonnamment, l'imagina pour un bateau à moteur et non à voiles à l'occasion de sa traversée New-York Le Havre en 1936. Le principe est d'asservir la barre ou tout au moins l'organe qui permet de diriger le bateau à l'angle du vent apparent. Un régulateur d'allure est constitué de trois grandes parties : une girouette ou aérien (voir la figure 3.1), un système de transmission et une pale. Lorsque le vent change de direction l'aérien suit et fournit une impulsion qui est transmise mécaniquement à la pale. Si la pale joue le rôle d'un safran, il s'agit clairement d'une régulation de type P (proportionnelle). De nombreuses variantes ont vu le jour (pour une présentation exhaustive de ces systèmes voir [Forthmann 01] et pour une étude technique voir [Loisirs Nautiques 80]) une des plus rustiques étant celle adoptée par Bernard Moitessier et Henry Wakelam [Moitessier 88] dans laquelle la pale est un simple fletner (volet articulé sur le bord de fuite du safran) et la barre amarrée. Les systèmes les plus efficaces sont ceux à safran pendulaire assisté qui allient force du vent et poussée de l'eau pour agir directement sur la barre via des drosses [Loisirs Nautiques 80]. La régulation n'est plus tout à fait proportionnelle puisqu'elle dépend également de la pression de l'eau sur la pale donc du carré de la vitesse du bateau.



Le régulateur d'allures permet de conserver un cap constant par rapport à la direction du vent apparent. L'aérien est réglé en fonction du cap désiré, alors que la pale immergée transmet directement la correction associée (le safran jouant ici le rôle de la pale). Il s'agit donc d'une régulation purement proportionnelle (a). En (b) la pale est indépendante du safran qui peut selon les modèles être simplement bloqué dans l'axe.

FIG. 3.1: Régulateur d'allures avec ses principaux constituants

Si les régulateurs d'allures ont l'immense avantage d'utiliser des énergies renouvelables, ils n'ont cependant pas été retenus par les coureurs. Christophe Cudennec⁴ a couru plusieurs éditions de la course en solitaire du Figaro et se souvient des régulateurs d'allures comme étant peu pratiques et peu performants comparés aux pilotes modernes. Plusieurs raisons à cela, tout d'abord ils sont sensibles, par principe, aux variations de vent apparent à la fois en force et en direction sans que cela soit

⁴ Christophe Cudennec est un ancien vainqueur de la course en solitaire du Figaro. Les propos qui lui sont prêtés dans ce chapitre proviennent de nombreux échanges personnels.

nécessairement détectable pour un homme dans sa cabine. Si le vent tourne, le bateau suivra pour garder un cap constant par rapport au vent apparent. Si le vent forçait, le vent apparent sera adonnant d'une part et, d'autre part, le comportement du bateau risque d'être différent (plus ardent par exemple) ce qui aura un impact direct sur sa trajectoire. En clair, comme pour les systèmes d'amarrage ou de couplage avec les voiles, le régulateur d'allures pour bien fonctionner doit être associé à un réglage de voiles adapté. Notamment dans le cas de bateaux très puissants, bateaux de course par exemple, la pale peut ne pas déployer suffisamment de puissance pour maintenir le bateau sur sa trajectoire. Les sorties de route et rupture de pales étaient choses courantes sur les premières Ostar⁵. Pire, la réaction du régulateur d'allures peut être contraire à la technique usuelle de barre. Par exemple, au portant abattre dans les risées permet de les *essuyer*, le régulateur d'allures lui les verra comme des adonnantes et, au contraire, lofera. Autre limitation : le vent doit être suffisamment fort pour agir efficacement sur l'aérien. Il n'y a pas de pilotage possible par vent faible. On retrouve ce cas de figure au portant où on peut avoir un vent apparent faible malgré un vent réel relativement soutenu. Pour un bateau planant, comme un mini⁶ par exemple, les brusques accélérations dont ils sont capables mènent à des vents apparents faibles mais également très variables en direction avec, de surcroît, des efforts très importants sur la pale. Ce cocktail rend inopérant un régulateur d'allures. Le type de trajectoire observée correspond à un système oscillant « sans embarder à plus de 15 ° dans les cas extrêmes, la moyenne se situant autour de 10 ° » [Moitessier 67]. Du coup il faut de nouveau rivaliser d'astuce pour limiter les embardées « grâce aux lanières de caoutchouc découpées dans une chambre à air de camion, qui servent à limiter le débattement de la barre » [Moitessier 67], c'est ce qu'on appelle techniquement l'*amortissement*. En fait ce problème de trajectoire est inhérent à la déportation du système par rapport au centre de rotation du bateau qui entraîne un déphasage particulièrement néfaste au portant [Tabarly 98]. D'astucieuses améliorations ont été envisagées (il en est présenté plusieurs toujours dans [Tabarly 98]) mais aucune ne s'est avérée universelle, c'est-à-dire adaptée à tous types de voilier. Enfin sa position excentrée (sur le tableau arrière) associée à son poids et son inesthétisme l'ont définitivement disqualifié aux yeux des coureurs. Pour autant, le régulateur d'allures marque une évolution importante dans les méthodes de pilotage car il est globalement plus sûr et plus stable (moins sensible aux variations) que les systèmes analysés précédemment. Il fit d'ailleurs les beaux jours des concurrents des premières courses au large en solitaire.

Du point de vue de l'automaticien, un régulateur d'allures est une régulation en boucle fermée de type proportionnelle à l'écart à la consigne. Ses performances sont donc meilleures que les deux précédents systèmes étudiés.

3.3.2 Les pilotes électriques

3.3.2.1 Pilotes de cockpit et pilotes in bord

Eric Tabarly sur l'Ostar 76 choisissait d'installer un pilote de cockpit (donc extérieur comme sur la figure 3.2) électrique plutôt qu'un régulateur d'allure [Tabarly 90]. Une des raisons était l'énorme puissance de son bateau Pen Duick 6 ... qui sonna également le glas de son pilote électrique. Les pilotes de cockpit ont en effet le triple désavantage d'être à la fois exposés aux intempéries, d'être portables donc d'avoir des vérins légers et peu puissants et, pour compenser ce manque de puissance, d'avoir un point d'application sur la barre relativement éloigné de la mèche du gouvernail pour bénéficier d'un levier suffisant ce qui limite d'autant la vitesse de rotation de la barre. Les pilotes in bord remédient à ces défauts en agissant presque directement sur la mèche avec des vérins rapides et puissants. Un pilote électrique, qu'il soit in bord ou de cockpit, est constitué d'un vérin (mécanique ou hydraulique), d'un calculateur qui veille au maintien d'une consigne et de capteurs (compas, angle de barre, vent, vitesse, gyromètre ...). Les consignes usuelles sont suivre un cap compas et conserver un cap par rapport au vent apparent ou par rapport au vent réel. L'asservissement se fait par régulation de type PID. Bien avant les voiliers, les navires de la marine marchande ou de guerre utilisaient des pilotes automatiques munis de compas gyroscopiques. Leurs coûts prohibitifs, leurs consommations électriques élevées ainsi

⁵ L'Ostar est la mère des courses en solitaire, appelée également *transat anglaise*, qui mène les bateaux de Plymouth à Newport aux Etats-Unis et qui révéla Eric Tabarly.

⁶ Un *mini* est un voilier de 6m50 de long destiné à la *Mini-Transat*, transatlantique ayant lieu les années impaires entre la France et les Antilles ou l'Amérique du sud.

que le peu de demande ont retardé leurs développements sur les voiliers. Marin Marie, encore lui, fut un des premiers à utiliser un pilote électrique développé par un amateur, Robert Césal [Marie 89], basé sur un compas magnétique et des cellules photo-électriques. L'installation effectuée in-extrémis s'avéra peu fiable mais permit de s'affranchir du régulateur d'allures dans le petit temps.



Un pilote de cockpit intègre dans un même boîtier le vérin, l'électronique et le clavier. Fixé sur le côté du cockpit, il n'est pas débrayable et nécessite un réglage de course avant de pouvoir être solidariser à la barre.

FIG. 3.2: Pilote de cockpit

Les premiers pilotes électroniques commercialisés pour les voiliers sont apparus dans le milieu des années 1970 (1974 exactement pour autohelm) et obéissaient à une consigne de cap fournie au départ par un compas à rose (c'était le cas du célèbre AT50 de chez Plastimo) puis par un compas fluxgate ou par une girouette (voir [Loisirs Nautiques 80]). Ils ne sont donc pas dépendants de la force du vent mais nécessitent une source d'énergie auxiliaire. Les pilotes d'aujourd'hui sont beaucoup plus sophistiqués puisqu'ils prennent en compte non seulement le cap et la girouette mais également la vitesse du bateau, l'angle de barre et la vitesse de rotation autour de l'axe vertical d'un repère lié au bateau. Ce dernier permet de déceler d'infimes variations de cap et donc de les corriger beaucoup plus tôt qu'avec le seul compas. Brookes, Raymarine, Silva ou encore nke sont quelques unes des marques les plus représentées. Aujourd'hui, le succès de ces pilotes par rapport aux régulateurs d'allures est incontestable. Ils sont compacts et faciles d'utilisation mais nécessitent un moyen de générer du courant. La plupart des plaisanciers adoptent un pilote de cockpit dont le vérin est directement fixé à la barre pour des raisons de coût et de facilité d'installation. Les vérins gênent alors la circulation dans le cockpit et ont le désavantage de n'être pas débrayables. Au moment d'embrayer, rien que le fait de trouver la bonne longueur du vérin avant de le solidariser à la barre constitue en soi déjà un petit challenge. Les puissances de ces vérins étant limitées, ils ne sont pas adaptés aux bateaux de course même petits qui adoptent par conséquent des pilotes in bord. Avec de tels pilotes la pression sur une simple touche permet de les embrayer alors qu'une autre touche permet de reprendre la main. La présence d'un vérin alourdit quelque peu la barre et rend un peu plus difficile le pilotage pour l'homme.

3.3.2.2 Le Gyropilot de nke

Dans la suite nous allons nous référer essentiellement au Gyropilot de nke (pilote in bord) car il est assez représentatif des autres pilotes et équipe l'intégralité des bateaux de la course en solitaire du Figaro (imposé par la jauge), une majorité des 60 pieds IMOCA, une majorité des trimarans du circuit ORMA et une majorité des minis. Sa diffusion touche également de plus en plus le monde de la plaisance malgré son coût et sa complexité d'installation. L'introduction du gyromètre, mesurant la vitesse de rotation du bateau autour d'un axe vertical, a été une véritable révolution tant le gain en performance fut significatif avec la possibilité de faire un véritable PID (avant le D posait un problème car déduit d'un compas fluxgate très bruyant). Avec ce pilote, le navigateur dispose de cinq modes de fonctionnement : le mode compas, le mode vent apparent, le mode vent réel, le mode GPS et le mode barre accessibles à partir d'un menu sur la façade du GyroGraphic (cf. figure 3.3). Seuls les trois premiers modes sont réellement utilisés en compétition. Une fois le mode sélectionné, il suffit d'appuyer sur la touche **Auto** pour embrayer le vérin avec comme consigne la valeur instantanée du capteur correspondant au mode sélectionné. La régulation étant de type PID, de nombreuses personnes ont la sensation qu'au début le pilote fait quelques embardées puis « apprend » car la trajectoire finit

par se stabiliser. Il n'en est rien ! Pour éviter ce type de comportement, il convient, avant d'embrayer, de stabiliser le bateau et notamment d'avoir peu d'angle de barre.

Pour le mode compas, le P et le I se font à partir de l'écart entre la consigne et le cap mesuré par un compas fluxgate et le D sur les données délivrées par le gyromètre. Les modes vent apparent et réel sont ramenés au mode compas en calculant l'équivalent en écart cap compas de l'écart en direction de vent. Ceci permet d'user indirectement d'un mode robuste et largement éprouvé et ne demande que quelques calculs dans le cas du vent apparent (1° de vent réel correspondant à 1° de cap géographique). Le mode GPS utilise le cap délivré par un GPS alors que le mode barre bloque cette dernière dans une position contrôlée par le capteur d'angle de barre.

Quel que soit le mode sélectionné, la consigne est affichée en vis à vis de la valeur mesurée. L'angle de barre apparaît également et donne une idée de l'équilibre du bateau. Sur le côté de l'écran d'affichage, des touches +10, -10, +1 et -1 permettent de modifier la consigne sans débrayer le pilote (voir la figure 3.3).



Le Gyropilote de nke en action en mode compas ! D'une part la consigne, d'autre part la mesure. L'erreur est donc ici de un degré. Le gain est accessible en façade (et s'affiche en haut à droite) et l'angle de barre donne une indication sur l'équilibre du bateau. Les touches Auto et Stop sont en bas à droite et les modifications de consignes (± 1 , ± 10) juste au-dessus.

FIG. 3.3: La façade du Gyropilot graphic de nke

Dans le pilote nke la correction à donner est inversement proportionnelle à la vitesse du bateau. La régulation obéit donc à une équation du type :

$$correction = \frac{K}{v}(Pe + I \int e + Dgyro)$$

où v est la vitesse du bateau, K un gain global, e l'écart entre la consigne et ce qui est mesuré et $gyro$ la valeur délivrée par le gyromètre (débruitée). Ce choix correspond à première vue à la pratique usuelle du marin car plus le bateau va vite, plus ce dernier réagit vite aux coups de barre. La correction est envoyée à un servomoteur qui contrôle la course du vérin par une régulation de type PI grâce à un capteur d'angle de barre.

Le skipper a la possibilité d'optimiser les performances de son pilote. Un premier réglage directement accessible est celui du gain qui n'agit pas de manière homogène sur le gain global K mais indépendamment sur le P et le D en leur attribuant des valeurs préalablement tabulées (d'après des tests effectués par Michel Desjoyeaux à l'époque). Globalement plus le gain est fort, plus P et D sont élevés (mais D croît beaucoup plus vite que P), plus la correction sera importante, et plus la consommation sera considérable. Dans la pratique pour trouver le bon gain, il est recommandé de le mettre au maximum, de le diminuer jusqu'à ce que le comportement du bateau ne convienne plus, pour le remonter d'un cran. On n'obtient pas un pilotage performant sans passer par le réglage du gain car un PID est lié à la dynamique du bateau et à son environnement. Celui-ci doit-être continuellement réajusté au fur et à mesure de l'évolution des conditions de navigation et c'est la raison pour laquelle il est directement accessible.

Via un menu *réglage pilote* il est possible d'accéder à d'autres paramètres. Parmi ceux-ci citons le *lissage vent* qui correspond à un amortissement de la valeur du vent captée par la girouette. Par mer agitée il vaut mieux opter pour un lissage important pour éviter que le bateau suive toutes les oscillations de la girouette dues aux chocs dans les vagues. La *contre-barre* permet de corriger l'effet d'un coup de barre en ramenant la barre vers l'axe du bateau (ou même au-delà) avant que la consigne ne soit atteinte, tenant compte ainsi de l'inertie du bateau (la contre-barre agit sur le D). Le *coefficient de barre* joue directement sur le gain global K . Bien d'autres paramètres sont disponibles, aussi est-il possible de sauvegarder jusqu'à neuf configurations pour les retrouver le moment venu. Enfin, empannages et virements de bord peuvent être configurés en fixant la valeur de l'angle de virement et la vitesse de la manœuvre ... restent les voiles à faire passer du bon côté.

Lorsque le bateau gîte, girouette et anémomètre en tête de mât ne sont plus dans le plan pour lequel ils ont été conçus. De ce fait (sans compter les mouvements de la tête de mât lors de passages de vagues) le vent apparent mesuré est largement faux et les modes vent apparent et réel peuvent être inutilisables. Ce type de problème se trouve amplifié sur les trimarans ORMA où les mâts basculent et tournent. Pour répondre à ces problèmes, nke a développé le **processorHR** puis une version grand public le **Processor Regatta** qui exploitent une centrale inertielle (en fait, un magnétomètre, gyromètre et accéléromètre sur les trois axes) pour calculer en temps réel le vent réel. Sur les bateaux où le mât est mobile (latéralement et/ou en rotation) une deuxième centrale est placée en tête de mât pour connaître la position du mât par rapport à la coque et mesurer précisément ses mouvements. Grâce à la centrale inertielle, une régulation prenant en compte gîte et tangage devenait alors possible donnant naissance au **pilotHR** avec une correction du type PPPIDDD :

$$\text{correction} = \frac{K}{v} (P_c eCap + P_g eGite + P_a eAssiette + I_c \int eCap + D_c gyro + D_r roulis + D_t tangage)$$

où $eCap$, $eGite$ et $eAssiette$ désignent les erreurs en cap, gîte et assiette et les modes vent étant toujours ramenés en interne à une consigne de cap.

Cette évolution répond à la pratique des marins qui utilisent les variations de gîte et d'assiette pour anticiper (voir section 3.7) et conduit à des économies d'énergie appréciables (de l'ordre de 50% d'après les enregistrements effectués sur le Vendée Globe 2008).

3.3.2.3 Les skippers parlent de leurs pilotes : les voies d'une possible amélioration

Dans le milieu de la course au large en solitaire les pilotes sont bien évidemment des auxiliaires incontournables et leurs performances participent directement à celle du skipper lui-même. Les améliorer constitue un axe de recherche au même titre que l'optimisation des carènes, des appendices ou des voiles. Posséder un meilleur pilote que ses adversaires constitue un avantage déterminant, car pouvoir confier son bateau à un bon pilote permet de se reposer, de s'alimenter, de passer du temps à faire de la navigation, d'optimiser ses réglages ou tout simplement d'utiliser mieux les capacités du bateau.

Quand on demande l'avis des coureurs sur leurs pilotes, les réponses sont très différentes d'un support à l'autre. Les figaristes en sont globalement contents mais plus les bateaux sont capables de grosses accélérations moins les skippers sont satisfaits. Jean Le Cam, skipper d'un 60 pieds IMOCA, confie lors de la Route du Rhum 2006 : « Je barre beaucoup, car c'est le seul moyen d'aller vraiment vite sous gennaker. Les gains comparés aux performances du pilote automatique sont de l'ordre de 3 noeuds ! ». Cet écart de performance de pilotage entre bateaux lents et bateaux rapides est en partie dû au fait que les capteurs sont d'autant plus perturbés que les accélérations sont élevées. Un reproche courant est leur *manque de fluidité* ou qu'ils barrent *comme un aveugle* dans le sens où ils ne tiennent pas vraiment compte de la mer. D'autre part, si les conditions changent c'est au skipper de paramétrer son pilote pour conserver un bon niveau de conduite. Le mystérieux *pilote intelligent* d'Yves Parlier pendant le Vendée Globe 2000 prenait en compte cet état de fait. Il s'agissait d'un pilote ouvert du point de vue du PID et les coefficients avaient été tabulés en fonction de différents paramètres (allure, état de la mer, force du vent ...). Il suffisait alors au skipper d'évaluer le contexte pour sélectionner le jeu de coefficients ad hoc, de les rentrer à la main puis d'embrayer son pilote. Des études ont été menées dans cette direction sur le trimaran Géant de Michel desjoyeux mais n'ont pas abouties tant le réglage d'un PID reste délicat. La force d'un produit comme le GyroPilot de nke réside dans un jeu

de coefficients qui convient à un large spectre de bateaux et de conditions. Que le coureur soit obligé de reconfigurer régulièrement son pilote pour garder un bon niveau de pilotage pose d'autant plus problème que la multiplicité des modes (compas, vent réel, vent apparent, GPS, barre) et des réglages (gain, lissage, contre-barre, coefficient de barre ...) les rend difficiles d'utilisation (avec la nécessité pour y accéder de passer par de multiples menus et sous-menus) et brouille les cartes. Loïc Ponceau du centre d'entraînement de Port La Forêt s'exclame « Si des réglages sont importants, qu'ils soient accessibles! ». Pour un coureur, un pilote *intelligent* serait un pilote embrayable d'une simple pression sur un bouton et qui barrerait comme un homme. Certains coureurs néanmoins maîtrisent bien *la bête* et exploitent judicieusement ses capacités.

Globalement le pilote se débrouille plutôt bien et barre même mieux qu'un homme dans la durée et lorsque les conditions sont stables. En effet, un pilote a l'avantage de ses inconvénients, c'est une machine qui ne fatigue pas, elle ne fait pas de grosses erreurs de barre comme le ferait un skipper en cas de perte de vigilance. L'autre avantage du pilote automatique est qu'il est capable de ne pas réagir à certaines sollicitations de l'environnement. Un exemple typique est la houle dans le petit temps où un barreur aura tendance à contrecarrer les effets des vagues parce que l'attitude du bateau change tout en essayant de suivre le vent apparent qui varie énormément. Le pilote en mode compas, lui, ira droit et au final sera plus performant. Un point fort mis en avant par les coureurs est le mode vent réel au portant : le bateau suit la houle, abat dans les descentes, relance dans les montées! Tout le contraire de ce qu'il devrait faire puisque le vent réel est censé rester stable! L'explication de ce bon comportement tient au fait que le calcul du vent réel est faux et en retard, d'ailleurs ce mode sous pilotHR (centrale inertielle) marche beaucoup moins bien!

Les défauts des pilotes commerciaux modernes sont relativement bien identifiés :

- En mode compas, si le bateau ralentit alors que le vent reste stable (arrêt dans une vague par exemple), le pilote ne le relancera⁷ pas. De même si le bateau accélère, le pilote n'en profitera pas pour faire du gain⁸.
- En mode vent réel, si le bateau ralentit alors que le vent reste stable le pilote ne le relancera pas. De même si le bateau accélère, le pilote n'en profitera pas pour faire du gain.
- En mode vent apparent si le bateau ralentit au près pour un vent réel stable, le vent apparent sera adonnant⁹ et plus faible et le pilote ira dans le sens inverse de la relance (ennuyeux si le bateau est freiné par du clapot par exemple).
- En mode compas si le vent forçit, le vent apparent adonne et s'il faiblit le vent apparent refuse et le bateau ne suivra pas cette variation.
- Le mode vent apparent n'est pas vraiment utilisable dans les vagues ou sur des bateaux capables de grosses accélérations car le vent apparent varie trop brutalement dans ces cas là.
- Dans la pétrole (vent très faible), la vitesse du bateau étant faible et la correction inversement proportionnelle à cette vitesse, les mouvements de barre peuvent être très brutaux et amples surtout en mode vent (car par nature le vent est très variable quand il est presque inexistant). Le bateau fait alors n'importe quoi¹⁰.
- Le terme intégral induit des dépassements importants de consigne lors de changements des conditions extérieures comme une brusque baisse de la force du vent.
- Pas de stratégie spécifique au passage d'une vague.
- Pas de stratégie de maintien de surf.
- Pas d'adaptabilité temps réel aux changements de l'environnement.

Au regard des défauts des pilotes modernes et de la pratique des coureurs [Ponceau 06] nous pouvons esquisser leur *notice d'utilisation* :

- Si le vent est faible, utiliser le mode compas.
- Plus on est près du vent ou proche du vent arrière, plus le mode vent réel est intéressant.
- Plus le vent est fort, plus le mode vent réel est fiable.
- Plus la vitesse du bateau est élevée, plus le gain doit être important.

⁷ Relancer un bateau consiste à s'écarter largement de la route dans le but de retrouver une bonne vitesse.

⁸ A l'inverse de la relance, le *gain* consiste à profiter d'une bonne vitesse pour *gagner* dans la direction où le bateau est censé aller moins vite.

⁹ On dit que le vent *adonne* s'il tourne pour venir plus sur l'arrière du bateau, sinon on dit qu'il *refuse*. Le skipper dira aussi qu'il y a une *adonnante* (souvent contractée en *ado*) ou un *refus*.

¹⁰ Certains coureurs utilisent une vitesse plancher pour remédier à ce problème. Thomas Coville sur son maxi trimaran Sodebo impose ainsi une vitesse de 15 noeuds si celle mesurée est inférieure.

- Si le vent est faible à modéré et stable et la mer calme le mode vent apparent peut s'avérer intéressant en *suivi de vent*¹¹.
- Aux allures de reaching et largue, le mode compas est conseillé car la vitesse du bateau est élevée et peu sensible aux variations de vent en direction et qu'il est intéressant d'aller droit.

3.3.3 Systèmes de pilotage : comparaison

Avant de comparer homme et pilote, dressons un bilan des systèmes de pilotage imaginés par l'homme (figure 3.4).

	REGULATION	INPUT	ALLURES
Amarrages barre	Constante Boucle ouverte	-	Près
Asservissements écoutes/barre	Type P Boucle ouverte	AWA	Portant
Régulateurs d'allures	Type P Boucle fermée	AWA	Toutes
Pilotes électriques	PID Boucle fermée	Cap (ou AWA ou TWA) et lacet	Toutes
PilotHR	PPPIDDD Boucle fermée	Cap (ou AWA ou TWA), lacet, roulis, tangage	Toutes

Les systèmes de pilotage (du haut vers le bas) prennent de plus en plus de paramètres en compte et finissent par couvrir l'ensemble des allures possibles.

FIG. 3.4: Petite taxinomie des systèmes de pilotage

La caractéristique commune aux systèmes de pilotage est qu'ils sont d'autant plus performants que le bateau est bien équilibré. En clair, pour bien fonctionner, le skipper doit régler en conséquence son voilier. L'amarrage de barre supporte mal les variations de l'environnement (mer ou vent) mais est basé sur un équilibre indirectement lié à la gîte et à l'angle au vent apparent. Les asservissements écoutes/barre et les régulateurs d'allures ont les défauts des régulateurs proportionnels : ils ont la fâcheuse tendance à donner des routes en lacet voire à être instables. Les pilotes électriques couvrent le plus large spectre d'utilisation possible mais nécessitent une source d'énergie auxiliaire.

AWA, cap, lacet, gîte, roulis et TWA apparaissent comme des informations importantes pour le barreur.

3.4 L'homme fait-il du PID ?

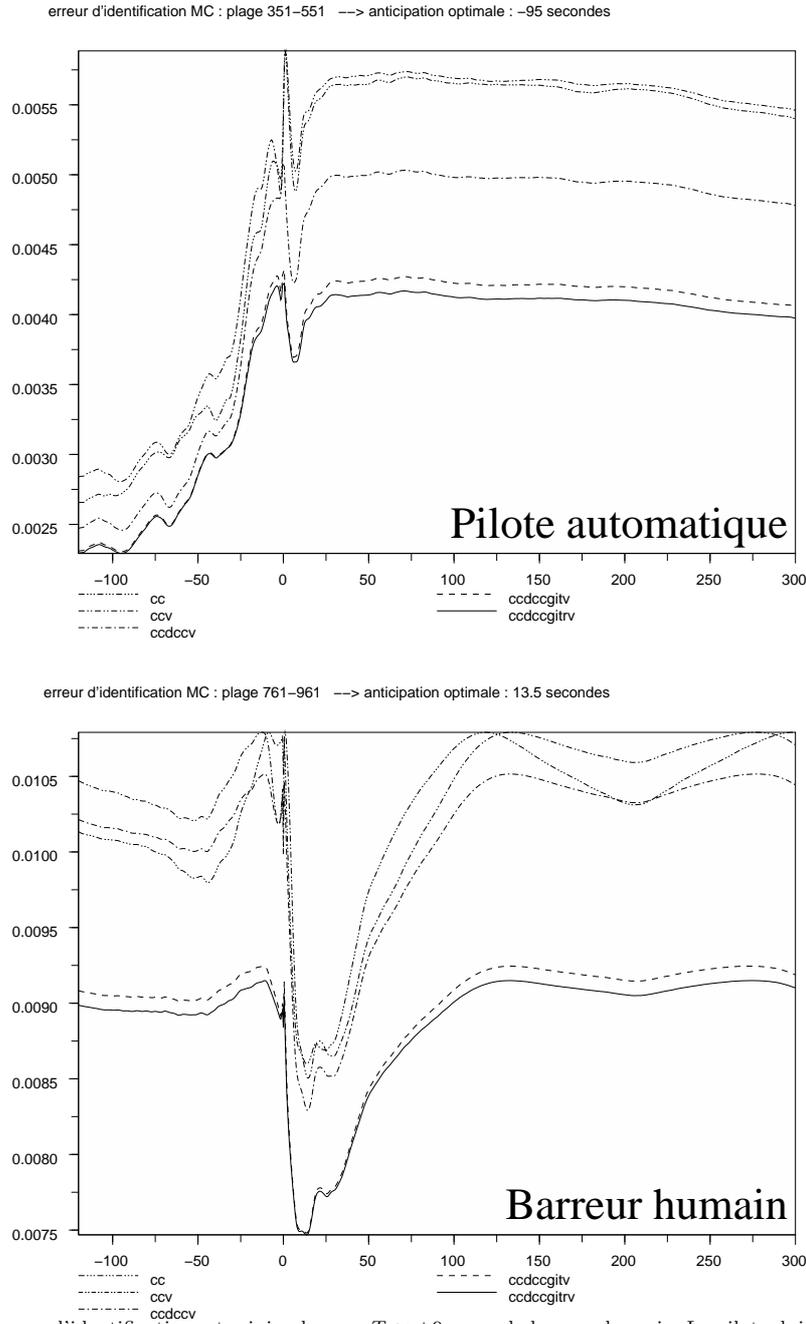
Les pilotes modernes approchent voire dépassent l'homme dans certaines conditions. Avant d'analyser en détail l'activité de l'homme à la barre, essayons de définir ce qui la distingue de celle d'un pilote automatique.

Pierre Bourcier [Bourcier 06] écrit dans la revue *Course Au Large* que « Le pilote mesure, compare puis agit » alors que « Le barreur mesure, relance, anticipe, s'adapte, donc agit en conséquence ». Nous avons vu que le pilote effectivement ne relance pas et que l'homme doit constamment régler les paramètres du pilote pour garder un bon niveau de pilotage. Afin de montrer que l'homme anticipe, nous avons cherché des indices expérimentaux prouvant la capacité de prédiction d'un barreur humain.

Des mesures ont été effectuées lors de la mini-transat 1997 sur le voilier *ARéVi* (voir la figure 3.5). Le bateau était équipé notamment d'un capteur d'angle de barre, d'un compas donnant le cap magnétique et d'une centrale inertielle fournissant en particulier la gîte et le roulis. Les enregistrements

¹¹ Le *suivi de vent* consiste à tenir compte au plus près des variations du vent apparent pour garder un bon réglage de voiles donc une bonne vitesse.

sont réalisés au minimum à 2Hz. Le bateau était mené soit sous pilote automatique, soit manuellement par le solitaire.



L'erreur d'identification est minimale pour $T \approx +9s$ pour le barreur humain. Le pilote, lui, n'a pas de tel minimum marqué. Ceci tendrait à prouver que l'homme anticipe contrairement à la machine.

FIG. 3.5: Homme et pilote sur ARéVi. Mini Transat 1997

Nous avons étudié les différences de comportements entre le pilote automatique et le barreur humain en identifiant par une méthode des moindres carrés quelques formules élémentaires de commande :

$$\theta = \mu(cc - consigne) \tag{3.1}$$

$$v\theta = \mu_{cc}(cc - consigne) + \mu_{dcc}dcc + \mu_{gite}gite + \mu_{roulis}roulis \tag{3.2}$$

où cc est le cap magnétique, $consigne$ la direction magnétique à suivre, dcc la vitesse de lacet, $gite$ l'angle de gîte et $roulis$ la variation de gîte. La première formule est une simple commande

proportionnelle entre l'angle de barre θ et l'écart à la consigne de cap ($cc - consigne$). La seconde tient compte en plus d'effets physiques dans l'équilibre des couples, extrêmement simplifiés et combinés linéairement.

La consigne n'étant pas mesurée, il faut la reconstruire. Nous la reconstruisons de la manière suivante : la consigne à l'instant t est une moyenne du cap compas cc sur un intervalle I . Cet intervalle est construit comme suit, en fonction d'un paramètre $T \neq 0$:

$$I(T) = [t, t + T] \text{ si } T > 0, I(T) = [t + T, t] \text{ si } T < 0$$

ce qui donne toute une famille de consignes : $consigne_T(t)$ correspondant au cap moyen suivi par le voilier entre t et $t + T$: avant t si $T < 0$, et après t si $T > 0$.

L'identification par la méthode des moindres carrés est réalisée pour chaque T sur le même domaine d'une vingtaine de minutes, pendant lesquelles les conditions d'état de mer étaient stables et se sont alternées des périodes de pilotage automatique et humain.

Les courbes d'erreur d'identification en fonction de T (Figure 3.5) font apparaître exclusivement pour le barreur humain un minimum pour $T \approx +13s$, ce qui correspond à l'ordre de grandeur de la période des vagues vues depuis le voilier.

L'analyse de ces résultats, tend à faire penser à la mise en œuvre par l'homme d'une stratégie prédictive de trajectoire liée aux vagues. Cependant, cette étude élémentaire ne donne pas de solution pour calculer en temps réel une consigne d'après les capteurs disponibles à ce moment là.

L'homme comparé au pilote fait également de la régulation (à partir d'informations multiples que l'on étudie dans la suite de ce chapitre) mais, en plus, identifie des contextes (présence de vagues, de rafales, bateau trop ardent ...), anticipe et agit en conséquence.

3.5 Différents modes de barre

Si les pilotes d'aujourd'hui utilisent des modes, est-ce le cas des barreurs humains ? C'est-à-dire, barre-t-on de manière fondamentalement différente si le vent est faible ou soutenu ou si la mer est calme ou hargneuse ou encore sur un multicoque ou un monocoque ?

3.5.1 La notion d'échelles de temps dégagée par les coureurs

Pour les coureurs les avis sont partagés. Hugues Destremau rapporte « si tu ne te dis pas qu'il faut que je change de mode, eh!, il y a de la brise maintenant!, si tu n'as pas fait le changement dans ta tête, tu n'avances pas ». On peut argumenter qu'au près dans le petit temps on a tendance à remplir la voile d'avant donc à tirer sur la barre alors que dans la brise à la même allure on a tendance à effacer la voile d'avant donc à laisser le bateau lofer naturellement voire à l'accompagner donc à pousser légèrement sur la barre. L'action sur la barre est alors opposée. Pour Philippe Legros ce n'est pas vrai car on peut le voir d'un autre point de vue « tu as en commun que pour relancer il faut abattre et dès que tu vas trop vite tu lofes. [...] Dans le petit temps si cela adonne [...] on va d'abord choquer la voile [...] et on va relofer progressivement en bordant. Dès que tu as du vent tu vas réguler beaucoup plus à la barre.[...] C'est plus une différence de procédure, tu passes d'abord par le réglage des voiles ou d'abord par la modification de trajectoire. L'échelle de temps varie un peu. La façon de barrer ne change pas vraiment ». Il y a là semble-t-il une notion fondamentale, celle d'échelle de temps. Plus qu'un changement de mode il s'agirait d'un changement de fréquence ou plus précisément d'une adaptation du niveau de vigilance et de réaction du barreur en fonction du degré de sollicitation des événements extérieurs, les réponses à la barre restant sensiblement les mêmes. C'est ce qui semble définir la notion courante de *toucher de barre*. Pour Philippe Gouard [Gouard 99] « on peut définir le bon barreur comme l'athlète capable d'adapter sa sensibilité (ou sa fréquence de coupure, c'est-à-dire le seuil de sensibilité qui lui est propre et au delà duquel il ne perçoit rien) à la fréquence de coupure du voilier. L'accord de ces deux sensibilités au niveau le plus élevé garantit un excellent toucher de barre ». Ainsi barrer un bateau lourd n'est pas très différent de barrer un bateau léger et toilé dans le

sens où il s'agit plus d'une adaptation du niveau de réactivité que d'autre chose. De manière générale, il convient de considérer le problème dans son ensemble. Barrer un bateau est un système complexe où interviennent un barreur, un voilier, la mer et le vent plus éventuellement un équipage. Or chacune de ces entités possède sa propre échelle de temps. Les fréquences propres du voilier (en roulis et tangage) sont relativement élevées, généralement plus que celles liées au système de vagues (période de quelques secondes). Météorologiquement, le vent n'est jamais stable et subit quasi-périodiquement de petites modifications à la fois en force et en direction. La période de ses oscillations est de l'ordre du quart d'heure. Un bon barreur finalement est quelqu'un qui est à l'écoute de son environnement et est capable de réagir en conséquence. Son spectre doit donc recouvrir l'ensemble des spectres des entités qui l'entourent. Non seulement sa vigilance doit s'adapter mais son action sur la barre en vitesse et en amplitude également.

Là où les coureurs sont unanimes pour dégager un mode de barre différent est lorsqu'il s'agit de sécurité. Certaines conditions font qu'il est primordial de barrer pour rechercher la survie du matériel, en particulier celle du bateau lui-même et par conséquent des hommes. On peut ainsi chercher à freiner le bateau ou à le présenter face à certaines vagues quitte à modifier largement sa route. Il existerait donc un mode survie, très particulier car tourné vers la préservation et non la performance.

3.5.2 Les modes de barre dans les locutions marines

Bien que la notion de *mode* ne semble pas clairement définie par les coureurs, il existe un certain nombre de locutions marines qui tendent à distinguer différentes façons de barrer. Nous les étudions ici.

3.5.2.1 Barrer aux penons

On entend souvent dire que l'on *barrer aux penons*. Les penons ou faveurs sont des brins de laine ou des bandes très légères de toile fixés sur les deux faces des voiles pour indiquer de manière fine la qualité de l'écoulement de l'air le long de la voile. Ils permettent au barreur de suivre avec précision les variations du vent. La voile est bien réglée et donc développe une force maximale lorsque les penons flottent à l'horizontale (car l'écoulement est alors laminaire). Si un penon au vent (sur l'intrados) *décroche*, il faut abattre, si c'est sur l'extrados il faut lofer. Ce type d'information est exploitable du près jusqu'au large car au-delà l'écoulement n'est de toutes façons plus laminaire. Cette manière de barrer est très répandue chez les régatiers et correspond à un suivi fin de l'angle de vent apparent.

3.5.2.2 Barrer au cap

Il en va de même avec la technique *barrer au cap*. Une habitude des marins pour rejoindre un point géographique particulier est de donner une consigne de cap au barreur. On règle alors les voiles en conséquence et on essaye de garder le cap le plus fidèlement possible. C'est exactement ce que fait un pilote automatique en mode compas. D'un point de vue performance, la ligne droite entre deux points étant le plus court chemin, c'est une stratégie intéressante. Les pilotes automatiques équipés d'un gyromètre corrigent très tôt les variations de cap et sont capable de le conserver avec une très grande précision. Les coureurs utilisent beaucoup le mode compas dans les conditions où le bateau va vite, par exemple le reaching dans la brise (où le bateau planera presque en permanence) et ils le jugent alors supérieur à l'homme. Comme le bateau va vite, autant aller droit.

3.5.2.3 Barrer au près

Une technique proche de *barrer aux penons*, mais plus spécifique, est celle de *barrer au près* qui consiste à obtenir le meilleur VMG pour gagner dans le vent. On pourrait aussi appelé ce mode *barrer au meilleur VMG*. Les penons sont alors très utiles pour suivre les évolutions du vent et profiter

de chaque adonnante. Le cap n'est plus alors un guide mais simplement un repère qui permet de constater les bascules et prendre, si nécessaire, des décisions tactiques. *Barrer au près* s'oppose de ce point de vue à *barrer au cap* et on peut dire que l'on retrouve la même problématique lorsqu'on cherche à descendre dans le vent. En effet, si le cap souhaité est trop proche du vent arrière, il est plus avantageux de tirer des bords de grand largue au meilleur angle de descente que d'y aller directement. Il y a donc deux grandes problématiques pour lesquelles le compas ne joue pas le même rôle : soit on fait du près (ou du grand largue) et le compas n'est qu'un repère, soit on barre au cap et le compas sert de guide.

3.5.2.4 Barrer au vent

L'expression *barrer au vent* se rapproche beaucoup de *barrer au près* ou de *barrer aux penons* dans le sens où il s'agit d'un suivi de vent apparent.

3.5.2.5 Barrer à la vague

L'expression *barrer à la vague* est assez courante dans la bouche des marins. L'amplitude et la période d'une vague entraînent des variations de vent apparent à cause des fluctuations de vitesse qu'elle impose au voilier (par gravité et par les courants de surface qui la parcourent), des différences d'altitudes entre le sommet et le creux de la vague (cisaillement du vent) et du dévent occasionné par la crête lorsqu'on est dans le creux de la vague. Barrer à la vague consiste à tenir compte de ces différents phénomènes pour conserver de bonnes sensations à la barre, c'est à dire une bonne vitesse compatible au passage de la carène dans la mer. Au portant, barrer à la vague consiste à tenter de profiter du surcroît de vitesse qu'elle offre pour faire surfer le bateau. Il existe un cas de vagues particulier, car très gênant, qui est le clapot. On parle alors de *barrer au clapot*. Le clapot, vagues courtes et fortement cambrées, freine le bateau en heurtant l'étrave et en accentuant le tangage. La technique usuelle du bon barreur est de *mayonnaiser*¹² en privilégiant la vitesse et la puissance au cap pour placer l'étrave où il le souhaite. L'idée est celle de la relance mais sur le temps de passage du phénomène.

3.5.2.6 Barrer en soulageant le bateau

Un mode qui s'apparente un peu à *barrer à la vague* est celui qu'un marin adopte lors d'une navigation par gros temps. La notion de gros temps est extrêmement dépendante de la force du vent, de l'état de la mer, du bateau et des compétences de son équipage¹³. Il s'agit d'un mode de survie qui s'attache à préserver le bateau. On évite de remplir trop les voiles pour perdre en puissance et on évite de présenter les flancs du bateau aux vagues de peur qu'il se couche ou se fasse retourner.

3.5.2.7 Barrer à la vitesse cible

Technique répandue chez les régatiers, *barrer à la vitesse cible* consiste à prendre comme consigne une *vitesse cible* en générale tabulée par l'expérience (cf. la notion de polaire chapitre 2). Extraordinairement efficace du point de vue de la performance, cette technique nécessite des capteurs fiables et correctement étalonnés pour être exploitable.

3.5.2.8 Barrer aux sensations de barre

L'effort subi par le safran est transmis au barreur via la barre. C'est ce qu'on appelle des *sensations de barre*. De cette manière, le voilier peut *parler* au barreur en lui indiquant par exemple qu'il est ardent ou mou. Un barreur apprécie en général d'avoir un bateau légèrement ardent. Quand la barre

¹² Expression due à Hugues Destremau, voir en annexe.

¹³ Lire à ce propos le fascinant ouvrage d'Adlard Coles *Navigation par gros temps* [Coles 90].

sollicite le barreur, ce dernier doit y répondre pour éviter des écarts de route. Inversement dans le petit temps, on cherche à avoir des sensations de barre, puis à les garder. Il s'agit dans la pratique d'un mode éphémère et plus utile aux réglages qu'à la conduite véritable du bateau.

3.5.3 Barrer, un mélange des genres ?

Si on analyse de plus près ces façons de barrer, on s'aperçoit qu'elles sont liées à des informations bien distinctes : variations de vent, vagues, mauvais temps, cap, vitesse ...

Dans la pratique un marin a un but à atteindre (un point géographique). Il détermine donc son cap compas. Si ce cap ne se situe pas dans la zone interdite ou proche du vent arrière il y va directement (en faisant fi de toute considération stratégique), on peut dire qu'il est en mode compas. S'il doit tirer des bords au près par exemple, il sera en mode près ou meilleur VMG et les penons lui seront forts utiles. Ensuite, un bon barreur tiendra compte du passage d'une vague, d'une rafale ... bref tentera de préserver l'équilibre de son bateau et fera attention à sa vitesse.

En première analyse nous dégageons trois grands modes de barre que nous intitulerons *barrer au meilleur VMG*, *barrer au cap* et *survie*, les deux premiers se distinguant par leurs utilisations du cap et intégrant l'utilisation d'une vitesse cible. Un bon barreur gardera en arrière plan ce mode et intègrera instinctivement les *accidents de la route* : vagues et variations de vent.

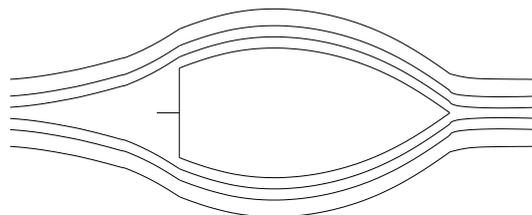
En dehors des modes, il existe des styles de barre différents. L'exemple typique, que nous analyserons plus loin, est celui du barreur qui au près fait du cap par opposition à celui qui privilégie la vitesse.

3.6 Les grands principes

On a vu que gîte et réglage de voiles jouent un grand rôle dans les systèmes mécaniques de pilotage (section 3.3). Nous étudions dans cette section les liens entre barre, carène et voiles qui judicieusement combinés détiennent les secrets de la vitesse. Les grands principes sous-jacents à la bonne marche du voilier sont au nombre de trois : bouger la barre le moins possible, garder la carène dans les lignes pour lesquelles elle a été dessinée et avoir des voiles bien réglées par rapport aux conditions de mer et de vent.

3.6.1 Un coup de barre est un coup de frein

Le premier principe se résume en l'adage « un coup de barre est un coup de frein ». L'écoulement de l'eau autour de la carène d'un voilier en route à cap constant (cf. figure 3.6), donc en ligne droite, est orienté dans le sens de la marche et déformé en son voisinage.



Les écoulements le long de la coque en surface. A l'arrière, le safran qui plonge en profondeur est soumis à un écoulement qui est orienté dans le sens de la marche.

FIG. 3.6: Les écoulements le long de la coque en surface

A l'arrière du bateau il y a convergence des filets d'eau mais le safran qui plonge largement sous la coque est soumis à l'écoulement général dans la direction de la marche qu'il courbe également de

part et d'autre de son profil. Par conséquent si le safran n'est pas dans l'axe du bateau il oppose une surface d'autant plus grande que son angle est important par rapport à l'axe du bateau. Si le bateau est en giration, les écoulements se courbent de la même manière que la trajectoire suivie et le safran peut alors prendre une angulation supérieure. C'est la raison pour laquelle un virement se fait en poussant progressivement la barre pour atteindre un angle parfois très important. Le barreur humain veillera à conserver un écoulement laminaire le long de son safran et l'angulera le moins possible. Dans les cas où on est capable d'établir un équilibre de route, c'est à dire un réglage à la fois de voile et d'assiette pour lequel le bateau *va tout seul*, le barreur laisse le bateau aller où il veut. Plus précisément si la barre sollicite la main du skipper dans un sens comme dans l'autre, le barreur va simplement retenir ou limiter le mouvement naturel de la barre. C'est ce qu'on appelle les sensations de barre, nous verrons plus loin qu'elles sont très importantes pour barrer et qu'elles sont essentiellement la traduction des forces exercées par les filets d'eau sur le safran. L'idée est d'essayer d'avoir un safran neutre c'est-à-dire un bateau équilibré. On dit d'un bon barreur qu'il *barre avec deux doigts*.

Physiquement il existe une corrélation entre sensations de barre et valeurs délivrées par un gyromètre placé au centre de rotation du bateau. Quand le bateau tourne, le safran cherche à s'effacer dans l'écoulement général et donc sollicite le barreur. Cependant, une vague peut également transmettre des efforts sur le safran sans faire tourner le bateau. D'autre part, si le bateau va droit avec un peu d'angle de barre (pour compenser les moments cinétiques des voiles et de la carène) on aura également des sensations de barre. Il existe donc également une corrélation entre sensations de barre et bateau mou, ardent ou équilibré.

Si systématiquement on est obligé de tirer sur la barre pour garder le bateau sur sa route on dira que le bateau est *ardent*, au contraire, si on est obligé de pousser sur la barre (en supposant classiquement que le barreur barre au vent avec une barre franche) on dira que le bateau est *mou*. Comme ces termes le laissent supposer, on préfère, en général, un bateau neutre à légèrement ardent à un bateau mou. Même si un bateau légèrement ardent est théoriquement moins performant qu'un bateau neutre un barreur le préférera ainsi pour des questions de sensations ce qui lui demandera moins de vigilance et donc moins d'efforts. Les sensations de barre sont très variables d'un bateau à l'autre et sont le fruit d'une multitude de paramètres. Sur des bateaux lourds comme le First Class Figaro Bénéteau le safran parle beaucoup bien que les vitesses soient faibles. Sur dériveur, Mumm 30 ou Melges 24, les sensations de barre sont nettes mais la barre reste étonnamment souple. Sur un 60 pieds Open comme SILL et VEOLIA le système à double safrans est tellement équilibré que l'on sent peu de chose, par contre l'indication d'angle de barre sur la console du pilote permet de se faire une idée de l'équilibre du bateau¹⁴.

Il y a cependant des cas extrêmes où la seule porte de secours (en tout cas accessible directement au barreur) est de donner des *coups de barre*. Le cas typique est le départ au lof sous spi, d'une part le bateau se couche faisant sortir le safran de l'eau, d'autre part l'angulation du safran est telle qu'il y a décollement, si bien qu'il décroche et ne répond plus. Pour éviter la sortie de route, on agit par petits coups répétés, d'amplitude assez faible, qui permet de replacer l'étrave du bateau sur sa route et de recoller les écoulements sur la surface du safran. Ces cas extrêmes sont repérables car la barre devient très dure. Un bon coup de barre peut aussi favoriser le départ en surf sur le sommet d'une vague.

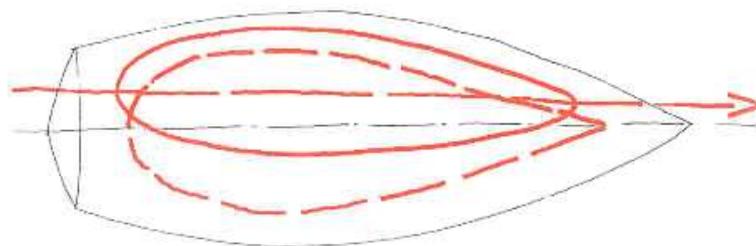
3.6.2 Être dans son assiette

Le deuxième grand principe pour aller vite est d'utiliser l'assiette du bateau dans les limites pour lesquelles elle a été dessinée. L'assiette désigne ici l'attitude du bateau¹⁵. Un dériveur est généralement fait pour marcher à plat ou très légèrement gîté car alors il devient ardent à cause de la déformation de la carène à la gîte (voir figure 3.7).

Toutes les carènes ne supportent pas d'égale façon la gîte car de surcroît le plan antidérive se

¹⁴ Sur les 60 pieds IMOCA à double safrans, relever le safran au vent rend mou le bateau car le poids du safran hors de l'eau entraîne la barre au vent. C'est une sensation très désagréable, bien que le bateau soit bien réglé.

¹⁵ Techniquement l'assiette désigne l'angle que fait la ligne de pont du bateau par rapport à l'horizontale, mais dans le langage courant on parle d'assiette latérale (gîte) ou longitudinale (vraie assiette).



Plus l'axe de la carène gîtée est parallèle à l'axe de la carène non gîtée, moins le bateau sera ardent à la gîte. Provenance du dessin : groupe Finot.

FIG. 3.7: Déformation de la carène à la gîte

trouve moins bien orienté et peut sortir en partie de l'eau. C'est le cas des bateaux larges et plats qui exigent de naviguer avec une faible gîte. Maintenant, vent arrière sur un cat-boat¹⁶ il peut y avoir avantage à être contre-gîté pour gagner en stabilité de route c'est-à-dire pour garder un safran neutre. On peut faire également gîter le bateau pour diminuer sa surface mouillée et gagner en vitesse. On voit que la notion de bonne assiette est très variable d'un bateau à l'autre et c'est justement une des qualités du bon barreur que de naviguer à la juste gîte. On la trouve en s'aidant des sensations, le bateau doit être facile, aller vite, bien passer dans la mer et être vivant à la barre. La bonne assiette longitudinale s'obtient de la même façon mais demande en général de déplacer des poids. Sur un multicoque la gîte est un facteur essentiel de vitesse : elle permet de décoller la coque centrale et de réduire radicalement la surface mouillée. Sur Tornado pour relancer le bateau, une technique initiée par l'australien Mitch Booth, dite « bootherie », consiste à aider le bateau à lever une coque en plaçant momentanément l'équipier sous le vent. Sur un multicoque Orma l'assiette longitudinale peut être réglée en modifiant l'incidence des foils, ceci permet de préserver le bateau d'enfournements dangereux.

3.6.3 Être bien réglé

Le dernier grand principe est d'avoir la toile du temps correctement réglée par rapport à l'allure du bateau. Dans l'optique du développement d'un pilote automatique n'agissant que sur la barre (besoin temps réel du skipper) nous supposons que les voiles sont bien réglées. Ce principe englobe le réglage des mâts, de l'incidence de quille (qui agit sur la gîte), de l'enfoncement des dérives, foils ... En principe on peut diriger un bateau, safran bloqué dans l'axe, uniquement en réglant ses voiles et en contrôlant son assiette. Le cas extrême est celui de la planche à voile ! Même si on ne règle pas le bateau et en particulier les voiles en navigation, un barreur cherchera un maximum de sensations et donc aura tendance à placer son bateau dans l'angle optimal de rendement pour sa voilure par rapport au vent. C'est une façon de constater un mauvais réglage de voile par exemple : pour ce réglage on fait trop de cap ou pas assez, en d'autres termes, l'équilibre de route se situe en dehors du cap souhaité.

3.7 Les informations

Nous avons déjà rencontré quelques informations utilisées par les marins pour barrer : la vitesse, l'assiette, les sensations de barre ou le cap. Nous allons essayer dans cette section d'identifier de manière exhaustive l'ensemble des informations qui contribuent à l'action de barre. L'ensemble de cette section ainsi que la suivante doivent beaucoup aux coureurs dont les propos (pour ceux qui ont pu être enregistrés et retranscrits) figurent en annexe de cette thèse.

Commençons par le système de perceptions dont est doté tout être humain en pleine possession de ses moyens.

¹⁶ Voilier n'ayant qu'une grand'voile et donc pas de foc.

3.7.1 Les signaux visuels

Les signaux visuels ont une grande importance, ils permettent un contrôle permanent des réglages, de la gîte, de l'état de la mer (repérage des vagues mais aussi des risées ou rafales), du ciel (présence de grains, de fronts, de couloirs entre les cumulus dans les alizés ...) et des instruments. Signalons tout de suite qu'ils ne sont pas indispensables dans le sens où il existe de très bons barreaux aveugles. Hugues Destremau a un fonctionnement circulaire « Je regarde ce qui se passe sur le pont, sur la mer, les penons avant, arrière et je recommence ». L'inspection du pont consistant à regarder les instruments et l'équipage. Le penon, cette « faveur » qui permet de visualiser la qualité de l'écoulement le long d'une voile donc de la régler, est un repère visuel important. Cependant sur les bateaux capables de fortes accélérations on peut abattre largement sans toucher aux réglages des voiles et sans faire décrocher les penons. C'est donc une information qu'il ne faut pas prendre seule. Le repère visuel de réglage pour les spinnakers (les gennakers ayant des penons comme les focs) est leurs bords d'attaque ou guindants. Si le tissu se replie c'est qu'on est trop lofé ou pas assez bordé. A la barre, si on bloque le réglage du spi, on cherche cette limite de repliement.

La vue permet également d'observer la girouette et donc d'avoir la direction du vent apparent, information qui peut être fournie par l'électronique du bord et donc lue au final sur un écran. La vue peut fournir des ordres de grandeur de vitesse. Un skipper qui connaît bien son bateau sait à l'observation de son sillage ou de la vague d'étrave s'il va vite ou non. De nuit les effets de phosphorescence de l'eau (en fait de la bioluminescence) conduisent souvent à surestimer sa vitesse. Mieux vaut alors se fier à son speedomètre. De manière générale on peut estimer visuellement la qualité des écoulements autour de la coque : moins il y a de remous, moins l'écoulement est turbulent, meilleur est le passage de la coque dans l'eau et donc meilleure est la vitesse. La vue permet de repérer les vagues et plus particulièrement les vagues accidentelles comme celles engendrées par le sillage d'un bateau ou les déferlantes. Si une houle régulière peut être repérée par l'oreille interne, car de nuit on la ressent parfaitement, par contre, une vague isolée, différente des autres, ne pourra être pleinement négociée que si elle est repérée suffisamment tôt. La voir arriver de loin permet non seulement de connaître sa direction, d'évaluer sa force mais aussi sa nature (sa cambrure, le fait qu'elle déferle ou non). De nuit, c'est beaucoup plus difficile, on s'aide d'autres indices comme de l'assiette du bateau ou du bruit de la vague.

3.7.2 Les signaux auditifs

Passons justement aux signaux auditifs, outre le bruit des vagues que l'on vient d'évoquer, le bruit du vent dans les oreilles donne une idée de sa force mais aussi de sa direction. Lorsqu'on a le même son des deux côtés on regarde dans la direction du vent. Ce n'est pas seulement une question de son mais surtout une question de pression à la fois au niveau des oreilles et au niveau du visage ; il s'agit alors de sensations tactiles que nous analyserons plus loin.

Le faseyement¹⁷ des voiles indique que l'on est trop lofé. Pour un barreur expérimenté c'est un cas de figure très rare, qui survient plutôt de nuit lorsque la fatigue et le sommeil l'emportent. Le faseyement agira alors comme une sonnette d'alarme et réveillera le barreur. Avant le faseyement le bateau se mettra à plat, son cap changera, l'angle au vent aussi, et les penons décrocheront. Le faseyement est donc un signal tardif qui dans le cadre d'un pilote automatique ignorant *a priori* la fatigue peut être délaissé.

Un autre bruit intéressant est celui du sillage quand il n'est pas couvert par le bruit environnant. Dans le petit temps en particulier, le bruit du sillage et plus généralement celui des écoulements le long de la coque donne une bonne indication sur leur qualité. C'est un fait connu que les marins s'éveillent à cause du changement de bruit du passage de la carène dans l'eau. Dans le petit temps, le bruit du sillage donne une bonne idée de la vitesse. Enfin le bruit des bouts¹⁸ qui se tendent, des poulies qui travaillent, bref du matériel qui souffre sont autant d'indicateurs des efforts supportés par

¹⁷ Une voile faseye quand elle bat comme un drapeau dans le vent.

¹⁸ Sur un voilier la seule *corde* est celle de la cloche !

le voilier. Pour autant les signaux auditifs ne semblent pas prépondérants, fait confirmé par l'existence d'excellents barreurs sourds.

3.7.3 Les signaux tactiles

Les signaux tactiles sont émis par le vent sur le visage ou les vibrations du bateau sur les parties du corps en contact avec lui. Une partie des sensations de barre sont tactiles. Il s'agit simplement des vibrations mais pas le fait que la barre sollicite le bras qui est un signal haptique ou tactilo-kinesthésique. Lorsque le vent est évanescent, la peau du visage peut être plus sensible qu'une girouette et un anémomètre. Au près dans ce type de temps, Philippe Legros conseille même de choquer du génois pour voir où est le vent, plutôt que d'agir sur la barre. Les solitaires, dans ce type de temps, apprécient le pilote automatique en mode compas car barrer dans ces conditions exige une concentration élevée. Ils se consacrent aux réglages et modifient la consigne de cap grâce à une télécommande.

Les vibrations que l'on peut ressentir au niveau des parties du corps au contact avec le bateau donnent essentiellement des indications de vitesse. Un safran proprement monté ne vibre pas sauf, éventuellement, au planing. Dans du petit temps par mer plate, on peut également ressentir les écoulements le long du safran sous forme de petites vibrations parce que le flux n'est pas parfaitement laminaire. Mais dès que la vitesse monte ces petites vibrations sont noyées par des sollicitations plus franches. Des vibrations parasites surviennent aussi quand une algue ou autre corps étranger vient se coller sur le safran. Le skipper s'empresse alors d'évacuer ces intrus synonymes de perte de vitesse.

Les vibrations du bateau lui-même donnent peu d'information. Le cas typique étant celui du surf où la quille se met à vibrer et même à *chanter*. Cela indique que la vitesse est élevée. De même, on sent et on entend le bateau ralentir. Ces sensations tactiles sont accentuées sur les bateaux en carbone dont la raideur répercute presque intégralement les moindres vibrations.

3.7.4 Les signaux haptiques

Viennent ensuite les signaux haptiques ou tactilo-kinesthésiques dont font partie les sensations de barre. On a vu que ces dernières sont essentielles car elles permettent au bateau de dialoguer avec le barreur. Si le bateau tourne ou a tendance à tourner, la barre transmettra cette information. Le barreur doit à la fois laisser faire le bateau, pour préserver l'équilibre du système, et amortir le mouvement, pour éviter les écarts de route importants. Si les sollicitations à la barre sont permanents ou trop fréquents et de forte intensité c'est que le bateau n'est pas équilibré donc mal réglé.

Les variations d'attitude du bateau et en particulier la gîte, impose au barreur des changements de position permanents. De manière plus précise, les angles tronc/bras et tronc/cuisses varient. Lorsque le bras agit sur la barre ces segments vont également changer de position les uns par rapport aux autres. Les signaux kinesthésiques permettent de se faire une image de son propre corps et des positions relatives de ses parties. A ce titre ils participent aux sensations de barre car l'idée que l'on se fait de la position de son bras qui tient la barre nous informe sur l'angle qu'elle fait par rapport à l'axe du bateau. On sait ainsi de façon inconsciente quelle est la position du bras qui correspond à une barre dans l'axe. D'autre part ces signaux complètent l'idée que l'on se fait de l'angle de gîte.

3.7.5 Les signaux vestibulaires

Enfin viennent les signaux vestibulaires qui informent le barreur sur l'attitude du bateau, mais également sur les accélérations à la fois angulaires et linéaires. Situés dans l'oreille interne, les capteurs vestibulaires constituent une véritable centrale inertielle doublée d'un inclinomètre (voir [Berthoz 97]). Cependant ils fournissent des informations ambiguës, ils ne peuvent distinguer une accélération dans un sens, d'une décélération dans l'autre sens. Aussi, il faut les doubler d'informations complémentaires, du

type visuel ou kinesthésique, pour lever cette ambiguïté. Nous en venons à une notion très importante qui revient systématiquement dans les propos des coureurs. A la question « qu'est ce qui fait que l'on barre très bien de nuit ? » ces derniers répondent qu'ils barrent à la gîte et, qu'en particulier, si un coussin était placé sous leurs fesses, ils ne pourraient plus barrer. Il s'agit donc typiquement d'informations vestibulaires complétées, confirmées et corrigées par des informations kinesthésiques et on peut affirmer qu'à elles seules elles permettent de barrer (exceptés quelques cas particuliers comme le petit temps).

3.7.6 Les capteurs du bord

Faisons maintenant le tour des principaux instruments dont sont équipés les bateaux de compétition modernes. Focalisons nous sur ceux directement utiles *a priori* au pilotage, c'est à dire que nous excluons des informations telles que la température de l'eau, la pression atmosphérique, l'hygrométrie (informations qui par ailleurs sont essentielles d'un point de vue notamment météorologique donc stratégique) ou encore la bathymétrie. Sur les bateaux de course d'aujourd'hui la totalité des capteurs transmettent leurs données à une centrale qui va les traiter et les transmettre à différents écrans. On peut alors sélectionner les informations que l'on veut visualiser et on dispose de répéteurs à différents endroits (pied de mât, bras sur les trimarans ...) pour garantir leurs accès dans une large gamme de situations.

Les informations les plus couramment affichées sont la vitesse du bateau ou speed (par rapport à la surface), la vitesse du vent réel ou TWS (True Wind Speed) qui est issue d'un calcul, la vitesse du vent apparent ou AWS (Apparent Wind Speed), l'angle du vent apparent (AWA) par rapport à l'axe du bateau, l'angle du vent réel (TWA) et la direction du vent réel (TWD) ou encore le cap compas¹⁹. Ces données sont souvent accompagnées de tendances qui aident aux choix tactiques. Les données fournies par le GPS (débrouillé depuis mai 2000 donc assez précis) peuvent être également exploitées : vitesse du bateau par rapport au fond, cap par rapport au fond (cap géographique), distance à une marque, cap d'une marque, vitesse de rapprochement ... dont on peut déduire la dérive du bateau et le vecteur courant. Sur le GyroGraphic de la société nke apparaît l'angle de barre donnant une idée de l'équilibre du bateau donc de son réglage. Finissons avec les penons disposés sur les voiles d'avant (du foc jusqu'au gennaker) et également sur la grand'voile et qui matérialisent les écoulements.

Les informations fournies par l'électronique sont par nature très bruitées et assez différentes de ce qui est perçu par le barreur car captées en d'autres endroits. Une girouette se trouve généralement en tête de mât, c'est à dire sur certains bateaux à pas loin de 30 m au-dessus de l'eau où le vent est sensiblement différent en direction et en force de celui que le skipper ressent. Ces informations, bien que filtrées, sont à prendre avec précautions comme celles captées par l'homme d'ailleurs. Les progrès réalisés sur les pilotes sont axés aujourd'hui sur l'amélioration des capteurs plutôt que sur le développement de leur intelligence.

3.8 La nécessaire hiérarchisation des données

La multitude des informations et leurs provenances diverses rendent impossible leur traitement simultané par l'homme. Le cerveau va être à l'affût de tout au plus deux ou trois indicateurs qui sont variables en fonction de l'environnement et des stratégies mises en œuvre. Dans le petit temps par exemple, l'attitude du bateau apporte trop peu d'informations pour être prépondérante. Dans une stratégie de relance, l'angle de barre pourra être important ce qui n'est pas le cas en général. Cette hiérarchisation est largement corroborée par les études sur le sommeil des solitaires. Des enregistrements de sommeil ont été effectués à plusieurs reprises en particulier sur la solitaire du Figaro. Au delà d'un certain seuil de fatigue, tout en barrant, les coureurs effectuent des micro-sommeils de quelques secondes leur permettant de récupérer. Tout le monde a entendu un jour ces histoires incroyables où le skipper raconte comment il s'endort en début de surf ne se reveillant qu'au bas de la vague pour

¹⁹ Le bon vieux compas de marine bien qu'obligatoire est trop lent pour être utilisable sur les engins de compétition. Le cap est fourni par un compas fluxgate et de plus en plus par une centrale inertielle.

relancer le bateau et replonger de nouveau dans les bras de Morphée! Les repères habituels comme la speed ou les penons ne servent plus, le cerveau se trouve dans une espèce d'état d'urgence où seules les informations jugées comme critiques vont être filtrées. Cette hiérarchisation est également confirmée par la pratique des marins et nous y consacrons l'intégralité de cette section.

3.8.1 Les informations primaires

Nous allons dans un premier temps dégager les informations qui semblent les plus essentielles, c'est-à-dire celles qui ne nécessitent pas de processus d'inférence particulier mais permettent une adaptation immédiate de l'individu sous la forme d'une action. Pour cela nous allons tout d'abord analyser ce qui réveille le barreur lors d'un micro-sommeil comme nous venons de l'évoquer, puis utiliser le travail de Mathieu Simonnet [Simonnet 02] sur la voile et la cécité et enfin confronter le tout aux pratiques des coureurs.

3.8.1.1 Ce qui réveille le barreur

Intéressons-nous à ce qui sort le barreur de son micro-sommeil. On peut estimer que plus la fatigue est prononcée, plus les seuils de tolérance sont repoussés, la limite étant atteinte lorsque le barreur s'écroule littéralement avec le bateau *en vrac*, voiles faseyantes et alarmes beuglantes. La première sollicitation lors d'un micro-sommeil est la barre qui se met à entraîner la main et le bras d'une manière plus ferme que la moyenne. C'est donc une sensation de barre et c'est un peu ce qui se passe lorsqu'on secoue quelqu'un pour le réveiller. Cette sollicitation va souvent de paire avec un changement d'attitude du bateau qui, s'il se prolonge, mène à des angles inhabituels provoquant le réveil. Le barreur émerge car il a un sentiment de chute. Il s'agit donc d'un réflexe qui vise à la préservation physique plus qu'à la bonne conduite du bateau. On atteint le degré le plus extrême de fatigue lorsque c'est le faseyement qui agit comme une alarme sonore (et tactile par répercussion des chocs dans toute la structure) car, normalement, la barre et l'assiette du bateau interviennent en amont. A ce stade là le bateau est déjà sorti de sa route et les conséquences matérielles peuvent être irréversibles.

3.8.1.2 Le cas des barreurs aveugles

Dans la mesure où il existe d'excellents barreurs aveugles, on peut estimer que les informations qu'ils utilisent, moins nombreuses par nécessité, sont les plus importantes d'autant qu'il s'agit des mêmes que pour les micro-sommeils. Dans son étude sur la voile et la cécité [Simonnet 02], Mathieu Simonnet propose une hiérarchisation des signaux utilisés. Pour lui les signaux auditifs sont les principaux repères utilisés dans le petit temps, par contre, dès que le vent dépasse 15 noeuds « ceux-ci ne semblent plus du tout utilisés ». Précisons que, comme le barreur est aveugle, les signaux auditifs sont en premier lieu le faseyement des voiles (très tardif) et le bruit du sillage qui donne une idée de la vitesse. Ensuite viennent les signaux vestibulaires et kinesthésiques associés essentiellement à la gîte et au roulis et dans une moindre mesure à l'assiette et au tangage, puis les sensations de barre et enfin, pour une part infime, les informations tactiles et kinesthésiques (donnant la position du bras qui tient la barre). Un barreur voyant dispose de toute une panoplie d'informations en amont du faseyement : penons, speed, TWA ... De même, de nuit, un bon barreur ne fera pas faseyer ses voiles. On peut donc supposer, comme on l'a déjà dit, que les signaux auditifs n'ont que peu d'importance. Il nous reste donc la gîte, le roulis et les sensations de barre.

3.8.1.3 L'avis des coureurs

Confrontons maintenant nos conclusions aux pratiques des marins. Les coureurs citent la gîte et les sensations de barre comme étant des informations primordiales. Philippe Legros dit « La gîte est une très très grosse information. On peut barrer les yeux fermés, on barre à gîte constante ».

Bertrand Chéret dans [Chéret 00] écrit « La sensation de la juste gîte est une des qualités du bon barreur de brise » et « Les dériveurs légers sont une bonne école de barre, dans la mesure où ils amènent à conjuguer une puissance vélique indispensable pour passer la vague avec une maîtrise de la gîte ». Pour Gildas Morvan les variations de gîte (roulis) permettent même d'anticiper car c'est une information qui vient souvent avant les instruments qui ont un peu d'inertie. A la question « Qu'est ce qui te permet d'anticiper ? », Philippe Legros répond sans hésiter « c'est l'assiette ». Le tangage et l'assiette longitudinale informe du passage d'une vague et donne une aide précieuse pour la négocier. Ce sont deux éléments importants lorsqu'on cherche à surfer ou à relancer le bateau car ils permettent de se situer par rapport à la vague. Au près, un tangage important sera l'indicateur de la présence d'un clapot et incitera à abattre pour passer en puissance plutôt que de subir. Maintenant, sur un multicoque de 60 pieds la gîte varie peu, cependant on sent bien le bateau prendre des *appuis*. On sent bien les accélérations dans l'axe du bateau à la fois au niveau des fesses et au niveau vestibulaire. De manière générale les accélérations permettent d'anticiper au même titre que les vitesses angulaires (roulis, tangage, lacet). On a vu que lacet et sensations de barre sont liés. Ces dernières servent beaucoup au réglage du bateau vers la quête d'un équilibre de route. Regardons comment Philippe Legros les utilise avant le départ d'une régates en Melges 24 « on règle le bateau, on pose le stick sur le caisson, on lache la barre et on borde notre grand'voile jusqu'à ce que notre bateau aille droit ». Pour Hugues Destremau c'est un repère essentiel, pour bien barrer il faut passer par un bateau bien réglé et ceci va de paire avec une barre neutre ou légèrement ferme, c'est-à-dire un bateau légèrement ardent. Pour autant, il faut bien comprendre que décider d'une action de barre dépend de plusieurs facteurs simultanément et qu'en prendre un séparément peut mener à une grave erreur. Un safran qui parle peut amener à se retrouver au largue avec la même sensation de barre qu'au près. C'est quelque chose d'assez fréquent dans le petit temps. D'autre part la barre peut être tellement neutre ou la vitesse tellement faible que l'information devient inexploitable. On est alors simplement obligé de veiller à ne pas trop l'angler.

Gîte, assiette longitudinale, vitesses angulaires, accélérations et sensations de barre sont des informations primordiales. Cependant pour barrer dans toutes les conditions et sur tout support (monocoque ou multicoque) d'autres informations sont nécessaires, c'est l'objet de la sous-section suivante.

3.8.2 Les informations complémentaires

Dans le tout petit temps, sur un monocoque, la force de poussée vélique étant trop faible, le bateau ne peut gîter. Les voiles pendent alors lamentablement, sans forme. Pour obtenir des profils aérodynamiques on va faire gîter le bateau en déplaçant les poids, matériel et équipage dont le barreur lui-même, sous le vent. Le seul poids des tissus va donner aux profils leur bonne concavité. Cette gîte forcée aura un autre avantage : la déformation de carène va rendre le bateau légèrement ardent et donc procurer un peu de sensations de barre. Les vitesses restant faibles, ces sensations sont très ténues, mais réelles. Comment barre-t-on dans ces conditions alors que la gîte ne varie pas ? On veille à donner peu de barre, à garder de la vitesse et pour cela à bien suivre le vent qui, dans ce type de conditions, est souvent irrégulier. On voit donc que l'absence de certaines informations, de facto, impose d'en exploiter d'autres. La gîte et les sensations de barre reprendront leur prééminence dès que les conditions le permettront, c'est-à-dire dès que le vent sera suffisamment fort. De toutes manières nous verrons que la speed ou la direction du vent sont des auxiliaires précieux pour bien barrer.

3.8.2.1 Différence culturelle

Quand on interroge les coureurs sur les informations qu'ils utilisent pour barrer on tombe sur une différence à la fois de culture et de génération. En effet, un certain nombre de coureurs sont issus de l'olympisme, c'est le cas par exemple de Jean-Yves Le Déroff qui sur Tornado ne pouvait utiliser qu'une girouette, en fait un simple penon fixé sur la martingale à l'avant du bateau, un compas de régates et les penons. Pour lui il n'est pas nécessaire de connaître sa vitesse pour barrer et encore moins celle du vent. Cependant ceci est modéré par le fait qu'il s'agit toujours de régates en flotte et en monotypie. Certes on n'a pas sa vitesse, mais on peut à tout instant la comparer à celle d'autres bateaux ce qui revient au même : on a un étalon, un référentiel. Ces coureurs ont la même approche

que ceux qui naviguent à l'ancienne. Ces derniers continuent de se passer de girouette/anémomètre et utilisent encore le bon vieux compas de cloison. Sur les bateaux dépourvus d'électronique, les skippers ne barrent qu'aux sensations de barre, à la gîte et aux penons tout en gardant un œil sur le compas pour confirmer ou non une bascule. Dans les entretiens avec les coureurs, on retrouve cette différence de formation dans le sens donné au vocabulaire utilisé. Ainsi, pour un skipper disposant d'électronique et l'utilisant beaucoup pour barrer, c'est le cas notamment des figaristes, le vent réel sera celui fourni par les instruments alors que pour les autres il s'agira du vent perçu à l'arrêt qui est l'acceptation correcte du terme. Les instruments peuvent ainsi donner l'impression que le vent réel varie alors qu'il s'agira en fait d'un problème de précision et de retard, la vitesse et le cap du bateau intervenant dans le calcul. De manière générale, pour toute une catégorie de coureurs, les informations fournies par les instruments sont considérées comme vraies, ou suffisamment exactes pour être prises comme référence. D'autre part, les coureurs sont unanimes sur ce point, sur les bateaux de compétition de 60 pieds (multi ou mono) les instruments sont incontournables et même vitaux. Ces différences d'approche entre coureurs mettent en relief le problème de la gestion des informations disponibles à bord d'un voilier.

3.8.2.2 Vent apparent et vent réel

Pour Jean-Yves Le Déroff, en Tornado, l'important c'est les penons et la girouette qui donne la direction du vent apparent. Pour lui « il y a un angle à respecter pour que le bateau aille vite. Et ceci à toutes les allures ». De toutes façons, sur ce type de support, ce sont les seules informations disponibles avec le compas. Le Tornado, bateau très rapide, garde un vent apparent très pointu, même aux allures de largue voire de grand-largue, si bien que girouette et penons ne sont pas des indicateurs suffisants. Le compas et les autres concurrents permettent en permanence de maintenir son bateau sur une bonne trajectoire. En Figaro II, le mode vent apparent du pilote n'est utilisé qu'au près [Ponceau 06], car sur un bateau lourd il permet un bon suivi de vent. Cependant, plus le vent monte plus le mode vent réel est utilisé. En multicoque de 60 pieds le mode vent apparent n'est jamais utilisé car il peut s'avérer très dangereux au point de risquer de *mettre la cabane sur le toit*. Le mode vent apparent n'est globalement pas adapté aux bateaux légers et toilés et c'est d'ailleurs le même problème rencontré avec les régulateurs d'allures. Même sur les Figaro II, bateaux relativement lourds, le mode vent apparent n'est pas utilisé au portant car les trajectoires deviennent alors trop sinueuses. De manière générale, en Figaro, plus le vent monte, plus le mode vent réel est utilisé près du vent ([Ponceau 06]). Le vent réel est donc une information bien plus sûre que le vent apparent. Regardons maintenant la pratique des navigateurs à l'ancienne. Au près ils barrent aux penons, au portant en observant le guindant de spi, en jetant de temps en temps un coup d'œil à la girouette et au compas en cas de doute.

3.8.2.3 Vitesse cible

Un indicateur très important pour la performance est la vitesse du bateau en comparaison avec la *vitesse cible* donnée par les polaires.

Pour les coureurs bien équipés en électronique la notion de vitesse cible est centrale. Pour Philippe Legros, spécialiste du match race et occasionnellement barreur sur le 60 pieds open SILL et VEOLIA, s'il fallait hiérarchiser les informations instruments, il placerait d'abord la speed, la force du vent réel ou TWS et enfin sa direction ou TWA : « Au près on barre pas mal à la vitesse cible. On fait de l'escalier, on atteint la vitesse cible, on Cape tout doucement de deux ou trois degrés, on voit que la vitesse tombe, on relance, on essaye de réduire au minimum l'écart autour de la vitesse cible ». Speed, TWA et TWS sont justement les informations présentes dans une polaire de vitesse usuelle. Lors d'une sortie sur le trimaran Géant, les répéteurs sur les bras donnaient l'angle du vent réel, la vitesse du bateau et le cap, dans le cockpit était affiché entre autres la vitesse du vent réel.

Sans avoir de polaires, beaucoup de marins se réfèrent aux sensations et aux concurrents pour estimer cette vitesse cible et *barrer à la vitesse*, c'est-à-dire relancer quand le bateau ralentit et faire du gain dans le cas contraire.

3.8.2.4 Les penons

Les penons servent surtout de jour car de nuit, malgré des projecteurs de pont, ils sont plus difficilement distinguables. D'autre part ils peuvent être collés à la toile par les embruns ou la pluie, enfin les conditions peuvent être telles que le coureur, continuellement aspergé, ne peut même plus regarder vers l'avant. Les penons restent utiles pour les réglages surtout aux allures intermédiaires comme le reaching. En monocoque, Philippe Legros insiste « les penons c'est plus une info que tu prends au départ. Tu te régles avant la régata ». A la question de savoir si ce sont les penons qui vont l'empêcher de trop caper, il répond : « Ce qui te feras ne pas décrocher si tu es déjà à ta vitesse cible c'est la gîte en fait. Dès que tu as lofé un petit peu trop ton bateau tu vas le sentir venir sur toi ». Dans la pratique les penons demeurent un indicateur fin des variations du vent apparent en direction, ils permettent un suivi du vent presque en instantané ce qui peut s'avérer pénalisant lorsque le vent réel varie en force plutôt qu'en direction comme on le verra plus loin. Ils sont plus parlant visuellement que l'angle du vent apparent ou réel affiché sur un répétiteur ou qu'une girouette en tête de mât.

3.8.3 Les informations : hiérarchie et utilité

Le tableau de la figure 3.8 présente de manière synthétique les trois groupes d'informations par ordre d'importance décroissante et leurs utilités respectives.

INFORMATIONS	UTILISATION
Gîte, Roulis Assiette, Tangage Lacet Accélération Sensations de barre	Equilibre, Anticipation de variation de cap Négociation de vagues Anticipation de variation de cap Anticipation, Relance Equilibre, Alerte aulofée/abattée
Vitesse cible TWA TWS	Performance
Penons ou/et AWA Cap	Réglages voiles Consigne d'arrière plan

Les informations sont classées en trois groupes, du plus important en haut au moins important en bas.

FIG. 3.8: Hiérarchisation des données et leur utilité

Les informations utiles au barreur forment donc trois groupes d'importances distinctes. Les informations du groupe le plus important sont celles que l'on ressent alors que les autres sont des informations que l'on va chercher. Les premières sont en permanence ressenties et entraînent des réflexes donc des réactions presque instantanées et les autres sont lues puis interprétées donc s'inscrivent dans un processus d'autant plus lent que le groupe est moins important.

Les informations du premier groupe portent sur la préservation de l'équilibre physique et l'anticipation. Les informations du deuxième groupe s'inquiètent de performance et celles du dernier groupe de réglage et de but final (le cap).

La gîte en statique, les sensations de barre et les penons servent essentiellement au réglage du bateau. On voit que les trois grands principes de barre, d'assiette et de réglage sont bien couverts par ces informations.

3.9 La technique de barre

Après avoir analysé et hiérarchisé les informations importantes pour le barreur, nous nous penchons sur la technique de barre en elle-même, c'est-à-dire sur ce que fait le barreur dans telles ou telles conditions. Nous décomposons l'approche en deux étapes : dans un premier temps nous considérons

des conditions stables (mer plate et vent constant en force et en direction), dans un deuxième temps, nous faisons intervenir vagues et variations de vent.

3.9.1 Les grands équilibres

Faisons, dans cette partie, l'hypothèse d'un vent stable à la fois en force et en direction et d'une mer calme, c'est-à-dire jeune et sans phénomène de type vent contre courant ou hauts fonds.

Nous allons étudier la manière de mener un bateau allure par allure (se référer au chapitre 2 pour ce qui est des allures).

3.9.1.1 Le près serré

Commençons par le près serré. C'est une allure où les écoulements le long des voiles sont laminaires mais où, par contre, la composante hydrodynamique de dérive est importante. Le leitmotiv au près est *cap et vitesse* qu'il vaut mieux décliner en *vitesse et cap* tant la vitesse va permettre au plan antidérive de jouer son rôle. Une fois la vitesse acquise, on peut commencer à caper progressivement. Dans les conditions très stables supposées ici, une fois le bateau lancé et les voiles réglées, on peut espérer obtenir une certaine stabilité de route et d'assiette et donc un angle de barre relativement constant.

Supposons de plus qu'il y ait assez de vent afin que le barreur ait de bonnes sensations. Si on abat légèrement, on augmente le braquage des voiles et la force vélique. La gîte va s'accroître et le voilier va accélérer. Un monocoque en gîtant devient naturellement ardent (sensations de barre) par déformation de carène et va de lui-même lofer, c'est-à-dire gagner au vent. Le barreur, lui, accompagne ce mouvement en évitant qu'il soit trop rapide ou trop ample. Si on lofe, le phénomène inverse survient : la gîte diminue et la vitesse décroît.

Par conséquent, dans ces conditions stables, si la gîte augmente, que le bateau devient ardent, que le TWA augmente, que les penons sous le vent décrochent ou que la vitesse cible augmente il faut lofer. Lofer ne veut pas nécessairement dire pousser la barre (dans le cas classique où le barreur se situe au vent) car le bateau aura tendance à le faire de lui-même et les informations de lacet, roulis et sensations de barre donnent de précieuses indications de ce point de vue.

Techniquement au près, on cherche en général à faire décrocher les penons au vent, sans perdre de vitesse. Généralement, comme on l'a déjà indiqué, on sentira le bateau venir sur soi, c'est-à-dire la gîte diminuer, avant que la vitesse ne baisse.

Pour obtenir le meilleur VMG le bon repère est la vitesse cible et non le VMG lui-même²⁰. En effet, avec l'inertie du bateau, il est facile d'obtenir temporairement un VMG élevé en lofant largement au-dessus de la route. La sanction est bien connue, le VMG se met ensuite à chuter brusquement et seule une large relance permettra de récupérer la vitesse cible. Au près barrer à la vitesse cible consiste alors à abatre lorsque la vitesse baisse (on relance), et à lofer lorsqu'on est au-dessus (on fait du gain).

Dans le petit temps où les sensations de barre et les variations d'attitude vont disparaître et où même les penons peuvent avoir du mal à flotter, TWA et vitesse cible vont prendre alors toute leur importance pour suppléer aux sensations. Dans ces conditions la polaire indique en général un cap cible beaucoup plus bas ce qui est conforme au fait que l'on cherche à privilégier la vitesse au cap. Comme on suppose le vent stable, le cap sera également un excellent repère une fois la vitesse acquise. Dans ce type de temps il faut veiller à peu anguler le safran pour éviter de faire décrocher le peu d'écoulement si chèrement acquis autour du safran (contrairement à ce que ferait une régulation dont la consigne est inversement proportionnelle à la vitesse). La vitesse, en renforçant le vent apparent, crée la vitesse, il s'agit de la préserver.

Le mode survie au près consiste à effacer le plan de voilure dans le vent, c'est-à-dire à naviguer plutôt au-dessus du meilleur près pour moins remplir les voiles et éviter au bateau de se coucher. On

²⁰ Il est possible d'afficher sur les répéteurs des pourcentages de performance. On peut savoir ainsi si on est à 100% de la vitesse cible ou non.

est donc attentif au TWA ou au AWA et encore plus aux variations de gîte (roulis), au lacet, au roulis et aux sensations de barre. Le cap et la vitesse passent à l'arrière plan, l'objectif étant de préserver le bateau !

3.9.1.2 Le reaching

Passons maintenant au débridé ou au reaching. C'est une allure où les voiles sont pleines, les écoulements laminaires, les vitesses élevées et, par conséquent, la dérive moindre. Les penons à la fois au vent et sous le vent sont bien tendus. C'est une allure où l'on peut faire d'assez grands écarts de route sans nécessairement s'en rendre compte et les vitesses cibles étant faciles à atteindre, le cap prend une importance accrue. Le mode compas sur les pilotes automatiques est d'ailleurs privilégié à ces allures par les compétiteurs. Le reaching reste une allure proche de celle du près d'un point de vue physique bien que moins fine techniquement car la voilure donne alors toute sa puissance. A ce titre on admettra plus d'angle de barre, donc un bateau beaucoup plus ardent. Maintenant, si on abat, le braquage des voiles augmente, la gîte s'accroît, etc. On a donc le même comportement qu'au près. On travaille sur la vitesse comme dans le cas du près : on abat si elle passe en-dessous de la vitesse cible et on lofe sinon.

Le mode survie devient délicat au reaching car il n'y a pas de porte de sortie sauf à accepter d'importants écarts de route pour remonter au près. Si le bateau devient extrêmement ardent et la barre trop dure, la solution passe par la réduction de voilure ou en choquant largement la grand'voile pour quelle ne porte plus mais pas par une tenue de barre particulière.

3.9.1.3 Le largue

Le largue ou vent de travers conduit à de nombreuses configurations de toiles en fonction des bateaux, de la force du vent et de l'AWA. On peut être ainsi aussi bien sous foc, que sous gennaker, spi asymétrique ou symétrique. De manière assez générale, c'est dans ces allures que les meilleures vitesses sont atteintes car l'écoulement est encore laminaire, la force vélique est bien orientée vers l'avant et grand'voile et voile d'avant n'interfèrent presque pas. On peut donc encore barrer aux penons. Les vitesses cibles varient peu dans ce secteur de vent, par contre les variations d'incidences du vent apparent sont très marquées. Le suivi du vent va donc réclamer des variations de route de grandes amplitudes et, en équipage, le suivi aux écoutes sera un élément capital de performance. Par vent un peu mou, les variations de gîte peuvent être difficiles à interpréter. La gîte diminue-t-elle parce qu'on a trop lofé et que les voiles portent moins, ou parce qu'on a trop abattu et que l'écoulement devient turbulent ?

Le largue en tant qu'allure médiane entre le près et le portant va offrir les deux types de comportement. Si on navigue au largue serré abattre aura tendance à faire gîter le bateau alors que proche du grand largue l'effet sera inverse. Ceci sera accentué par le choix de la voile d'avant : sous spi ou gennaker si la gîte devient critique il ne faut surtout pas lofer mais abattre pour calmer le jeu, sous foc il vaudra mieux lofer.

C'est une allure où il devient intéressant d'aller droit, donc d'être attentif au cap.

Le largue n'est pas une allure de survie car la poussée vélique est maximale et les vagues souvent dans le sens du vent (par vent fort il y en a toujours un peu) risquent de coucher le bateau.

3.9.1.4 Le grand largue

Vient ensuite l'allure de grand-largue où les écoulements deviennent turbulents. Sous spinnaker le repère visuel n'est plus le penon mais le bord d'attaque de la voile. Si ce dernier se replie on abat, sinon on lofe jusqu'à ce qu'il faseye. En solitaire, on aura tendance à régler le spi pour le cap souhaité puis à rester à jouer avec le guindant (bord d'attaque) du spi en jetant de temps en temps un coup d'oeil sur le cap. Si la trajectoire dévie de la consigne, on règle le spi en conséquence. A cette allure

si on abat la gîte va diminuer et la vitesse baisser. Au contraire, si on lofe la gîte augmentera et la vitesse aussi. La notion de vitesse cible reste donc valide, la relance se faisant en lofant et le gain en abattant contrairement au près. Au portant, avoir une bonne girouette est appréciable car on manque souvent de repère surtout si on a la possibilité de surfer. C'est une allure où il est facile d'aller droit et le cap devient un critère important. Une notion importante au grand-largue est celle de VMG qui rend cette allure véritablement symétrique à celle du près. Si la polaire est connue, on peut déterminer facilement le cap et la vitesse cible pour le meilleur VMG.

En cas de survie, le grand largue offre une certaine sécurité car on va vite, donc on a un vent apparent plus faible, et on accompagne les vagues, donc le bateau fatigue moins. Généralement, on barre en faisant bien attention de prendre les vagues sur le trois quart arrière ou l'arrière du bateau et les départs en surf peuvent intervenir fréquemment. Il est courant alors d'abattre en grand jusqu'au plein vent arrière pour maintenir le bateau bien à plat. Les sorties de route peuvent s'avérer violentes à cause de possibles empannages.

3.9.1.5 Le vent arrière

Finissons avec le vent arrière, allure assez inconfortable et généralement lente. Le bord d'attaque du spi est un bon repère mais peut décrocher assez tard d'autant plus que sur certains gréements il est parfois impossible de brasser à l'équerre. Les meilleurs repères restent, si les conditions le permettent, la gîte et la girouette (ou l'AWA ou le TWA). Le bateau doit rester plat et la girouette du bon côté. Si le bateau gîte on abat, si il contre-gîte on lofe.

3.9.2 Les principes fins ou les accidents

Les grands principes liés à l'action de barre étant vus, pavons d'embûches la route de notre voilier : vagues et variations de vent. Bien que les deux interviennent souvent simultanément, le barreur parviendra à distinguer l'action de l'un de l'action de l'autre. Aussi, nous commencerons par analyser l'effet d'une vague isolée ou d'un système de vagues pour nous pencher ensuite sur le vent et ses variations en force et en direction.

3.9.2.1 Un petit phénomène d'inertie

Souvent lorsqu'on cherche à contrer une gîte croissante, l'action à la barre commence par l'accroître. D'une part, la gîte augmentait et continue encore à le faire par inertie, d'autre part il y a comme un seuil critique à passer au-delà duquel la tendance va brutalement s'inverser. Ce petit phénomène n'a pas d'incidence particulière sur l'action de barre puisqu'il va dans le sens du prolongement de la même action.

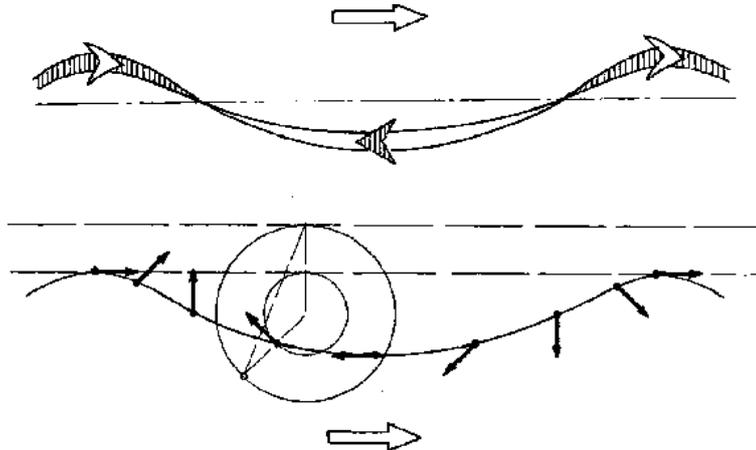
3.9.2.2 Les vagues

Restons sur un vent stable en force et en direction et générons des vagues sur notre plan d'eau. Evidemment il existe plein de types de vagues de la simple ride sur l'eau jusqu'à la déferlante en passant par le clapot. Pour un marin une vague isolée se caractérise par sa direction, sa hauteur et sa cambrure (plus la cambrure est forte plus la vague casse et est agressive). Une vague est rarement seule mais se déplace le plus souvent en groupe, cependant les bateaux génèrent des vagues isolées avec leurs sillages.

La vague isolée

Regardons comment un bateau réagit physiquement au passage d'une vague. La vague, en déplaçant une masse d'eau, modifie le centre de carène du voilier. Le point d'application de la poussée d'Archimède va donc se déplacer en même temps que la vague entraînant des variations d'attitude. Le mouvement des particules d'eau n'est pas homogène dans une vague, il est même opposé entre la

crête et le creux (voir la figure 3.9). Une vague va donc agir sur la trajectoire du bateau et modifier temporairement son vent apparent.



Le tracé de la houle trochoïdale ou houle de Gertner est obtenu par le parcours d'un point d'un cercle de diamètre la hauteur de houle solidaire d'un cercle ayant la longueur d'onde de la houle pour circonférence. Ce dernier roulant sous une droite parallèle au déplacement. Les particules d'eau de surface sont censées décrire des mouvements circulaires de diamètre celui du plus petit cercle.

FIG. 3.9: Mouvements des particules d'eau dans une vague. Figure tirée de [Gutelle 01]

La négociation d'une vague dépend de sa direction par rapport à celle du bateau, du fait qu'il la rattrape ou non et également de sa cambrure.

Si la vague vient de face, l'étrave va d'abord monter jusqu'au passage de la crête à l'aplomb du centre de gravité du bateau, puis, va basculer de l'autre côté de la vague. En fonction de la cambrure de la vague, de sa hauteur et de sa vitesse, le voilier peut planter dans la vague (avant le passage de la crête) et presque s'arrêter, il peut aussi tomber brutalement de l'autre côté de la vague (pilonnement). Dans tous les cas une vague de face entraîne du tangage qui est un élément négatif à la vitesse. La plupart du temps les vagues de face surviennent à l'allure du près. Un bon barreur travaillera la vague en lofant sur sa montée et en abattant derrière la crête. Ceci permet à la fois de suivre les fluctuations du vent apparent (qui adonne sur la montée et refuse après la crête), de ralentir et d'éviter de se présenter face à la lame avec le risque de la percuter ou de retomber brutalement derrière. Si, malgré tout, le bateau est ralenti, le barreur le relancera. Les autres allures que le près facilitent la négociation des vagues. La navigation se faisant en puissance, le bateau est moins sensible à leur passage. Le barreur cherchera simplement à éviter d'aborder frontalement les crêtes si elles sont trop agressives.

Si la vague arrive par le trois quarts avant et au vent, en plus du tangage, le bateau subit un coup de roulis en commençant par gîter. Il y a un petit effet dit de *marsouinage* car l'étrave du bateau est alors légèrement déportée par la vague, effet qui sera compensé par le coup de gîte en termes de trajectoire. A la barre on suivra tout simplement les mouvements naturels du bateau.

Si la vague est travers au bateau il n'y aura pas de tangage mais un coup de roulis. Le barreur aura tendance à compenser les mouvements du bateau dûs en grande partie aux déformations de carène. Une vague très cambrée risquera même de coucher le bateau, c'est la raison pour laquelle il est pénible de barrer travers aux vagues. Dans le petit temps, les voiles peuvent se retrouver à contre c'est-à-dire gonflées dans le mauvais sens et le bateau contre-gîter, il ne faut pas alors chercher à compenser en abattant mais plutôt attendre que la vague passe.

Les vagues venant de trois-quart arrière et au vent chassent sous le vent la hanche du bateau et accentuent l'effet du coup de gîte qu'elles entraînent. Le barreur doit réagir sans tarder en abattant dans la vague pour éviter les sorties de route. Au portant, ces vagues offrent l'opportunité de surfer, technique analysée plus loin.

Une vague venant de l'arrière transmet une partie de son énergie au voilier et n'influence pas son cap. C'est le cas idéal, parfois nécessaire dans le gros temps dans le but de préserver l'intégrité du navire, qu'on appelle alors la *fuite*.

Les vagues qui arrivent sous le vent sont plus rares car la plupart proviennent de l'action du vent sur la surface de l'eau. Le cas peut cependant survenir, par exemple après le passage d'un front ou lorsqu'il s'agit de phénomènes résiduels comme la houle. Cette situation inhabituelle rend pénible le travail du barreur car anti-intuitif. Une vague de trois-quart avant risque de trop faire lofer le bateau et le barreur peut être amené à légèrement abattre avant la crête pour passer en puissance tout en risquant de l'aborder de face. La problématique inverse survient dans le cas d'une vague au trois-quart arrière où il faudra éviter de trop abattre. Quant à une vague de travers mieux vaut la laisser passer sans agir sur la trajectoire.

Globalement donc, la négociation d'une vague consiste à éviter de l'affronter de face, à suivre les variations de vent apparent (on lofe dans la montée, on abat dans la descente) et à compenser les changements d'attitude du bateau excepté lorsqu'elle survient par le travers.

Négocier un système de vagues régulier et bien organisé revient à négocier chacune isolément. Cependant, il existe trois types de mer particuliers où la technique de barre peut s'avérer spécifique : le clapot, la houle et les déferlantes.

Le clapot

Le clapot se caractérise par une mer courte et cambrée qui localement peut sembler désordonnée avec des crêtes de directions différentes car le clapot naît de la rencontre de phénomènes opposés (vent contre courant, courant contre courant, remontée des fonds contre vent ...). Dans ces conditions le gréement est agité de mouvements désordonnés. Le vent apparent varie beaucoup, d'autant plus que le vent réel est faible. Il est alors difficile de conserver un écoulement laminaire le long des voiles et la vitesse chute. Au près, la priorité ne sera donc pas le cap mais la vitesse. Le barreur doit donc abattre pour passer en force. Les vagues ont tendance à *descendre*²¹ le bateau et la vitesse trop faible à mal faire travailler le plan antidérive. Dans ces conditions, pour aller bien, il faut aider le bateau à se faufiler dans les vagues. Cela demande un bon toucher de barre, et de voir les vagues pour pouvoir les anticiper.

La houle

La houle se caractérise par une forte amplitude liée à une période longue et ... par sa propension à donner le mal de mer. Les courants de surface y sont importants et, par conséquent, les variations de vent apparent aussi. Lorsqu'elle vient à la rencontre du bateau, ce dernier est ralenti lors de sa montée et son vent apparent va adonner. Une bonne technique consiste à lofer jusqu'au sommet de la vague pour relancer le bateau en abattant après celle-ci tout en profitant au début du courant favorable. Il est généralement bon d'être déjà légèrement en contre-gîte au sommet de la vague. Cette dernière, en poussant une masse d'air devant elle, renforce le vent réel et accentue l'adonnante. La houle peut entraîner un phénomène de roulis rythmique, balançant le voilier d'un bord sur l'autre. Relancer le bateau en s'écartant largement de la route permet de mettre temporairement un terme à ce problème.

La houle, phénomène résiduel, est rarement dans le sens du vent. Si la houle est travers au bateau et attaque son côté au vent, celui-ci va recevoir un surplus de vent et prendre un coup de gîte avant de basculer dans l'autre sens au passage de la crête. On pourra donc lofer en amont du sommet pour abattre ensuite. Si la houle arrive sous le vent du bateau, elle aura tendance à le faire contre-gîter et à faire refuser le vent dans sa phase ascendante. Il faudra donc abattre avant le sommet pour lofer ensuite. Si enfin la houle vient de l'arrière, on peut en profiter pour lofer en la descendant si on doit gagner en cap.

Négocier une houle revient donc à négocier chacune des vagues isolément tout en pouvant anticiper car le phénomène est très régulier. Excepté dans le petit temps, suivre le vent réel c'est-à-dire le TWA mène à de bonnes trajectoires et il sera même profitable d'amplifier quelque peu les lacets.

La mer en colère : les déferlantes

Par mauvais temps il arrive que la mer déferle à cause de la remontée des fonds ou de la présence d'un courant. Le marin demeure souvent démuni face à la violence des forces engendrées, il ne lui reste plus qu'à préserver son esquif en partant en fuite, c'est-à-dire dans le sens du vent et de la mer. La technique de barre s'apparente à celle du surf en veillant à présenter la poupe bien dans l'axe des vagues pour éviter de se faire rouler. Quand la vague happe le bateau, celui-ci semble littéralement tomber et la mousse du déferlement remplit si bien le cockpit que le barreur n'y voit plus rien. Le

²¹ Faire perdre en cap.

contrôle se fait alors sur la gîte pour essayer de garder le bateau plat. Le tangage renseigne sur la position par rapport à la vague. Un des risques de ce type de mer est de sancir, c'est-à-dire faire chavirer le bateau par l'avant en rattrapant la vague de devant. Il faut alors ralentir le bateau en filant des cordages à l'arrière.

3.9.2.3 Le vent et ses variations

Après avoir analysé l'effet des vagues sur la route du bateau, regardons maintenant celui du vent et de ses variations.

Le vent forcé

Supposons que le vent forçisse tout en ne changeant pas de direction. La conséquence immédiate, due en partie à l'inertie du bateau, est un vent apparent adonnant. Une autre conséquence est une accentuation de la gîte excepté aux allures proches du vent arrière. Au près, le barreur en profitera pour gagner au vent et éventuellement soulager le bateau en lofant pour *essuyer* la survente. Aux autres allures il faudra modifier les réglages si on souhaite conserver le même cap.

Le vent mollit

Si le vent mollit, le bateau subit une refusante et a tendance à se redresser. Une erreur classique en dehors du près est d'abattre pour suivre le vent alors qu'il convient de conserver son cap et de régler aux écoutes.

Les rafales

Un temps à rafales (survente brutale et temporaire) peut se gérer différemment à la barre dans un but à moyen terme. En dehors du près, il devient intéressant de faire des ondulations de part et d'autre de la route directe en lofant dans les molles (une rafale est suivie d'une *molle*) et en abattant dans les rafales. Cette façon de faire, correspond à une alternance de relances et de gains sous le vent. Elle permet de profiter du surplus de vent pour faire de la vitesse et d'aller chercher de la pression lorsque le vent faiblit donc de garder de bonnes sensations. Elle peut s'envisager sans toucher aux écoutes donc dans le cadre du pilote. Au près la situation est plus délicate car abattre dans une rafale peut coucher le bateau. On aura plutôt tendance à profiter de l'adonnante pour à la fois gagner en cap et soulager le bateau.

Le vent tourne

Il est rare qu'un changement d'intensité du vent ne s'accompagne pas d'un changement de direction. Si le vent tourne et qu'on garde le même cap, les voiles se trouveront mal réglées donc moins efficaces. Au près un refus s'accompagnera d'une diminution de la gîte et le barreur suivra cette variation. Inversement, une adonnante sera systématiquement exploitée surtout si l'on cherche à gagner au vent. Dans le cas d'une descente (portant) au meilleur VMG, le même suivi du vent est important. Dans les autres allures, mieux vaut suivre aux réglages pour essayer d'aller droit.

Bertrand Chéret dans [Chéret 06] explique une erreur fréquente dans le petit temps alors que « le braquage de la voilure [...] atteint des angles où la composante de Trainée augmente plus vite que celle de Portance. Nous risquons même d'avoir un début de décollement. Sous ces effets pervers et bien que le vent adonne, le voilier ralentit au lieu d'accélérer, il se redresse et cherche à abattre au lieu de lofer [...] Une erreur courante consiste à abattre au lieu de lofer ». Le barreur se trompe souvent dans ce cas car il accorde plus d'importance aux informations de gîte qu'à celles de vent. Pour éviter ce type d'erreur, il importe d'être capable d'identifier le contexte.

De même, au portant, il est difficile de distinguer une adonnante d'une molle, heureusement que toutes deux nécessitent une relance.

Les techniques de compétition par rapport au vent

Comme dans le petit temps les différentiels de vitesse sont importants en fonction de la force du vent, suivre les variations du vent apparent n'est pas la meilleure solution. La technique dite en escalier ou par paliers consiste quand le vent forcé à relancer le bateau sur sa nouvelle vitesse cible en conservant momentanément le cap antérieur, voire en abattant un peu, pour lofer une fois celle-ci atteinte. Cette technique n'est pas intuitive car deux phénomènes contradictoires vont intervenir. D'une part, la speed sera inférieure à la nouvelle vitesse cible incitant à relancer, d'autre part l'augmentation de la gîte et

le nouveau repère de TWA plus pointu feront lofer. Cette technique n'a plus d'intérêt dans un vent plus soutenu car alors les vitesses cibles varient peu. Symétriquement, si le vent mollit, la stratégie est la même. On attend d'atteindre la nouvelle vitesse cible avant d'abattre. C'est une sorte de prime à la fainéantise !

Finissons avec la technique Wally [Bernot 94] mise au point lors de l'America's Cup à Perth. Cette technique de barre s'applique dans le cas de vents rapidement variables et consiste à optimiser sa route sur le vent moyen et non sur le vent instantané. En pratique, au près, si le vent adonne on choisira le cap cible qui donne le meilleur gain dans l'axe du vent moyen, donc on abattra légèrement par rapport au près serré. Si le vent refuse, le même raisonnement nous amènera à serrer plus le vent que l'angle du meilleur VMG pour le nouveau vent. Au portant une adonnante nous fera abattre légèrement et naviguer un peu moins vite alors qu'une refusante nous fera lofer un peu et naviguer plus vite. La technique Wally est plus avantageuse au portant qu'au près (voir [Bernot 94] pour des estimations). Techniquement, on peut définir des critères déterminant si le vent est rapidement variable ou non et calculer sa direction moyenne. Il n'est pas difficile ensuite, connaissant les polaires, de calculer les cap cibles en fonction des variations du vent. Cette technique prend tout son intérêt si elle est accompagnée des réglages *ad hoc* mais n'est guère envisageable dans le cadre d'un pilote automatique n'agissant que sur la barre.

3.9.2.4 La relance

Il y a une chose que ne font pas les pilotes automatiques aujourd'hui c'est la relance. Relancer un bateau consiste à retrouver le plus rapidement possible sa vitesse cible en modifiant temporairement la trajectoire. Pour l'homme, la relance est une recherche de sensations. Au près par exemple, après avoir buté contre une vague, on va abattre pour à la fois remplir les voiles et se retrouver sur un cap où la vitesse cible est supérieure à celle du meilleur près. Une fois le bateau relancé, on lofe progressivement pour retrouver son cap initial. Evidemment, pour être pleinement efficace, la relance doit être accompagnée d'un réglage de voiles adapté. Surtout dans la brise, abattre alors que l'on est au près sans choquer peut bloquer le bateau en le couchant sur l'eau. Les sensations que l'on recherche lors d'une relance sont des sensations de vitesse, c'est-à-dire les sensations de barre, les accélérations dans l'axe du bateau et la gîte. Ensuite lorsque la vitesse cible est atteinte ou même dépassée on replace progressivement l'étrave du bateau sur le cap cible. Les instruments utiles sont donc le speedomètre, le compas ou l'angle au vent réel en supposant que sa direction n'a pas changé. La relance occulte quelque peu le grand principe d'anguler le moins possible le safran. Dans certains cas il est avantageux de dévier largement de sa route, c'est ce qu'appellent les marins une relance basse, et ceci dépend du type de bateau, de la force du vent, et aussi de l'état de la mer. La connaissance des polaires va permettre de donner des éléments de réponse au problème de l'angle de la relance. Schématiquement, plus la polaire sera distendue (avec de gros écarts de vitesse en fonction des allures), plus la relance peut être appuyée, c'est-à-dire loin de la consigne de cap. Pour des bateaux lents, il est dangereux de s'écarter beaucoup de la route car le gain de vitesse sur le nouveau cap sera trop faible par rapport à l'allongement de la route. Pour un voilier rapide relancer en grand est important car le bateau a peu d'inertie et l'allongement de la route sera compensée par le gain de vitesse. On remarquera que les bateaux lourds du fait de leur inertie seront proportionnellement moins freinés que les légers et nécessitent également de ce fait d'une relance moins prononcée.

3.9.2.5 Vagues, surf et planing

Une qualité du bon barreur est de profiter d'une vague pour faire surfer son engin. Cela nécessite au portant de lofer franchement avant la crête de la vague pour prendre de la vitesse et, au moment où elle soulève l'arrière, d'abattre en grand vers le bas de la vague. Il s'agit donc d'une relance très marquée. Le tout consiste ensuite à faire durer le surf le plus longtemps possible et là le critère absolu est l'assiette du bateau et sa vitesse, les autres informations passant au second plan. Le bateau doit garder une gîte faible ou nulle, une contre-gîte indique généralement qu'on a trop abattu et que le surf risque de s'arrêter. On peut garder un œil sur la girouette pour éviter un empannage intempestif. Si le phénomène s'essoufle, on relance en lofant un peu. Pour les multicoques ORMA, rattraper les vagues est courant. Le surf perdure car il accompagne la vague et la relance est également longue car

il faut dépasser la vague suivante. C'est une situation assez déroutante pour un barreur qui découvre ces engins.

Certains bateaux ont la possibilité de planer, c'est-à-dire de surfer en permanence. Barrer devient relativement facile car généralement le bateau avance *comme sur des rails*. Il déjauge en partie ce qui le rend moins vulnérable aux vagues et lui permet de les franchir en puissance.

3.10 Le barreur et sa représentation du monde

Bien barrer nécessite de se bâtir une représentation suffisamment fiable du monde qui nous entoure, c'est-à-dire de la mer, du vent et du voilier lui-même. L'expertise du comportement d'un barreur humain que nous venons d'effectuer, nous permet de dégager un ensemble de concepts ou éléments de contexte liés au vocabulaire métier en vue de les implémenter dans notre application de pilotage. Elle nous renseigne également sur le choix des capteurs aptes à les caractériser et à donner une idée des formules fournissant leurs valeurs : la direction du vent est ressentie par l'audition et le toucher mais une girouette fournit une donnée similaire, de nuit une vague est ressentie par le système vestibulaire mais une centrale inertielle capture également des mouvements ... Il doit donc être possible d'activer nos concepts à partir de capteurs et de leurs donner des valeurs en fonction de leurs degrés d'activation. Pour chaque catégorie de concepts, nous donnons dans des tableaux récapitulatifs leur liste et leurs caractérisations en termes de capteurs.

En équipage, la tâche du barreur se limite souvent à la barre. L'équipier d'avant (appelé *numéro 1*), se charge de prévenir le barreur de l'arrivée d'une vague qui diffère des autres, ou de la présence d'un paquet d'algues. Le navigateur se charge de repérer le type de vent, les effets de côte, la présence de courant, le tacticien de gérer la position du bateau par rapport à la flotte, le *performer* d'annoncer la vitesse du bateau, etc. Réciproquement, le barreur parle de ses sensations pour aider l'équipage à mieux régler le bateau. Ce dialogue permanent barreur/équipage apparaît comme un élément essentiel dans la représentation que ce fait le barreur du monde qui l'entoure. Par conséquent, nous allons l'étudier en le posant comme archétype du questionnement auquel se soumet le barreur, même en l'absence d'équipage, pour bâtir sa représentation du monde.

3.10.1 Le dialogue barreur/équipage

Dans certaines disciplines comme le match-race de véritables protocoles de communication entre les différents membres de l'équipage sont instaurés assurant ainsi une circulation optimale de l'information [Poirey 03]. Le fait qu'un ensemble d'informations, traitant aussi bien des réglages *ad hoc* (choix de voile, tension du pataras, angle de quille ...) que des performances attendues (polaires), soit soigneusement tabulé et accessible aux personnes concernées assure une réactivité très forte en évitant les tâtonnements et les erreurs en cas de stress ou de fatigue. Commençons par regarder le type d'informations que donne le barreur à ses équipiers.

Il existe deux grands types de situation sur un voilier : soit on se trouve en manœuvre, soit on se trouve en navigation. La manœuvre (virement, empannage, prise de ris, changement de voile d'avant ...) doit être systématiquement annoncée par le barreur car elle passe généralement par une modification de trajectoire donc d'assiette et nécessite une action spécifique de l'équipage. C'est le barreur qui initie et donne le rythme et qui adapte sa trajectoire aux impératifs de la manœuvre et de la sécurité. Rien ne sert de planter le bateau dans une vague si un équipier s'échine à l'avant.

En navigation, le barreur transmet ses sensations de barre *le bateau est mou, manque de puissance, vibrations dans le safran* (présence éventuelle d'algues) ou prévient de ses décisions *je relance, je pipe* (remonter au-dessus du près serré) ou encore avertir de situations de crise *je pars au lof, le safran décroche*.

Les équipiers doivent eux transmettre au barreur les informations utiles à sa tâche. Certaines se lisent directement à la surface de l'eau, *vague, algues, rafale, adonnante* et/ou dépendent de

l'électronique *sous la vitesse cible, viring de 10 °*, d'autres se réfèrent à la concurrence *plus haut, moins vite*.

Les informations se classent en trois grandes catégories : celles qui décrivent la mer, celles qui décrivent le vent et celles qui parlent de l'équilibre du bateau ainsi que de sa situation par rapport à la mer et au vent.

3.10.2 La mer du barreur

Pour un marin la mer est un plan d'eau hétérogène [Parenthoën 04] parcouru de nombreux phénomènes. Pour un besoin temps réel, nous avons vu que, dans le cas général, le barreur négocie la mer vague par vague et distingue, car ils induisent des stratégies particulières, quelques cas particuliers de mer : *mer plate, clapot, houle, mer déferlante* (voir le tableau de la figure 3.10).

CONCEPT	CARACTERISATION
Mer plate	Absence de tangage
Clapot	Fréquence tangage élevée, vitesse très inférieure à vitesse cible
Houle	Accélérations verticales : fréquences basses, amplitudes importantes
Mer déferlante	Violents coups de roulis

Un barreur, en dehors d'une mer *classique* caractérisée par des vagues d'une certaine fréquence et d'une certaine amplitude, distingue quatre grands types de mer.

FIG. 3.10: Concepts liés à la mer du barreur

L'*état de la mer* semble important dans le réglage du pilote (et en particulier de son gain). L'état de la mer est la description de la surface de la mer en terme de hauteur de vague, c'est-à-dire de la distance entre le creux et la crête de la vague. Les marins utilisent généralement l'échelle de Douglas reproduite figure 3.11 qui décrit 9 états possibles.

CONCEPT	CARACTERISATION
Etat de la mer	Hauteur des vagues en m
Calme	0
Ridée	0 à 0.1
Belle	0.1 à 0.5
Peu agitée	0.5 à 1.25
Agitée	1.25 à 2.5
Forte	2.5 à 4
Très forte	4 à 6
Grosse	6 à 9
Très grosse	9 à 14
Enorme	14 et plus

L'échelle de Douglas caractérise les états de la mer en fonction des hauteurs moyennes des vagues.

FIG. 3.11: L'échelle de Douglas décrivant l'état de la mer

Pour un marin une vague se caractérise par sa direction, son amplitude, sa fréquence et sa cambrure. Pour le barreur ce qui comptera le plus est la position de son bateau par rapport à la vague. Il distingue pour cela quatre grands instants : le sommet, le creux, la descente et la montée. Pour pouvoir différencier sommet et creux on a besoin de savoir si la vague rattrape le bateau ou vient à sa rencontre (voir la figure 3.12).

3.10.3 Le vent du barreur

Le vent se caractérise par sa force et sa direction. Dans la bouche d'un marin la force du vent est qualifiée du plus faible au plus fort en *pétrole, petit temps, medium, brise et gros temps*. En fonction de

CONCEPT	CARACTERISATION
Sommet	Assiette nulle
Creux	Assiette nulle
Descente	Assiette positive
Montée	Assiette négative

Concepts qui caractérisent partiellement les quatre positions les plus importantes du bateau par rapport à une vague. L'utilisation de la dérivée des accélérations verticales permet de distinguer tout d'abord si la vague est rattrapante ou non et ensuite si on est dans son creux ou sur son sommet (voir chapitre 4).

FIG. 3.12: Positions du bateau par rapport à une vague

ses variations en force, le barreur dira qu'il est *stable*, *forcissant*, *mollissant* ou encore *oscillant*. Les oscillations sont repérées par les vitesses maximum et minimum du vent réel. Il faut savoir que le vent présente généralement des oscillations assez régulières d'une période de quelques minutes (typiquement entre 5 et 10 minutes) accompagnées de variations de direction. Un marin parlera de *bascule* quand le vent effectue une rotation franche puis reste stable en direction. Plus précisément, il dira qu'il y a du *viring* si la rotation est à droite (dans le sens des aiguilles d'une montre) et de *backing* sinon et donnera la valeur de la bascule en degrés. Les deux autres cas étant *stable* et *oscillant*, ce dernier caractérisé par les caps limites (en degrés). Les combinaisons des variations à la fois en force et en direction étant possibles, un marin retiendra six grands types de vent [Bernot 94] : le *stable*, l'*oscillant*, le *forcissant*, le *mollissant*, le *basculant* et l'*oscillant basculant*. Dans le cas oscillant il repèrera les moments où le vent est en butée (sur les caps ou les vitesses de vent limites) à la fois en force et en direction.

Ensuite, les phénomènes isolés sont importants. La *rafale* ou *risée* dénote une brusque survente (accompagnée souvent d'une variation de direction) alors que la *molle* décrit le phénomène inverse. L'*adonnante* ou *ado* est une rotation du vent qui l'amène plus sur l'arrière du bateau au contraire du *refus* ou *refusante*.

L'ensemble de ces concepts est résumé dans le tableau de la figure 3.13.

3.10.4 Le bateau du barreur

Le barreur est la personne la mieux placée pour juger de l'équilibre du bateau et donc de son réglage grâce aux sensations de barre. Les qualificatifs sont alors *ardent*, *mou* ou *équilibré*. Le fait qu'un voilier soit *surtoilé* ou *soustoilé* va entraîner un comportement ardent ou mou ; de même, un bateau *puissant* sera souvent ardent. Une des capacités d'un bon barreur est de savoir barrer à la *juste gîte*. Il percevra si son bateau est *trop gîté* ou *pas assez gîté* voire *contre-gîté*. La gîte étant liée aux sensations de barre, un bateau à la bonne gîte sera *équilibré*.

Les marins repèrent rapidement les conditions qu'affectionne un bateau particulier. Ils diront que tel voilier est *un bateau de brise* ou *un bateau de près*. Ces considérations n'intervenant pas directement dans la manière de barrer ne seront pas prises en compte.

Un marin caractérise la situation de son bateau par rapport au vent en termes d'amure et d'allure (voir chapitre 2). Il sera soit *babord amure*, soit *tribord amure* et au *près serré*, au *près*, au *reaching*, au *largue*, au *grand largue* ou au *vent arrière*. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une allure à proprement parler, on ajoute le cas où le bateau est *bout au vent*, c'est-à-dire dans la zone autour de l'axe du vent où il ne peut évoluer correctement car les voiles ne portent pas assez.

Le barreur suit généralement une consigne de cap et en fonction de l'amure il dira qu'il est *sous la route* ou *au-dessus de la route* pour signifier qu'il est *sous le vent de la route* ou *au vent de la route*.

L'assiette du bateau prend toute son importance en tant que positionnement par rapport à la vague notamment pour les départs en surf. Les cas importants sont *début surf* et *fin surf* pour pouvoir abattre et ensuite relancer. Une fois parti en surf, le bateau est au *planing* caractérisé par une vitesse nettement au-dessus de la vitesse critique (cf. chapitre 2).

CONCEPT	CARACTERISATION
Petole	AWS inférieure à 3 noeuds
Petit temps	AWS entre 3 et 8 noeuds
Medium	AWS entre 8 et 24 noeuds
Brise	AWS entre 24 et 35 noeuds
Gros temps	AWS supérieure à 35 noeuds
Stable	TWD et TWS stables
Oscillant	TWD et/ou TWS oscillants
Basculant	TWD tourne
Oscillant basculant	TWD tourne et oscille
Forcissant	TWS croissante
Mollissant	TWS décroissante
Rafale	Montée importante et brutale du TWS
Molle	Chute importante et brutale du TWS
Ado	Rotation importante et brutale du TWD à gauche si babord amure ou à droite sinon
Refus	Rotation importante et brutale du TWD à droite si babord amure ou à gauche sinon

Les concepts associés au vent forment trois groupes : la force du vent, son évolution et les effets locaux. La notion de force de vent pour le barreur est, contrairement à l'échelle Beaufort, relative à lui-même et donc liée au vent apparent. Les variations de directions sont repérées grâce au TWD (True Wind Direction).

FIG. 3.13: Concepts liés au vent

Il existe deux situations de stress liées à la sortie de route : le risque de *départ au lof* ou *aulofée* et le risque de *départ à l'abattée* ou *abattée*.

Le tableau de la figure 3.14 résume l'ensemble de ces affordances avec leurs caractérisations.

3.11 Mesurer la performance d'un barreur

L'évaluation des systèmes de pilotage présentés dans la section 3.3 s'appuyaient sur l'expérimentation, l'observation puis l'analyse des comportements des voiliers qui en sont équipés. Ceci permet de les comparer entre-eux. Une autre problématique consiste à les comparer à un barreur humain (dans l'hypothèse qu'un tel archétype existe) et a été quelque peu abordé dans la section 3.4. Une autre problématique encore est la comparaison de barreurs humains entre-eux. Nous allons tout d'abord expliquer pourquoi une mesure de la performance d'un barreur est particulièrement difficile à définir notamment à travers la notion de *style de barre*. Nous suggérerons ensuite trois approches : une plutôt d'ordre statistique sur des données réelles, une autre basée sur des techniques de simulation par réalité virtuelle et une dernière axée sur de l'expertise.

3.11.1 Position du problème et styles de barre

Essayons de fixer une mesure, un critère de comparaison, qui permette d'évaluer la manière de barrer. Gardons à l'esprit que le pilote automatique que nous souhaitons développer n'agit que sur la barre et sur aucun autre élément du voilier. Notre mesure doit donc être adaptée à cette contrainte.

Commençons par déterminer le terrain de jeu. A cette fin, nous supposons fixés un point de

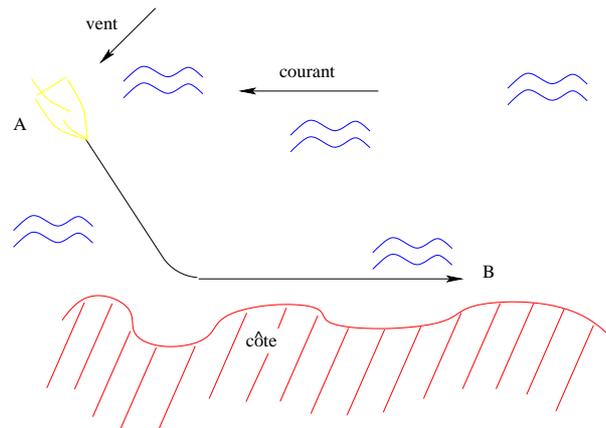
CONCEPT	CARACTERISATION
Mou	La barre pousse
Equilibré	Barre neutre ou tire légèrement
Ardent	La barre tire
Trop gîté	Gîte très supérieure à celle de la polaire de gîte
Pas assez gîté	Gîte très inférieure à celle de la polaire de gîte
Contre-gîté	Gîte de signe opposé à celle de l'amure
Babord amure	Le TWD est à gauche du cap compas
Tribord amure	Le TWD est à droite du cap compas
Bout au vent	TWA en-deça de l'angle du meilleur VMG polaire
Près serré	TWA autour de l'angle du meilleur VMG polaire
Près	TWA proche mais un peu au-delà de l'angle du meilleur VMG polaire
Reaching	TWA entre 50 et 70 degrés
Largue	TWA entre 70 et 110 degrés
Grand largue	TWA entre 110 et 160 degrés
Vent arrière	TWA entre 160 et 180 degrés
Sous la route	Route fond sous le vent de la route prévue
Au-dessus de la route	Route fond au vent de la route prévue
Début surf	Tangage avant, assiette vers l'avant, grand largue, accélération avant
Fin surf	Tangage faible, assiette faible ou vers l'arrière, décélération avant
Planing	Speed très au-dessus de la vitesse critique
Aulofée	Très ardent, gîte importante, roulis important, lacet vers lof important
Abattée	Très mou, contre-gîte, vent arrière, lacet vers abattée important

Les cinq groupes de concepts associés au bateau : les équilibres, la situation du bateau par rapport au vent, la situation du bateau par rapport à la route à suivre, le surf et les risques. Le TWD (True Wind Direction) est l'azimut du vent réel. La route fond est la route géographique effectuée (par opposition à la route surface qui est la trace laissée sur la surface de la mer).

FIG. 3.14: Concepts liés au bateau

départ et une marque à contourner (pour reprendre la terminologie des marins). D'un point de vue mathématique ces deux objets peuvent être vus comme deux points A et B géographiquement repérables par leurs latitudes et longitudes respectives (par GPS par exemple). Ces deux points sont supposés être situés sur une étendue d'eau dépourvue d'obstacles à la fois fixes (côtes, haut-fonds, plates-formes pétrolières...) ou mobiles (d'autres voiliers par exemple ce qui induirait des considérations tactiques). On supposera que cette étendue d'eau est soumise à un vent régulier, cependant on acceptera de légères variations de sa force et de sa direction autour d'une force moyenne et d'une direction

moyenne. Ceci n'empêche pas d'avoir à l'échelle locale (de l'ordre de la minute, de l'ordre d'un degré Beaufort et de l'ordre de 5° par exemple) un refus, une adonnante, une risée ou une molle. Notre notion de mesure de la performance d'un barreur s'inscrit donc a priori dans un temps relativement court de l'ordre de la demie heure par exemple, mais peut se prolonger à plusieurs heures si les conditions sont stables. Ce plan d'eau peut être parcouru par un système de vagues mais lui aussi relativement stable comme une houle régulière, un clapot, une mer croisée, c'est-à-dire qu'entre les deux points A et B il n'y a pas différentes zones avec différents systèmes de vagues qui induiraient éventuellement des considérations stratégiques ou tactiques. Enfin, on peut y ajouter un courant que l'on va considérer comme stable en direction et en force. L'idée est de s'assurer d'évoluer sur un plan d'eau homogène pour s'abstraire des considérations stratégiques et tactiques du type de celles de la figure 3.15 et de se placer dans une situation où les skippers vont estimer que la route directe (en termes marins et non mathématiques) est la meilleure.



En mer, la route directe est rarement la plus courte. Dans le cas présenté mieux vaut privilégier une route à la côte pour s'abriter du courant et peut-être bénéficier d'un vent plus adonnant (le vent indiqué étant le vent synoptique) surtout si la côte est basse.

FIG. 3.15: La route d'un voilier dépend de multiples considérations stratégiques ou tactiques

On suppose donc que le parcours entre A et B se fait sur un seul bord et plus strictement à une seule allure. C'est-à-dire que l'on souhaite maintenant s'abstraire des réglages et des manœuvres car le pilote automatique n'agira que sur la barre. Le bord entre A et B sera ainsi un bord de largue, de près, ou encore de reaching. Le plein vent arrière bien que peu avantageux et délicat sera traité comme les autres allures et supposé sans empannage.

On dira alors que α a mieux barré que β entre A et B si pour un même bateau et les mêmes conditions de vent et de mer, α contourne B avant β . Cela suppose également que A et B ont choisi le même plan de voile, les mêmes répartitions de volumes d'eau dans les ballasts, la même inclinaison de quille ... Dans l'absolu, A et B devraient avoir une morphologie proche et se placer sensiblement au même endroit et ils devraient partir en même temps du même point pour bénéficier de la même vague au départ ... Autant de contraintes qui rendent impossible la mise en œuvre pratique de cette mesure. On ne suppose pas ainsi que la technique de barre est indépendante du réglage mais qu'au contraire les forces induites par ces réglages par rapport aux conditions extérieures entraînent un certain nombre de sensations que le barreur va interpréter en agissant sur la barre. Ainsi un coureur peut choisir d'abattre dans les surventes pour profiter de l'accélération, un autre au contraire de lofer pour soulager le bateau, le premier à contourner B aura eu raison. La mesure de performance proposée est globale, c'est-à-dire se juge sur l'ensemble du parcours entre A et B . On pourra objecter que sur une portion du parcours A a fait une grave erreur mais s'il arrive quand même devant B , alors A a globalement mieux barré que B . C'est le problème d'une telle mesure, mais on ne peut se contenter de regarder la trajectoire dans une vague car même si les deux bateaux partent du même point il y a très peu de chance qu'ils arrivent au même point. Ce qui nous intéresse est donc une performance moyenne qui prend essentiellement en compte la manière de négocier les vagues et les petites variations de vent.

En particulier, cette mesure ne fera pas de distinction entre des *styles de barre*. Par exemple un coureur peut affectionner faire du cap au près, il aura les réglages adaptés, c'est à dire une chute de grand'voile plutôt bloquée et la tendance à laisser lofer le bateau dans les surventes. Un tel coureur choquera tardivement, et privilégiera le cap à la vitesse. Ce style de barre est redoutable en régat en flotte parce qu'il permet de se placer au vent de ses adversaires et donc de les contrôler et de les gêner

mais peut s'avérer non pertinent lors d'un près océanique avec du clapot par exemple. Ce style de navigation est tout en finesse car joue avec la limite du vent et accompagne en la bridant la trajectoire naturelle du bateau. Inversement, toujours au près, un barreur peut privilégier la vitesse au cap. Dans la brise sa grand'voile fusera souvent alors que son foc sera plutôt plein. Un tel barreur aura tendance à beaucoup régler sa grand'voile pour garder une assiette constante et un cap constant. Contrairement au premier barreur il aura tendance à régler avant de modifier sa route, il régule l'équilibre du voilier via sa grand'voile. C'est une navigation toute en puissance qui permet de placer l'étrave du bateau là où on le souhaite et qui peut s'avérer très efficace dans le clapot et les situations où la puissance est importante. Evidemment, dans l'objectif d'un pilote automatique, on se place plus dans le premier style car les réglages sont plus figés. Cependant rien n'interdit d'exiger du pilote une consigne de cap légèrement plus ouvert avec un réglage de voiles également plus ouvert. La mesure proposée ne distingue pas ces styles de barre car pour une même carène ils peuvent mener à des performances comparables, simple affaire de style.

3.11.2 Approche statistique

L'impossibilité de faire partir les deux bateaux en même temps et au même point semble pouvoir être contournée par l'utilisation de statistiques. Si A et B se plient un grand nombre de fois à l'exercice, celui qui devance le plus souvent son adversaire peut être considéré comme un meilleur barreur.

Dans le milieu de la compétition à la voile certains coureurs ont la réputation d'être de bons tacticiens, d'autres de bons régleurs ou encore d'autres de bons barreurs. La fédération française de voile (FFV) s'est penchée sur le problème de l'évaluation de la performance des hommes dans le cadre des jeux olympiques [Gouard 88]. A ce titre un 470²² avait été instrumenté dans le but de datalogger un certain nombre de données lors de parcours d'entraînement. L'axiome de départ est qu'un bon barreur est un champion du monde²³ et que les autres barreurs (évoluant tout de même au niveau national) sont moins bons. Les enregistrements sont ensuite analysés et comparés à l'aide d'outils statistiques. La conclusion s'articule en deux points : le suivi du vent et l'adaptation aux changements de l'environnement. Il apparaît qu'un bon barreur est quelqu'un qui est capable de suivre finement les variations du vent en cap. D'autre part, les performances doivent beaucoup aux manœuvres et en particulier à la capacité de retrouver rapidement le meilleur compromis cap/vitesse alors que la plupart des repères ont changé lors de la manœuvre. Philippe Gouard [Gouard 88] conclut qu'un bon barreur est quelqu'un qui est capable de repérer les fréquences propres de son voilier en général plus élevées que celles de la mer et du vent.

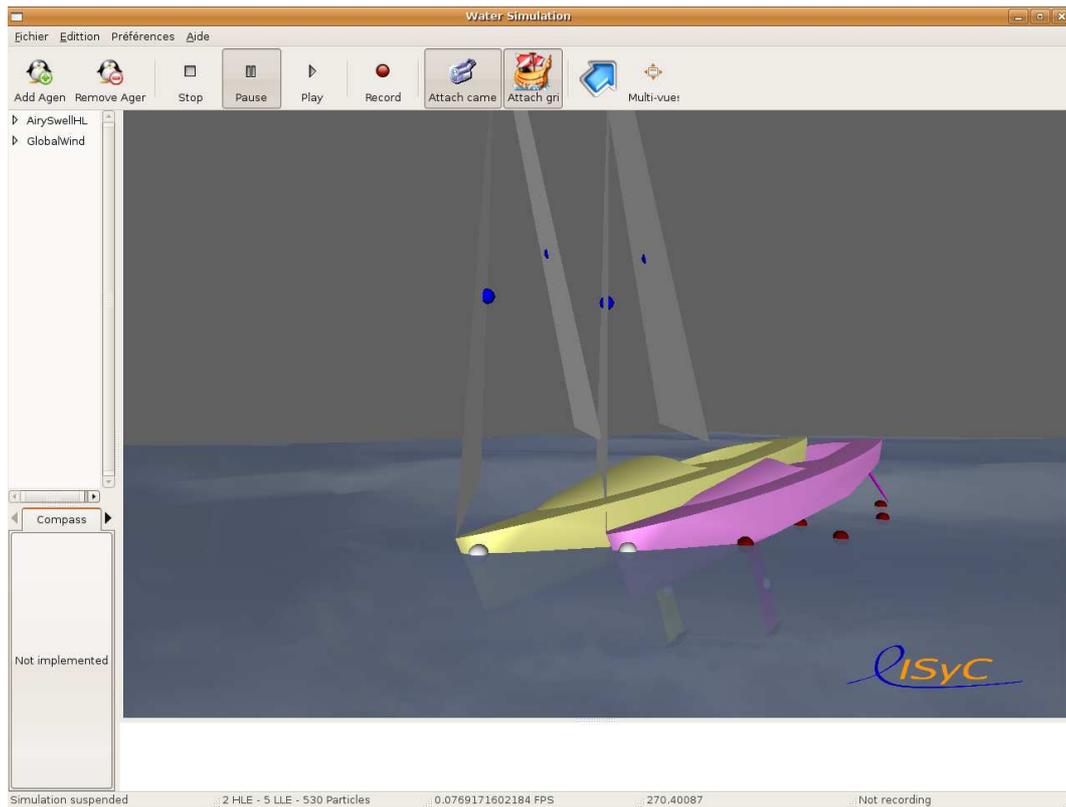
3.11.3 Réalité virtuelle

Disposer d'une mer virtuelle et d'un voilier virtuel offre de fait la possibilité de rejouer la même navigation avec différents barreurs. L'utilisation d'outils statistiques permet d'envisager de s'affranchir de biais inhérents à l'intervention de nombres tirés aléatoirement. Mais on peut avoir beaucoup mieux en implémentant la possibilité de cloner le bateau tout en lui affectant un barreur de son choix (figure 3.16).

Le clone hérite des mêmes caractéristiques physiques que son modèle et commence sa vie au même endroit. Les deux bateaux sont alors superposés et leur unique différence réside dans le barreur. Il est alors possible de voir quel bateau dépasse l'autre et donc de comparer les barreurs. Cependant, deux barreurs différents ont tendance à ne pas rester sur la même route et il est souvent nécessaire de modifier légèrement la consigne de cap du bateau d'origine (le clone vit sa vie) pour pouvoir les comparer.

²² Dériveurs à deux équipiers de 4 mètres 70 de long en usage aux jeux olympiques.

²³ Marc Bouët en l'occurrence.



Le clone est généré par la simple frappe d'une touche. Il est lancé sur la mer avec les mêmes caractéristiques physiques et à la même position.

FIG. 3.16: Le bateau virtuel et son clone

3.11.4 L'avis d'un expert

Une approche simple à mettre en œuvre consiste tout simplement à demander à un expert d'observer le barreur et d'évaluer son comportement. L'élaboration d'un environnement virtuel crédible, mer, vent, voilier peut permettre de s'affranchir de tests réels et faciliter encore la tâche. Le problème inhérent à cette démarche est que le jugement de l'expert est par essence anthropomorphique. Or, aujourd'hui, dans certaines conditions, le pilote barre mieux que l'homme. Il serait dommage de perdre ainsi une occasion d'optimiser la technique de barre.

3.12 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une expertise complète de la technique de barre sur un voilier. Dans la littérature consacrée à la voile, barrer est considéré comme une activité intuitive et ne conduit qu'à peu de commentaires. Aussi cette étude apparaît comme originale de part son ampleur et son exhaustivité.

Barrer n'est pas l'apanage de l'homme car, depuis fort longtemps, de nombreux systèmes de pilotage ont été conçus pour se substituer à lui, le libérant ainsi pour d'autres tâches. Ces systèmes exploitent un certain nombre d'informations qui constituent un premier bilan de celles utiles au marin. Cependant, un homme barre fondamentalement différemment d'un pilote. Il mesure, agit, anticipe, relance et adapte son niveau de vigilance et sa vitesse de réponse aux conditions. Nous dégageons ensuite, dans un sens très éloigné des pilotes modernes, trois *modes de barre* : *barrer au meilleur VMG*, *barrer au cap* et *survie*, les deux premiers se distinguant par leurs utilisations du cap. Notre pilote étant orienté vers la performance, une section entière est consacrée aux grands principes inhérents à la bonne marche du bateau du point de vue du barreur : limiter les angles de barre qui sont autant de coups de frein, garder l'assiette du bateau dans des limites raisonnables, et, bien le régler. En d'autres

termes, trouver un bon équilibre de route et d'assiette ce qui passe essentiellement par les *sensations de barre*. Nous effectuons ensuite une étude détaillée des informations qui interviennent dans l'action sur la barre basée sur l'expérience de plusieurs coureurs, ce qui nous permet de les hiérarchiser et de déterminer leurs rôles respectifs. Les *sensations de barre* et les informations vestibulaires sont ainsi les plus importantes, suivent les informations qui ont trait à la polaire (vitesse cible, TWA et TWS) alors que l'angle au vent apparent et le cap clôturent ce panorama. Nous poursuivons par un examen des pratiques usuelles des barreaux dans des conditions stables puis face aux perturbations liées aux vagues et au vent. Toute cette étude conduit à définir un ensemble d'informations critiques qui décrivent l'image que se fait le barreur de son environnement. Ces informations, appelées *concepts*, sont dégagées à partir du vocabulaire métier du marin et leurs caractérisations en termes de données capteurs sont explicitées. Nous achevons notre expertise par quelques pistes sur la difficile question de la mesure de la performance d'un barreur.

La représentation du monde érigée par le barreur étant largement esquissée, les stratégies de barre adoptées face aux différents contextes étant décrites, nous pouvons à présent nous attaquer à la modélisation d'un barreur de voilier orienté vers la performance.

Bibliographie

- [Abril 97] Abril, J., Salom, J., et Calvo, O. (1997). Fuzzy control of a sailboat. *International Journal of Approximate Reasoning*, 16(3-4) :359–375.
- [Asken 83] Asken, C. (1983). *Nouveau traité de navigation. Tomes I et II*. Chiron.
- [Bernicot 02] Bernicot, L. (2002). *La croisière d'Anahita*. Voiles Gallimard.
- [Bernot 94] Bernot, J.-Y. (1994). *Vent et Régate : Les Stratégies*. Biblio Voile FFV Chiron.
- [Bernot 95] Bernot, J.-Y. (1995). *Météorologie locale : Croisière et régates*. Biblio Voile FFV Chiron.
- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.
- [Bourcier 06] Bourcier, P. (2006). *Quel pilote pour demain ?* Course Au Large numéro 17.
- [Cadoret 03] Cadoret, B., Duviard, D., Guillet, J., et Kérisit, H. (2003). *Ar Vag Voiles au travail en Bretagne atlantique, Tome 1*. Editions de l'estran.
- [Chéret 00] Chéret, B. (2000). *Les Voiles*. Gallimard.
- [Chéret 06] Chéret, B. (mars 2006). *Changer de vitesse au près*. Cahier des régates numéro 104.
- [Coles 90] Coles, A. (1990). *Navigation par gros temps*. Voiles Gallimard.
- [Dumas 91] Dumas, V. (1991). *La route impossible*. EMOM.
- [Finot 77] Finot, J.-M. (1977). *Eléments de vitesse des coques*. Arthaud.
- [Forthmann 01] Forthmann, P. (2001). *Tout savoir sur le pilotage automatique*. Loisirs Nautiques.
- [Gibson 77] Gibson, J. (1977). The theory of affordances. *Perceiving, acting and knowing*.
- [Glénans 65] Glénans (1965). *Cours de navigation des Glénans. Tomes I et II*. Editions du compas.
- [Glénans 04] Glénans (2004). *Le cours des Glénans*. Seuil.
- [Gouard 88] Gouard, P. (1988). *Nouvelles techniques pour gagner*. Chiron.
- [Gouard 99] Gouard, P. (1999). *Les nouvelles stratégies en voile*. Chiron.
- [Gutelle 01] Gutelle, P. (2001). *Architecture du voilier. Tome 1. Théorie*. Loisirs nautiques.
- [Loisirs Nautiques 80] Loisirs Nautiques (1980). *Connaissance du Pilote Automatique*. Loisirs Nautiques Hors Série 9.
- [Marie 89] Marie, M. (1989). *Vent Dessus Vent Dedans*. Voiles Gallimard.
- [Mayençon 82] Mayençon, R. (1982). *Météorologie marine*. E.M.O.M.
- [Moitessier 67] Moitessier, B. (1967). *Cap Horn à la voile*. Arthaud.
- [Moitessier 88] Moitessier, B. (1988). *Vagabond des mers du sud*. Arthaud.
- [Morineau 01] Morineau, T. (2001). Eléments pour une modélisation de la notion d'affordance en psychologie ergonomique. In *actes d'EPIQUE'01*, Nantes, France. Congrès EPIQUE de la Société Française de Psychologie.
- [Pajot 77] Pajot, Y. et Pajot, M. (1977). *Voile et régates*. E.M.O.M.
- [Parenthoën 04] Parenthoën, M. (2004). *Animation phénoménologique de la mer : une approche éactive*. Mémoire de Thèse, Université de Bretagne Occidentale.

- [Poirey 03] Poirey, T. (2003). La communication à bord en équipage. Match Racing. Rapport technique, Ecole Nationale de Voile.
- [Ponceau 06] Ponceau, L. (2006). Réglages Figaro 2 pilote nke. Communication personnelle.
- [Ravon 00] Ravon, D. et Dumard, C. (2000). *La régates. Tactique et stratégie*. Gallimard.
- [Régate Internationale 91] Régate Internationale (1991). *Spécial Technique. Hors série numéro 2*. Régate Internationale.
- [Simonnet 02] Simonnet, M. (2002). *Voile et cécité*. Mémoire de maîtrise de S.T.A.P.S. Université de Bretagne Occidentale.
- [Slocum 03] Slocum, J. (2003). *Seul autour du monde sur un voilier de onze mètres*. Chiron.
- [Stelzer 07] Stelzer, R., Pröll, T., et John, R. (2007). Fuzzy Logic Control System for Autonomous Sailboats. In *Fuzzy Systems Conference. FUZZ-IEEE 2007*, pages 1–6.
- [Tabarly 64] Tabarly, E. (1964). *Victoire en solitaire*. Arthaud.
- [Tabarly 77] Tabarly, E. (1977). *Guide pratique de manoeuvre*. Editions du Pen Duick.
- [Tabarly 90] Tabarly, E. (1990). *Pen Duick VI*. Editions du Pen Duick.
- [Tabarly 98] Tabarly, E. (1998). *De Pen Duick en Pen Duick*. Editions du Pen Duick.
- [van Aartrijk 03] van Aartrijk, M. et Samoocha, J. (2003). Learning to Sail. In *European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their implementation on Smart Adaptive Systems (EUNITE 2003)*, Verlag Mainz, Aachen.
- [Yeh 92] Yeh, E. et Bin, J. (1992). Fuzzy Control For Self-steering Of A Sailboat. In *Singapore International Conference on Intelligent Control and Instrumentation*, volume 2, pages 1339–1344.

Modélisation et implémentation

4.1 Multi-agents et réseaux de Petri

Modéliser le système mer/vent/voilier par un système d'équations différentielles serait une approche idéale mais d'une complexité rédhibitoire (voir le chapitre 2). Bien que l'expertise du chapitre 3 ait permis de sélectionner un ensemble cohérent de capteurs disponibles dans le commerce et compatibles avec les contraintes inhérentes aux systèmes embarqués, un nombre fini de capteurs demeure insuffisant pour décrire de manière exhaustive ce système. Etant donnée sa complexité mathématique, rien ne peut garantir l'existence de domaines de contrôlabilité stables. Nous savons seulement que l'homme reste capable de mener son voilier dans la plupart des conditions rencontrées en fonction de l'image qu'il se forge de son environnement. L'expertise a décrit les éléments qui permettent au barreur de prendre des décisions. Ces éléments passent par des mesures de variables sensorimotrices partiellement déterminables par capteurs mais restent par essence flous. Les sensations de barre sont une information floue de même que de déterminer si le bateau est ardent ou non. L'utilisation de la logique floue pour associer des valeurs à toutes ces données sensorimotrices apparaît alors comme un choix naturel. Elle permet en outre de traduire directement une expertise en donnant un sens à un ensemble de variables linguistiques décrivant l'environnement du marin. Elle permet enfin de prendre en compte l'imprécision des données qui sont très bruitées dans ce type d'application.

Chaque composant du système mer/vent/voilier possède sa propre granularité en termes de fréquences. Celles liées au vent sont plutôt basses (de l'ordre de 10^{-3} à $10^{-1}Hz$), celles liées aux vagues plutôt moyennes (0.1 à $1Hz$) et celles liées au bateau lui-même plutôt hautes (de 1 à $10Hz$). Chaque phénomène possède sa propre fréquence. Au sein du vent par exemple, alors qu'un viring ou un backing porte sur plusieurs minutes (car associé à la structure même du vent), une adonnante se détermine sur quelques secondes. De même, le passage d'une vague se fait habituellement en quelques secondes alors que le changement de l'état de mer (houle, clapot ...) peut s'effectuer sur plusieurs heures. Ces phénomènes sont trop décorrélés (une vague ne fait pas la houle) pour qu'ils puissent être raisonnablement hiérarchisés et ce sera au barreur/expert en fonction des contraintes locales d'effectuer la sélection la plus pertinente. Enfin, le barreur doit s'adapter aux fréquences des phénomènes qui l'entourent pour être suffisamment réactif vis-à-vis de ces derniers. Toutes ces considérations incitent au choix pour le barreur de voiliers d'une architecture multi-agents qui permet au sein d'un environnement complexe d'obtenir autonomie, adaptabilité, robustesse et flexibilité.

Vérifier les propriétés d'un système multi-agents et s'assurer que les objectifs qui lui sont assignés sont effectivement atteints passe généralement par sa simulation. Dans ce cadre, proposer des modèles qui fournissent à la fois des patrons pour la conception et des méthodes analytiques pour la vérification apporte des outils intéressants aux concepteurs de tels systèmes.

Un système multi-agents peut être étudié comme un système asynchrone, concurrent, partagé et aléatoire. En programmation objet, un agent est généralement vu comme un objet doté d'activités propres ce qui lui confère *de facto* une certaine autonomie. Un agent autonome évolue dans un envi-

ronnement et est capable d'agir de son propre chef afin de remplir les objectifs pour lesquels il a été créé. Il peut être réactif, proactif¹ ou même social. En effet, dans un système multi-agents, les agents communiquent et interagissent de manière synchrone ou asynchrone. Ces communications et interactions peuvent être vues comme des événements discrets. Dans un système multi-agents la dynamique est composée d'événements qui ont pour certains une évolution continue. Pour nous abstraire de cet aspect, nous allons nous intéresser au début et à la fin de ces événements. Ce choix se justifie dans la mesure où on peut toujours considérer qu'une fin conditionne l'occurrence de nouveaux débuts.

Par conséquent, dans ce chapitre, nous regarderons les systèmes multi-agents comme des systèmes dynamiques à événements discrets. De nombreux formalismes ont été utilisés pour modéliser de tels systèmes. On peut citer les automates, les réseaux de Petri [Alla 00], les langages synchrones [Benveniste 03], la logique temporelle [Pnueli 77] ou encore les chaînes de Markov [Puterman 94]. Dans cette thèse nous avons choisis les réseaux de Petri (le chapitre 6 propose les principales définitions et propriétés les concernant) car ils sont distribués par nature et ont été utilisés avec succès dans la modélisation et l'analyse des systèmes distribués [Reisig 98], des systèmes de production [Desrochers 95] ou encore des programmes concurrents [Murata 89]. L'utilisation des réseaux de Petri pour modéliser et analyser les systèmes multi-agents n'est pas nouvelle et se retrouve dans de nombreux travaux [Bourdais 06, Chevaillier 99, Celaya 09]. Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux états du système et à leurs séquençements possibles ce que nous pourrions également appeler des *scénarios*. Nous ne nous préoccupons pas de savoir à quel moment tel ou tel état est atteint mais plutôt de savoir s'il est accessible. Aussi, le modèle des réseaux de Petri temporisés [David 92] souvent utilisé pour l'analyse des performances des systèmes ne nous intéresse pas ici. Nous avons choisi celui des réseaux de Petri synchronisés [David 92] pour lesquels le franchissement des transitions dépend de l'occurrence d'événements en sus des conditions habituelles.

De nombreuses généralisations des réseaux de Petri ont été proposées pour répondre aux différentes problématiques liées aux systèmes dynamiques à événements discrets [Holloway 97, Juhás 03]. Dans le cadre de cette thèse nous nous sommes intéressés à des généralisations particulières dites *extensions algébriques* car elles sont basées sur le remplacement de l'algèbre usuelle des places (le monoïde des entiers naturels) par d'autres tout en essayant de préserver un maximum des propriétés usuelles des réseaux de Petri. En particulier, nous avons essayé de proposer des réseaux capables de modéliser de manière simple des comportements cycliques en employant des groupes finis car ce type de comportement est courant en mer sous l'action des vagues et des bascules de vent. La totalité de la deuxième partie de cette thèse est consacrée à la présentation de quelques unes de ces extensions et de leurs propriétés sous l'angle de la synthèse et de la théorie des régions.

Ce chapitre décrit à la fois la modélisation et l'implémentation de l'architecture multi-agents choisie pour simuler l'action d'un barreur de voilier dans une optique de sécurité et de performance.

4.2 Agent actif et agent réactif

Dans ce chapitre, pour modéliser, nous utiliserons les *réseaux de Petri synchronisés* [David 92] une variante des réseaux de Petri dits interprétés où chaque transition est associée à un événement. Dans un réseau de Petri synchronisé le franchissement d'une transition nécessite l'occurrence de l'événement qui lui est associé en plus des conditions habituelles. Contrairement à la règle de tir classique, lorsqu'une transition est validée et que l'événement associé arrive, la transition *doit* être tirée. Si certaines transitions ne sont synchronisées avec aucun événement, pour assurer l'homogénéité du modèle, l'événement toujours occurrent, noté e , leur est associé. La sémantique liée à la règle de tir de tels réseaux diffère alors largement de celle des réseaux places/transitions usuels². Cependant, nos choix rendront ces différences mineures.

Les événements peuvent être externes comme un top d'horloge ou la réception d'un message, ou internes comme l'envoi d'un message ou la terminaison d'une tâche. Dans notre modélisation les places

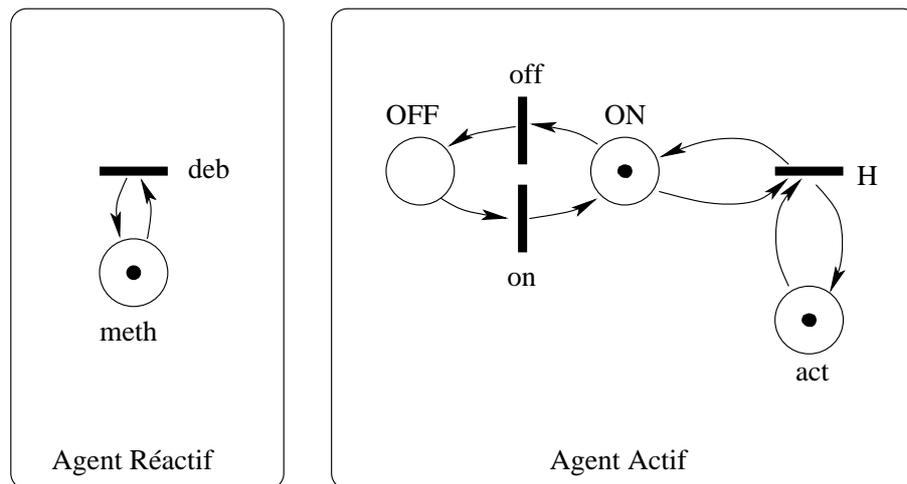
¹ Un agent est dit *proactif* s'il est capable de déterminer tout seul les actions à accomplir pour atteindre son but.

² Notamment que se passe-t-il lorsqu'on est en présence d'un *conflit effectif* c'est-à-dire lorsque deux transitions sont validées simultanément et synchronisées sur le même événement ?

représentent aussi bien des ressources, des tâches en cours d'exécution ou des états dits internes alors que les transitions représentent des événements internes ou externes. Le graphe des marquages d'un réseau synchronisé est le graphe des marquages du réseau dans lequel les noms des transitions sont remplacés par les événements associés (comme pour un réseau de Petri étiqueté).

Sous ARéVi une *activité* est, du point de vue objet, une fonction membre dotée d'une fréquence qui permet au scheduler de planifier ses appels. Les activités sont rangées en fonction de leur date d'activation, les conflits étant gérés par tirage aléatoire. Une activité doit se terminer sous peine de bloquer le système mais peut être mise en sommeil ou réveillée à volonté. Un *agent* se définit comme un objet doté d'activités. Par extension, un objet au sens classique du terme peut être vu comme un agent n'ayant aucune activité. Du coup, nous pouvons distinguer deux grandes catégories d'agents. La première concerne les agents dotés d'activités réveillées périodiquement par des tops d'horloge, ces agents seront dits « actifs ». La seconde contient les agents qui n'agissent que sur envoi de message (appel à une de leurs fonctions membres), ces agents seront dits « réactifs ». Certains agents vont partager ces deux caractéristiques et seront donc à la fois actifs et réactifs. Fondamentalement, ces deux types d'agents diffèrent peu car le scheduler peut être vu comme un agent qui effectue des appels périodiques à des méthodes, les agents concernés réagissant à ces appels.

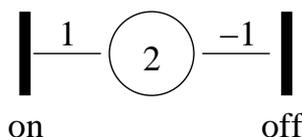
La figure 4.1 propose à gauche une modélisation d'un agent réactif alors qu'à droite un agent actif présente un petit mécanisme supplémentaire pour contrôler le fait de réagir ou non aux tops d'horloge. Si l'événement *on* se produit alors que la transition associée n'est pas sensibilisée, cette dernière ne peut être tirée. L'événement est alors perdu. Sémantiquement c'est une différence essentielle par rapport aux réseaux non étiquetés pour lesquels transitions et événements sont confondus.



Un agent réactif attend l'occurrence de l'événement *deb* pour exécuter sa méthode *meth*. Un agent actif accomplit périodiquement son activité *act* sauf si elle est mise en sommeil par l'arrivée de l'événement *off*. *H* est le signal d'horloge.

FIG. 4.1: Modèle d'agent réactif et actif

Le sous-réseau consacré à la prise en compte ou non du signal d'horloge est binaire et a un graphe des marquages réduit à un cycle d'ordre 2. Il est naturellement modélisable par le strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net (voir le chapitre 7) de la figure 4.2 qui permet de gagner une place.



Si l'événement *on* survient, la transition associée ne peut être tirée car elle mènerait au marquage 0 interdit dans les strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets. 2 représente le fait que le top d'horloge est pris en compte alors que 1 représente son inhibition.

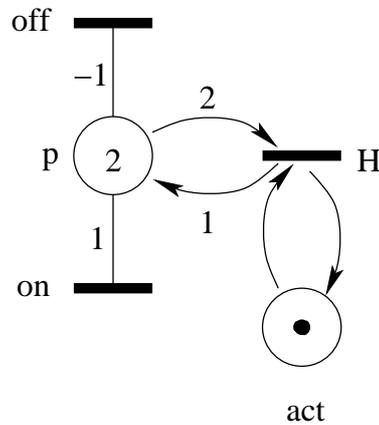
FIG. 4.2: Strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net simulatant le contrôle d'horloge d'un agent actif

Pour pouvoir combiner plusieurs types (voir le chapitre 9 pour la définition du *type d'un réseau*) dans un même réseau nous introduisons la notion de *multi-types net* (MT-net).

Définition 4.2.1 (Multi-Types-Net) *Un Multi-Types-Net est un réseau pour lequel à chaque place*

p est associée un type T_p . Chaque sous-réseau constitué d'une place p et de toutes les transitions est un réseau de type T_p .

Pour pouvoir utiliser le réseau précédent nous le plongeons dans les $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}_2$ -nets (réseau avec règle de tir en deux temps présenté chapitre 7) qui nous permet de simuler une self-loop. Le MT-net résultant est donné figure 4.3.



Le type de la place p est celui des $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}_2$ -nets (voir chapitre 7) alors que celui de la place act est le type des réseaux de Petri usuels.

FIG. 4.3: MT-net modélisant l'agent actif de la figure 4.1

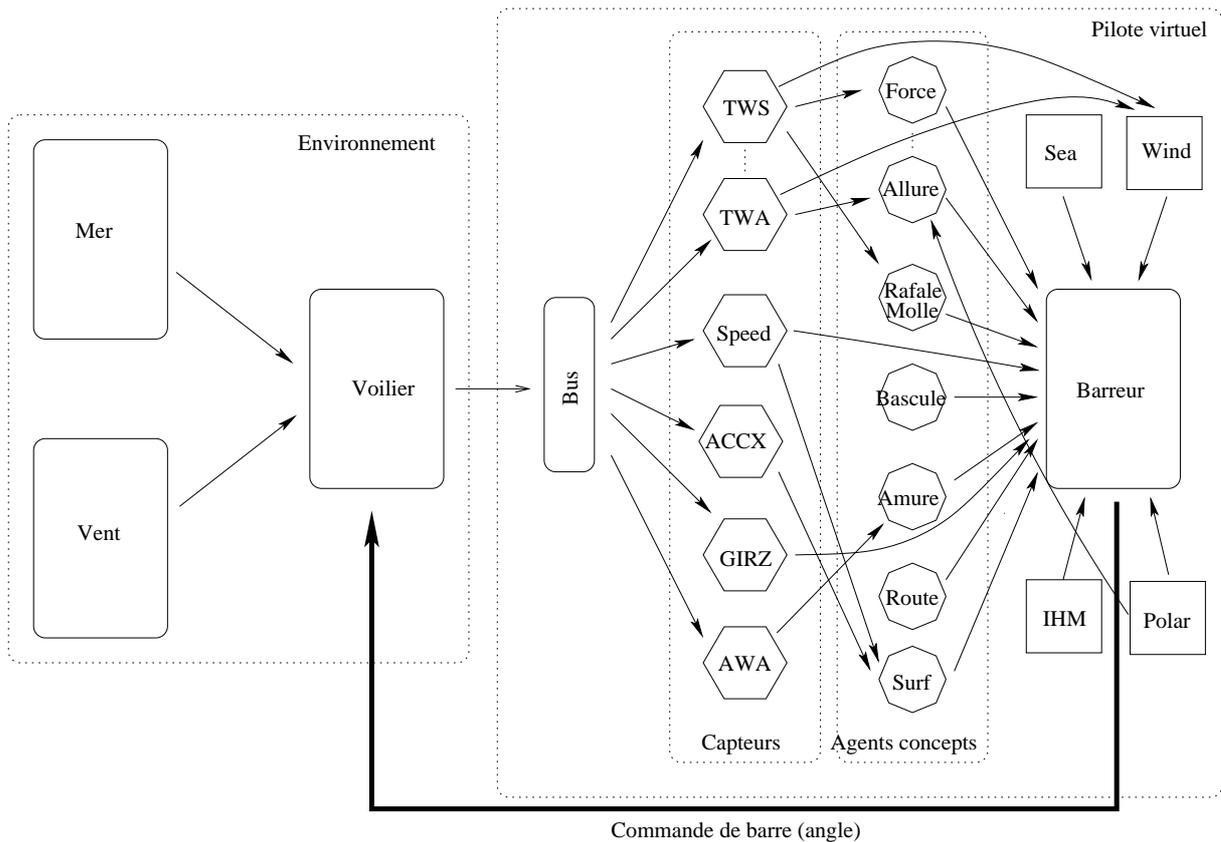
Si l'agent abrite plusieurs activités, son modèle s'obtient par union des modèles associés à chaque activité. Dans la suite, le contrôle d'horloge d'un agent actif sera implicite et donc non représenté.

4.3 Le système global

Le système global repose sur un ensemble d'agents agissant en parallèle de manière asynchrone et ayant leur propre autonomie. Il peut se décomposer en deux grandes parties, d'une part l'*environnement* et, d'autre part, le *pilote virtuel*. La figure 4.4 présente le système *environnement/pilote virtuel* dans sa globalité. L'environnement est issu du modèle IPAS et les entités Mer/Vent/Voilier ne sont volontairement pas détaillées ici car susceptibles d'être substituées en lieu et place par l'environnement réel.

Au sein du pilote virtuel interagissent de multiples agents. Le *bus* joue le rôle d'interface entre environnement et pilote et restitue à des agents *capteurs* un ensemble de données issues des capteurs « physiques » du bord. Ces *capteurs* nourrissent des *agents concepts* qui décrivent la plupart des variables linguistiques dégagées lors de l'expertise ainsi que les trois modèles de mer, de voilier et de vent utilisés par le barreur. Ce dernier utilise l'ensemble de ces informations pour décider d'une commande de barre qu'il transmet alors directement par UDP³ au voilier. La communication entre pilote virtuel et environnement s'effectue exclusivement par UDP. Ce protocole présente l'avantage d'offrir une transmission rapide tout en garantissant une certaine fiabilité des données par checksum. L'ordre chronologique n'est pas garanti et la perte de paquets possible mais l'autonomie des entités environnement et pilote virtuel est, de fait, totale. D'autre part, la plupart des pilotes automatiques installés sur les voiliers de compétition utilisent ce protocole. L'idée est alors de pouvoir brancher directement notre pilote virtuel sur un matériel physique existant. Dans la suite de cette section nous détaillons chaque catégorie d'agents intervenant dans le pilote virtuel à l'exception du barreur qui est traité dans une section à part.

³ User Datagram Protocol.



Le système global se compose de deux parties principales : l'environnement et le pilote virtuel. L'environnement comprend la mer, le vent et le voilier. Le pilote virtuel regroupe une *bus*, des *capteurs*, des *agents concepts*, les agents *sea*, *wind* et *polar* qui fournissent des modèles de mer, de vent et du bateau, le *barreur* lui-même, son *IHM* ainsi que d'autres agents n'apparaissant pas ici. En particulier, une partie seulement des capteurs et des agents concepts sont représentés ici par souci de clarté. Les flèches indiquent le flux des données dans l'application, toutes n'apparaissent pas. Ainsi le pilote virtuel ne perçoit l'environnement que via le voilier et la commande de barre passe directement du barreur au voilier.

FIG. 4.4: Vue simplifiée du système global environnement/pilote virtuel

4.3.1 Le bus

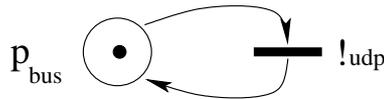
Le *bus* est chargé de collecter les données issues des capteurs placés sur le voilier. Il se comporte comme un récepteur de trames UDP, chaque trame contenant les noms des capteurs suivis de leur valeur. Ce choix est motivé par la technologie *nke* dans laquelle l'ensemble des capteurs est relié à un bus via le protocole *topline*⁴. Ces données sont alors récupérées et traitées par le *processorHR* qui va aussi en générer d'autres (par exemple la déclinaison magnétique qui dépend de la position géographique du voilier). L'ensemble de ces données est alors accessible pour les répéteurs (afficheurs) et peuvent être en particulier dataloggées sur une clé USB externe sous la forme d'une trame similaire à celle choisie pour le bus⁵. Ce choix permet donc l'utilisation du pilote virtuel au sein d'un environnement virtuel, au sein d'un environnement réel ou encore avec des données dataloggées. Les données récoltées par le bus correspondent à celles disponibles sur un voilier moderne de compétition (girouette, anémomètre, speedomètre, capteur d'angle de barre ...) et inclues en outre les efforts sur la mèche de safran.

Techniquement, le bus ne fait que réagir à l'occurrence d'une trame UDP en la mémorisant, c'est un agent purement réactif. Il s'agit donc d'un simple espace mémoire partagé en lecture par de multiples agents. Dans la figure 4.5 l'écriture d'une nouvelle trame est symbolisée par une self-loop. Le jeton stipule que la mise à jour est toujours possible car il s'agit d'une simple recopie sans contrôle

⁴ Le protocole *topline* se contente de fixer un format de donnée pour chaque capteur, la manière d'émettre et de recevoir n'est nullement contrainte. Chaque donnée est envoyée sur le bus sans s'inquiéter d'éventuelles collisions, la réception se fait, elle, sans vérification d'intégrité.

⁵ Pour une présentation plus détaillée du système *nke* voir l'annexe B.

d'intégrité. En particulier si la liaison UDP est coupée, les données stockées sur le bus n'évoluent pas tant que la liaison n'est pas rétablie.

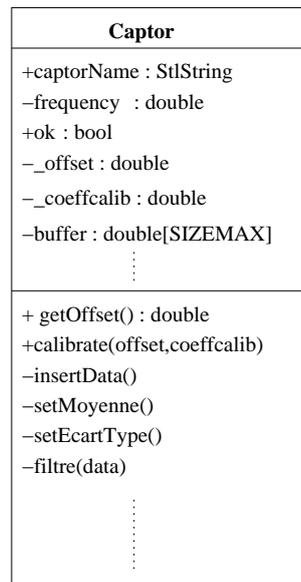


Le bus est un simple espace mémoire dédié à la récupération des trames UDP construites par concaténation des données fournies par les capteurs physiques du voilier. Le bus, abonné à ces messages, réagit à leurs occurrences en tirant la transition étiquetée par `!udp`. L'absence de tout contrôle d'intégrité rend sa mise à jour toujours possible, ce qui est ici symbolisé par une self-loop et la présence d'un jeton dans la place.

FIG. 4.5: Modélisation du bus

4.3.2 Les capteurs

Les agents *capteurs* de l'application pilote virtuel ne reprennent pas à strictement parler les capteurs physiques du voilier mais les données disponibles sur le bus. Ainsi aura-t-on par exemple les capteurs *AWA*, *TWA*, *AWS* et *TWS* dont les données sont obtenues à partir de celles délivrées par la girouette, l'anémomètre et le speedomètre. Ces agents capteurs disposent de méthodes comme la conversion (passage de $m.s^{-1}$ en *noeuds* par exemple), la calibration, le réglage d'offset, le lissage (moyenne sur fenêtre glissante), l'élimination de valeurs ponctuelles accidentelles (que l'on peut remarquer sur les enregistrements effectués à bord de bateaux réels, dits « datalogs », dont nous disposons)... Ils sont dotés également d'un buffer⁶ permettant d'établir un petit historique et de mettre en place un certain nombre d'outils statistiques comme le calcul de la moyenne, de l'écart type ou encore du *min* et du *max*. La figure 4.6 présente dans le formalisme UML quelques unes des spécificités des agents capteurs.



L'agent capteur avec quelques uns de ses attributs et méthodes au format UML.

FIG. 4.6: Présentation UML d'un agent capteur

L'activité des agents capteurs consiste à extraire périodiquement leur donnée de la trame délivrée par le bus. Une telle pratique correspond à celle du marin : les données ne sont consultées que ponctuellement et de manière quasi-périodique, entre deux relevés elles sont tout simplement perdues. Si une donnée n'est plus disponible, le barreur humain s'en passe et continue d'agir. Sur un voilier réel, il est relativement courant que la trame soit partiellement ou totalement cassée et la tentative d'extraction de données peut alors échouer. La dernière donnée valide sert alors de donnée actuelle par défaut et le capteur positionne une variable d'état pour le préciser (l'attribut *ok* de la figure 4.6). Un

⁶ La taille de ce buffer est de 1024 données ce qui fournit un historique d'environ 40s pour une fréquence de 25Hz, fréquence la plus commune pour les capteurs physiques.

capteur est donc fondamentalement un automate à deux états qu'il est naturel de modéliser par le réseau de Petri à places binaires de la figure 4.7.

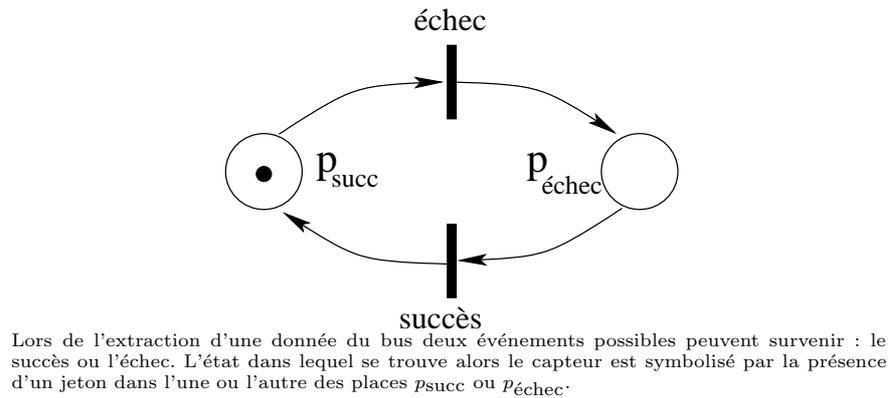
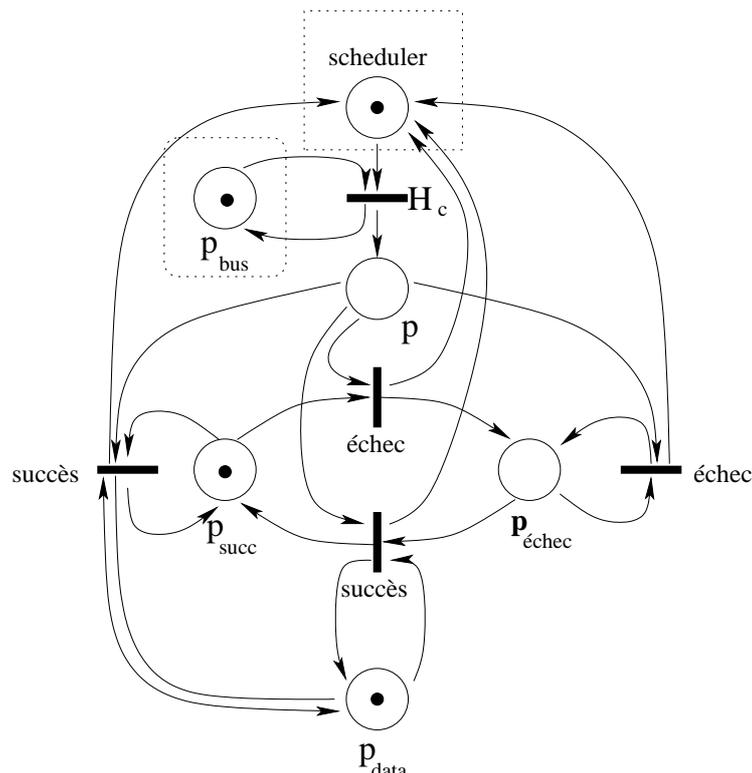


FIG. 4.7: Les états d'un capteur

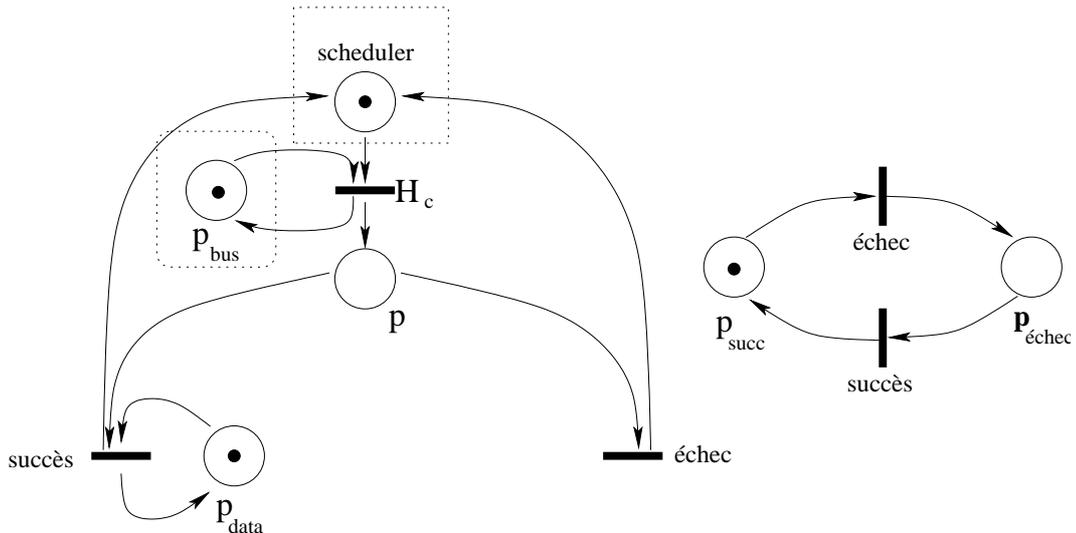
Le réseau global modélisant un capteur donné figure 4.8 s'obtient en synchronisant la mise à jour de l'état du capteur avec le reste du réseau. Dans ce modèle, pour éviter de relancer l'activité au cas où l'événement H_c surviendrait alors qu'un jeton est déjà présent dans p , une place **scheduler** contrôle que l'ensemble de l'activité de l'agent capteur est terminée avant d'éventuellement en exécuter une autre. Le scheduler est ainsi relié à toutes les transitions étiquetées par des tops d'horloge ainsi qu'aux transitions marquant la fin des activités correspondantes. Ceci impose que la mise à jour de l'état du capteur soit non bloquante donc d'ajouter des self-loops sur les places p_{succ} et $p_{échec}$.



L'activité de l'agent capteur consiste à chaque top d'horloge H_c à accéder à l'espace mémoire du bus p_{bus} pour mettre à jour sa donnée p_{data} . En fonction du succès ou de l'échec de cette mise à jour un jeton est placé dans p_{succ} ou dans $p_{échec}$. La place p_{bus} a été encadrée car elle ne fait pas partie du capteur. La communication entre le bus et les capteurs est assurée via le partage de la place p_{bus} et est donc asynchrone.

FIG. 4.8: Modélisation de l'agent capteur

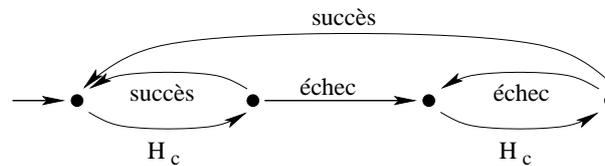
La sémantique des réseaux de Petri synchronisés nous permet de simplifier notablement le modèle en nous affranchissant de la synchronisation précédemment effectuée. Le réseau résultant apparaît figure 4.9 et la partie gérant les états du capteur pourrait être remplacée en lieu et place par le strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net de la figure 4.2 avec les événements correspondants.



Le réseau précédent peut être simplifié car les événements succès et échec seront traités simultanément dans les deux parties du réseau. La mise à jour sera donc bien effective avant de pouvoir lancer une nouvelle activité.

FIG. 4.9: Modélisation simplifiée de l'agent capteur

Un tel réseau est conservatif. En effet, p_{bus} et p_{data} contiennent toujours exactement un jeton alors que le réseau de la figure 4.7 est un graphe d'états donc également conservatif ce qui certifie qu'un capteur ne peut-être que dans un des deux états échec ou succès à la fois. Un réseau conservatif est borné ce qui garantit un graphe des marquages fini. Comme nous sommes intéressés par la modélisation de comportements périodiques, il est important de s'assurer de l'absence de blocage. Le graphe des marquages du réseau présenté figure 4.10 montre que le réseau est vivant donc sans blocage.



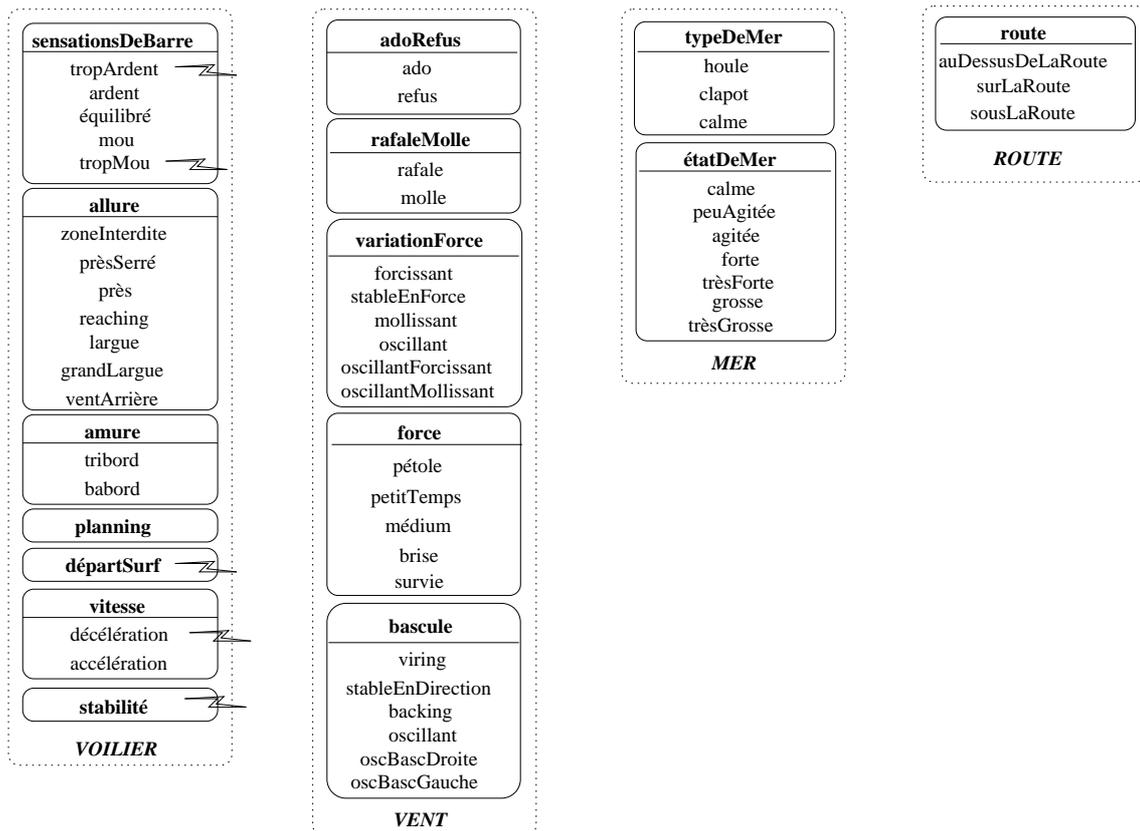
Le graphe des marquages (sans l'étiquetage des sommets) du réseau de la figure 4.9 permet de constater qu'il est vivant donc nécessairement sans blocage.

FIG. 4.10: Graphe des marquages simplifié du réseau capteur

4.3.3 Les agents « concepts »

L'expertise du chapitre 3 a permis de dégager les éléments importants pour la conduite et la prise de décision. Si une perte de vitesse doit être prise en compte par le barreur, il peut être essentiel de savoir si elle est due à un refus ou à une vague. Les agents « concepts » identifient de manière autonome et spécialisée les caractéristiques de l'environnement. Ils sont chargés de traduire en termes métier (rafale, refus, allure ...) les données mises à disposition par les agents capteurs. Nous appelons « concepts » ces termes métier. Ces agents se distinguent par deux types de comportement : il y a ceux qui alertent le barreur en lui envoyant un message et ceux qui sont consultés périodiquement. Le choix de faire une alerte est lié à l'impact sur la performance du bateau. Ainsi, une rafale ne sera pas jugée comme significative si elle n'entraîne pas un ralentissement du bateau. Par contre, la perte de vitesse, un bateau trop ardent ou un départ de surf doivent provoquer une réaction immédiate du barreur. Les agents concepts peuvent s'organiser en groupes en fonction de leurs domaines de compétence. La figure 4.11 présente quatre groupes d'agents concepts (parmi d'autres) portant sur l'image que se fait le barreur de son voilier, de la route qu'il suit, du vent et de la mer qu'il subit. Ainsi, les agents concepts liés à la perception du bateau concernent les sensations de barre, l'allure, l'amure, la vitesse et les aspects spécifiques comme le départ en surf, le planing ou la stabilité.

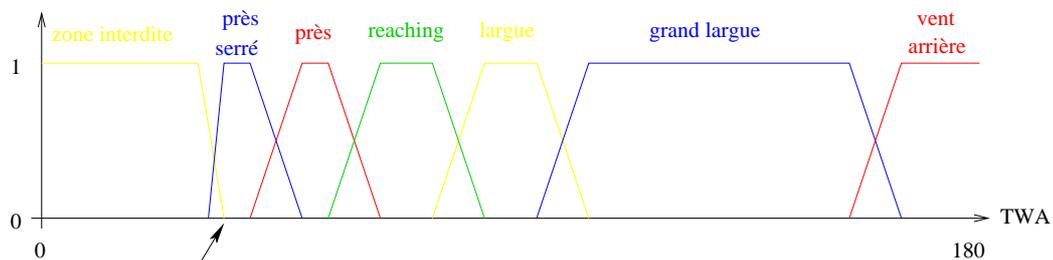
Les agents concepts s'apparentent à des capteurs qui délivreraient des valeurs linguistiques au sens



Chaque agent concept est en charge d'un certain nombre de notions issues du vocabulaire métier du marin qu'on appelle des concepts (qu'on appellerait en logique floue des *valeurs linguistiques*). Un agent concept est représenté ici par une boîte dont le titre en gras est le nom de l'agent. On peut regrouper certains d'entre eux en fonction de leur compétence. On obtient ainsi quatre grands groupes qui concernent le voilier, le vent, la mer et la route suivie. Certains agents concepts délivrent un message d'alerte au barreur. Ces cas sont indiqués ici par un petit éclair.

FIG. 4.11: Quatre groupes d'agents concepts

de la logique floue. Leurs évaluations sont de nature assez diverses mais peuvent être vues comme floues (du fait qu'un ensemble au sens classique du terme peut toujours être vu comme un cas particulier d'ensemble flou). L'agent **allure**, par exemple, combine différentes données pour déterminer une partition floue forte⁷ du domaine de l'angle du vent réel (TWA) qui permet de répondre (de manière floue) à la question de savoir dans quelle allure le bateau évolue (voir la figure 4.12).



Angle fourni par les polaires de vitesse.

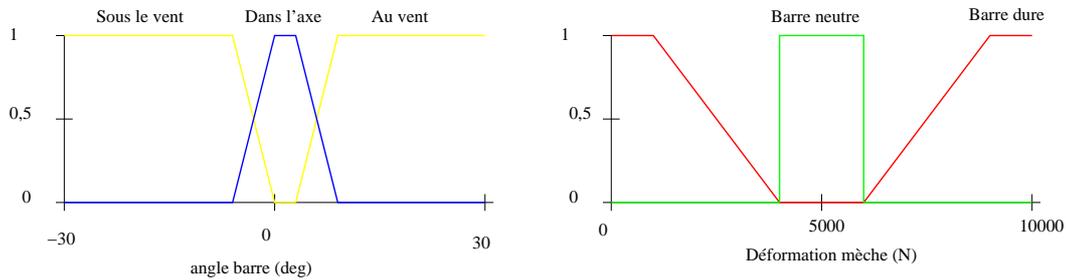
Découpage de l'ensemble des angles de vent réel (de 0° à 180°) en sous-ensembles flous. Le domaine du près serré est centré autour de l'angle optimal de remontée au vent donné par la polaire. La borne gauche du domaine du près dépend de celui du près serré et pour les autres allures les valeurs de TWA sont fixées.

FIG. 4.12: Les allures du voilier vues comme ensembles flous

La détermination de valeurs peut être plus complexe comme pour l'agent **sensationsDeBarre** qui s'appuie sur une combinaison floue de l'angle de barre, et des efforts sur la mèche de safran. La figure 4.13 donnent les sous-ensembles flous représentant les termes linguistiques *sous le vent, dans l'axe,*

⁷ Une partition floue est dite *forte* si la somme des degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous vaut 1.

au vent d'une part et *barre neutre* et *barre dure* d'autre part. Les sous-ensembles flous *trop ardent*, *ardent*, *équilibré*, *mou* et *trop mou* qui décrivent les sensations de barre sont définis via des relations floues faisant intervenir l'angle de barre et les efforts sur la mèche de safran.

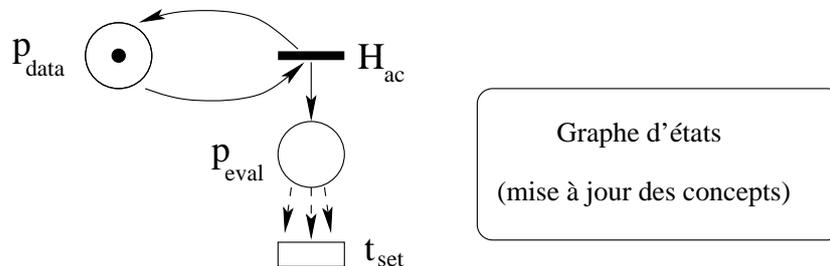


Un marin définira la position de sa barre par rapport à l'axe du bateau, d'autre part il ressentira si la barre est neutre ou dure. L'angle de barre et les efforts sur la mèche sont des moyennes sur plusieurs secondes.

FIG. 4.13: Ensembles flous décrivant la position de la barre et les efforts sur la barre

D'autres valeurs sont basées sur de simples calculs. Ainsi une rafale est vue comme une augmentation d'au moins vingt pour cent de la force du vent sur un intervalle de temps de moins de 5s. De la même façon l'identification du type de mer passe par l'agent *Wind* et utilise la fréquence principale des vagues pour conclure.

Une partie des agents concepts sert à définir l'état dans lequel se trouve le système et à ce titre leur modélisation est importante. Pour cela, au sein d'un agent, les concepts apparaissent à la fois sous la forme d'une valeur floue et sous la forme d'une valeur booléenne (qui sert notamment à l'IHM). Les valeurs booléennes définissent l'état de l'agent et pour cela une et une seule doit être à la valeur vrai. C'est le concept prépondérant (au sens des fonctions d'appartenance) qui est pris comme état de l'agent. Les valeurs floue et booléenne d'un concept cohabitent car sont toutes les deux utiles. Les agents concepts, de manière générale, vont lire un certain nombre de données auprès de capteurs ou d'autres agents, les analyser et mettre à jour leur état comme l'indique la figure 4.14.

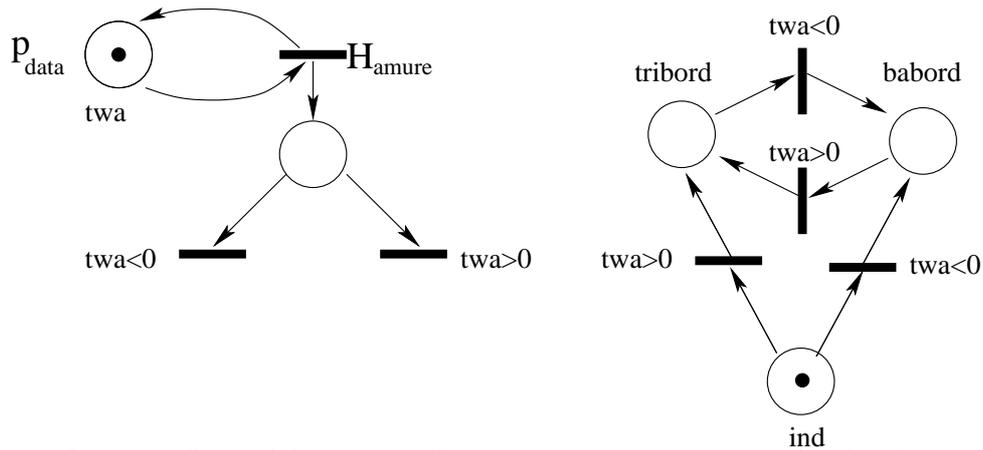


Le top d'horloge H_{ac} d'un agent concept entraîne la lecture des données nécessaires regroupées dans p_{data} . p_{eval} représente la phase d'évaluation des concepts associés à l'agent. La boîte t_{set} contient le mécanisme provoquant la mise à jour des concepts booléens qui représentent l'état de l'agent. Il s'agit tout simplement d'un ensemble de transitions (une pour chaque concept) ayant chacune p_{eval} comme unique place d'entrée. Comme pour le capteur, un graphe d'états avec les transitions étiquetées par les mêmes événements que ceux apparaissant dans t_{set} met à 1 le concept prépondérant.

FIG. 4.14: Modèle générique d'un agent concept

Par exemple, l'agent concept *amure* qui détermine si on se trouve *tribord amure* ou *babord amure* est donné figure 4.15.

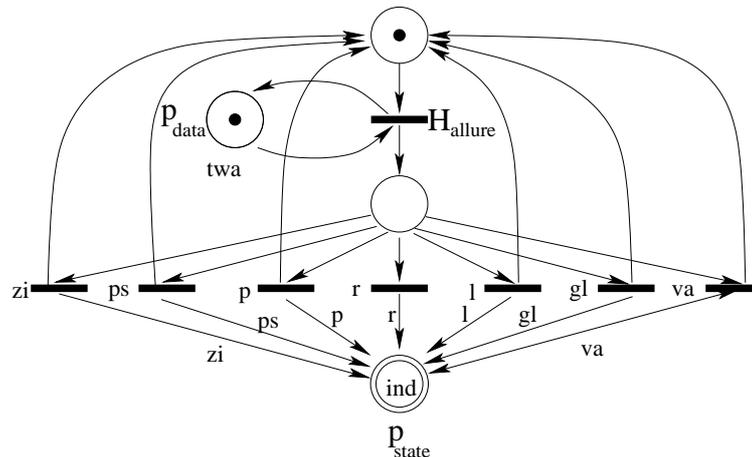
La plupart des agents concepts ont des graphes d'états dont le rôle est d'effectuer de l'écriture, c'est-à-dire d'écraser la valeur précédente par celle qui vient d'être évaluée. Certaines extensions des réseaux de Petri, comme les signal nets [Hanisch 00], proposent des places de haut niveau avec des arcs d'écriture pour modéliser ce mécanisme. Avec les MT-nets nous pouvons en offrir une présentation homogène. Par exemple, la figure 4.16 modélise l'agent concept *allure* chargé de déterminer l'*allure* dans laquelle le bateau évolue. Le graphe d'états se retrouve synchronisé avec le reste du réseau suite à son remplacement par la place p_{state} dont le type permet l'*écriture de données*. Ce type correspond tout simplement à une algèbre munie d'une loi telle que tout élément est absorbant à droite excepté pour un élément neutre (ici *ind*) qui permet de traiter le cas des transitions non graphiquement reliées à la place contenant un marquage de ce type. Les réseaux de ce type présentent deux inconvénients,



Comme pour l'agent générique capteur, l'agent concept **amure** peut se retrouver dans deux états **tribord** ou **babord**. Au départ l'amure est indéterminée ce qui est indiquée par la présence d'un jeton dans la place **ind**.

FIG. 4.15: L'agent concept amure

d'une part aucune transition n'est interdite à partir de n'importe quel état, d'autre part ils ne sont pas réversibles car les valeurs y sont écrasées.

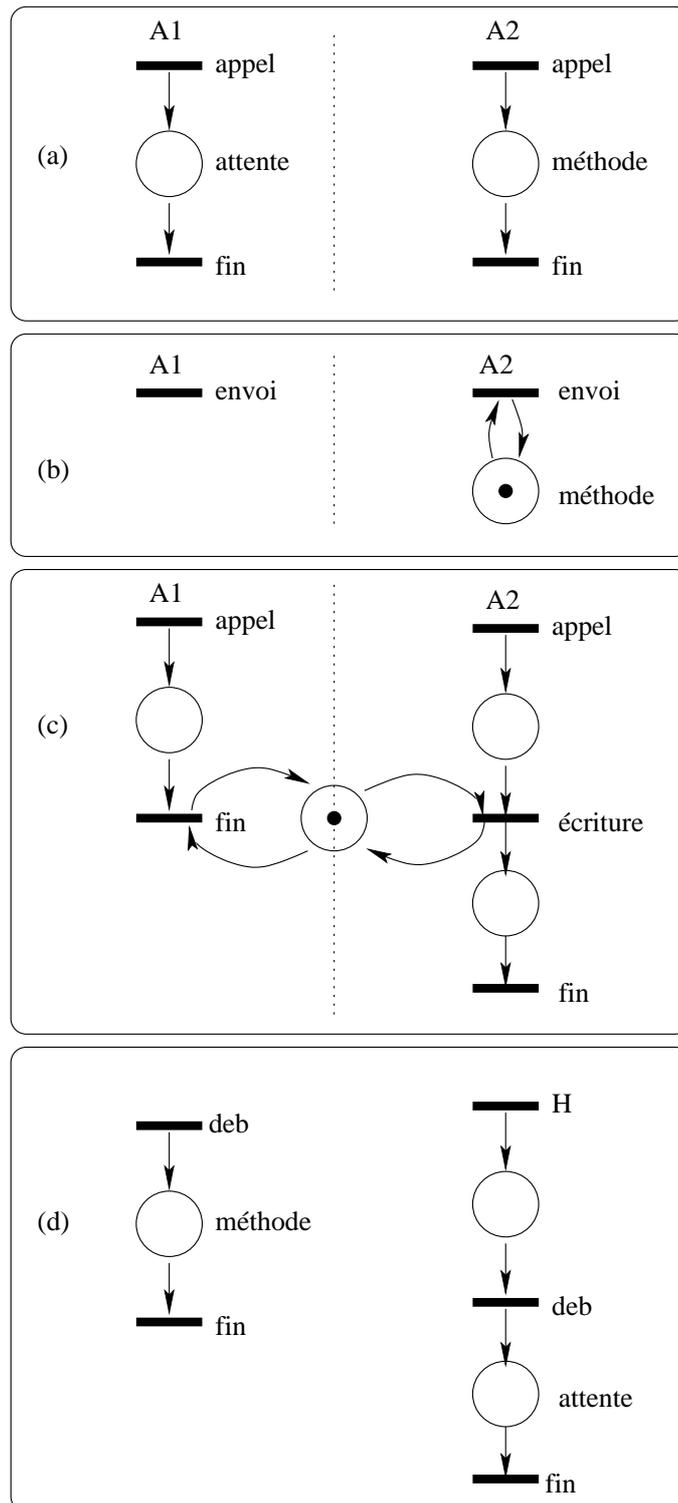


L'agent concept **allure** et les huit états qu'il peut prendre. **va** dénote le vent arrière, **gl** le grand-largue, **l** le largue, **r** le reaching, **p** le près, **ps** le près serré, **zi** la zone interdite (bout au vent) où le bateau ne peut naviguer convenablement, plus un état indéterminé **ind**. Le type de la place p_{state} doit autoriser l'écrasement de la valeur y figurant par les sept allures possibles. Elle est doublement cerclée pour la distinguer des autres. **ind** est également l'élément neutre de l'algèbre sous-jacent de la place p_{state} .

FIG. 4.16: L'agent concept allure

4.3.4 La communication

Un agent concept communique de plusieurs manières avec les autres agents que ce soit par lecture de données, par appel de méthodes ou par message. Dans nos modèles la lecture et parfois l'écriture de données se font par self-loop sur une place contenant un jeton. Les autres modes de communication possibles sont modélisés figure 4.17 et portent sur l'appel de méthode publique avec ou sans retour de valeur ou l'envoi de message pour lequel le destinataire doit réagir. Le dernier exemple explicite comment un agent peut offrir la possibilité à un autre agent, lui compris, de forcer une de ses activités normalement réveillée périodiquement par un top d'horloge.



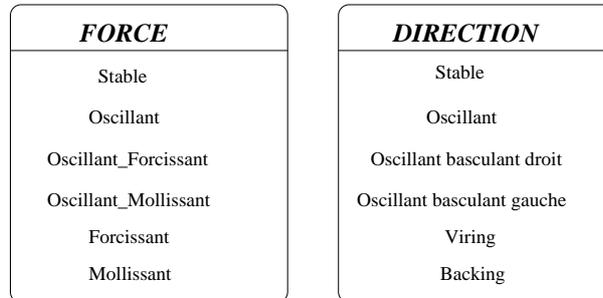
En (a) l'agent A1 fait appel d'une méthode de l'agent A2 s'en en attendre de valeur. Techniquement A1 ne poursuit son exécution qu'une fois la méthode de A2 achevée. `appel` est un événement interne à A1 alors que `fin` est un événement interne à A2. En (b) A1 envoie un message à A2 à la réception duquel il doit réagir. Par contre A1 n'attend pas de réponse. En (c) que ce soit par envoi de message ou par appel de méthode, si A1 attend une réponse, A2 écrit la donnée dans une place puis prévient via l'événement `fin` qu'elle est disponible. L'écriture et la lecture se font ici par self-loop. En (d) pour qu'une activité périodique H puisse être provoquée par message ou par appel on utilise la méthode du (a) en associant une méthode à l'activité qui ne fait alors que l'appeler.

FIG. 4.17: Les différentes manières de communiquer

4.3.5 Les agents Sea, Wind et Polar

Trois agents *Sea*, *Wind* et *Polar* proposent des modèles de la mer, du vent et du voilier au barreur. Les capteurs n'ont pas vocation à fournir des modèles, notamment l'historique des données

qu'ils gèrent est trop courte pour permettre l'identification de certains phénomènes. Les agents **Sea** et **Wind** récupèrent des données capteurs (donc déjà filtrées) à des fréquences d'échantillonnage du double des fréquences⁸ les plus élevées usuellement observées pour les vagues et les variations du vent ayant un intérêt pour le barreur. Typiquement les oscillations de vent durent aux alentours des 5 minutes alors que les clapots les plus courts peuvent donner des périodes relatives (par rapport au bateau) de l'ordre de la seconde. La fréquence de **Sea** est fixée à $2Hz$ alors que celle de **Wind** est de $\frac{1}{60}Hz$. **Wind** travaille directement sur le TWS (force du vent réel) et le TWD (direction du vent réel) pour caractériser son type à la fois en direction et en force (voir figure 4.18).

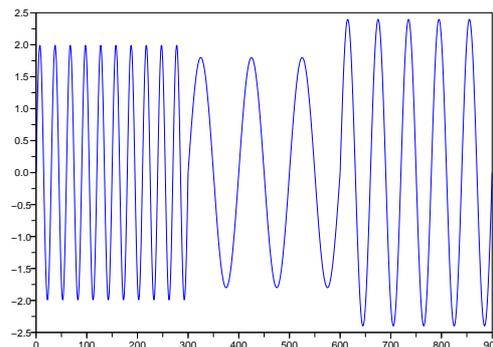


L'agent **Wind** est chargé de déterminer le type de vent que l'on subit sur le plan d'eau.

FIG. 4.18: Les caractéristiques du vent à la fois en force et en direction pour l'agent **Wind**

Les échantillons sont approchés par leur droite de régression linéaire qui permet alors de déterminer la tendance générale, c'est-à-dire le fait que le vent soit stable ou non en direction ou en force. Pour cela une pente trop faible est considérée comme non significative. Ensuite, on calcule la différence entre les échantillons et les points de la droite de régression pour pouvoir effectuer une transformée de Fourier rapide qui donnera la fréquence et l'amplitude principales des oscillations. Généralement le vent tourne et change de force simultanément. **Wind** permettra à terme de construire un modèle de vent pour pouvoir simuler⁹.

L'agent **Sea** détermine le type et l'état de mer en utilisant les données inertielles du bateau. Pour le barreur virtuel la mer est réduite à une sinusoïde dont la fréquence est la fréquence d'amplitude maximale du spectre calculé. La mer vue du barreur à travers les mouvements de son bateau s'apparente donc aux tronçons de sinusoïdes de la figure 4.19 :



L'agent **Sea** effectue périodiquement une transformée de Fourier des accélérations sur l'axe vertical (un calcul de spectre de tangage y est couplé pour distinguer les effets des vagues de ceux du vent et des réglages de voiles). Il se contente de voir la mer comme une sinusoïde dont l'amplitude et la fréquence sont données par la fréquence principale du spectre d'amplitude.

FIG. 4.19: La mer vue du barreur

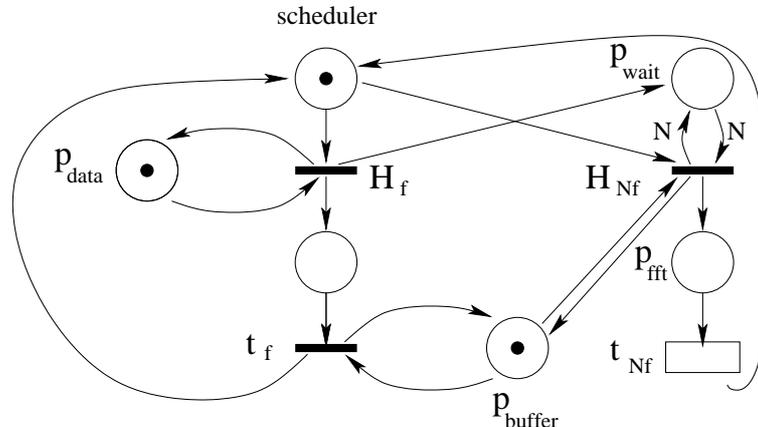
A terme, le but principal de l'agent **Sea** est d'être capable de fournir un modèle de mer pour l'anticipation (voir la section 4.5). Or, pour l'instant, la détermination de la direction des vagues n'est

⁸ Afin de respecter le théorème de Shannon.

⁹ Aujourd'hui, le modèle IPAS ne permet pas de définir des scénarios de vent (il est fixé à la fois en force et en direction via l'interface) et ne tient pas compte des perturbations locales des vagues sur le vent. Ces améliorations sont cependant envisageables et souhaitables pour gagner en réalisme.

pas faite car délicate¹⁰. Une manière simple de procéder est de considérer que les vagues courent dans le sens du vent. Cette approximation se révèle souvent suffisante dans le cas de la houle car il s'agit d'une *mer de vent*.

La figure 4.20 présente un modèle commun aux agents **Wind** et **Sea**. Le réseau est non borné donc non conservatif mais est bien vivant.



Les agents **Sea** et **Wind** ont deux activités déclenchées par les horloges H_f et H_{Nf} . La place p_{wait} (non bornée) assure que N données sont présentes dans le buffer p_{buffer} avant d'autoriser le tir de H_{Nf} . En effet, bien que la fréquence de H_{Nf} soit N fois celle de H_f , l'ordonnancement des tâches par le scheduler peut entraîner des décalages imprévisibles surtout lors de la première évaluation. Ensuite, comme le buffer est circulaire, l'ensemble des données y figurant reste cohérent. Le rectangle blanc est le sous-réseau chargé de la mise à jour du graphe d'états non représenté ici.

FIG. 4.20: Modèle commun aux agents **Sea** et **Wind**

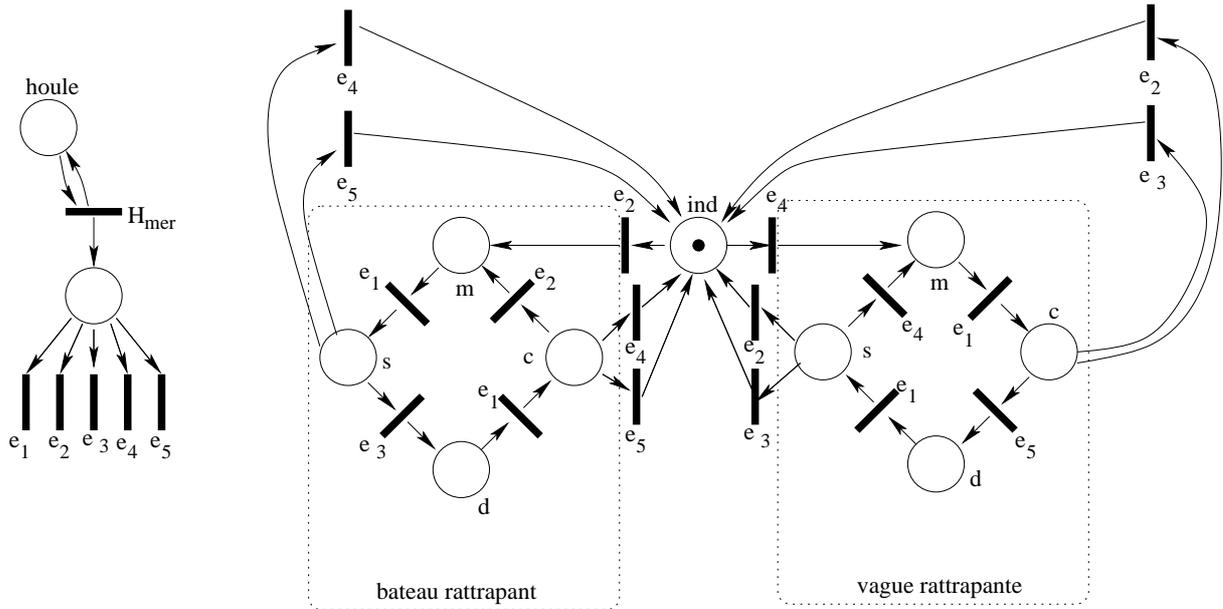
Dans certains cas, comme le départ en surf, pour pouvoir prendre une décision le barreur a besoin d'une information de phase, c'est-à-dire de connaître la situation de son bateau par rapport à la vague qu'il négocie. Physiquement, lorsque le bateau se situe sur la face descendante de la vague il accélère alors qu'il est ralenti dans sa partie ascendante. A l'usage il y a quatre endroits importants dans les vagues : le sommet, le creux, la phase ascendante et la phase descendante (que l'on rattrape la vague ou que l'on descende la vague). Même si on prend pour modèle de mer une simple sinusoïde, le temps de descente et le temps de montée ne sont pas généralement égaux (au portant lors d'un surf le temps de descente peut être très long) et ne sont pas perçus comme tels. Ce qui permet au barreur de se situer par rapport à la vague, ce sont les changements d'attitude du bateau fournis par la centrale inertielle. Un agent concept, appelé **Mer** (non représenté jusqu'ici pour des raisons de simplification), recueille les caractéristiques de la mer issues de l'agent **Sea** en termes métier et se charge de synchroniser la situation du voilier sur la vague par rapport aux données inertielles dans le cas d'une houle. Dans la figure 4.21 on retrouve les quatre états importants sous deux cycles différents possibles en fonction du fait que le bateau rattrape la vague ou non.

Le graphe d'états comporte deux cycles. Des strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets (voir chapitre 7) permettent de les modéliser avec seulement deux places et trois transitions en jouant sur l'alternance des tirs des transitions comme indiqué sur la figure 4.22.

Bien que permettant de diminuer leur taille, les réseaux obtenus ne sont plus du tout naturels. D'une part, le cycle d'ordre 4 n'apparaît plus au premier coup d'œil et, d'autre part, les marquages n'indiquent plus directement l'état dans lequel on se trouve et nécessitent d'être décodés. Leur utilisation dans ce cadre semble donc délicate d'autant qu'il n'existe pas pour l'instant de patron de conception permettant de les synthétiser dans le cas général.

Un agent concept **Vent** réalise le même travail que l'agent **Mer** vis-à-vis du vent et permet au barreur de se situer par rapport aux bascules, de savoir si le vent est en butée à droite ou à gauche ou s'il est entrain de basculer. Son modèle contrairement à celui de l'agent **Mer** est plus simple car un seul des deux cycles est suffisant.

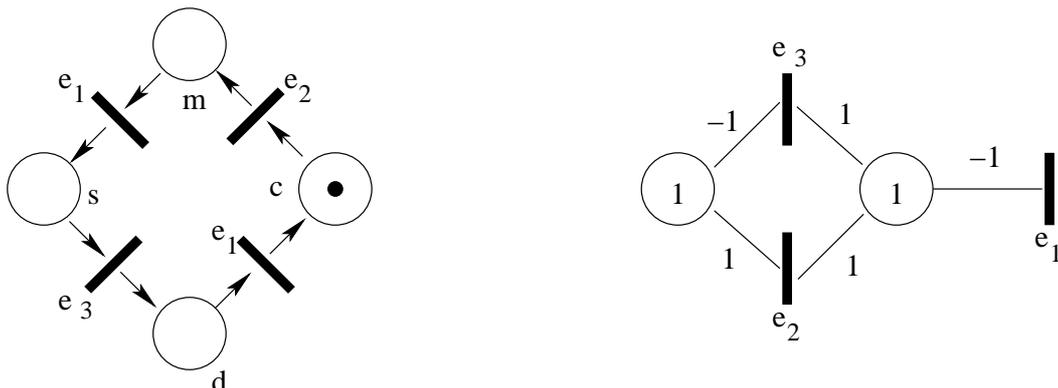
¹⁰ Le problème de savoir reconstruire une mer à partir de données inertielles est très difficile car les vagues prennent des formes assez diverses (cambure, déferlement ...) et la centrale inertielle ne se trouve jamais au centre de gravité du bateau (à cause des réglages d'inclinaison de quille et de ballasts sans compter le matériel mobile).



- e₁ pitch ≈ 0
- e₂ pitch < 0 && daccz < 0
- e₃ pitch > 0 && daccz > 0
- e₄ pitch < 0 && daccz > 0
- e₅ pitch > 0 && daccz < 0
- m montée
- d descente
- s sommet
- c creux

L'agent Mer tente de déterminer comment se situe le bateau par rapport à la vague sur laquelle il évolue. On retrouve les deux parties caractéristiques d'un agent concept avec, à droite, le graphe d'états. Si la présence d'une houle a été repérée par l'agent Sea et qu'un jeton se situe dans la place ind (pour indéterminé), l'agent Mer tente de synchroniser son état avec les informations (assiette longitudinale et dérivée des accélérations sur l'axe vertical) envoyées par la centrale inertielle tout en déterminant si le bateau rattrape la vague ou non. L'état n'évolue que si les informations reçues sont celles attendues. Si elles sont contradictoires, on demande une resynchronisation. Les événements utilisent des valeurs moyennées pour éviter des changements d'états incessants et contradictoires. Le réseau est volontairement incomplet (la lecture des données notamment n'y figure pas). Si la houle disparaît, le jeton du graphe d'états peut se retrouver en dehors de la place ind, il sera alors resynchronisé dès qu'une houle réapparaîtra.

FIG. 4.21: Modèle partiel de l'agent Mer

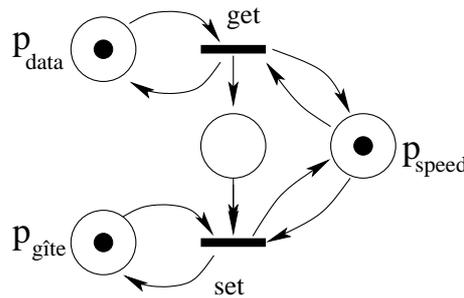


Le réseau de Petri standard à gauche extrait de celui modélisant l'agent Mer et son strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net équivalent à droite. Le marquage (2, 2) (les marques étant lues de gauche à droite sur la représentation graphique) représente l'état m, (2, 1) l'état s, (1, 2) l'état d et (1, 1) l'état c.

FIG. 4.22: Modélisation par strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net d'un des cycles de l'agent Mer

Le modèle du voilier est lui basé sur des polaires de vitesse et de gîte qui sont élaborées et mises à jour par l'agent Polar. Il réagit aux messages de l'agent concept *stability* chargé de repérer les moments où le bateau est en situation d'équilibre, c'est-à-dire les moments où la vitesse est censée être maximale. La mise à jour de la polaire est effectuée si la vitesse observée est supérieure à celle donnée par la polaire, la gîte est alors actualisée. Le comportement de l'agent Polar est donné figure

4.23 (où la polaire de gîte est réduite à une place), la transition `get` est synchronisée avec celle qui lui correspond dans l'agent `stability`.



L'agent concept `stability` active par l'envoi du message `get` la mise à jour des polaires. La mise à jour de la polaire de gîte se fait avec celle de vitesse.

FIG. 4.23: Modèle de comportement de l'agent polar

4.3.6 L'IHM

L'IHM est présentée en détail au chapitre 5. Sa partie commande directement accessible est semblable à celle proposée par les pilotes commerciaux. Un bouton `Start/Stop` lance le pilote avec comme consigne de cap le cap courant. Des boutons ± 1 et ± 10 permettent de modifier cette consigne. Nous considérons que le pilote doit effectuer avant tout un suivi de cap et que ce cap est donné par l'interface. Il n'est pas possible à l'utilisateur de spécifier par exemple une consigne d'angle de vent réel, c'est le pilote lui-même qui prendra la décision de faire du suivi de vent ou non. La mise à jour de la consigne force le pilote à reboucler sur son état initial (voir la section 4.4).

La section suivante est spécifiquement consacrée au barreur.

4.4 Le barreur

4.4.1 Architecture générale du barreur

Les premières architectures dédiées à la commande de robot à la fin des années soixante [Nilsson 69] s'inspirent de travaux en intelligence artificielle (IA) et sont généralement qualifiées de délibératives car elles cherchent à s'approcher du raisonnement humain. Elles fonctionnent selon une boucle Perception-Planification-Action et le traitement des données y est séquentiel. Un modèle global du monde est disponible, il peut être figé comme pour le robot Shakey [Nilsson 84], ou tenir compte de modifications dynamiques comme dans les architectures centralisées de type Blackboard [Hayes-Roth 85] ou TCA développée par Simmons [Lin 89]. De telles architectures sont souvent hiérarchisées à l'image de l'architecture NASREM [Albus 87] avec ces modules de planification, de modélisation du monde et de perception et sont dites délibératives/hiérarchiques. Dans la pratique elles se révèlent inadaptées à la robotique autonome, au sein d'un environnement en perpétuel évolution, par manque de réactivité, d'adaptabilité et de flexibilité car elles impliquent souvent de lourds calculs.

Des architectures dites réactives virent le jour dans les années quatre-vingt. Elles mettent en avant l'idée que de la somme de comportements élémentaires du type Perception-Action peut émerger un comportement complexe voire intelligent. La possibilité d'avoir plusieurs comportements concurrents oblige à opérer une sélection. La Subsumption Architecture de Brooks [Brooks 86] en hiérarchisant les comportements va permettre par inhibitions/suppressions une telle sélection. Cependant dans ces architectures, l'absence de planification peut mener à un comportement chaotique, et, l'absence de mémoire empêche la reconnaissance d'erreurs.

Les architectures les plus développées aujourd’hui sont des architectures hybrides à la fois délibératives et réactives qui tentent de conjuguer les avantages des deux approches. Les architectures hybrides sont généralement des architectures à « couches ». Ainsi ATLANTIS de Gat [Gat 91] comporte trois couches, la couche de contrôle, la couche de séquençement et la couche délibérative. Ces trois couches fonctionnent de manière asynchrone à des fréquences d’autant plus élevées qu’elles effectuent des tâches de plus grande abstraction, principe que l’on retrouve dans l’architecture Soar de Newell [Newell 90]. Un exemple typique d’architecture hybride demeure 3T [Bonasso 97] qui comprend un niveau fonctionnel, un niveau exécutif et un niveau délibératif. Mais dans les architectures hybrides on trouve également des systèmes multi-agents telle IDEA [Muscettola 02] qui dote chaque agent de capacités à la fois délibératives et réactives grâce à un ensemble de contraintes et de compatibilités permettant de spécifier les évolutions possibles de leurs états.

L’architecture que nous proposons pour le barreur d’un voilier est plutôt du type hybride car elle contient en son sein, entre autres, une partie réactive et une partie délibérative. En effet, au sens objet du terme, le barreur est vu comme l’agrégat de trois barreurs dits *réactif*, *expert* et *adaptatif* qui coopèrent en parallèle comme cela est illustré figure 4.24.

Le barreur réactif est chargé de la réponse temps réel à imprimer à la barre face aux sollicitations extérieures. Il fonctionne à une fréquence relativement élevée ($10Hz$) proche de celle des capteurs dont il exploite les données ce qui lui assure une certaine réactivité. L’agent expert s’occupe des variations locales de son environnement c’est-à-dire de phénomènes identifiables sur des intervalles de temps de quelques secondes tels une refusante, une rafale, une brusque décélération ou encore un départ au lof. Son activité cyclique consiste à surveiller un certain nombre de variables, à évaluer le contexte dans lequel il se trouve et à changer éventuellement d’état. Cette activité peut être forcée sur l’occurrence de messages envoyés par des agents concepts ou le barreur réactif. A chaque état est associé un mode de barre mis en œuvre par le barreur réactif. Cet agent prend donc en charge l’aspect délibératif de l’expertise. L’agent adaptatif se charge des phénomènes identifiables sur plusieurs minutes tels les bascules, les écarts moyens à la route ou les changements d’états de mer. Il gère les réglages généraux des modes de barre tel le gain et les consignes internes (non visibles du skipper). Sa fréquence plutôt basse ($0.1Hz$) permet d’éviter une relative instabilité inhérente à l’adaptation incessante des paramètres de pilotage.

Bien que chacun des trois barreurs réponde à des exigences d’horizons distincts (court terme, moyen terme et long terme pour simplifier) il ne s’agit nullement d’une architecture hiérarchique. En effet, ces trois agents – réactif, expert et adaptatif – fonctionnent de manière asynchrone et interagissent deux à deux directement sans avoir nécessairement à transiter par un tiers. Cela assure une certaine robustesse : le barreur réactif contrôlant la direction du voilier est toujours en action, selon sa propre autonomie.

Les sous-sections suivantes décrivent en détail chacun des agrégés constitutifs du barreur.

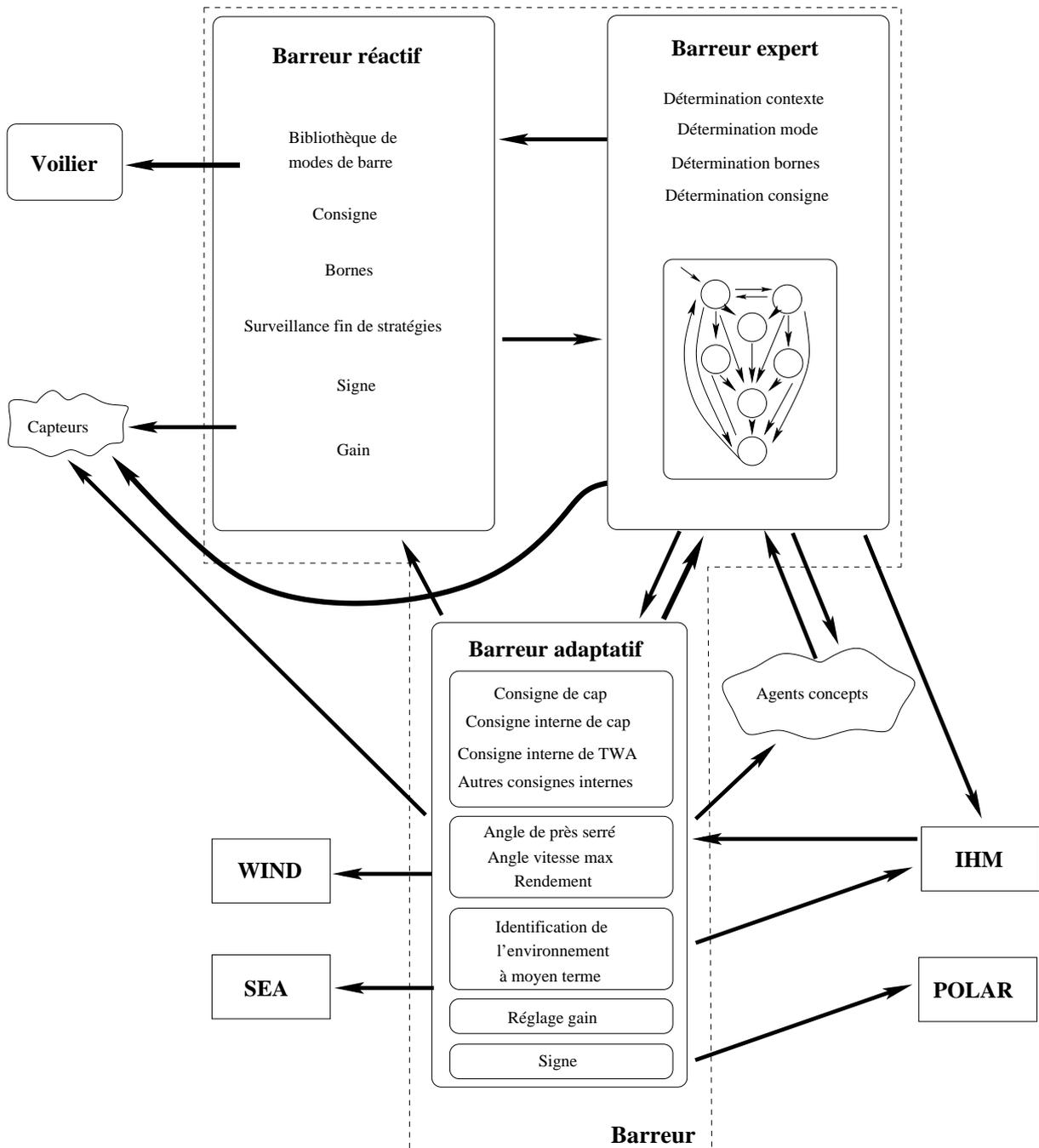
4.4.2 Le barreur réactif

La figure 4.25 détaille cet agent et ses relations avec les autres agents du pilote virtuel.

L’agent réactif a pour tâche l’action temps réel sur la barre et dispose pour cela d’une bibliothèque de lois de commandes. Nous avons fait le choix de régulations de type PID dont les coefficients ont été validés par expérience (voir le chapitre 5) pour leur popularité dans l’industrie et parce qu’il s’agit d’une solution déjà largement éprouvée dans le cadre des pilotes automatiques pour voiliers. Cette structuration autorise aisément un autre choix de lois de commande. En particulier de la commande sans modèle [Fliess 09] a été envisagée en collaboration avec Emmanuel Delaleau [Gédouin 08] de l’ENIB¹¹. A l’image des pilotes commerciaux, nous appellerons ces PID des *modes* de barre (voir figure 4.26). Il s’agit des modes *cap*, *cap relatif*, *vent réel*, *gîte*, *gîte relatif* et *gain*. C’est le barreur expert qui décide du mode de barre, on dira alors que le barreur réactif agit selon le mode sélectionné.

Le mode *cap* est une régulation de type PDD qui tient compte du roulis à cause de son importance

¹¹ Ecole Nationale d’Ingénieurs de Brest.



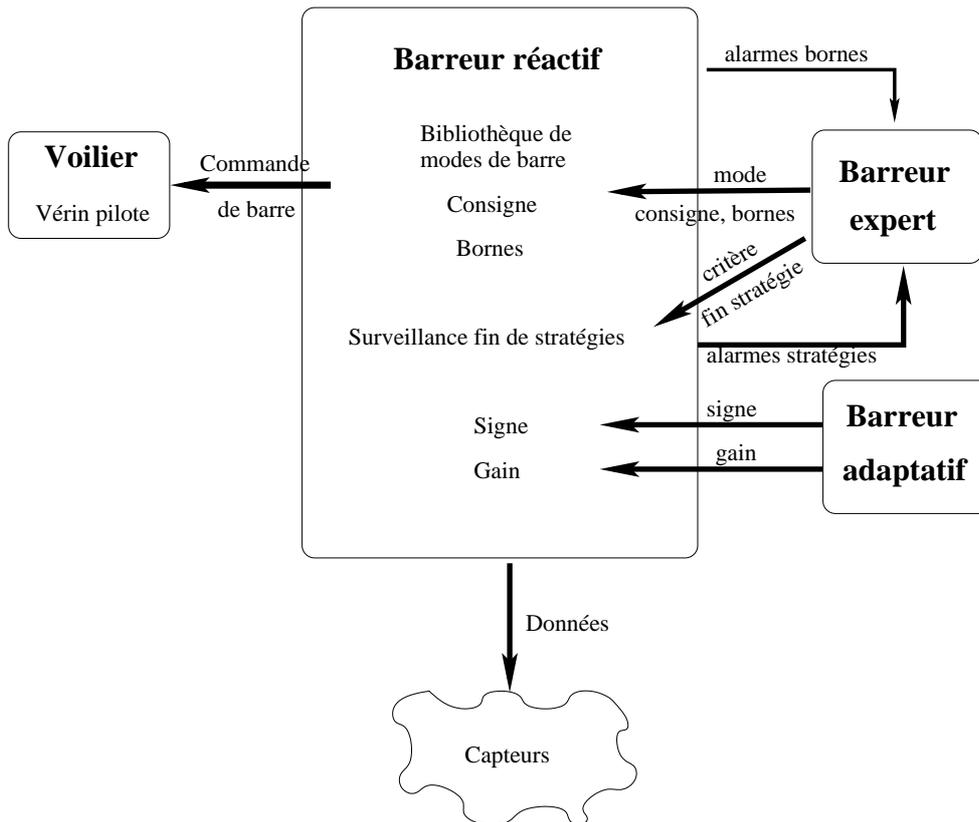
Le barreur (entouré en tireté) se compose de trois barreurs dits réactifs, expert et adaptatif. L'agent réactif s'occupe du court terme et sa fréquence est relativement élevée ($10Hz$). L'agent expert détermine toutes les secondes le contexte dans lequel il évolue, sélectionne un mode de barre qu'il demande au barreur réactif d'appliquer. Il peut également réagir aux alarmes diffusés par certains agents concepts ou par le barreur réactif en changeant d'état. Le barreur adaptatif gère les variations lentes de l'environnement telles les bascules ou le changement d'état de mer et met à jour un certain nombre de données utiles pour barrer en s'aidant notamment des polaires. Sa fréquence est plutôt basse ($0.1Hz$). Les flèches indiquent quelques unes des communications possibles entre agents qu'il s'agisse d'envois de messages, d'appels de méthodes, de lectures ou d'écritures de données.

FIG. 4.24: Architecture générale du barreur

pour l'anticipation :

$$\theta_{barre} = K_c(K_{cap}(cap - consCap_i) + K_{lacet}lacet + am.K_{roulisroulis})$$

K_{cap} , K_{lacet} et K_{roulis} sont fixés alors que le gain K_c est ajusté en fonction de l'environnement par le barreur adaptatif. Le terme am devant K_{roulis} vaut ± 1 en fonction de l'amure du bateau. L'option (prise notamment par la société **nke**) de corriger de manière inversement proportionnelle à la vitesse a



Le barreur réactif récupère les données capteurs pour déterminer la commande d'angle de barre à envoyer au vérin du voilier. Les lois de commande apparaissent sous la forme d'une bibliothèque de modes de barre et sont sélectionnées par le barreur expert. Le barreur adaptatif, lui, gère des paramètres généraux de ces lois. Les flèches indiquent des messages ou requêtes.

FIG. 4.25: Le barreur réactif

MODES DE BARRE
Mode cap :
$\theta_{barre} = K_c(K_{cap}(cap - consCap_i) + K_{lacet}lacet + am.K_{roulis}roulis)$
Mode cap relatif :
$\theta_{barre} = K_c(K_{cap}(cap - consCap_i) + K_{lacet}lacet + am.K_{roulis}roulis) + \theta_{reel}$
Mode vent réel :
$\theta_{barre} = K_{vr}(K_{TWA}(TWA - consTWA_i) + K_{lacet}lacet + am.K_{roulis}roulis)$
Mode gîte :
$\theta_{barre} = sgn.K_g(K_{gite}(gite - consGite_i) + am.K_{roulis}roulis + K_{sb}(sensabarre - consSB_i) + K_{dsb}(\frac{dsensabarre}{dt}))$
Mode gîte relatif :
$\theta_{barre} = sgn.K_{gr}(K_{gite}(gite - consGite_i) + am.K_{roulis}roulis + K_{sb}(sensabarre - consSB_i) + K_{dsb}(\frac{dsensabarre}{dt})) + \theta_{reel}$
Mode gain :
$\theta_{barre} = -K_{gr}(K_{gite}(gite - consGite_i) + am.K_{roulis}roulis + K_{sb}(sensabarre - consSB_i) + K_{dsb}(\frac{dsensabarre}{dt})) + \theta_{reel}$

FIG. 4.26: Les différents modes de barre de la bibliothèque du barreur réactif

été abandonnée à cause d'une part de certaines situations critiques qu'elle entraîne (voir le chapitre 3) et, d'autre part, à cause du fait que les coureurs gommant partiellement cette correction en augmentant habituellement le gain à mesure que la vitesse du bateau augmente. Il s'agit donc d'une régulation PDD sans terme intégral qui entraînera généralement une erreur statique de quelques degrés. Cette erreur statique est gérée indépendamment du barreur réactif par le barreur adaptatif via la consigne interne de cap $consCap_i$ qui peut être différente de celle exigée par le skipper. La disparition du terme intégral permet ainsi d'éviter les dépassements de consignes constatés lors de modifications brutales des conditions de navigation car alors la consigne initiale est reprise.

Le mode *cap relatif* reprend le mode cap en effectuant la correction relativement à l'angle de barre

mesuré :

$$\theta_{barre} = K_c(K_{cap}(cap - consCap_i) + K_{lacet}lacet + am.K_{roulis}roulis) + \theta_{reel}$$

La robustesse du mode cap étant en pratique largement éprouvée, le mode vent réel utilise la même formule ($K_{vr} = K_c$ et $K_{TWA} = K_{cap}$ dans 4.26) avec une consigne d'angle au vent réel à la place d'une consigne de cap et le TWA à la place du cap. Ce choix permet de s'appuyer sur une régulation robuste tout en facilitant le passage d'un mode à l'autre. Le mode vent réel a été préféré à celui de vent apparent à cause des risques que présente ce dernier vis-à-vis des voiliers capables de fortes accélérations.

Le mode gîte est régulé de la manière suivante :

$$\theta_{barre} = sgn.K_g(K_{gite}(gite - consGite_i) + am.K_{roulis}roulis + K_{sb}(sensabarre - consSB_i) + K_{dsb}(\frac{dsensabarre}{dt}))$$

c'est-à-dire qu'il fait intervenir la gîte et le roulis mais également les sensations de barre et ses variations. sgn vaut ± 1 en fonction de la polaire (angle de vitesse max évaluée périodiquement par le barreur adaptatif). Les consignes sont des consignes dites internes car évaluées par le barreur adaptatif et non fixées par un opérateur humain.

Le mode gîte relatif reprend le mode gîte mais relativement à l'angle de barre réel θ_{reel} :

$$\theta_{barre} = sgn.K_{gr}(K_{gite}(gite - consGite_i) + am.K_{roulis}roulis + K_{sb}(sensabarre - consSB_i) + K_{dsb}(\frac{dsensabarre}{dt})) + \theta_{reel}$$

Le mode gain sert exclusivement pour les départs en surf. Il s'agit d'un mode gîte relatif dans lequel on force l'abattée pour profiter de l'énergie de la vague :

$$\theta_{barre} = -K_{gr}(K_{gite}(gite - consGite_i) + am.K_{roulis}roulis + K_{sb}(sensabarre - consSB_i) + K_{dsb}(\frac{dsensabarre}{dt})) + \theta_{reel}$$

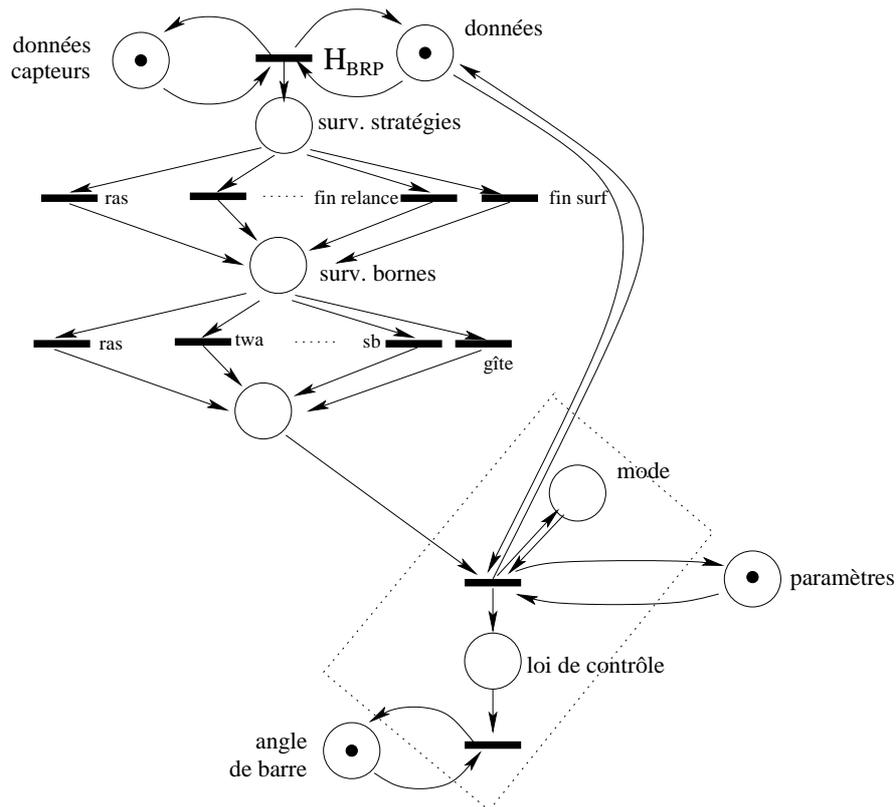
Ces lois de commande servent au calcul de l'angle de barre absolu (par rapport à l'axe du bateau) qui est ensuite directement transmis au voilier par UDP.

A chaque loi de commande est associé un ensemble de bornes sensées assurer une utilisation robuste de la loi. Il s'agit de fourchettes de valeurs à ne pas dépasser (typiquement de bornes de gîte pour le mode gîte, de bornes d'angle au vent réel pour le vent réel ...), dans le cas contraire le barreur réactif prévient par message le barreur expert qui peut alors décider d'un changement de mode.

D'autre part, le barreur expert charge le barreur réactif de surveiller la terminaison de certaines stratégies sous la forme d'un prédicat à vérifier portant sur un ensemble de valeurs délivrées par des capteurs. Par exemple, un surf est considéré comme fini lorsque le bateau commence à décélérer. Ceci permet d'être plus réactif car la fréquence du barreur réactif est plus élevée que celle du barreur expert.

Le barreur réactif obéit donc à une boucle perception/décision/action à une fréquence de 10Hz.

La figure 4.27 propose un modèle simplifié du barreur réactif à l'aide d'un réseau de Petri. Dans ce modèle les communications avec le barreur expert se font par envoi de messages et sont donc modélisées par la synchronisation des transitions correspondantes par un même événement. C'est le cas des transitions liées à la surveillance de stratégies ou à la surveillance des bornes qui doivent entraîner une réaction du barreur expert.



Le barreur réactif commence par récupérer l'ensemble des données nécessaires auprès des capteurs qui vont lui permettre d'appliquer la loi de commande en cours. Il surveille le bon déroulement des stratégies s'il y a lieu de le faire (la transition **ras** gère les cas où il n'y a rien à signaler au barreur expert), teste les bornes et alerte le barreur expert si besoin est. Le calcul de l'angle de barre termine le cycle du barreur réactif. La partie commande est encadrée en pointillés car se répète autant de fois qu'il y a de modes différents.

FIG. 4.27: Modèle simplifié du barreur réactif

4.4.3 Le barreur expert

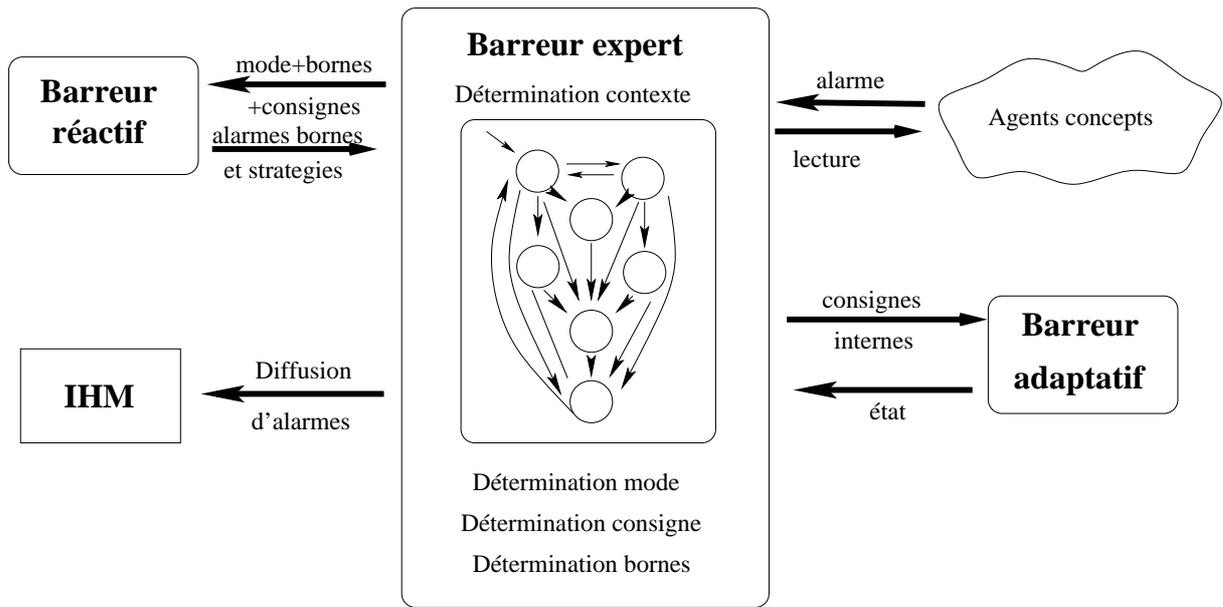
4.4.3.1 Présentation globale

Le barreur expert joue un rôle de contrôleur vis-à-vis du barreur réactif. C'est lui qui détermine le mode de barre à employer et il s'appuie pour cela sur l'expertise réalisée. L'agent expert s'inscrit sur du moyen terme par rapport aux agents réactif et adaptatif. Il se concentre sur les phénomènes détectables en quelques secondes du type adonnante, rafale, perte de vitesse ou encore bateau devenant très ardent. La figure 4.28 présente ses principales fonctions vis-à-vis des autres barreurs.

Le rôle du barreur expert est de déterminer le contexte dans lequel il se trouve pour choisir le mode de barre adapté et l'imposer au barreur réactif. L'évaluation du contexte est périodique (activité de l'agent) ou provoquée par des alarmes envoyées par l'agent réactif ou les agents concepts. Un changement de contexte entraîne généralement un changement de mode accompagné de ses consignes ainsi que de bornes assurant une utilisation robuste du nouveau mode de barre. Les nouvelles consignes peuvent provenir de consignes internes évaluées par le barreur adaptatif.

4.4.3.2 Evaluation des bornes

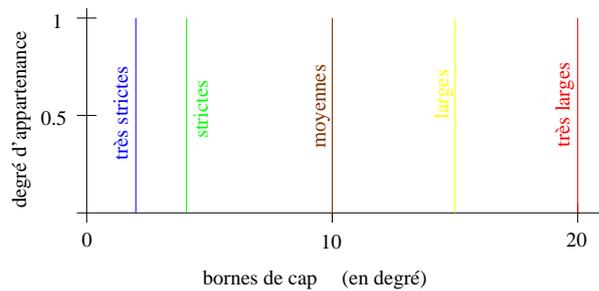
Les bornes qui accompagnent les modes de barre sont des paires ordonnées de valeurs entre lesquelles doivent se maintenir chacune des variables sensorimotrices associées. Leurs déterminations sont de nature très variables et liées au contexte. Il peut s'agir de valeurs prédéterminées ou obtenues grâce à des systèmes d'inférences flous de type Mandani [Mandani 74]. Dans ce dernier cas, les entrées sont de type trapézoïdales et les variables de sorties sont des singletons. La défuzzification passe par



Le barreur expert détermine le contexte dans lequel il se trouve pour décider du mode de barre à exiger du barreur réactif avec ses consignes et ses bornes. Pour cela, il s'appuie sur le barreur réactif, le barreur adaptatif et les agents concepts.

FIG. 4.28: Le barreur expert

la méthode des centres de gravité des singletons (CoGS). La figure 4.29 présente le cas du cap où la variable floue bornes de cap peut prendre cinq valeurs.



La variable floue bornes de cap (en degrés de part et d'autre de la consigne interne) peut prendre les cinq valeurs très strictes, strictes, moyennes, larges ou très larges.

FIG. 4.29: Les ensembles flous pour la variable bornes de cap

Le tableau 4.30 présente, dans le cas d'un suivi de vent, les paramètres concrets des règles qui sont toutes de la forme

SI allure EST x ET force du vent EST y
ALORS bornes de cap EST z

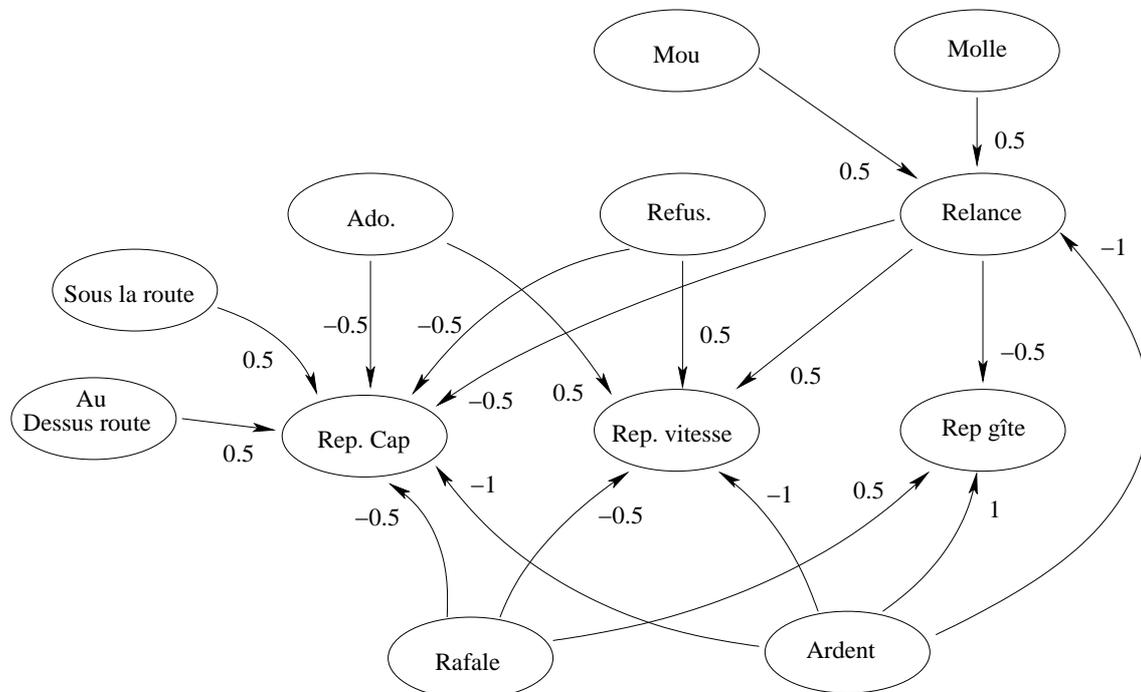
	Pétole	Petit temps	Médium	Brise	Survie
Près serré	moyennes	larges	larges	larges	très larges
Près	moyennes	larges	larges	larges	très larges
Reaching	très strictes	strictes	strictes	strictes	larges
Largue	très strictes	strictes	strictes	strictes	larges
Grand Largue	moyennes	larges	larges	larges	très larges
Vent arrière	strictes	très larges	très larges	très larges	très larges

FIG. 4.30: Règles floues

Le barreur réactif veille au maintien des variables dans les bornes spécifiées et alerte le barreur expert dès qu'un dépassement est repéré.

4.4.3.3 Le comportement du barreur expert

Dans un premier temps [Guillou 07], pour contrôler le comportement du barreur expert, nous avons choisi d'utiliser des graphes cognitifs flous (GCFs)[Tolman 48, Kosko 86] car ils peuvent être vus comme des réseaux sémantiques permettant de retranscrire de manière simple et intuitive un comportement complexe ce qui leurs confère un intérêt certain par rapport aux réseaux de neurones par exemple qui sont de nature essentiellement statistique.



Exemple de traduction d'expertise par un graphe cognitif flou. Les sommets sont des concepts et les arcs portent les poids de ces concepts. Ainsi une molle incite à la relance alors qu'avoir un bateau ardent inhibe cette même relance pour favoriser une attention particulière à la gîte du voilier.

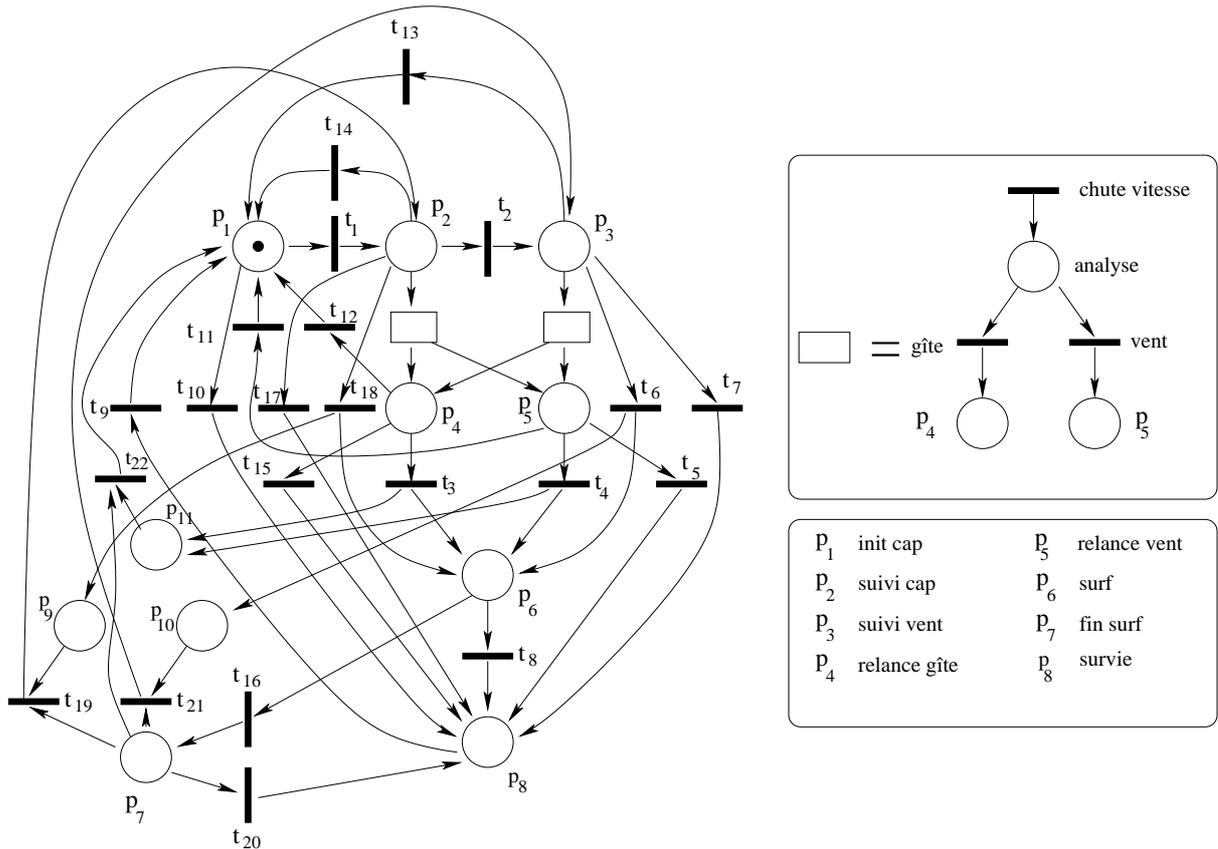
FIG. 4.31: Modèle de barre à l'allure de près

Les GCFs sont des graphes orientés dont les noeuds sont des concepts (d'où le nom d'*agent concept*) et les arcs des liens d'influence entre ces concepts. La figure 4.31 présente un modèle de la technique « barrer au près ». Dans ce but, on associe les sommets de tels graphes aux concepts permettant de définir un contexte dégagés lors de l'expertise. Cette dernière va permettre également de dégager des relations d'excitation ou d'inhibition entre concepts et de définir ainsi une matrice des liens.

La dynamique du graphe permet, via la matrice des liens, d'évaluer les valeurs de concepts qui par défuzzification vont conduire à prendre une décision sur le mode de barre à utiliser. Cette approche a déjà été employée avec succès pour décrire le comportement perceptif d'acteurs virtuels autonomes [Parenthoën 05] et autorise à faire de l'apprentissage sur le poids des arcs. Cependant, dans le cadre de notre application, elle s'est avérée délicate à manipuler. D'une part le poids des arcs est difficile à évaluer et influence grandement la dynamique du graphe. D'autres part les valeurs calculées ne convergent pas forcément et peuvent avoir par exemple des comportements cycliques. Dans ce dernier cas le nombre d'itérations conditionne directement le résultat final sans que l'on puisse raisonnablement choisir.

L'expertise étant relativement directive, nous avons finalement préféré contrôler le barreur expert par un graphe d'états dont une représentation simplifiée est donnée figure 4.32 (il s'agit d'un graphe d'états si on exclut les places p_9 , p_{10} et p_{11} qui ne servent qu'à mémoriser l'état précédent un départ au surf).

A chaque état est associé un mode de barre avec ses bornes qui dépendent du contexte et ses consignes. La structure du réseau est basée sur le fait que le mode cap est un mode robuste et sûr. Ainsi le barreur expert est censé demeurer la plupart du temps dans les états *suivi cap* et *suivi vent*



Les états sont matérialisés par les places p_1 à p_8 . L'état **init cap** est chargé de la mise à jour de consignes dites internes. Les états **suivi de cap** et **suivi de vent** gèrent la commande de barre lorsque tout va bien. **relance gîte** et **relance vent** prennent le relai lorsque l'on constate une chute de vitesse importante. **surf** est chargé des départs en survitesse alors que **survie** intervient dès que le bateau devient trop ardent ou trop mou. Chacune des transitions peut-être raffinée en y ajoutant une phase de calcul de bornes et certaines sont étiquetées par des événements émis par le barreur réactif ou par des agents concepts.

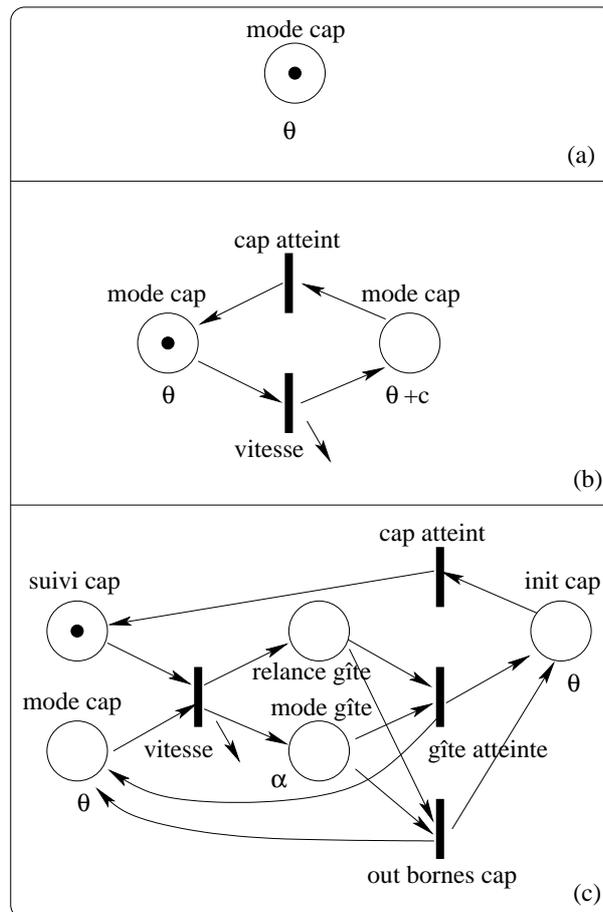
FIG. 4.32: Contrôle des modes de barre par le barreur expert

qui sont associés aux modes **cap** et **vent réel** (qui est une variante du mode **cap**). L'état **init cap** sert d'état initial à chaque fois que l'on spécifie une nouvelle consigne via l'IHM ou que l'on doit reprendre la consigne initiale après l'avoir abandonnée pour répondre à des événements et est chargé de déterminer les consignes internes qui seront par la suite affinées par le barreur adaptatif à condition que l'on soit dans l'état **suivi cap** ou l'état **suivi vent**. Notre pilote étant axé sur la performance, nous sommes attentifs aux baisses de vitesse (la référence étant la consigne interne de vitesse, évaluée sur du plus ou moins long terme en fonction de l'état de la mer par le barreur adaptatif) qui mènent aux états **relance gîte** ou **relance vent** respectivement liés aux modes **gîte** et **vent réel**. La possibilité d'un départ en surf (signalée par agent concept) fait passer dans l'état **surf** sauf si on est dans l'état **fin surf**, **survie** ou **init cap**. L'état **survie** intervient lorsque le bateau devient trop ardent ou trop mou (cas signalés par l'agent concept en charge des sensations de barre) et est prioritaire car censé préserver l'intégrité du bateau.

4.4.3.4 Les stratégies

Si l'événement **vitesse chute** survient (envoyé par un agent concept dont c'est le rôle), le barreur expert tente de déterminer s'il est la cause d'une bascule de vent, d'une variation de la force du vent ou encore d'un choc dans une vague (il détermine le contexte) car alors la stratégie à appliquer n'est pas la même. Une stratégie débute dès que l'on quitte un des deux états stables **suivi cap** ou **suivi vent**. Nous posons qu'une stratégie peut être définie et contrôlée par une séquence de tir dans le réseau de Petri contrôlant les états du barreur expert. Cette approche permet de décrire une stratégie comme une séquence de postures sensorimotrices que l'on cherche à atteindre plutôt que comme une séquence de consignes de cap qui ne correspond guère à ce que cherche à faire un barreur humain comme

l'illustre la figure 4.33 sur l'exemple d'une relance due à une vague ou à une variation de la force du vent.



Comparaison des stratégies employées lors d'une chute de vitesse due à une vague ou à une variation de la force du vent (molle ou rafale). (a) modélise le comportement d'un pilote commercial classique en mode cap : pas de modification de consigne (la consigne θ est indiquée sous la place), le pilote reste impassible, il ne relance pas. (b) présente le cas des pilotes commerciaux améliorés avec relance : la chute de vitesse est repérée et traitée par une abattée dont l'angle c est tabulé, la consigne passe de θ à $\theta + c$ et lorsque le nouveau cap est atteint le pilote reprend la consigne initiale θ . Si la chute de vitesse est due à une vague ou pire à une rafale, le braquage des voiles sera trop important et risque de conduire le bateau à se coucher. (c) donne une vue simplifiée du comportement de notre pilote. Quand la chute de vitesse intervient, le barreur expert passe en mode **relance gîte** et synchronise le passage en mode **gîte** du barreur réactif avec comme consigne de gîte, la consigne interne de gîte α . Il essaie ainsi de relancer le bateau sans risquer de le vautrer tout en effectuant un écart à la route non constant mais qui correspond à ce dont on a besoin pour retrouver la gîte initiale et, avec un peu de chance, la vitesse initiale. Si le vent a trop mollifié et que la consigne de gîte n'est plus accessible, les bornes de cap seront dépassées et le barreur expert basculera dans l'état **init cap** avec la consigne initiale de cap et reprendra de nouvelles consignes internes qui tiennent compte de cette modification de l'environnement. Sinon, une fois la consigne de gîte atteinte il passe également dans l'état **init cap**. En effet, un retour direct dans l'état **suivi cap** présente le risque de se trouver en dehors des bornes de cap si la relance a été importante. Si le bateau parvient à stabiliser son cap autour de la consigne, le barreur expert repassera alors dans l'état **suivi cap**.

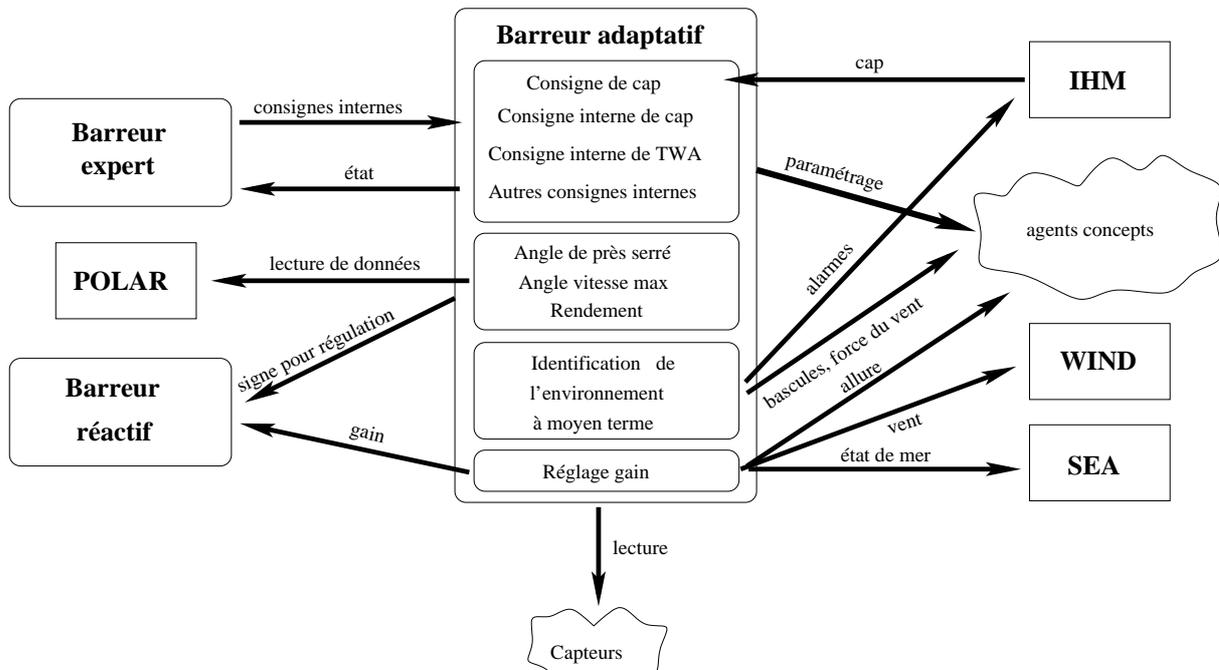
FIG. 4.33: Comparaison des stratégies pour différents pilotes

Lors d'une stratégie, à chaque changement d'état, le barreur expert fournit des critères au barreur réactif qui, lorsqu'ils sont atteints, déterminent le passage dans un autre état. C'est le barreur réactif qui en est chargé pour des raisons de réactivité. Si une stratégie ne se déroule pas comme prévue, les différentes bornes vont permettre, lorsqu'une d'entre-elles sera dépassée, de forcer un retour dans l'état **init cap**.

La structure du réseau de Petri contrôlant les états du barreur expert dépend donc également des stratégies mises en oeuvre. De ce point de vue on peut envisager l'ajout de places et de transitions pour une meilleure définition et un meilleur contrôle des stratégies.

4.4.4 Le barreur adaptatif

Le rôle du barreur adaptatif est de prendre en charge des phénomènes qui s'étalent sur des périodes d'au moins une dizaine de secondes. Ses prérogatives portent sur la mise à jour des consignes (à la fois la consigne initiale de cap et les consignes dites internes), le calcul de différents éléments propres aux polaires, la détermination du type de vent et de mer rencontrés qui vont permettre d'ajuster le gain global pour le barreur réactif (voir la figure 4.34). Pour éviter des changements incessants, la fréquence du barreur adaptatif est portée à $0.1Hz$.



Le barreur adaptatif s'occupe de paramètres généraux propres au pilotage. Il gère les consignes, analyse les polaires, évalue son environnement et détermine certaines grandeurs utilisées par le barreur réactif.

FIG. 4.34: Le barreur adaptatif

Pour mettre son pilote en route, le skipper donne une consigne de cap qui est alors mémorisée par le barreur adaptatif. L'absence de coefficient intégral dans le mode cap permet d'être plus réactif aux sollicitations de l'environnement mais induit une erreur statique gênante. Pour pallier à ce problème, le barreur réactif ne suit pas la consigne donnée par le skipper mais une consigne dite interne de cap. Au départ consigne interne et consigne de cap sont identiques. Le barreur adaptatif évalue à basse fréquence l'erreur entre le cap moyen suivi et la consigne interne et corrige cette dernière de la moitié de la différence (ce qui permet une convergence assez rapide). Les autres consignes internes, mises à jour en fonction du contexte, servent de références lors de changements de mode.

Le barreur adaptatif est chargé de récupérer à partir des polaires un certain nombre de données utiles au pilotage comme l'angle au vent de vitesse maximale ou le rendement moyen du barreur. Il identifie le type de vent et de mer auquel il est confronté pour en avertir éventuellement le skipper à travers l'IHM et lui permettre d'évaluer le gain via un système d'inférence flou établi grâce aux expériences menées au centre d'entraînement de course au large de Port-La-Forêt [Ponceau 06]. Il paramètre les agents concepts chargés d'envoyer des alarmes au barreur expert pour qu'ils tiennent compte de l'environnement. Ainsi il demandera de repérer les chutes de vitesse sur des périodes plus ou moins longues en fonction de la stabilité de la vitesse ce qui permet de prendre en compte les variations naturelles dues à la houle par exemple.

4.5 Vers un barreur réactif/prédictif

En neurophysiologie le principe de *perception active* [Berthoz 97, Brunia 99] stipule que perception et action sont liées par l'existence de modèles internes permettant de simuler les conséquences d'une action par des mécanismes d'inhibition comme si l'individu agissait réellement. Pendant le déroulement d'une action, le cerveau mettrait en oeuvre deux modes en parallèle. Le premier serait réactif, il permet de contrôler que les données restent dans des limites attendues, le second serait prédictif, il déroule mentalement l'action en anticipant les perceptions associées et vérifie par intermittence uniquement une partie des capteurs, seulement ceux qui sont jugés critiques pour l'action en cours. Autrement, le cerveau perdrait trop de temps à analyser l'ensemble des données.

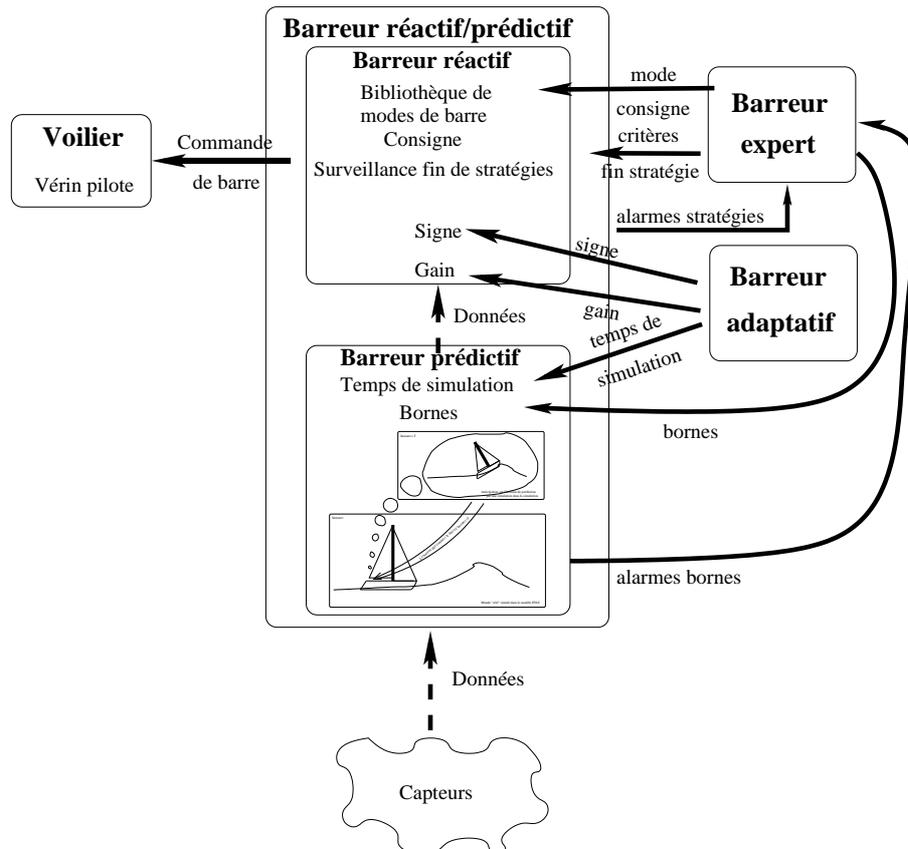
Guidés par ces idées, nous pouvons proposer d'intégrer une partie prédictive à notre barreur de voilier. Pour éviter d'incessantes synchronisations périodiques, nous regroupons partie réactive et partie prédictive au sein du seul barreur réactif qui devient alors un barreur réactif/prédictif.

En commande prédictive [Allgöwer 99], appelée également commande à horizon glissant, on cherche à optimiser à partir des entrées le comportement futur et anticipé du système considéré. La prédiction utilise un modèle du système et s'effectue sur un intervalle de temps fini appelé *horizon de prédiction*. Le principe de la commande consiste à déterminer à chaque période d'échantillonnage la meilleure séquence de commandes sur l'horizon de prédiction. Cette optimisation dépend usuellement d'une *trajectoire de référence* supposée connue. La première commande de la séquence optimale est alors appliquée et le processus recommence avec la mise à jour des entrées lors du nouvel échantillonnage.

Le barreur ne connaît pas *a priori* de trajectoire de référence en termes de cap constant par exemple ou de vitesse optimale mais agit plutôt en termes de maintien de variables sensorimotrices entre des valeurs qui garantissent l'assurance de « garder la main ». Des travaux ont été menés dans ce sens [Azevedo 02] dans le cadre du contrôle de la locomotion bipède sans spécification de trajectoire de référence où l'optimisation s'effectue non pas sur une trajectoire de référence mais sur un ensemble de contraintes physiques garantissant le déplacement du robot sans chute.

Notre approche est encore différente car nous estimons que le barreur agit comme si le phénomène était déjà là pour pouvoir mieux l'affronter. De ce point de vue, nous ne pouvons anticiper les rafales et risées car le barreur humain utilise pour les repérer les marques qu'elles impriment à la surface de l'eau mais nous pouvons anticiper leurs conséquences une fois qu'elles sont détectées. L'anticipation mise en oeuvre par le barreur prédictif pourra par contre prévoir l'arrivée des vagues si leur fréquence et leur hauteur sont déterminables par l'agent *Sea*. Le passage de vagues modifie brutalement certaines données telles la direction et la force du vent apparent, la vitesse du bateau, son tangage ou encore son roulis. Dans certains cas la régulation de barre ne permet pas de corriger physiquement, à l'aide du seul safran, les variations induites par une vague. Un barreur humain anticipera en faisant comme si le bateau subissait déjà les effets de la vague pour placer l'étrave de son voilier de manière plus adaptée aux perturbations attendues. Pour reprendre ce type de comportement, le barreur prédictif simule sur un intervalle de temps précalculé (l'horizon de prédiction) l'ensemble de son environnement (mer, vent, bateau sous son mode de barre actuel) pour voir ce qui se passera à l'échéance de cet horizon. L'algorithme est alors simple, si l'état anticipé du bateau est « raisonnable » par rapport au but recherché (les bornes fournies par le barreur expert), le barreur réactif/prédictif n'anticipe pas. Par contre, si l'état anticipé augure d'un écart à la consigne plus important qu'à l'instant présent et hors bornes la commande de barre imposée sera celle liée à l'horizon de prédiction **comme si le phénomène était déjà là**. Dans ce dernier cas, les données fournies pour la régulation sont celles obtenues par simulation à l'horizon de prédiction et non pas celles issues des capteurs. Les bornes associées à chaque mode de barre et fournies par le barreur expert ne sont plus gérées par la partie réactive du barreur réactif/prédictif mais contrôlées par la partie prédictive. Si certaines variables sont déjà hors bornes et que leurs valeurs anticipées accentuent le phénomène un message d'alerte est diffusé au barreur expert qui peut alors choisir de changer de mode. Lors du cycle suivant, une simulation est de nouveau effectuée avec les nouvelles valeurs des capteurs et le processus recommence ainsi indéfiniment. La fréquence des prédictions doit donc coïncider avec celle des commandes de barre et c'est une des raisons pour laquelle la partie réactive et la partie prédictive sont regroupées. Ceci permet à la partie réactive d'avoir un accès transparent aux données à travers la partie prédictive qui peut donc être vue comme un filtre. Les données capteurs passent nécessairement par la partie

prédictive qui fournit soit les données anticipées soit les données capteurs à la partie réactive (voir figure 4.35).



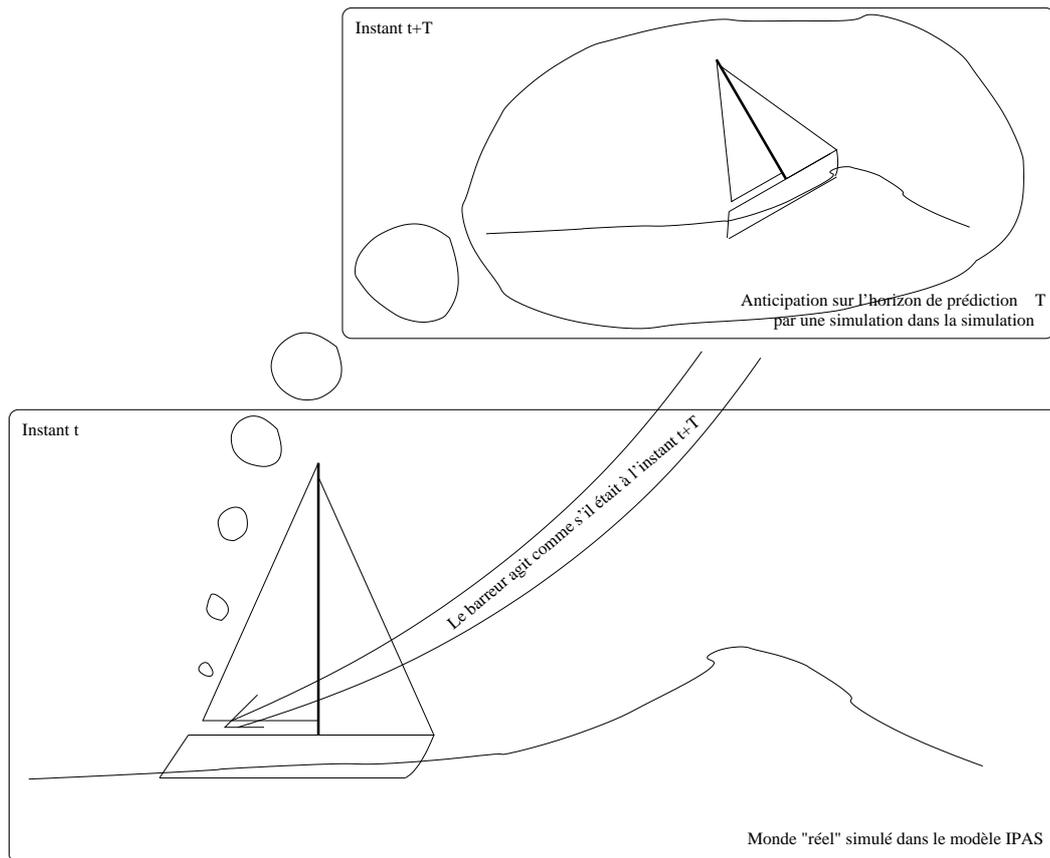
Une partie prédictive est intégrée en la plaçant entre les données et le barreur réactif pour donner un barreur dit réactif/prédictif. On peut considérer qu'elle a un rôle de filtre vis-à-vis des données. Dans ce schéma, les flèches en tiretés indiquent le flux des données qui transitent bien par le barreur prédictif avant d'atteindre le barreur réactif. Les bornes ne sont plus gérées par la partie réactive mais par la partie prédictive qui peut ainsi anticiper sur d'éventuels dépassements futurs.

FIG. 4.35: Le barreur réactif/prédictif

Une question importante est l'estimation d'un temps raisonnable pour permettre l'anticipation : trop court le voilier ne peut se placer dans la bonne attitude par rapport au phénomène attendu, trop long il se peut que l'on effectue l'inverse de ce qu'il faudrait faire (opposition de phase) et qu'on accentue le phénomène que l'on souhaite prévenir. Ce temps dépend à la fois de l'évolutivité du bateau (sa capacité à tourner) et de la période relative des vagues et est déterminé par le barreur adaptatif. Par expérience, nous estimons que les embardées de cap ne doivent pas excéder 20° et que l'angle de barre ne doit pas non plus dépasser 20° sous peine d'arrêter le bateau. Le temps que met le voilier à abattre de 20° avec 20° d'angle de barre est estimé à partir de sa vitesse moyenne et sert d'horizon de prédiction en cas d'absence de houle. Si une houle est détectée, l'horizon de prédiction est pris comme min du temps précédent et de la moitié de la période principale des vagues. C'est le barreur adaptatif qui se charge de déterminer cet horizon de prédiction et de le transmettre au barreur prédictif.

L'anticipation consiste donc à simuler le comportement du voilier dans son environnement c'est-à-dire avec les vagues et le vent qu'il subit. Les agents **Wind** et **Sea** sont à l'origine prévus pour permettre la reconstruction de l'environnement du bateau. Mais techniquement, il était plus simple d'utiliser le modèle lui-même pour simuler. Lors de sa création le barreur virtuel donne naissance à un processus qui simule une mer, un vent et un voilier piloté par le mode de barre sélectionné. Ce processus est donc identique à celui qui est utilisé pour simuler l'*environnement* à l'exception notable de l'abandon de la partie graphique grosse consommatrice de ressources CPU. L'état de mer dans le modèle IPAS est décrit via la notion de groupes de vagues¹² et le voilier virtuel est équipé de telle manière qu'il « voit » les groupes de vagues de son voisinage. Pour simuler, on génère la mer avec les

¹² Un groupe de vagues est constitué en moyenne de 3 à 15 vagues qui obéissent à des caractéristiques propres (voir par exemple [Parenthoën 04]).



Le barreur prédictif simule un modèle de mer, de vent et de voilier avec les caractéristiques locales perçues par le voilier « réel ». L'horloge interne de cette simulation est accélérée par rapport à celle du « monde réel ». Monde réel et simulé sont deux instances du même modèle, il y a donc *simulation dans la simulation*. Le barreur anticipe en agissant comme s'il était déjà en présence des données qu'il devrait avoir à l'issue de l'intervalle appelé horizon de prédiction. Pour cela, le barreur prédictif fournit ces données au barreur réactif en lieu et place des capteurs sans que ce dernier puisse s'en rendre compte. L'anticipation n'a lieu que si les valeurs à l'horizon de prédiction ne réduisent pas l'écart à la consigne et sont hors bornes.

FIG. 4.36: Simulation dans la simulation pour l'anticipation

groupes repérés, le vent mesuré et l'ensemble des paramètres physiques du voilier à un instant donné (comprenant le mode de barre en cours) et on augmente la fréquence de l'ordonnanceur associé au processus (voir la figure 4.36). Le barreur prédictif dispose alors de données prédites qu'il utilise pour déterminer celles qu'il va fournir à la partie réactive selon l'algorithme défini plus haut. Le barreur réactif, lui, agit comme si ces données étaient directement issues des capteurs.

Pour anticiper, le barreur réactif est donc placé en avance de phase par rapport à son environnement. Ceci lui permet de corriger plus tôt sa trajectoire, donc potentiellement de donner moins d'angle de barre, et donc, de moins freiner le bateau.

Dans le cadre d'une utilisation réelle, l'anticipation pose de nombreux problèmes *a priori* difficiles. Par définition, dans le cadre virtuel, le modèle de mer utilisé est bon puisqu'exact. En utilisation réelle, le modèle devient un vrai modèle, c'est-à-dire une abstraction de la réalité. Il convient qu'il soit suffisamment juste pour être exploitable. Ceci signifie qu'on doit être capable de reconstituer une mer crédible à partir des capteurs disponibles à bord du bateau. Les données fournies par la centrale inertielle permettent d'évaluer grossièrement l'état de la mer et en particulier la fréquence et l'amplitude des vagues ainsi que le positionnement du bateau par rapport à elles. Mais d'autres données peuvent être exploitées comme la force et la direction du vent ou même des observations par balises ou satellites accessibles par internet. La reconstitution du vent est elle aisée car l'anticipation ne se fait que sur quelques secondes et choisir comme vent pour la simulation le vent instantané reste une bonne approximation. Enfin, reste le problème de dynamiquement bien positionner le bateau sur la vague avant de lancer la simulation. La dynamique du bateau est bien connue grâce notamment à la centrale inertielle, par contre son enfoncement dans l'eau est très difficile à estimer et son attitude ne correspondra pas exactement au modèle de mer généré. Au lancement de la simulation pour anticiper,

le bateau virtuel est lâché avec la dynamique du bateau réel dans une mer virtuelle qui est une approximation de la mer réelle. Le bateau risque alors de « tomber » s'il n'est pas assez enfoncé dans l'eau ou de « bondir » s'il l'est trop. La dynamique du bateau est alors grandement perturbée. Une solution consisterait justement à lâcher le bateau pour noter son point d'équilibre avant de lancer la simulation avec ces nouvelles valeurs.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exhibé une architecture multi-agents capable de contrôler la barre d'un voilier évoluant au sein d'un environnement complexe. En particulier, la partie barreur proprement dite met en jeu trois agents qualifiés de réactif, expert et adaptatif qui fonctionnent en parallèle de manière asynchrone. Le barreur expert identifie les contextes pour effectuer des commutations de modes de barre mis en œuvre par le barreur réactif. Ceci permet de décrire des stratégies comme une succession de postures sensorimotrices plutôt que comme une succession de consignes de cap qui pourraient causer de nombreux problèmes du fait d'un réglage de voile *a priori* figé. D'autre part, un barreur prédictif est proposé et fonctionnerait de manière synchronisée avec le barreur réactif. Il anticiperait le comportement futur du bateau à travers une *simulation dans la simulation* pour, le cas échéant, fournir des données prédites en lieu et place des données réelles au barreur réactif afin qu'il agisse comme si le phénomène était déjà là.

Afin de mieux appréhender ce type de système, d'aider à leur conception et d'offrir la possibilité de les valider au moins partiellement, nous en proposons une modélisation par réseaux de Petri. Les contours d'une méthodologie générale pour modéliser des systèmes multi-agents par de tels réseaux sont dessinés. Par contre, les extensions algébriques proposées dans la deuxième partie de cette thèse ne sont guère utilisables comme modèles car d'usage compliqué et peu intuitif.

Les architectures multi-agents en éclatant le code en autant de composants logiciels plus ou moins indépendants rendent leur modification relativement aisée. Dans le cadre de notre application, de nombreuses améliorations sont ainsi envisageables. On peut par exemple ajouter des capteurs et des agents concepts pour affiner la perception de l'environnement. On peut envisager l'essai d'autres lois de commande pour le barreur réactif. On peut compléter l'automate qui contrôle les états du barreur expert pour décrire de nouvelles stratégies ou améliorer celles déjà existantes. Un des gros défauts de notre système est de n'offrir qu'une forme d'apprentissage limitée essentiellement à la mise à jour de polaires. Si le rôle de l'apprentissage dans ce type d'activité semble important, toute la difficulté est de déterminer sur quoi en faire et sur quels critères tant les paramètres sont nombreux. En effet, bien barrer un bateau ne se réduit pas à savoir conserver un cap, ni même à être capable de retrouver le plus rapidement possible une consigne suite à un écart de route mais repose sur des compromis qui dépendent de la mer, du vent, du réglage du bateau et même de l'humeur du barreur. Pour anticiper, nous proposons d'intégrer une partie prédictive dans le barreur réactif pour donner un barreur réactif/prédictif. Cet aspect a été implémenté mais n'a jamais été fonctionnel car il a posé de nombreux problèmes temps réel dus à la surcharge considérable de calculs. Il pose de plus sur un voilier réel de véritables défis car il faut alors être capable de simuler une mer crédible à l'aide des capteurs disponibles puis de positionner dynamiquement correctement notre voilier dessus.

Le chapitre 5 propose, par le truchement d'expérimentations, de mettre en lumière les intérêts de notre approche par rapport aux pilotes commerciaux actuels.

Bibliographie

- [Albus 87] Albus, J., McCain, H., et Lumia, R. (1987). NASA/NBS standard reference model for telerobot control system architecture (NASREM). Rapport Technique 1235, NBS.
- [Alla 00] Alla, A., David, R., Mascolo, M. D., et Ferrier, J. (2000). *Analyse et commande des systèmes à événements discrets*. Hermès.
- [Allgöwer 99] Allgöwer, F., Badgwell, T., Qion, J., Rawlings, J., et Wright, S. (1999). Nonlinear Predictive Control and Moving Horizon Estimation - An introduction overview. In *European Control Conference ECC*, pages 392–449.
- [Azevedo 02] Azevedo, C., Poignet, P., et Espiau, B. (2002). Moving Horizon Control For Biped Robots Without Reference Trajectory. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, pages 2762–2767.
- [Benveniste 03] Benveniste, A., Caspi, P., Edwards, S., Halbwachs, N., Guernic, P. L., et de Simone, R. (2003). The synchronous languages 12 years later. *Proceedings of the IEEE*, 91(1) :64–83.
- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.
- [Bonasso 97] Bonasso, R. P., Firby, J., Gat, E., Kortenkamp, D., Miller, D. P., et Slack, M. G. (1997). Experiences with an Architecture for Intelligent, Reactive Agents. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 9(2/3) :237–256.
- [Bourdais 06] Bourdais, R., Perruquetti, W., et Yim, P. (2006). Modélisation multi-agents à l’aide des réseaux de Petri. In *Conference Internationale Francophone d’Automatique, CIFA*.
- [Brooks 86] Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, pages 14–23.
- [Brunia 99] Brunia, C. (1999). Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, 101 :213–242.
- [Celaya 09] Celaya, J., Desrochers, A., et Graves, R. (2009). Modeling and Analysis of Multi-agent Systems using Petri Nets. *Journal Of Computers*, 4(10).
- [Chevaillier 99] Chevaillier, P., Harrouet, F., et Loor, P. D. (1999). Application des réseaux de Petri à la modélisation des systèmes multi-agents de contrôle. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*.
- [David 92] David, R. et Alla, H. (1992). *Du Grafctet aux Réseaux de Petri*. Hermès.
- [Desrochers 95] Desrochers, A. et Al-Jaar, R. (1995). *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems : Modeling, Control, and Performance Analysis*. IEEE Press.
- [Fliess 09] Fliess, M. et Join, C. (2009). Model-free control and intelligent PID controllers : towards a possible trivialization of nonlinear control? In *15th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2009)*, Saint-Malo France. IFAC.
- [Gat 91] Gat, E. (1991). Integrating planning and reacting in a heterogeneous asynchronous architecture for mobile robots. *SIGART Bulletin 2*, pages 70–74.
- [Guillou 07] Guillou, G. et Parenthoën, M. (2007). Modèle multi-agents pour le pilotage temps réel d’un voilier. In *6ème Colloque Francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs - MSR 2007*, pages 145–157, Lyon France. Hermes-Lavoisier.

- [Gédouin 08] Gédouin, P., Join, C., Delaleau, E., Bourgeot, J., Arbab-Chirani, S., et Calloch, S. (2008). Model-free control of shape memory alloys antagonistic actuators. In *17th IFAC World Congress*, Seoul Korea, Republic of.
- [Hanisch 00] Hanisch, H. et Lüder, A. (2000). A Signal Extension for Petri Nets and its Use in Controller Design. *Fundamenta Informaticae*, 41(4) :415–431.
- [Hayes-Roth 85] Hayes-Roth, B. (1985). A blackboard architecture for control. *Artificial intelligence*, 26 :251–321.
- [Holloway 97] Holloway, L., Krogh, B., et Giua, A. (1997). A Survey of Petri Net Methods for Controlled Discrete Event Systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 7(2) :151–190.
- [Juhás 03] Juhás, G., Lorenz, R., et Neumair, C. (2003). Modelling and Control with Modules of Signal Nets. In *Lectures on Concurrency and Petri Nets*, volume 3098, pages 585–625.
- [Kosko 86] Kosko, B. (1986). Fuzzy Cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24 :65–75.
- [Lin 89] Lin, L.-J., Simmons, R., et Fedor, C. (1989). Experience with a task control architecture for mobile robots. Rapport Technique CMU-RI-TR-89-29, Carnegie-Mellon University.
- [Mandani 74] Mandani, E. et Assilian, S. (1974). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 :1–13.
- [Murata 89] Murata, T. (1989). Petri nets : Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4) :541–588.
- [Muscuttola 02] Muscuttola, N., Dorais, G., Fry, C., Levinson, R., et Plaunt, C. (2002). Idea : Planning at the core of autonomous reactive agents. In *3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space*.
- [Newell 90] Newell, A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Harvard University Press.
- [Nilsson 69] Nilsson, N. (1969). A mobile automation : an application of artificial intelligence techniques. In *Proc. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pages 509–520.
- [Nilsson 84] Nilsson, N. (1984). Shakey the robot. Rapport Technique 323, SRI, Menlo Park, CA.
- [Parenthoën 04] Parenthoën, M. (2004). *Animation phénoménologique de la mer : une approche éactive*. Mémoire de Thèse, Université de Bretagne Occidentale.
- [Parenthoën 05] Parenthoën, M., Tisseau, J., Buche, C., et Reignier, P. (2005). Comportements perceptifs d’acteurs virtuels autonomes. *RSTI-TSI*, 24(10) :1259–1293.
- [Pnueli 77] Pnueli, A. (1977). The Temporal Logic of Programs. In *FOCS-77*, pages 46–57, Providence, RI, USA.
- [Ponceau 06] Ponceau, L. (2006). Réglages Figaro 2 pilote nke. Communication personnelle.
- [Puterman 94] Puterman, M. (1994). *Markov Decision Processes, Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons.
- [Reisig 98] Reisig, W. (1998). *Elements of distributed algorithms : modeling and analysis with Petri nets*. Springer-Verlag.
- [Tolman 48] Tolman, E. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4) :189–208.

Chapitre 5

Expérimentation

5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons, en action, le barreur virtuel développé conformément à l'architecture décrite au chapitre 4 (sans sa partie prédictive). Ce pilote est un composant logiciel qui récupère un ensemble de données issues de capteurs dans le but de délivrer, en temps réel, une commande d'angle de barre absolu à un servo-moteur. La configuration matérielle des pilotes commerciaux installés sur la plupart des voiliers de course au large imposait ce choix technique. L'emploi d'un environnement virtuel, pour développer et tester, a été préféré à celui d'un environnement réel car il évite de fastidieux et coûteux essais sur l'eau. Le modèle de mer (et de vent accessoirement) IPAS et le modèle de voilier virtuel, développés tous deux sur la plate-forme ARéVi, ont été présentés chapitre 2. Comme évoqué à la fin du chapitre 3, la performance d'un barreur est difficile à évaluer. Nous nous attachons dans ce chapitre à mettre en valeur les apports de notre approche en présentant différents scénarios pour lesquels les régulations classiques échouent généralement. Cependant, la faiblesse du modèle de voilier implémenté limitera beaucoup la portée de nos travaux. Aussi, l'étude de mesures autre que celles des trajectoires ainsi que notre regard d'expert permettront également d'argumenter et d'étayer nos choix. Nous verrons qu'avec le modèle de voilier actuel le gain se situe plus dans le domaine de la sécurité que dans celui de la performance.

5.2 L'IHM

L'interface comporte deux fenêtres, une pour le barreur virtuel proprement dit et l'autre qui sert de répéteur pour les données usuellement employées par les skippers. Cette dernière (voir figure 5.1) affiche ainsi la vitesse du bateau, les données relatives au vent (force et angle en apparent ou en réel ainsi que sa direction) ou encore la gîte ou l'angle de barre. Toutes ces données sont lissées sur une demie seconde pour éviter un scintillement pénible de l'affichage. Pour pouvoir retrouver rapidement les bons réglages, les angles des voiles sont également indiqués. Enfin un bouton permet de lancer des enregistrements de données qui servent en particulier à illustrer ce chapitre.

Le cap compas n'apparaît pas car il est présent sur la fenêtre spécifique au barreur de la figure 5.2 à côté de la consigne à suivre. Pour reprendre la présentation des pilotes commerciaux, la consigne suit le cap réel tant que le pilote n'est pas branché (via la pression du bouton **Start** !). De même, quatre touches +1, -1, +10 et -10 permettent au skipper de modifier en ligne la consigne. Contrairement aux pilotes commerciaux, notre pilote virtuel ne propose aucun réglage à l'utilisateur, type mode ou gain¹ et offre ainsi une interface extrêmement épurée et simple d'usage. La partie centrale de la fenêtre donne le ressenti du pilote par rapport à l'environnement et répond à des questions telles que :

¹ Voir l'expertise du chapitre 3 au sujet des pilotes commerciaux.

TL25	
Speed	11.26
TWD	0
TWS	20
TWA	179.1
AWS	8.7
AWA	175.1
Angle barre	-8.8
Sensa Barre	6581
Gite	-11.051
GV	70.9998
Foc	73
Affichage	
Record off	

Les principales données utilisées par le barreur sont affichées sur le répéteur. En tête, car la plus importante pour la performance, la vitesse du bateau est ici de 11.26 noeuds. C'est une très bonne vitesse pour un voilier de 60 pieds au plein vent arrière (TWA = 179.1) et n'ayant plus que 8.7 noeuds de vent apparent. Par contre, l'angle de barre est important ainsi que la gîte. L'indication des angles de voiles a été ajoutée pour faciliter leurs réglages.

FIG. 5.1: Répéteur pour différentes données du bord

Quelles sont l'allure et l'amure du voilier? Est-il ardent ou mou? Quelle est la force du vent? La mer est-elle grosse? Certains de ces concepts (l'allure et l'amure pour être précis) influencent directement le comportement du pilote et il est plus sûr d'attendre leurs déterminations avant de l'embrayer.

Enfin, une fenêtre d'information au bas de l'interface fournit des indications au skipper sur l'évolution du vent, d'éventuels réglages, le fait que le bateau part en surf ou l'apparition de situations critiques nécessitant son intervention.

La réalité virtuelle permet de régler l'ensemble des paramètres du système de manière incrémentale par essais successifs dans différentes configurations de mer et de vent. Bien que longue et fastidieuse cette mise au point s'avère évidemment bien plus aisée que s'il fallait la faire sur un voilier réel. En effet, il est facile de générer des conditions extrêmes de mer et de vent, de mettre le voilier sur n'importe quelle allure et de regarder ce que cela donne. Un bon marin, lui, se gardera bien de sortir dans ces conditions ... Ceci nous a permis de caractériser de manière acceptable les états et les types de mer, le type de vent, les sensations de barre, les allures ou encore les départs et les fins de surf. Le système permet également de générer relativement rapidement (sur plusieurs jours quand même) des polaires de vitesse et de gîte. Tous ces paramètres sont de fait liés aux modèles et si certains dépendent directement du voilier choisi (comme les polaires) il n'est pas sûr que les autres soient facilement transposables à d'autres voiliers même monocoques. Cependant le fait que leurs réglages aient été guidés par l'expertise devrait leur garantir une certaine genericité.



Ici le pilote est débrayé comme indiqué en bas de l'interface et la consigne suit le cap du voilier. Dans les conditions présentées dans la figure 5.1 précédente on peut lire que le bateau est ardent, tribord amure, que nous sommes au vent arrière dans un vent médium avec une mer calme et un vent stable en direction et en force.

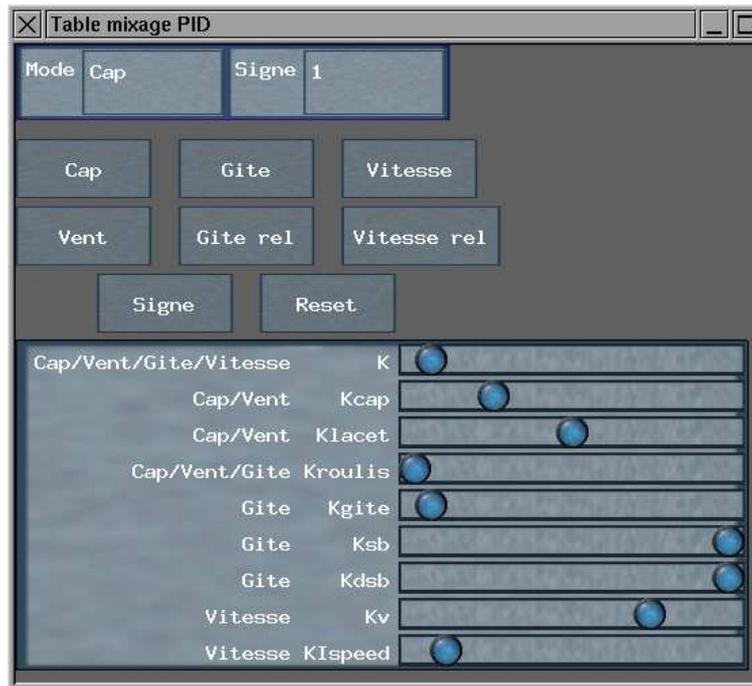
FIG. 5.2: L'interface du barreur virtuel

5.3 Table de mixage

Pour tester différents PID et régler leurs coefficients, la table de mixage de la figure 5.3 a été créée dans laquelle les différents coefficients apparaissent avec les modes dans lesquels ils interviennent.

Régler un PID est une tâche délicate mais en partant des coefficients éprouvés dans les pilotes commerciaux pour les modes **Cap** et **Vent**² et en sachant que les autres PID ne servent *a priori* que temporairement pour faire face à des situations ponctuelles, la réalité virtuelle a permis de reproduire à volonté ces situations particulières pour aider au choix de « bons » coefficients. Ceci a permis d'éliminer les modes vitesse et vitesse relatif car si, à l'essai, ils présentaient d'intéressants avantages du point de vue de la performance (notamment pour le passage de clapot), ils conduisaient le voilier à des situations critiques du fait d'un réglage fixe des voiles. Les modes gîtes et gîtes relatifs leurs ont été alors préférés pour leurs capacités à aller chercher de la vitesse tout en veillant à ne pas coucher

² Vent réel.



Sur cette table de mixage il est possible d'imposer au voilier six modes de barre différents entre Cap, Vent, Gite, Gite rel (gîte relatif), Vitesse et Vitesse rel (vitesse relatif). On peut changer le signe de la commande (qui dépend normalement de la polaire de vitesse et est automatiquement déterminé par le barreur adaptatif lorsque le pilote est branché) et retrouver les réglages de base en appuyant sur le bouton Reset. Le réglage des coefficients se fait via l'utilisation de scroll bar.

FIG. 5.3: Table de mixage employée pour le réglage des PID

le bateau.

5.4 Quelques scénarios

Pour comparer notre pilote avec un PID classique nous clonons le bateau pour en obtenir un deuxième qui possède son propre pilote régulé de la manière suivante :

$$\theta_{barre} = K(K_P(cap - consigne) + K_D lacet + K_I \int (cap - consigne))$$

Les coefficients K , K_P , K_D et K_I ayant été fournis par la société nke³. Le voilier de départ sera dit barré par le « barreur virtuel » alors que l'autre voilier sera appelé « le clone ».

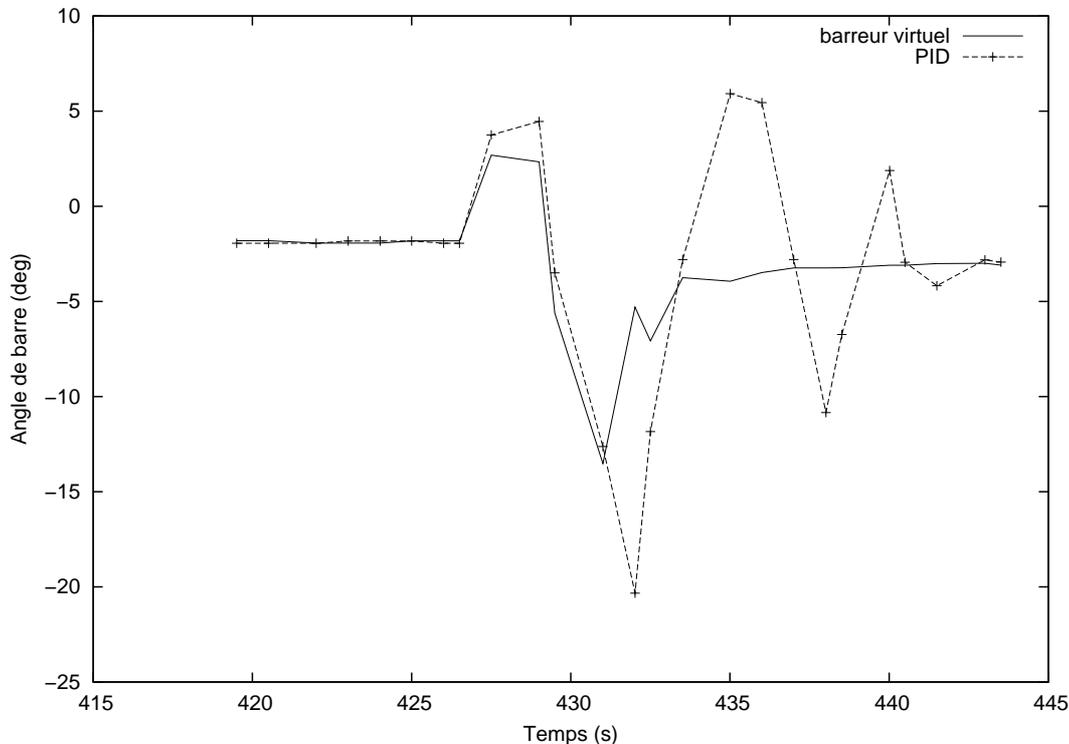
Bien que les coefficients de notre pilote en mode cap soient différents (notamment il n'y a pas de terme intégral ce qui fait que la stabilisation est beaucoup plus rapide), dans des configurations stables les deux voiliers affichent quasiment le même cap et du coup les mêmes performances. C'est lors d'« accidents » que leurs comportements divergent. Nous en faisons une petite revue de détail dans cette section.

5.4.1 Intérêt de la suppression du terme intégral

Comme on l'a vu chapitre 2 si le terme intégral d'un PID tend à annuler l'erreur statique, il a tendance par contre, en réponse à un échelon, à accentuer les oscillations avant stabilisation. Nous avons fait le choix de ne pas utiliser de terme intégral pour éviter ces oscillations et, ainsi, être plus

³ Leurs valeurs ne peuvent être dévoilées ici car il s'agit d'un secret industriel.

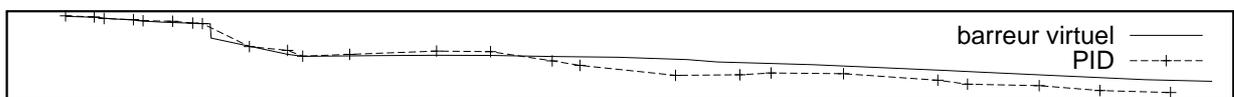
proche de la technique de barre d'un barreur humain. Voici un petit scénario simple qui permet de mettre en lumière ce phénomène. Nos deux bateaux naviguent par cinq noeuds de vent sous le vent d'un cargo qui les masque. Ils sortent ensemble de la zone de déventement pour retrouver brutalement vingt noeuds de vent. Les bateaux se mettent à gîter et donc à lofer et les pilotes doivent rattraper cet écart à la route. La figure 5.4 donne les mouvements de barre de nos deux pilotes. Le simple PID imprime des mouvements de barre plus importants que ceux du barreur virtuel.



Les données du bateau mené par barreur virtuel apparaissent en trait plein alors que celles du clone muni d'un PID standard sont en points-tirés. L'influence du terme intégral est très nettement visible sur les mouvements de barre. Les coups de barre étant autant de coups de frein, le barreur virtuel qui ne fait pas intervenir de terme intégral se retrouve légèrement devant le clone.

FIG. 5.4: Influence du terme intégral sur la commande de barre

Ces mouvements représentent autant de coups de frein et induisent un allongement de la trajectoire (voir la figure 5.5) ce qui donne un avantage au barreur virtuel. D'autre part, un bon barreur évitera de faire de la contre-barre (voir chapitre 3) en anticipant et aura donc une trajectoire de barre plus proche de celle du barreur virtuel que du PID.



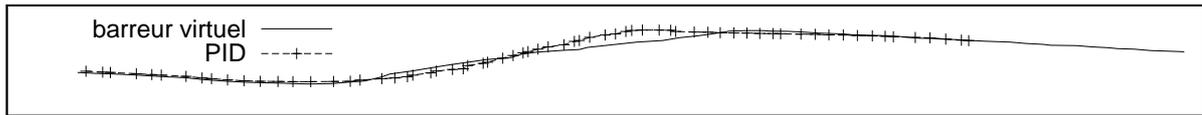
Le point de départ se situe à gauche de la figure. Les coups de barre donnent une trajectoire plus sinueuse donc plus longue au clone qui se retrouve légèrement en retrait une fois la barre stabilisée. Le barreur virtuel récupère sa consigne de manière douce.

FIG. 5.5: Trajectoires

5.4.2 Rafale

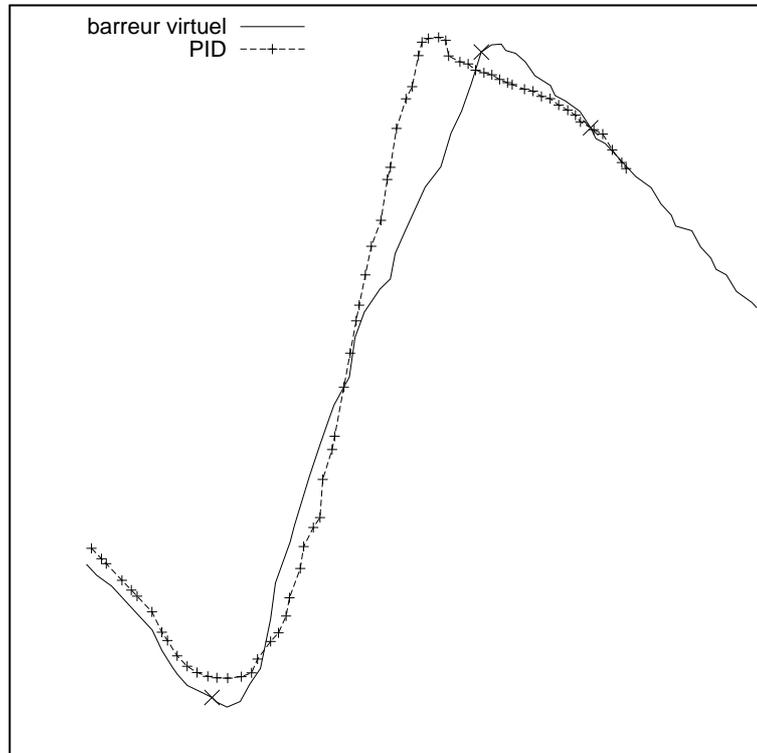
Les deux voiliers naviguent travers au vent dans 20 noeuds de vent par mer calme lorsque survient une rafale à 23 noeuds qui dure une quarantaine de secondes puis le vent reprend sa force initiale. Les figures 5.6 et 5.7 donnent les trajectoires des deux bateaux en sachant que le point de départ se situe à gauche des figures. La première courbe donne les trajectoires non déformées (les angles sont respectés) alors qu'elles sont déformées dans la seconde pour pouvoir mieux les comparer.

Après le passage de la rafale le clone finit par s'aligner sur la trajectoire de l'autre voilier et se



Au départ les deux voiliers sont quasiment superposés. A la fin de la séquence, le voilier piloté par le barreur virtuel se retrouve nettement devant.

FIG. 5.6: Trajectoires réelles des deux voiliers lors d'une rafale



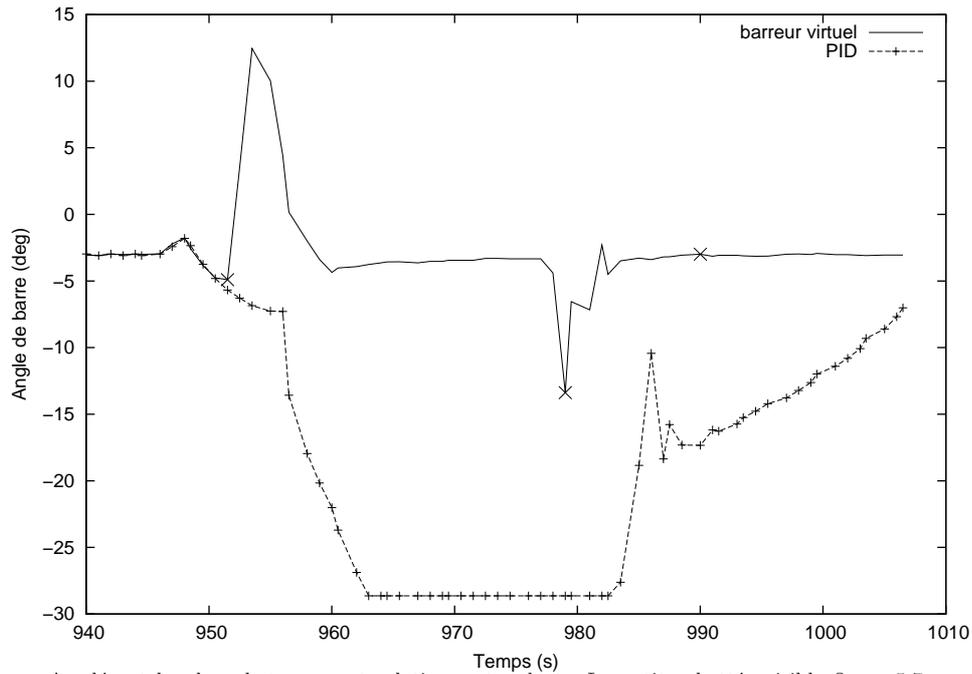
Les mêmes trajectoires que celles de la figure 5.6 mais déformées pour mieux pouvoir les comparer. Quand la rafale « descend » les deux voiliers abattent légèrement pour essayer de contrecarrer le surcroît de puissance mais ils finissent par partir au lof, c'est-à-dire par se tourner brutalement vers le vent. Le barreur virtuel passe en mode gîte (les changements de mode sont indiqués par des croix en X) et accompagne cette aulofée alors que l'autre pilote cherche à lutter contre l'écart à la consigne en donnant beaucoup de barre (voir la figure 5.8). Lorsque la rafale se termine le barreur virtuel repasse en mode cap et le clone finit par venir s'aligner à l'arrière de l'autre voilier.

FIG. 5.7: Trajectoires déformées des deux voiliers lors d'une rafale

retrouve alors nettement derrière. Pour expliquer cet écart regardons les courbes des figures 5.8 et 5.9 qui donnent les angles de barre et les vitesses des deux bateaux durant cette rafale. Le premier changement de mode (les changements de mode sont indiqués par des croix en X sur les graphes) est provoqué par l'agent concept chargé de détecter les pertes de vitesse. Le barreur virtuel étant tourné vers la performance, une rafale entraînant un gain de vitesse n'aurait pas changé le mode courant mais entraîné simplement une réévaluation des consignes dites internes du pilote.

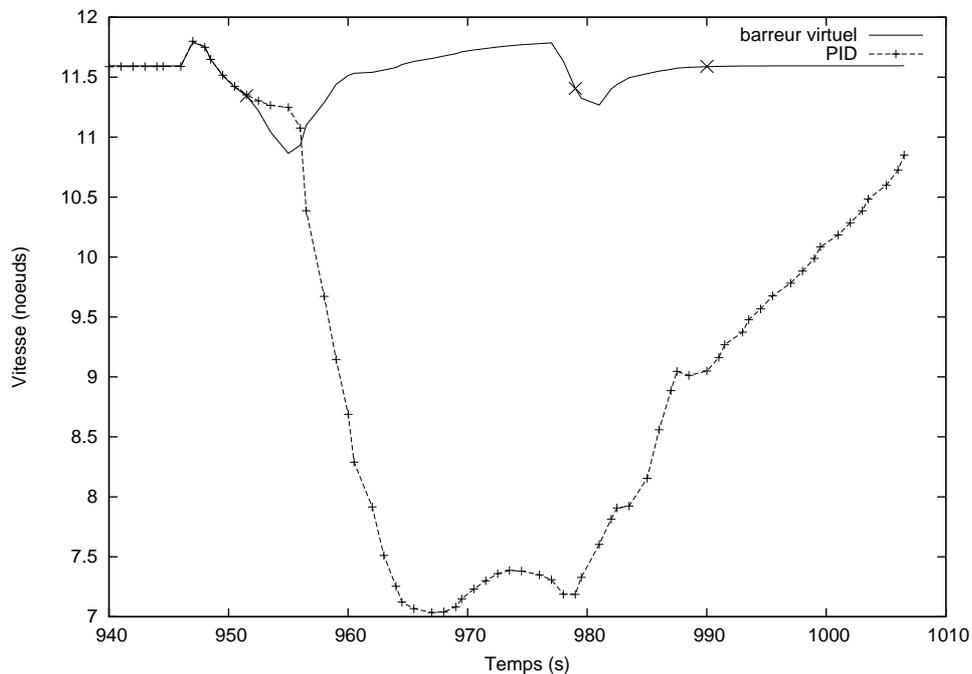
Avec un PID standard le fait d'amener la barre en butée (voir figure 5.8) est physiquement risqué et susceptible d'entraîner de la casse. De plus, un vrai bateau s'arrêterait pratiquement et devrait partir au lof beaucoup plus violemment ce qui éviterait le coup de barre observable entre les instants 950 et 960 dans la courbe du barreur virtuel. Notre modèle de bateau ralentit peu lorsqu'il devient très ardent comme on peut le voir figure 5.9.

En terme marin on dira que le barreur virtuel a « salué la rafale ».



Au départ les deux bateaux sont relativement ardents. La petite abattée visible figure 5.7 se traduit pour un court instant par moins d'angle de barre avant que les bateaux partent brutalement au lof. Alors que le barreur virtuel change de mode pour accompagner l'aulofée, l'autre barreur cherche désespérément à compenser la déviation de trajectoire en mettant la barre au vent en butée physique. Pendant ce temps le barreur virtuel retrouve rapidement un angle de barre raisonnable. Lorsque la rafale est passée l'absence de terme intégral permet au barreur de retrouver rapidement un bon angle de barre.

FIG. 5.8: Evolution des angles de barre lors d'une rafale



L'arrivée de la rafale se traduit tout d'abord par une accélération, puis la vitesse chute brusquement car le bateau se « vautre ». Lorsque le barreur virtuel change de mode, la vitesse continue à chuter car il cherche à lofer. Une fois la bonne gîte trouvée, le voilier reprend progressivement de la vitesse. La deuxième chute de vitesse correspond à la fin de la rafale. Le deuxième pilote en mettant sa barre en butée freine son bateau et finit par stabiliser plus ou moins sa vitesse. Il ne reprend pied que lorsque la rafale se termine.

FIG. 5.9: Evolution des vitesses lors d'une rafale

5.4.3 Molle

Les deux bateaux évoluent dans 20 noeuds de vent par mer calme lorsque le vent tombe rapidement à 17 noeuds. L'arrivée de la molle (chute brutale de la force du vent) se traduit par une baisse de

vitesse qui entraînera le barreur virtuel à relancer le bateau. Le mode employé est alors le même que pour une rafale (le mode gîte) mais la sortie ne s'opère pas sur les mêmes critères. En effet lorsqu'une rafale entraîne une baisse de vitesse c'est que les réglages du bateau ne permettent pas de supporter une telle force de vent. Il ne sert à rien de reprendre sa route tant que le vent ne faiblit pas. Par contre, le barreur virtuel demande au skipper d'intervenir via son interface. Pour une molle, le barreur virtuel cherche à garder sa vitesse, il abat jusqu'à retrouver sa vitesse cible ou dépasser les bornes de cap déterminées par le barreur expert (voir la figure 5.10) puis reprend la consigne initiale.

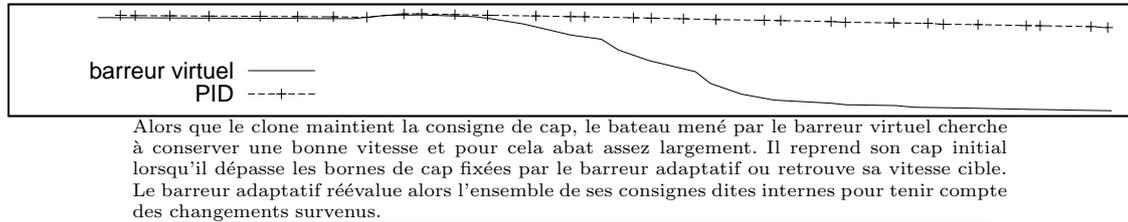
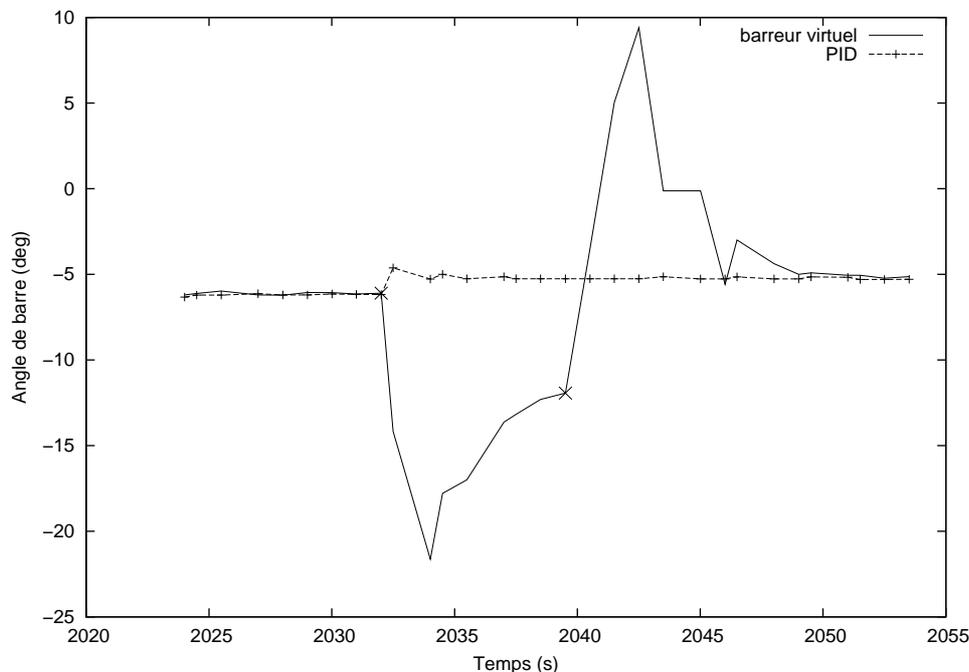


FIG. 5.10: Trajectoires lors d'une molle

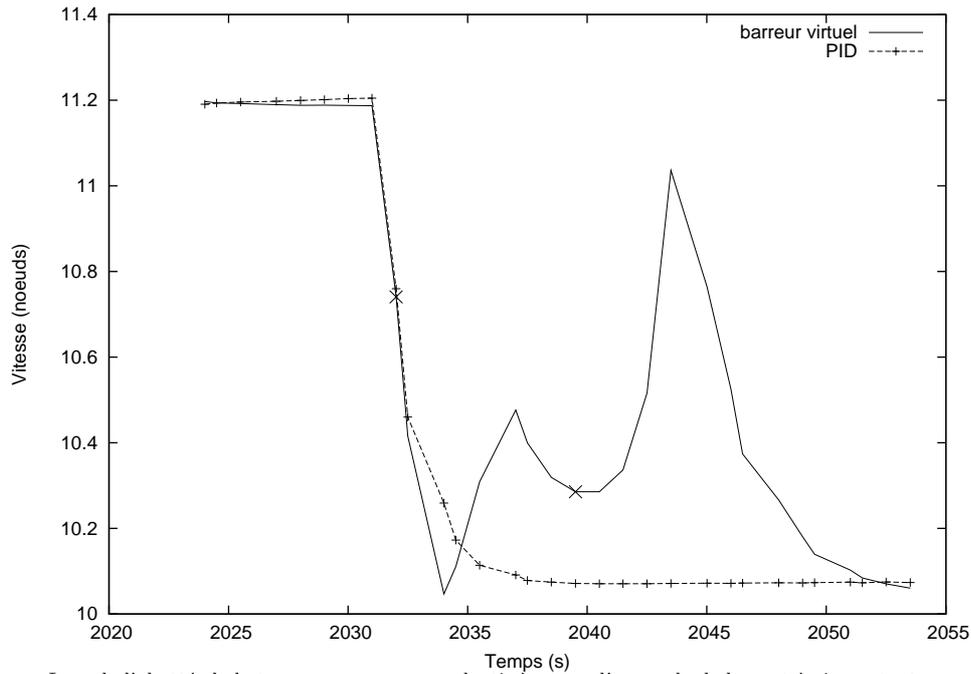
Au niveau de la barre, figure 5.11, le barreur virtuel tire franchement dessus pour abattre puis la pousse également franchement dès qu'il estime la relance terminée.



Peu après la baisse de vent, le barreur virtuel repère une perte de vitesse et tire fortement sur la barre pour abattre (au niveau de la première croix en X). Lorsque la fin de relance est repérée (deuxième croix), il pousse sur la barre pour reprendre le cap initial. Le PID se contente de donner un petit coup de barre pour compenser le fait que le bateau devient moins ardent.

FIG. 5.11: Angles de barre lors d'une molle

Bien que le bateau mené par le barreur virtuel parcourt une distance plus importante, le fait qu'il conserve une bonne vitesse (voir figure 5.12) lui permet de rester à la hauteur du clone. Techniquement il se retrouve sous le vent de ce dernier ce qui peut à terme l'handicaper. C'est la raison pour laquelle, le pilote virtuel ne peut prendre la décision de changer de cap sur le long terme. Un bateau de course réel sera beaucoup plus sensible à un refus en termes de perte de vitesse que notre modèle. Si le vent revient dans sa direction initiale avant que le bateau ne reprenne sa consigne de départ, la relance sera alors très efficace.

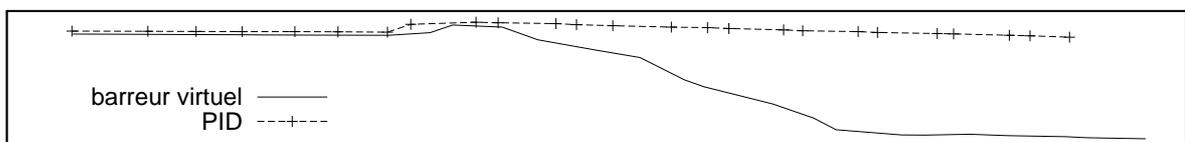


Lors de l'abattée le bateau commence par ralentir à cause d'un angle de barre très important, puis il prend une meilleure vitesse que le clone. Une fois la relance terminée, le fait de lofer pour reprendre la consigne apporte temporairement un surplus de vitesse au bateau.

FIG. 5.12: Vitesses lors d'une molle

5.4.4 Refus

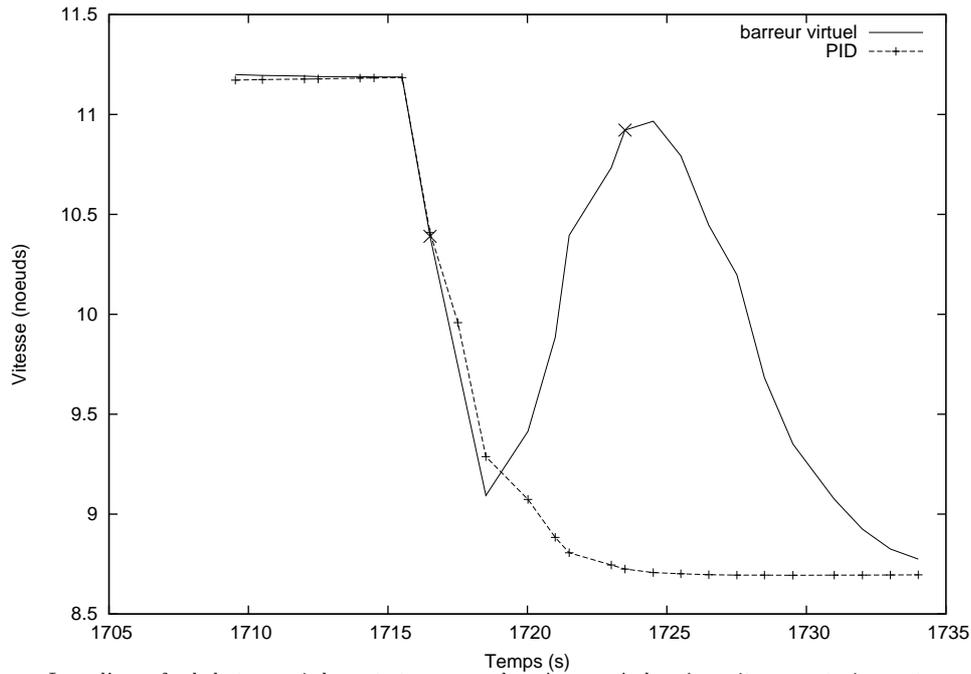
Les deux bateaux évoluent à 90 degrés du vent réel lorsque le vent refuse brutalement de 20 degrés. La baisse de vitesse consécutive décide le barreur virtuel à relancer. Pour ce faire il passe en mode vent réel car il a repéré que la chute de vitesse est dûe à une rotation du vent. La trajectoire résultante est assez similaire à celle observée dans le cas d'une molle (voir figure 5.13) excepté le fait que le clone se retrouve alors légèrement distancé. De même que pour le cas d'une molle, ce n'est pas au barreur virtuel de décider de changer de cap sur le long terme mais au skipper lui-même de le faire. Il se contente donc de relancer puis de reprendre la consigne.



L'écart à la consigne correspond à l'écart qu'effectue le vent en direction sauf s'il dépasse les bornes déterminées par le barreur expert. Le voilier piloté par le barreur virtuel conserve une bonne vitesse qui lui permet de passer devant le clone (voir figure 5.14).

FIG. 5.13: Trajectoires lors d'un refus

La figure 5.14 donnent les vitesses respectives des deux voiliers. Contrairement à une molle le barreur virtuel peut espérer atteindre sa vitesse cible en retrouvant sensiblement le même angle au vent réel. Le coup de barre donné pour récupérer l'angle au vent réel commence par freiner un peu le bateau dirigé par le barreur virtuel. Cet effet passé, le bateau retrouve presque sa vitesse cible avant de revenir à sa consigne initial. De même que pour une molle, si le refus est de courte durée, conserver sa vitesse sera bénéfique surtout sur un voilier réel.

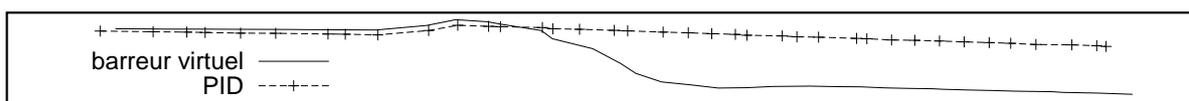


Lors d'un refus le bateau suit le vent et conserve donc à peu près la même vitesse contrairement au clone qui se retrouve avec un mauvais réglage de voiles par rapport au nouveau vent.

FIG. 5.14: Vitesses lors d'un refus

5.4.5 Molle refusante

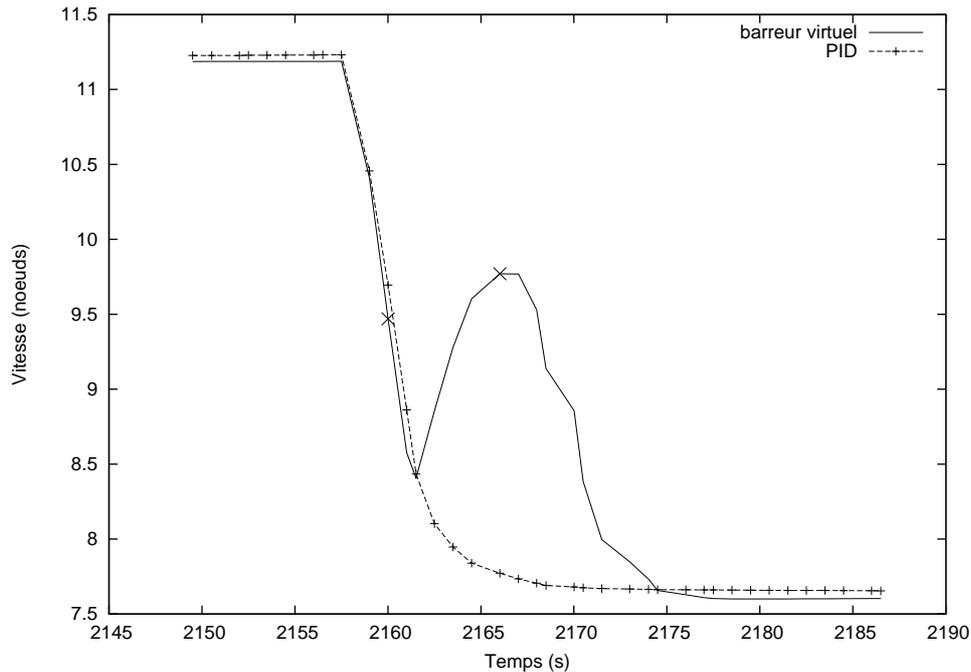
Les variations en force du vent s'accompagnent généralement de variations en direction. Lorsque nous combinons les deux scénarios précédents pour obtenir à la fois un vent mollissant et refusant, la chute de vitesse est bien sûr également très marquée et le barreur virtuel pour y répondre privilégie le suivi d'angle de vent réel. La trajectoire de la figure 5.15 ressemble alors fortement à celle suivie lors d'un simple refus.



Lorsqu'interviennent simultanément un refus et une molle, le barreur expert privilégie la rotation du vent, c'est-à-dire qu'il cherche à préserver son angle au vent réel. Le refus étant de 20 degrés l'abattée est également de 20 degrés. Lorsque les deux bateaux reprennent le même cap, celui ayant choisi de relancer se retrouve légèrement devant.

FIG. 5.15: Trajectoires lors d'une molle refusante

La courbe des vitesses de la figure 5.16 est également très similaire à celle obtenue lors d'un refus. Le vent ayant moli il est impossible au bateau de retrouver sa vitesse cible en se contentant de retrouver sa consigne interne d'angle au vent réel. C'est lorsqu'il atteint cet angle que le barreur virtuel estime que la relance est terminée. Il repasse alors en mode cap avec sa consigne interne initiale et le barreur adaptatif réinitialisera ses consignes internes pour tenir compte des modifications de son environnement en prévenant, via l'IHM, le skipper qu'il faut border les voiles car le vent a refusé.

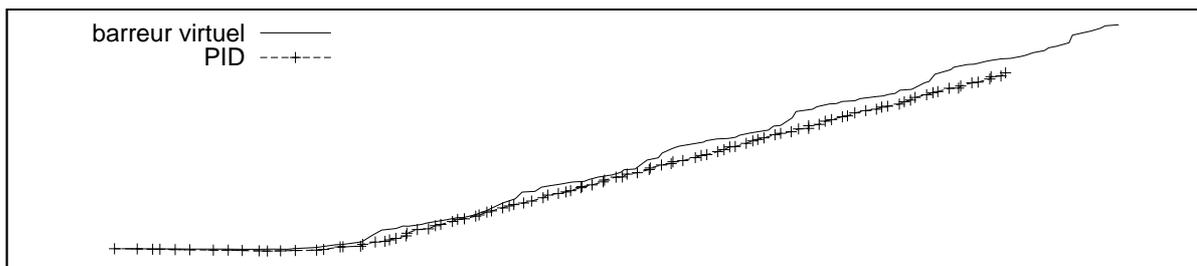


Alors qu'il a décidé de relancer (première croix) le bateau du barreur virtuel continue à ralentir à cause d'un angle de barre excessif. Puis il reprend de la vitesse avant de décider de revenir à la consigne lorsqu'il atteint sa consigne interne d'angle au vent réel.

FIG. 5.16: Vitesses lors d'une molle refusante

5.4.6 Clapot

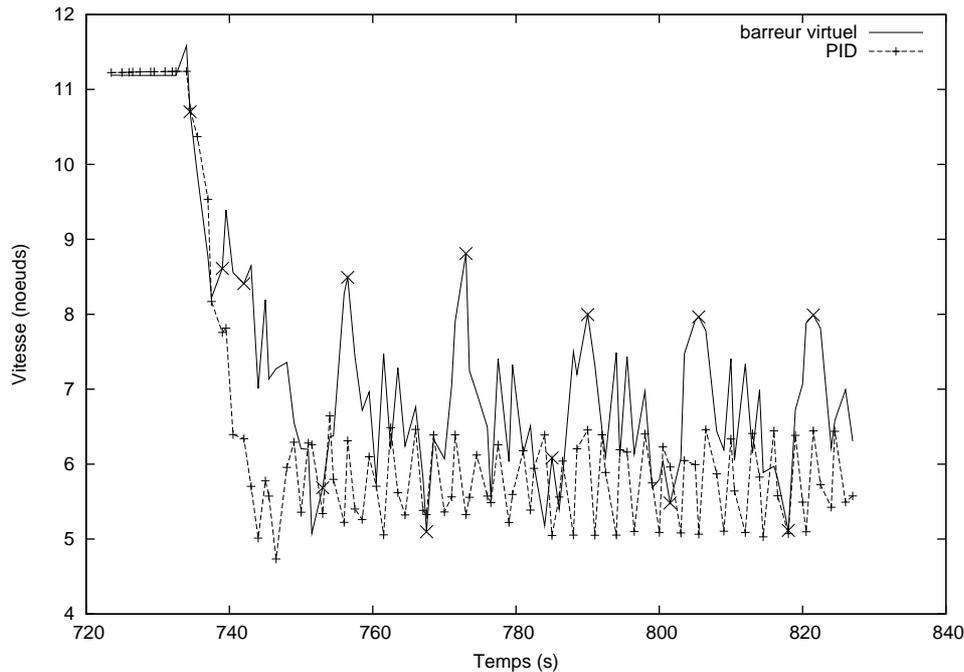
Dans ce scénario, les voiliers passent brutalement d'une mer calme à un méchant clapot qui les freine sévèrement. Ce type de phénomène est fréquent au raz de Sein par exemple où les courants violents lèvent facilement des clapots courts et cambrés qui rendent difficile la progression des bateaux. Dans notre cas, le clapot rend les bateaux très ardents et ces derniers n'arrivent plus à maintenir leur consigne (voir la figure 5.17).



Dès qu'ils entrent dans la zone de clapot, les deux voiliers ne parviennent plus à conserver leur cap car ils deviennent excessivement ardents. Le barreur virtuel gère mieux ce passage dans le clapot car il évite de vautrer le bateau en le laissant régulièrement lofer lorsqu'il devient trop ardent. Il finit par devancer assez nettement le clone.

FIG. 5.17: Trajectoires dans du clapot

Le barreur virtuel commence par essayer de faire de la relance, ce que fera également un bon barreur. Malheureusement, comme l'abattée ne s'accompagne pas d'un réglage de voile, le bateau se vautre encore plus. Le barreur virtuel passe alors en mode survie, c'est-à-dire en mode gîte relatif, pour préserver l'intégrité de son matériel. Une fois sorti de ce mode, il ne tente plus de relancer son bateau car ne parvenant pas à reprendre sa route il ne tient plus compte de sa précédente vitesse cible et cherche simplement à revenir sur sa consigne de cap. A chaque fois que le bateau devient trop ardent il passe en mode gîte et cette stratégie lui permet de conserver une meilleure vitesse (voir figure 5.18) que le clone pour un cap similaire.



Le barreur virtuel en lofant lorsque le bateau devient trop ardent conserve une meilleure vitesse à son voilier.

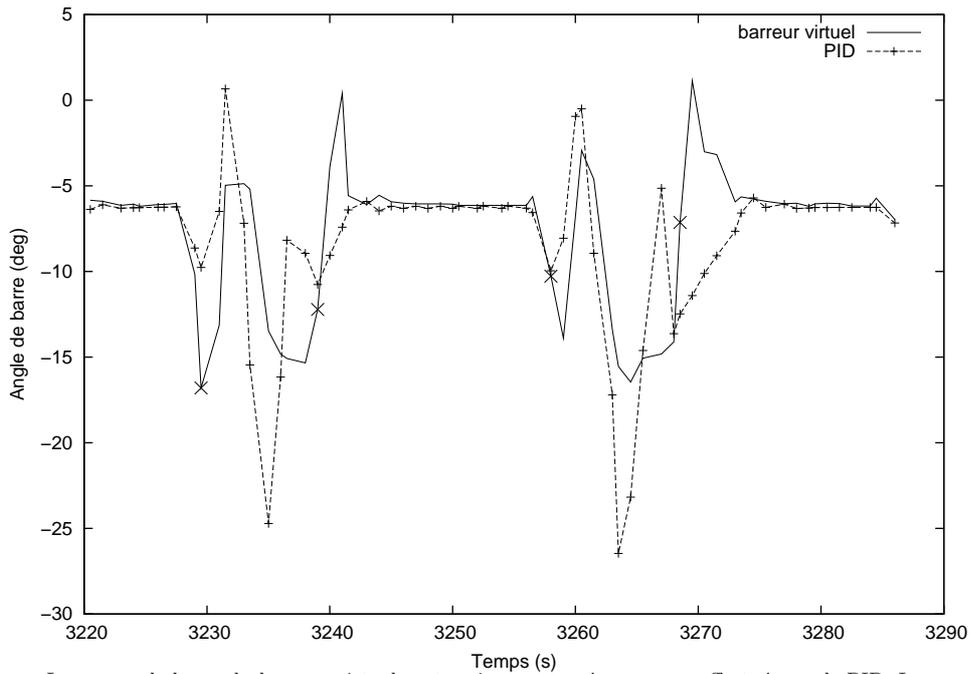
FIG. 5.18: Vitesses dans du clapot

5.4.7 Groupe de vagues isolé

Un phénomène courant qui freine les bateaux est le passage d'une ou plusieurs vagues isolées, très courtes et cambrées. Ce type de configuration apparaît naturellement par superposition de plusieurs trains de vagues ou de manière artificielle au travers des sillages des cargos ou des chalutiers. Dans l'optique de reproduire une situation similaire, nous générons sur un plan d'eau initialement au repos des groupes de trois vagues de longueur d'onde courte et relativement cambrées à intervalles de temps suffisamment longs pour que les voiliers puissent stabiliser leurs trajectoires avant l'arrivée d'un nouveau groupe.

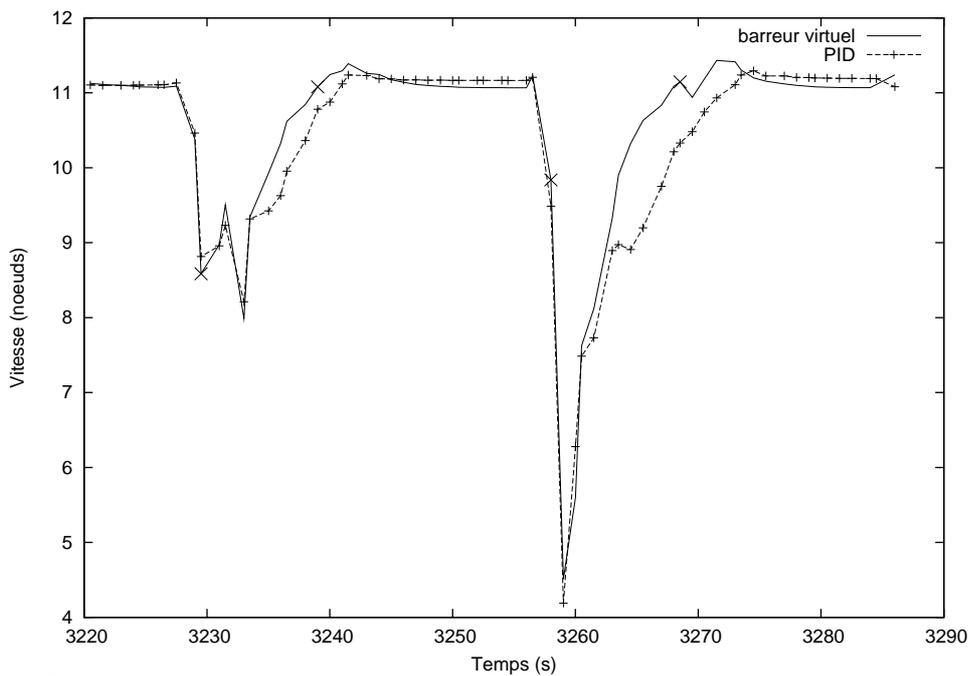
Lors du passage du groupe, les bateaux effectuent des mouvements désordonnés, tapent dans les vagues et ralentissent beaucoup. Le PID réagit aux mouvements du bateau en donnant des coups de barre très importants. Le barreur virtuel, prévenu par l'agent concept chargé de repérer les coups de frein, passe en mode gîte relatif pour relancer. Le bateau ayant aussi des mouvements de roulis prononcés, le barreur virtuel donne également des coups de barre mais moins prononcés. Lorsque la vitesse redevient proche de la vitesse cible, le barreur virtuel repasse en mode cap ce qui entraîne le coup de barre visible avant la stabilisation de l'angle de barre entre deux passages de groupe. Globalement les coups de barre du barreur virtuel sont moins prononcés et ce dernier retrouve plus rapidement sa vitesse cible en cherchant à faire de la relance comme on peut le voir figure 5.20.

Un bateau réel aura tendance à rencontrer de grandes difficultés à retrouver de la vitesse s'il n'effectue pas de relance. En effet les voiliers de courses sont très sensibles aux réglages et de tels chocs dans les vagues modifient considérablement le vent apparent. Le temps que le bateau « refabrique » le vent apparent conforme à ses réglages peut être alors assez sensible. Notre modèle de voilier réaccélère sans problème et se joue finalement assez facilement des accidents qu'il peut rencontrer. Le comportement du barreur virtuel sera sans doute beaucoup plus pertinent sur un voilier réel.



Les coups de barre du barreur virtuel sont moins prononcés que ceux effectués par le PID. Le barreur virtuel passe en mode gîte relatif pour essayer de relancer le bateau après avoir repéré une chute de vitesse et retrouve un mode cap dès qu'il est proche de sa vitesse cible.

FIG. 5.19: Angles de barre lors de la négociation de vagues isolées



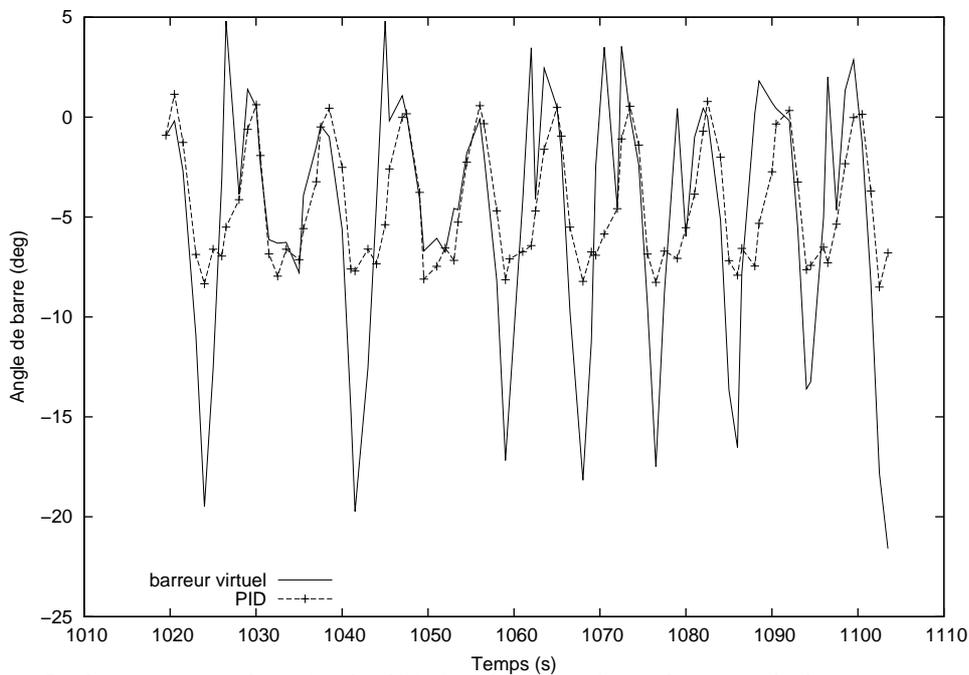
Les vitesses des deux voiliers restent proches, cependant le barreur en cherchant à faire de la relance retrouve une vitesse plus intéressante dans cette phase. Les trajectoires des deux bateaux ont tendance à se séparer, le clone se retrouve en léger retrait du barreur virtuel et finit par subir plus tardivement les effets du groupe de vagues.

FIG. 5.20: Vitesses lors de la négociation de vagues isolées

5.4.8 Départs en surf

Notre barreur virtuel étant orienté vers la performance, il tentera de partir en surf dès qu'il estimera que la situation y est favorable. Pour cela, une houle doit être repérée par l'agent *sea*, la navigation doit s'effectuer au portant et lorsque le voilier se retrouve à descendre une vague en

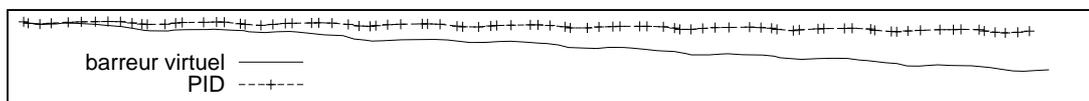
accélération tout en étant proche de sa vitesse limite de carène le barreur virtuel change d'état pour essayer de partir en surf (il se retrouve alors en mode gain). Ceci se traduit figure 5.21 par des coups de barre prononcés pour tenter de partir dans la vague, suivi de petits coups de contre-barre lorsqu'il s'agit de relancer le bateau dans l'optique de la prochaine vague.



Le clone se contente de corriger les déviations de cap causées par le passage de chaque vague alors que barreur virtuel tente de profiter de leur énergie pour partir en surf et donne un coup de barre dans ce but. On s'aperçoit que le barreur virtuel accentue les mouvements demandés par un simple PID. Dans certains cas le barreur virtuel laisse passer la vague (ici la deuxième et la quatrième) soit parce qu'il estime qu'elle ne présente pas les caractéristiques pour surfer, soit parce qu'il n'a pas fini de relancer son bateau et n'est alors pas réceptif aux messages de l'agent *concept surf*.

FIG. 5.21: Angles de barre lors de départs en surf

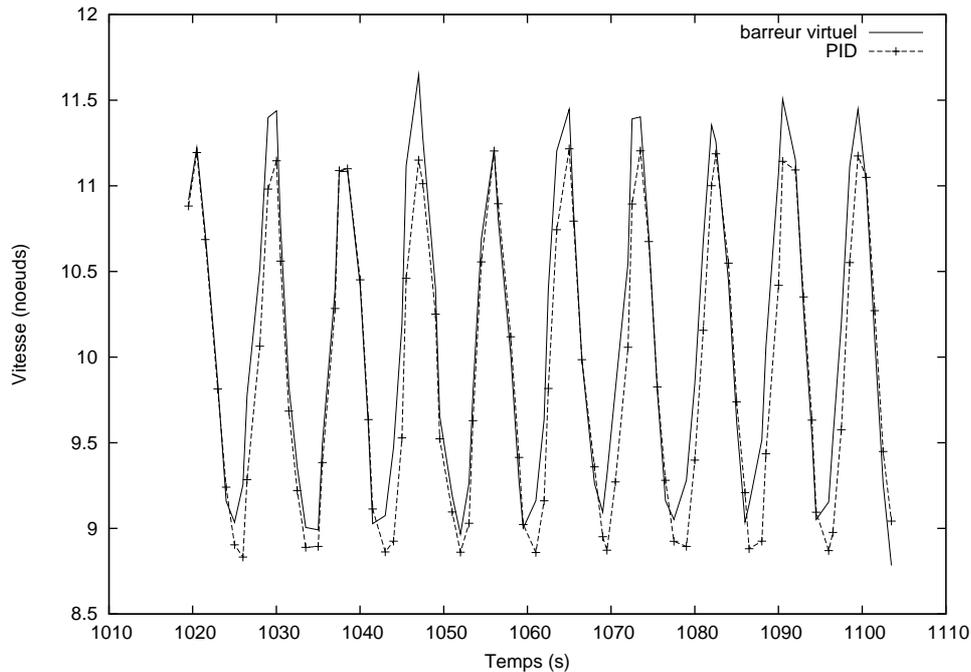
Les trajectoires données figure 5.22 montrent que le barreur virtuel effectue une route plus abattue que le clone car il tente de partir en surf en abattant sur certaines vagues. Les tentatives échouent rapidement (elles s'arrêtent dès que le bateau n'accélère plus) car notre modèle de bateau peine à accélérer contrairement à un bateau réel qui brutalement déjaugera et gagnera plusieurs noeuds de vitesse.



Le bateau mené par le barreur virtuel a tendance à faire une route plus abattue que le clone car il cherche à partir en surf sur les vagues. Bien qu'il effectue plus de route que le clone, il se retrouve légèrement devant à l'issue de cette simulation.

FIG. 5.22: Trajectoires lors de départs en surf

Sur un voilier réel, le gain devrait être important car il est déjà présent dans le cas virtuel où les vitesses obtenues (voir figure 5.23) sont tout le temps supérieures à celles du clone. Les deux seules vagues pour lesquelles les vitesses sont pratiquement identiques sont celles pour lesquelles le barreur virtuel ne cherche pas à partir en surf (voir la figure 5.21). En tous cas, visuellement, pour un expert, le comportement du voilier semble ainsi plus proche de ce que ferait un barreur humain.



Bien que notre modèle de bateau ne se comporte guère comme un véritable voilier par rapport aux départs en surf, le barreur virtuel conserve en permanence une vitesse supérieure à celle du clone.

FIG. 5.23: Vitesses lors de départs en surf

5.5 Conclusion

L'utilisation de la réalité virtuelle comme espace d'expérimentation permet de tester, d'améliorer et de corriger notre pilote pour voiliers de course. Elle permet également de l'évaluer avant d'envisager une utilisation sur un bateau réel et notamment de comparer son comportement à celui des pilotes commerciaux via l'usage d'un bateau clone muni de son propre pilote. Les différents scénarios présentés dans ce chapitre mettent à jour un comportement proche de celui d'un barreur humain, des gains notables en termes de sécurité et des gains plus mitigés en termes de performances.

Que notre pilote ait un comportement crédible de barreur humain est naturellement lié au choix de s'appuyer sur une expertise. Qu'il ait globalement un comportement marin conduit de fait à un haut niveau de sécurité. Du point de vue des performances, l'architecture assure dans les cas courants un comportement proche de celui d'un pilote commercial classique, en particulier, parce que le barreur réactif obéit au même type de lois de commande. Cependant, l'absence de terme intégral au profit d'une notion de consigne interne permet d'obtenir des trajectoires plus proches de celles d'un barreur humain lorsqu'il est nécessaire d'effectuer des corrections importantes. Mais la capacité de notre pilote à dérouler des stratégies entraîne des allongements de route qui ne sont pas toujours compensés par d'éventuels gains de vitesse. Par expérience, et ceci a été déjà évoqué dans l'expertise, on sait que dans certains cas un pilote automatique s'en sort mieux qu'un homme qui aura tendance à privilégier ses sensations aux données brutes dont il peut disposer. Il n'est donc pas étonnant de retrouver ce même problème dans notre cas. Cependant, il faut bien garder à l'esprit que les stratégies de barre sont fortement bridées par le fait de s'interdire toute intervention sur les réglages du bateau ce qui ne correspond pas à ce que fera un barreur humain. Il est de fait délicat de garder dynamiquement un bon niveau de performance sans un réglage de voiles adapté. La simulation met également en lumière les nombreuses faiblesses du modèle de bateau implémenté. Ainsi, ce dernier, même fortement gité, a du mal à partir au lof, il possède une stabilité de route étonnante même avec les safrans angulés au maximum. Il ne se comporte pas comme un bateau réel pour ce qui est des départs en surf. Il n'avance guère au près et accélère peu lorsqu'il abat. Bref, il se comporte plus comme un bateau à déplacement lourd et peu sensible aux coups de barre que comme un voilier de compétition puissant et léger. Il n'est pas étonnant, alors, que notre pilote basé sur une expertise de la technique de barre de bateaux de course affiche des gains de performance mitigés lorsqu'il agit sur un modèle de bateau finalement assez éloigné du modèle choisi dans l'expertise. Il est probable que notre pilote conduise

à de meilleures performances à bord d'un véritable monocoque de course léger et doté d'une grande surface de voilure.

Deuxième partie

Quelques extensions algébriques des réseaux de Petri

Chapitre 6

Réseaux de Petri et extensions algébriques

6.1 Introduction

Les réseaux de Petri sont très largement utilisés pour modéliser et contrôler les systèmes à événements discrets à cause de leur expressivité, des outils algébriques et graphiques qu'ils proposent et du fait qu'ils s'imposent naturellement dans le cadre des systèmes concurrents. Cependant, plusieurs caractéristiques des systèmes à événements discrets ne sont pas supportés par les réseaux de Petri standards mais sont d'usage courant dans les applications réelles. Par exemple, pour permettre le test à zéro, les réseaux de Petri ont été étendus en y adjoignant des arcs spéciaux dits *inhibiteurs*. Il a été prouvé que les réseaux de Petri à arcs inhibiteurs ont la puissance des Machines de Turing, ce qui rend malheureusement indécidable tout un ensemble de propriétés sympathiques des réseaux de Petri usuels.

Dans l'optique de modéliser notre système multi-agents de pilotage, nous nous sommes intéressés à un type particulier d'extension appelé *extension algébrique* car il consiste à remplacer l'algèbre usuelle des places par une autre et nécessite en général de modifier la règle de tir. Ce chapitre rappelle quelques préliminaires mathématiques puis expose l'essentiel sur les réseaux de Petri en insistant sur leur expressivité et leurs propriétés décidables car il est important d'essayer d'en préserver un maximum dans les extensions envisagées. Lorsqu'on cherche à modéliser des comportements, le problème de la synthèse des réseaux à partir de spécifications peut s'avérer utile. De nombreux outils ont été conçus pour attaquer ce problème, mais nous avons choisi celui des *régions* car il peut s'adapter à différentes algèbres sans trop de modifications et répond donc bien aux mécanismes mis en œuvre dans les extensions algébriques des réseaux de Petri. Cet outil ne présente pas d'intérêt dans le cadre des réseaux étiquetés et nous nous plaçons donc dans le cadre plus restrictif des réseaux non étiquetés c'est-à-dire des réseaux dont l'étiquetage des transitions est injectif (deux transitions distinctes ne peuvent porter le même nom). Nous poursuivons par une présentation des extensions en général et plus particulièrement des extensions algébriques pour finir avec quelques outils logiciels liés aux réseaux, à leur synthèse et à leurs extensions.

6.2 Préliminaires

6.2.1 Un peu d'algèbre

\mathbb{N} désignera indifféremment l'ensemble ou le *monoïde* des entiers naturels. On rappelle qu'un monoïde est un ensemble muni d'une loi interne et associative et d'un élément neutre. \mathbb{Z} désigne

l'ensemble des entiers relatifs et est également un *groupe*.

Définition 6.2.1 (Groupe) *Un groupe G est une structure $(G, +, 0)$ où G est un ensemble, $+$ une loi interne et associative, $0 \in G$ est l'élément neutre pour cette loi et tout élément de G est inversible ($\forall x \in G, \exists y \in G / x + y = y + x = 0$). Si la loi est commutative le groupe est dit commutatif ou abélien.*

L'*ordre* d'un groupe désigne son *cardinal* alors qu'un élément x d'un groupe G est dit d'*ordre fini* ou de *torsion* si il existe $k \in \mathbb{N}$ tel que $kx = 0$ (en notation additive). Un groupe sans élément d'ordre fini est dit sans *torsion*.

Définition 6.2.2 (Cône positif) *Soit E un ensemble muni d'une loi interne $+$, d'un élément neutre 0 pour cette loi et d'une relation d'ordre \geq monotone (i.e. $\forall a, b, c \in E, a \geq b \implies a + c \geq a + c$). Le cône positif de E est l'ensemble des x de E tels que $x \geq 0$.*

Un *magma* est un ensemble muni d'une loi interne¹. A^B désigne l'ensemble des applications de B dans A , si B est fini cette notation peut très bien servir pour décrire l'ensemble des vecteurs à composantes dans A et indexés par B . Soit M un vecteur ou une matrice, M^t désigne sa *transposée*.

6.2.2 Langages et image de Parikh

Soit $\Sigma = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ un alphabet fini. Un *mot* sur Σ est une séquence finie d'éléments de Σ (appelés également *caractères*). Σ^* désigne l'ensemble des mots sur Σ . Un *langage* sur Σ est une partie de Σ^* . En particulier le mot vide est noté ε . Lorsque u et v sont deux mots, $u.v$ désigne la concaténation de u et v et $u^* = \{u^k | k \in \mathbb{N}\}$, où u^k est la concaténation de k fois le mot u . Le mot x est un *préfixe* du mot y si il existe un mot z tel que $y = x.z$.

Définition 6.2.3 (Langage préfixe-clos) *Soit L un langage, on dit que L est préfixe-clos ou clos par préfixe si quel que soit $x \in L$ tout préfixe de x est dans L . La clôture par préfixe d'un langage L est le plus petit langage préfixe-clos contenant L , noté \bar{L} .*

Lorsque x est un mot, on notera $|x|$ sa *longueur*, c'est-à-dire le nombre d'éléments de Σ figurant dans x . On notera également $|x|_a$ le nombre d'occurrences du caractère a dans le mot x .

Définition 6.2.4 (Image commutative ou de Parikh) *L'image commutative ou de Parikh d'un mot x de Σ^* est définie par :*

$$\bar{x} = (|x|_{a_1}, |x|_{a_2}, \dots, |x|_{a_n})$$

6.2.3 Systèmes de transitions étiquetées

Nous définissons les *systèmes de transitions étiquetés*.

Définition 6.2.5 (Système de transitions étiquetées) *Un système de transitions étiquetées est un tuple (Q, E, T, q_0) où Q est un ensemble d'états, E un ensemble d'étiquettes ou d'événements, $T \subseteq Q \times E \times Q$ est une relation de transition et $q_0 \in Q$ est l'état initial.*

¹ Dans la littérature anglosaxonne un magma est appelé un *groupoid*.

Soit $S = (Q, E, T, q_0)$ un système de transitions étiquetées. Le fait que $(q, a, q') \in T$ se note également $q \xrightarrow{a} q'$ et q' est appelé *successeur* de q par a . Un *chemin* dans S est une séquence $c \in T^*$ telle que l'extension de la relation de transition aux mots soit définie pour c à partir de q_0 .

Définition 6.2.6 (Langage d'un système de transitions) *Le langage d'un système de transitions étiquetées $S = (Q, E, T, q_0)$ est l'ensemble de ses chemins et se note $\mathcal{L}(S)$.*

Les systèmes de transitions étiquetées peuvent se composer par *produit synchronisé* à partir du moment où ils partagent le même ensemble d'événements.

Définition 6.2.7 (Produit synchronisé) *Soient $S = (Q, E, T, q_0)$ et $S' = (Q', E, T', q'_0)$ deux systèmes de transitions étiquetées, le produit synchronisé de S et S' est le système de transitions étiquetées $S \times S' = (Q \times Q', E, t, (q_0, q'_0))$ où t est définie comme suit : $((q, q'), a, (p, p')) \in t$ si et seulement si $(q, a, p) \in T$ et $(q', a, p') \in T'$*

6.3 Les réseaux de Petri places/transitions

Le modèle original défini par Carl Adam Petri dans sa thèse de doctorat [Petri 62] et initialement conçu pour décrire la composition et la communication entre automates a conduit à différentes variétés de réseaux de Petri. Nous choisisons de les définir de manière usuelle, c'est à dire comme des réseaux places/transitions [Reisig 85]. Comme nous ne nous intéresserons pas aux propriétés structurelles, nous les prenons d'office marqués.

6.3.1 Définitions et représentation

Définition 6.3.1 (Réseau de Petri (RdP)) *Un réseau de Petri RdP en abrégé est un quadruplet $R = (P, T, f, M_0)$ où :*

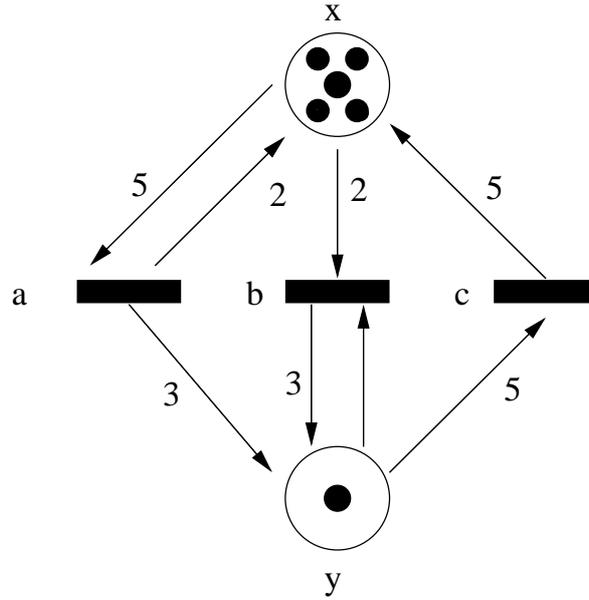
P est un ensemble fini de places, T est un ensemble fini de transitions (disjoint de P), $f : P \times T \cup T \times P \rightarrow \mathbb{N}$ est la relation de flot et $M_0 \in \mathbb{N}^P$ est le marquage initial.

Définition 6.3.2 (Marquage) *Un marquage M d'un réseau de Petri $R = (P, T, f, M_0)$ est une application de P dans \mathbb{N} et sera représenté le plus souvent par un vecteur de $\mathbb{N}^{|P|}$. $M(p)$ donne le nombre de jetons présents dans la place $p \in P$, ces jetons sont habituellement considérés comme des ressources. M_0 est un marquage particulier donnant la distribution des jetons du réseau à l'état initial.*

Graphiquement, un réseau de Petri est représenté comme un graphe biparti dans lequel les places sont symbolisées par des cercles et les transitions par des rectangles. La figure 6.1 fournit un exemple de réseau à deux places x et y et trois transitions a , b et c . Entre une place p et une transition t un arc orienté est dessiné si $f(p, t) > 0$ et dans l'autre sens si $f(t, p) > 0$, l'arc est alors étiqueté par cette valeur sauf éventuellement s'il est étiqueté par 1. Le marquage initial du réseau de la figure 6.1 est tel que $M_0(x) = 5$ et $M_0(y) = 1$ ce que l'on notera également $\begin{pmatrix} 5 \\ 1 \end{pmatrix}$.

On trouve très couramment cette définition alternative des réseaux de Petri [Peterson 73, Peterson 81, Meseguer 90] :

Définition 6.3.3 *Un réseau de Petri est un quintuplet $R = (P, T, Pré, Post, M_0)$ où P et T sont les ensembles non vides et disjoints des places et des transitions, $Pré : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction d'incidence avant, $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est la fonction d'incidence arrière et M_0 est le marquage initial. $Pré$ et $Post$ sont également appelées relations de flot.*



Réseau de Petri $R = (P, T, f, M_0)$ où $P = \{x, y\}$, $T = \{a, b, c\}$, $f(a, y) = f(b, y) = 3$, $f(x, a) = f(c, x) = f(y, c) = 5$, $f(a, x) = f(x, b) = 2$, $f(y, b) = 1$, $M_0(x) = 5$ et $M_0(y) = 1$.

FIG. 6.1: Exemple de réseau de Petri

Les liens entre relation de flot de la définition 6.3.1 et fonction d'incidence avant et arrière de la définition 6.3.3 sont directs :

- $\forall (p, t) \in P \times T, f(p, t) = \text{Pré}(p, t)$, et
- $\forall (t, p) \in T \times P, f(t, p) = \text{Post}(p, t)$.

Cette définition des réseaux de Petri permet de mettre en avant la notion de *places d'entrée* d'une transition $t \in T$ qui sont les places $p \in P$ telles que $\text{Pré}(p, t) > 0$ ainsi que, de manière symétrique, celle de *places de sortie* d'une transition. Respectivement, on parlera de transitions d'entrée et de sortie des places.

Définition 6.3.4 (Réseau de Petri pur) Un réseau $R = (P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0)$ est dit pur s'il ne possède pas de self-loop, c'est-à-dire si $\forall p \in P, \text{Pré}(p, t) \cdot \text{Post}(p, t) = 0$.

Il est également usuel de définir la matrice d'incidence $C : T \rightarrow \mathbb{Z}^P$ comme la différence entre les fonctions Post et Pré , c'est à dire $\forall t \in T, C(t) = \text{Post}(t) - \text{Pré}(t)$. Ainsi la matrice d'incidence du réseau de la figure 6.1 est :

$$C = \begin{pmatrix} -3 & -2 & 5 \\ 3 & 2 & -5 \end{pmatrix}$$

6.3.2 Comportement d'un réseau de Petri

Définition 6.3.5 (Règle de tir pour les réseaux de Petri) Une transition $t \in T$ est franchissable à partir d'un marquage M si $\forall p \in P, f(p, t) \leq M(p)$. Dans ce cas le tir ou franchissement de cette transition mène au nouveau marquage M' tel que $\forall p \in P, M'(p) = M(p) - f(p, t) + f(t, p)$. Cette opération est notée $M[t]M'$.

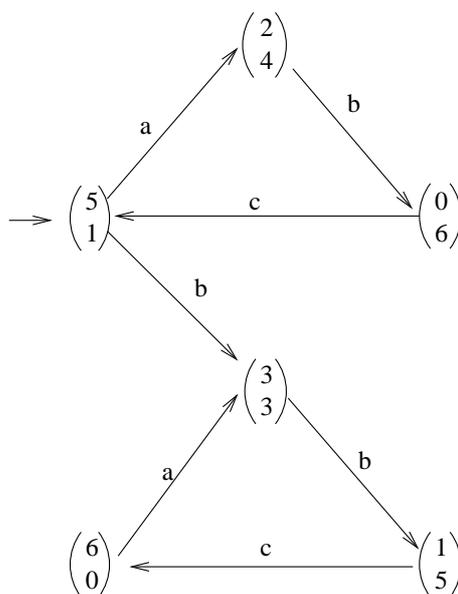
Nous voyons que le tir d'une transition s'effectue en deux temps : il y a d'abord consommation de ressource puis production. La règle de tir stipule donc que l'algèbre des places est le monoïde des entiers naturels \mathbb{N} . L'écriture $M[s]M'$ permet de généraliser de manière immédiate la notation précédente à une séquence finie de transitions $s = t_1 t_2 \dots t_n$. Un réseau de Petri pouvant être assimilé à un système de transitions étiquetées, le tir d'une transition est souvent vu comme un *événement*.

Définition 6.3.6 (Ensemble des marquages accessibles) L'ensemble des marquages accessibles est le plus petit ensemble de marquages qui contient M_0 et stable par tir de transitions.

Définition 6.3.7 (Graphe des marquages) *Le graphe des marquages est le graphe dont les noeuds sont les marquages accessibles et dont les arcs, étiquetés par les transitions, sont définis par la relation de tir entre les marquages.*

Un graphe des marquages est donc un système de transitions étiquetées dont l'état initial est M_0 et dont la relation de transition est définie à travers la règle de tir.

La figure 6.2 donne le graphe des marquages du réseau de la figure 6.1 où le marquage initial est pointé par une flèche entrante. Nous avons affaire ici à un graphe fini ce qui permet d'assimiler ce réseau à un automate fini déterministe où les états sont les marquages accessibles, l'état initial est le marquage initial et les transitions sont définies par celles du graphe. Mais nous pouvons avoir également des graphes de marquages infinis. En effet, il suffit de prendre un réseau réduit à une place et une transition d'entrée pour obtenir un réseau dans lequel la transition est indéfiniment tirable et l'ensemble des marquages accessibles est l'ensemble infini des entiers naturels à partir du moment où le marquage initial est vide.



Graphe des marquages du réseau de la figure 6.1. Ce graphe est fini et permet d'assimiler ce réseau à un automate fini déterministe.

FIG. 6.2: Graphe des marquages.

Les graphes des marquages constituent un outil puissant d'analyse des réseaux et donc des systèmes modélisés par des réseaux de Petri. Le fait qu'ils soient généralement infinis rend cette analyse non triviale.

Définition 6.3.8 (Langage d'un réseau) *Le langage d'un réseau de Petri R est l'ensemble des séquences de franchissements valides à partir du marquage initial et est noté $\mathcal{L}(R)$ ou $L(R)$.*

Contrairement aux automates finis, un état d'un réseau de Petri correspond à un marquage accessible et il n'y a pas *a priori* de notion d'état final ou accepteur. Cela revient à considérer tout marquage comme état accepteur. Le langage d'un réseau de Petri tel qu'il est défini est donc nécessairement préfixe. Pour de nombreux auteurs [Valk 77, Hack 75] le langage d'un réseau dépend d'une fonction d'étiquetage. Notre définition revient à choisir un étiquetage injectif comme il est de mise lorsqu'il s'agit de faire de la synthèse via la théorie des régions.

Définition 6.3.9 (Place bornée) *Une place p d'un réseau de Petri $R = (P, T, Pré, Post, M_0)$ est dite bornée s'il existe $k \in \mathbb{N}$ tel que pour tout marquage accessible M , $M(p) \leq k$.*

Définition 6.3.10 (Réseau de Petri borné) *Un réseau $R = (P, T, Pré, Post, M_0)$ est dit borné s'il existe $k \in \mathbb{N}$ tel que chacune des places de R soit bornée par k . Dans ce cas, on dira également que le réseau R est k -borné.*

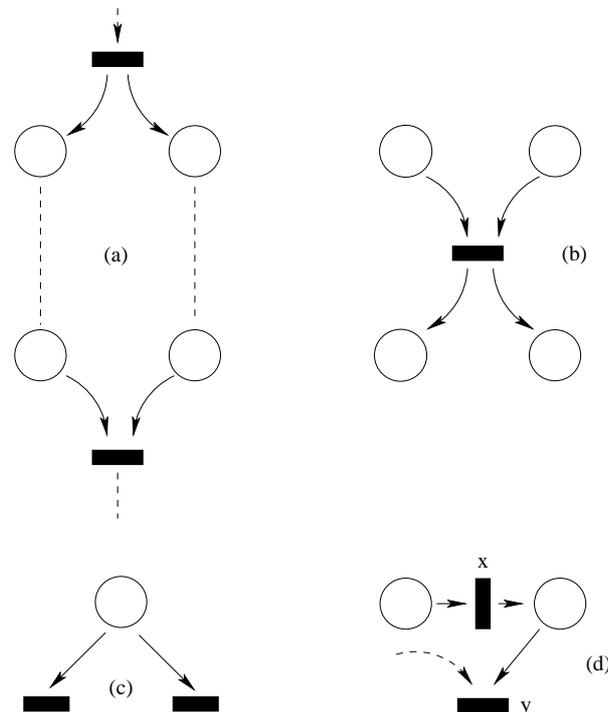
L'ensemble des *réseaux élémentaires* [Ehrenfeucht 90a, Ehrenfeucht 90b] est une classe très importante de réseaux de Petri comme sous-classe de beaucoup de classes de réseaux (la classe des réseaux de Petri, celle des réseaux purs ou encore des réseaux bornés). Formellement dans de tels réseaux les arcs ne peuvent être de poids supérieur à 1, mais pour l'équivalence que nous définirons dans le chapitre 7, ils peuvent être définis comme suit.

Définition 6.3.11 (Réseau élémentaire) *Un réseau de Petri est dit élémentaire s'il est 1-borné et pur.*

Dans la suite, l'ensemble des réseaux élémentaires sera noté *EN* pour *Elementary Nets*.

6.4 Les réseaux de Petri comme outil graphique

Les états d'un système modélisé par un réseau de Petri sont par nature distribués : la configuration d'un réseau est son marquage qui associe à chaque place la valeur locale de l'état en cette place. La règle de tir, elle, va permettre d'exprimer un large éventail de propriétés des systèmes comme la causalité (un événement précède toujours un autre événement), le parallélisme et la synchronisation conjointement à la gestion des ressources (plusieurs places pouvant être en sortie et/ou en entrée d'une transition), le non-déterminisme avec la possibilité de tirer plusieurs transitions, ou encore les conflits lorsqu'une place est partagée par deux transitions en entrée dotée d'un nombre de jetons insuffisant pour satisfaire les deux. Aussi l'idée d'utiliser les réseaux de Petri pour modéliser le comportement dynamique d'un système à événements discrets n'est pas nouvelle. La figure 6.3 propose quelques modélisations possibles de mécanismes liés aux systèmes à événements discrets.



Quelques exemples de mécanismes modélisables naturellement par des réseaux de Petri. En (a) nous avons du parallélisme, en (b) un mécanisme de synchronisation, en (c) un conflit (structurel ici en l'absence de marquage) ou choix (avec partage de ressource) et en (d) une notion de causalité : *y* ne peut être franchie tant que *x* ne l'est pas.

FIG. 6.3: Réseaux de Petri et modélisation graphique

La capacité, à travers la règle de tir, de visualiser graphiquement le comportement d'un réseau de Petri, aide le modélisateur à débusquer les imperfections ou les erreurs du modèle. Les outils associés aux réseaux de Petri permettent un processus de modélisation itératif dans lequel le modèle peut être construit incrémentalement en le modifiant et en le réanalysant alternativement.

6.5 Expressivité et décidabilité

Spécifier un système par des réseaux de Petri offre un large choix d'outils de vérification de propriétés partagées par de tels systèmes. La construction de l'*arbre de couverture* ou du *graphe de couverture* [Karp 69] permet de décider du *problème de la couverture* qui consiste à exhiber un marquage accessible M' qui couvre un marquage donné M (i.e. tel que $\forall p \in P, M(p) \leq M'(p)$), de décider si un réseau est *borné* ou encore si une place du réseau est bornée. Le graphe de couverture consiste à donner une vision finie du graphe des marquages en contrepartie d'une perte d'information. Le principe consiste à explorer exhaustivement par chaînage avant les marquages accessibles à partir du marquage initial tout en repérant les séquences répétitives croissantes (pour un ordre sur l'ensemble des marquages). Nous généraliserons le procédé au cas des strict- \mathbb{Z} -nets et des \mathbb{Z} -nets dans le chapitre 7. Pour résoudre le problème de couverture des techniques de chaînage arrière ont également été proposées. D'abord découvertes en 1976 par Arnold et Latteux [Arnold 76], elles ont été redécouvertes en 1996 par Abdulla, Cerāns, Jonsson et Yih-Kuen [Abdulla 96] puis généralisées par Finkel et Schnoebelen en 1998 [Finkel 98]. Le principe de l'algorithme consiste à calculer l'ensemble des prédécesseurs couvrants du marquage que l'on souhaite couvrir. Contrairement à la construction de l'arbre de couverture, le point de départ n'est plus M_0 le marquage initial mais celui pour lequel le problème de couverture est posé. On doit alors remonter les exécutions possibles plutôt que d'avancer. L'*accessibilité*, c'est-à-dire le problème de savoir si un marquage donné est atteignable à partir du marquage initial à travers une séquence de tirs de transitions, demeure le problème le plus célèbre pour sa difficulté. Il a été montré décidable conjointement par Kosaraju [Kosaraju 82] et Mayr [Mayr 84] pour la catégorie des *systèmes d'additions de vecteurs avec états* (les SAVE) qui englobe celle des réseaux de Petri. Un très joli livre de Reutenauer [Reutenauer 88] est consacré à cet épineux problème qui a occupé durant 25 ans de nombreux chercheurs. La *vivacité* d'une transition, c'est-à-dire le problème de savoir si pour une transition t et tout marquage accessible M il existe au moins un marquage atteignable à partir de M pour lequel t est tirable, et plus généralement la vivacité d'un réseau découlant du problème d'accessibilité sont par conséquent également décidables. Le problème du *blocage*, essentiel pour l'analyse d'un système et lui aussi décidable, consiste à savoir s'il existe des marquages pour lesquels aucune transition n'est franchissable (appelés également marquages *puits*).

L'équation fondamentale :

$$M' = M + C\bar{s}$$

qui lie le nouveau marquage M' avec le marquage de départ M par franchissement de la séquence de transition s (via l'*image commutative* ou *image de Parikh* \bar{s} de s) est à la base des outils d'algèbre linéaire pour l'analyse des réseaux de Petri. Notons que pour une séquence s réduite à une transition $t \in T$, l'équation fondamentale ne caractérise pas la règle de tir. Elle donne simplement, si t est franchissable, le marquage atteint. Par contre dans le cas d'un réseau pur, la transition est franchissable si le marquage atteint est dans \mathbb{N}^P . L'utilisation de l'algèbre linéaire comme moyen d'analyse des réseaux de Petri s'articule autour de la notion d'invariants linéaires. Un *P-flot* est un vecteur y de \mathbb{Z}^P tel que $y^t C = 0$ alors qu'un *P-semiflot* est un vecteur de \mathbb{N}^P qui vérifie la même relation. L'aspect dual est donné par les *T-flots* et les *T-semiflots* qui sont des vecteurs z , respectivement dans \mathbb{Z}^T et \mathbb{N}^T , et qui vérifient $Cz = 0$. *P-flots* et *T-flots* forment des sous-espaces vectoriels (comme noyaux d'une application linéaire). Un *P-flot* est une somme de places pondérée par des entiers, et le cas des *P-semiflots* est particulièrement fécond car on peut en déduire, par exemple, que toutes les places de son support sont bornées. Les *T-semiflots* permettent d'exhiber des comportements cycliques ou répétitifs pour un marquage de départ approprié. Au delà des invariants, un des grands intérêts des *P-semiflots* et des *T-semiflots* est d'offrir une décomposition du modèle représenté par le réseau de Petri. Le sous-réseau obtenu par restriction de l'ensemble des places au support d'un *P-semiflot* est appelé une *composante conservative*. Si le support est P lui-même, le réseau est dit *conservatif*. De même, pour les *T-semiflots* on parlera de *composante consistante*. Ces propriétés sont de plus *structurelles*, c'est-à-dire non dépendantes du marquage initial et liées à un certain nombre de problèmes de décidabilité comme le caractère structurellement borné d'un réseau ou encore la vivacité. Le calcul des semiflots consiste à construire une base de l'espace vectoriel associé. Il s'agit donc de techniques très différentes de celles passant par la construction de graphes de couverture. Les notions de *trappes* et de *siphons* mènent à de nouveaux invariants. Contrairement aux semiflots, les propriétés que l'on peut vérifier ne sont pas structurelles mais restent vraies à partir du moment où dans l'exécution du réseau elles l'ont été au moins une fois. Une trappe est un ensemble de places qui une fois qu'il a capturé un jeton en gardera

par la suite toujours au moins un. Un siphon est, pour sa part, un ensemble de places qui une fois perdu tous ses jetons ne peut plus en récupérer. Un ensemble de places qui est à la fois une trappe et un siphon est donc un P -semiflot. Ces notions permettent l'analyse de certaines propriétés comme le blocage ou la vivacité notamment. Un panorama assez exhaustif de ces techniques se trouve dans [Silva 98]. Citons un dernier point où l'algèbre linéaire intervient : la notion de *distance synchronique*, à l'origine introduite par Carl Adam Petri pour mesurer le degré d'indépendance d'événements dans un cadre concurrent, associée à des techniques d'algèbre linéaire peut conduire à l'obtention de bornes d'invariants synchroniques [Silva 88].

La construction de graphes des marquages et les techniques d'algèbre linéaire sont directement liées à la taille du réseau c'est-à-dire au nombre de places et de transitions du réseau. Aussi l'usage de ces outils s'avère souvent fastidieux voire impossible dans la pratique. Des méthodes de *réduction* ont été proposées [Berthelot 83, Colom 86]. Elles transforment un réseau en un autre réseau plus simple tout en préservant un ensemble de propriétés du réseau de départ. Ces méthodes pour être fructueuses doivent d'une part avoir des conditions d'application fortement récurrentes dans les modèles, doivent conduire d'autre part à des transformations efficaces en termes d'analyse (rien ne sert de réduire la taille du réseau si le graphe d'accessibilité associé n'est guère plus simple) et, enfin, doivent préserver des propriétés intéressantes telles le caractère borné ou l'accessibilité. Dans le jeu des réductions proposées on trouve les *substitutions* de places, la suppression des places *implicites*, la suppression des transitions *neutre* ou encore la *pré* et la *postagglomération* de transitions. D'un point de vue théorique, la décision de certains problèmes peut passer par des transformations de réseaux qui ne réduit pas forcément leurs tailles car ce qui importe c'est de transporter le problème dans une classe de réseaux pour laquelle la solution est connue. Il est facile de montrer par exemple que tout réseau place/transition peut être transformé en un réseau pur modulo une certaine relation d'équivalence. Une transformation d'un réseau R d'une classe C (les réseaux bornés ou purs par exemple) en un réseau R' d'une classe C' s'appelle un *dépliage*. Déplier permet d'obtenir des résultats de décidabilité car si un problème est décidable dans C' il l'est alors dans C . Une fois un réseau déplier on peut également appliquer les outils de vérification connue pour la classe C' sans modification. Enfin, le dépliage permet l'obtention de bornes de complexité à partir du moment où l'on sait borner le coût du dépliage et borner le coût du problème dans la classe cible. Un cas particulier de dépliage est la *normalisation* qui consiste à construire un réseau de Petri dont les arcs sont pondérés par 0 ou 1 et dont le marquage initial impose au plus un jeton par place. L'intérêt des réseaux normalisés est qu'ils sont plus faciles à manipuler et à analyser que les réseaux de Petri standards. Hack [Hack 76] propose une normalisation par anneau (chaque place $p \in P$ est remplacée par un anneau de $M_0(p)$ places), dans [Kasai 82] on trouve une normalisation qui préserve la vivacité, les blocages et la terminaison, alors que dans [Schwer 87] elle est orientée dans le but de préserver la régularité et l'algébricité du langage. On trouvera d'autres normalisations dans [Pelz 92] ou dans [Sifakis 79] notamment.

La comparaison des classes de langages engendrés par les réseaux de Petri par rapport à des classes connues (réguliers, algébriques ...) offre un bon moyen de cerner le pouvoir d'expression des réseaux. Les résultats classiques sur les langages des réseaux de Petri s'obtiennent sur des réseaux étiquetés, c'est-à-dire sur des réseaux munis d'une fonction d'étiquetage qui peut envoyer une transition sur le mot vide. Ceci conduit à une définition du langage d'un réseau largement différente de celle proposée dans la section précédente (qui s'inscrit dans les travaux ayant liens avec les problèmes de synthèse via la théorie des régions [Badouel 99]). Il a été montré que les langages de réseaux de Petri contiennent les langages réguliers et sont incomparables avec les langages algébriques [Jantzen 79]. D'autre part dans le cas d'un étiquetage injectif et non effaçant (en d'autres termes dans le cas où l'étiquetage est l'identité ce qui correspond à notre définition d'un langage de réseau) le graphe de couverture permet de décider si le langage d'un réseau de Petri est régulier ou non [Valk 77]. Dans ce même cas, Schwer [Schwer 87] montre que l'algébricité est décidable.

Le pouvoir d'expression graphique des réseaux de Petri ainsi que l'abondance des outils mathématiques disponibles en font un modèle de choix pour la spécification, la validation, la vérification [Diaz 03] et en particulier le model-checking [Bérard 01].

6.6 La synthèse

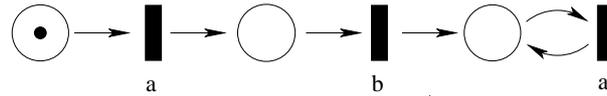
Ce sont les travaux de Ramadge et Woaham [Ramadge 89] qui fondent la théorie de la synthèse des contrôleurs ou superviseurs sur les systèmes à événements discrets et utilisent les automates à états finis et les langages pour modéliser à la fois les systèmes et les commandes. L'étude de systèmes réels entraîne généralement une explosion combinatoire du nombre d'états et l'emploi des réseaux de Petri peut permettre de pallier à ce problème. Il existe diverses approches dans le domaine des réseaux de Petri ([Guia 92, Yamalidou 96, Uzam 06]) mais nous nous intéresserons plus spécialement à la synthèse via la théorie des régions.

Le problème de la synthèse de réseaux concerne la théorie des graphes. Il consiste à décider si un graphe étiqueté par des événements est isomorphe au graphe des marquages d'un réseau de Petri et dans le cas positif de construire ce réseau. Ehrenfeucht et Rozenberg qui ont été les premiers à l'étudier pour le cas des réseaux élémentaires ont défini la notion de *région* [Ehrenfeucht 90a, Ehrenfeucht 90b]. Une région est un ensemble de sommets d'un graphe qui potentiellement peuvent représenter une place c'est-à-dire l'ensemble des états pour lesquels la place est marquée. Les régions sont les ensembles tels que les transitions sur un même événement modifient de la même manière l'appartenance à ces ensembles. Pour qu'un graphe étiqueté puisse être le graphe des marquages d'un réseau élémentaire, Ehrenfeucht et Rozenberg dégagent deux *propriétés de séparation*. D'une part il faut suffisamment de régions pour distinguer tous les états, d'autre part si un événement est interdit à partir d'un état il doit exister une région pour « inhiber » cet événement. Le problème de synthèse pour les réseaux élémentaires a été démontré par la suite indécidable [Badouel 97a].

Pour pouvoir traiter le cas d'autres réseaux, les deux propriétés de séparation restent les mêmes mais avec d'autres notions de régions. Le problème de synthèse pour les réseaux de Petri purs et bornés a été montré décidable en temps polynomial [Badouel 95]. Le problème de synthèse d'un réseau pur et borné à partir d'un langage γ est également étudié et est montré décidable pour un langage rationnel. L'algorithme de synthèse est basé sur des méthodes de programmation linéaire dans les rationnels et permet de décider également en temps polynomial du problème de la synthèse pour les réseaux stratifiés [Badouel 97b] qui sont une sous-classe des réseaux auto-modifiants de Valk [Valk 78]. En fait, il est possible d'obtenir une présentation générique du problème de synthèse en passant par la notion de *type* de réseau que nous définirons dans le chapitre 7. Dans [Badouel 99] on trouvera l'ensemble des résultats concernant la synthèse de réseaux bornés. [Busi 97] utilise les mêmes techniques pour le cas des réseaux de Petri à arcs inhibiteurs. Pour le cas de langages ou de graphes context-free réguliers ou déterministes la synthèse des réseaux non bornés est décidable mais non décidable pour les langages context-free ou les HMSC [Darondeau 04]. Le problème de synthèse a été étendu aux *spécifications automatiques* dans [Badouel 04].

La théorie des régions sert également à la synthèse de superviseurs ou de contrôleurs [Achour 05] sous la forme d'un ensemble de places dites de contrôle qui est ajouté au modèle initial.

Le problème de la synthèse pour des réseaux de Petri étiquetés présente peu d'intérêt du fait que tout système de transition fini est le graphe des marquages d'un réseau de Petri étiqueté. Il est dans ce cas trivial de construire le réseau correspondant en associant à chaque état une place et à chaque arc une transition étiquetée par le même symbole que l'arc et pour lequel on attribue à la seule place associée à l'état initial un jeton. Un tel réseau, de par sa configuration, est d'ailleurs appelé une *graphe d'états* [David 92] et ne présente aucun intérêt d'un point de vue parallélisme. De fait la synthèse de réseaux non étiquetés exhibe le parallélisme sous-jacent compatible avec le comportement séquentiel demandé. De plus, les réseaux de Petri étiquetés possèdent potentiellement des graphes de marquages indéterministes ce qui rend leur étude plus délicate, notamment il est possible d'exhiber des réseaux étiquetés dont les langages ne peuvent être des langages de réseau de Petri non étiquetés. Un exemple est donné figure 6.4.



Le langage de ce réseau est l'ensemble des préfixes de aba^* qui ne peut être le langage d'un réseau de Petri non étiqueté. En effet, à partir du marquage initial, seul a peut être tiré mais qu'une seule fois. Le fait de tirer a consomme donc strictement de la ressource dans au moins une place. Dans un réseau non étiqueté, après le tir de b , a ne pourra donc pas être tiré indéfiniment.

FIG. 6.4: Réseau étiqueté dont le langage ne peut être celui d'un réseau non étiqueté

6.7 Les extensions

Bien qu'outil courant pour la modélisation de systèmes à événements discrets les réseaux de Petri ne couvrent pas nombre de caractéristiques importantes comme le test à zéro, la lecture ou l'écriture de données. Aussi de nombreuses extensions des réseaux de Petri places/transitions usuels ont été proposées soit pour réduire la taille des modélisations, soit pour étendre leur pouvoir d'expression, soit pour disposer d'informations plus précises sur les jetons, soit encore, d'un point de vue théorique, pour essayer d'obtenir une approche uniforme d'un maximum de classes de réseaux de Petri. Certaines de ces extensions sont des réseaux de haut-niveau qui permettent de construire des représentations plus compactes mais n'augmentent pas le pouvoir d'expression des réseaux de Petri : ces réseaux de haut-niveau peuvent être modélisés par des réseaux de Petri équivalents et ces extensions sont donc généralement appelées des abréviations de réseaux. D'autres classes de réseaux sont des extensions strictes dans le sens où il n'est pas possible de les simuler par des réseaux places/transitions standards. Une attention particulière est portée aux réseaux obtenus par remplacement de l'algèbre des places usuelle (le monoïde $(\mathbb{N}, +, 0)$ des entiers naturels) par une algèbre plus générale pour donner des réseaux qualifiées d'*extensions algébriques*.

6.7.1 Les abréviations

Le problème récurrent des modélisateurs est l'explosion combinatoire de la taille des réseaux qu'ils manipulent. Dans certains cas, cette croissance provient de l'intervention répétée de certains types de sous-réseaux attachés à des entités différentes mais ayant des comportements similaires. L'adjonction de fonctionnalités considérées alors comme primitives au modèle standard des réseaux places/transitions peut permettre d'alléger sensiblement le travail du modélisateur en réduisant la taille des réseaux manipulés. Si les classes des réseaux obtenus ainsi ont la même expressivité que les réseaux de Petri standards on parle d'*abréviations de réseaux*. On peut montrer par exemple que les réseaux de Petri tels qu'ils sont définis dans cette thèse sont une abréviation des réseaux pour lesquels la relation de flot est à valeurs dans $\{0, 1\}$. Les abréviations les plus citées dans la littérature sont les *réseaux à capacité*, les *réseaux à prédicats* et les *réseaux colorés* qui sont obtenus par différentes modifications aussi bien au niveau des places qu'au niveau des transitions, des arcs ou de la règle de tir.

Dans les *réseaux à capacité* [André 81] à chaque place est associée sa capacité (une borne finie à ne pas dépasser); la règle de tir est modifiée en interdisant le franchissement d'une transition si le marquage atteint dans une place dépasse sa capacité. Ces réseaux permettent de modéliser élégamment des systèmes avec producteurs et consommateurs où interviennent des tampons.

Dans les *réseaux à prédicats* [Genrich 79] des paramètres sont attribués aux jetons qui peuvent ainsi être distingués. Le tir d'une transition consiste à produire et à consommer des jetons qui satisfont les prédicats qui étiquettent la transition. Les réseaux de Petri à prédicats permettent de représenter de manière concise des réseaux standards de grande taille.

Les *réseaux colorés* [Jensen 92] que l'on peut voir comme un cas particulier des réseaux à prédicats, distinguent les jetons en les colorant. Le franchissement d'une transition par rapport à une couleur consomme et produit des combinaisons linéaires de couleurs définies par des fonctions étiquetant les arcs. Lorsque, dans un système, apparaît plusieurs sous-systèmes ayant une description identique, les réseaux de Petri colorés permettent de s'affranchir de répéter autant de fois ce sous-système en

n'en gardant qu'un seul exemplaire. Ils sont très souvent utilisés pour modéliser certains systèmes complexes car ils conduisent à une forte réduction de la taille du modèle.

6.7.2 Les extensions

Modifier les règles de fonctionnement des réseaux de Petri usuels rend parfois indécidables certaines propriétés. Si on obtient un modèle plus expressif, on parle alors d'*extension*. Les extensions sont intéressantes si elles offrent un gain d'expressivité suffisant eu égard à la perte au niveau de la décidabilité des problèmes évoqués dans la section 6.5. En particulier certaines extensions ont la puissance des machines de Turing rendant indécidable tout problème non trivial. Une première approche consiste à adjoindre au modèle standard des arcs particuliers tout en gardant un fonctionnement habituel dans le cas où ces nouveaux arcs n'interviennent pas. Il s'agit donc fondamentalement d'une modification de la règle de tir. Les *réseaux de Petri à arcs inhibiteurs* ont le pouvoir de tester si une place est vide ou non. Il a été montré [Hack 75] qu'ils avaient la puissance des machines de Turing. C'est une classe de réseau importante car elle sert fréquemment comme modèle de comparaison. Les *réseaux avec arcs Reset* possèdent des arcs capables de mettre à zéro le contenu d'une place quel que soit son contenu initial. L'action d'un arc Reset est tout à fait différente de celle d'un arc inhibiteur car elle est toujours autorisée sans qu'il soit nécessaire d'effectuer un quelconque test. Dans les réseaux avec Reset seule la terminaison et la couverture restent décidables alors que vivacité, accessibilité et caractère borné d'un réseau ou d'une place deviennent indécidables [Dufourd 98]. Les *réseaux avec Transferts* autorisent eux le transfert de la totalité des jetons d'une place dans une autre. Valk [Valk 78] propose avec ses *Self-Modifying nets* de travailler sur des combinaisons linéaires des contenus des places. Les *Self-Modifying nets* étendent donc les réseaux avec Transferts, les réseaux avec Reset et les réseaux avec arcs inhibiteurs et ont donc la puissance des machines de Turing. Catherine Dufourd dans sa thèse [Dufourd 98] généralise tout cela avec les *G-réseaux* (« G » pour généralisés) où une transition peut ajouter ou soustraire aux places l'évaluation de polynômes à coefficients entiers. Tous ces modèles conservent l'idée qu'un réseau manipule des ressources entières avec un tir de transition en deux temps : une première étape de consommation suivie d'une deuxième étape de production. D'autres extensions modifient considérablement la sémantique de base. Par exemple avec les *réseaux de Petri continus* [David 98] la règle de transition agissant sur des états discrets est remplacée par une notion de trajectoire sur des marquages réels. Les *réseaux de Petri hybrides* [David 98] combinent cet aspect continu avec l'aspect discret usuel. Dans les *réseaux de Petri flous* on a une mesure de la possibilité du tir d'une transition qui permet de travailler avec l'idée d'incertitude. On trouve également les réseaux de Petri dits *non-autonomes* dans le sens où ils dépendent de l'occurrence d'événements extérieurs et/ou du temps. Citons les *réseaux de Petri synchronisés*, les *réseaux temporisés*, les *réseaux interprétés* ou encore les *réseaux stochastiques*.

Dans la lignée des modèles étendant strictement les réseaux de Petri usuels tout en tentant d'essayer de préserver un maximum de propriétés décidables on peut citer les *Process Rewrite Systems* [Mayr 00] et les *réseaux de Petri récursifs* [Haddad 07] qui préservent la décidabilité de l'accessibilité ou encore les *data nets* [Lazić 07] pour lesquels la couverture et la terminaison restent décidables ainsi que le caractère borné du réseau sous certaines restrictions.

6.7.3 Les extensions algébriques

Une autre approche dans le but d'obtenir des extensions consiste à remplacer l'algèbre des places (le monoïde des entiers naturels) par une algèbre plus générale. On obtient alors une *extension algébrique*. Une des premières motivations aux extensions algébriques est de présenter une approche uniforme d'un maximum de classes de réseaux de Petri déjà connus comme les réseaux bornés, les réseaux à arcs inhibiteurs ou encore les réseaux continus. Les notions générales telles les marquages, la règle de tir sont formulées dans le cadre unique de l'extension proposée et ne sont plus dépendantes d'une classe particulière. Ce cadre permet d'obtenir généralement d'autres classes de réseaux qui vont permettre de décrire et de modéliser d'autres types de comportements. Avoir un cadre général facilite alors la comparaison entre toutes les classes qui en sont dérivables. Dans l'industrie, il est sou-

vent nécessaire de travailler avec différentes classes de réseaux pour répondre à autant de spécificités différentes. Avoir une classe générale peut alors faciliter la tâche du modélisateur. Une seconde motivation, conséquence directe de la précédente, est que tout résultat obtenu sur l'extension demeure valide, sans avoir à l'adapter, pour toute classe définissable comme cas particulier de l'extension. Un secret espoir reste d'obtenir un cadre algébrique dans lequel l'étude des réseaux de Petri usuels se trouve facilitée. Aujourd'hui, on ne sait pas par exemple caractériser les graphes des marquages des réseaux de Petri. Enfin le choix d'étendre algébriquement les réseaux est naturellement guidé par l'importance de l'outillage algébrique déjà disponible : l'algèbre est un formidable moyen d'attaque des problèmes sur les réseaux de Petri pourquoi ne pas profiter des nombreux résultats déjà acquis dans ce domaine tout en essayant de les étendre ?

Winskel suggère dans [Winskel 87] une formulation algébrique des réseaux de Petri. Cette idée est reprise dans [Meseguer 90] qui voit un réseau places/transitions comme un graphe orienté dont les sommets sont l'ensemble des marquages (i.e. les éléments du monoïde libre et commutatif des places) et les arcs sont étiquetés par des multi-ensembles de transitions qui sont potentiellement tirables de manière concurrente. La règle de tir usuelle peut alors être vue comme un cas particulier dans lequel le multi-ensemble de transitions se réduit à un singleton. A notre connaissance, il s'agit du premier article qui fournit une généralisation de l'algèbre utilisée pour les places du réseau. Les auteurs envisagent comme algèbres possibles les monoïdes commutatifs et plus généralement les semi-modules. Ils suggèrent également d'employer des groupes abéliens mais jugent cette approche trop générale. Dans le cas d'un monoïde commutatif $(A, +, e)$, il n'existe pas *a priori* d'inverse. Un réseau de Petri (non marqué) est alors un quadruplet (P, T, I, O) où I et O sont des fonctions qui à chaque transition associe une valeur de A (dans le cas où A est le monoïde libre des places on retrouve bien la définition usuelle). La règle de tir : une transition $t \in T$ est franchissable à partir d'un marquage $M \in A^P$ s'il existe $X \in A^P$ tel que $X + I(t) = M$, dans ce cas le marquage M' atteint est défini par $M' = X + O(t)$.

La démarche que l'on vient de voir est généralisée dans [Ehrig 94] et [Padberg 96] où l'algèbre considérée est un magma associatif et commutatif avec une règle de tir similaire. Ces travaux emploient très largement la théorie des catégories et mènent aux *Abstract Petri Nets*. Cependant le fait que l'équation $X + I(t) = M$ puisse avoir plus d'une solution rend indéterministes les systèmes ainsi décrits ; caractéristique qui peut être levée en spécifiant des conditions supplémentaires. D'autres problèmes apparaissent, par exemple l'usage d'algèbres non simplifiables (i.e. dans lesquels $x + y = x + z$ n'entraîne pas nécessairement que $y = z$) peut mener à des états différents si on commute des transitions dans une séquence ! Dans le réseau de la figure 6.5 nous avons $P = \{a, b\}$, $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ et l'algèbre choisie est l'ensemble des parties de P munie de l'union c'est-à-dire $(2^P, \cup)$ ². Un marquage M est défini comme étant un élément de 2^P . La règle de tir est alors : $t \in T$ est franchissable à partir d'un marquage $M \in 2^P$ s'il existe $X \in 2^P$ tel que $X \cup I(t) = M$, dans ce cas le marquage M' atteint après franchissement est $M' = X \cup O(t)$. Le problème de l'existence de plusieurs solutions à l'équation $X \cup I(t) = M$ est résolu en prenant pour X le complémentaire de $I(t)$ dans M .

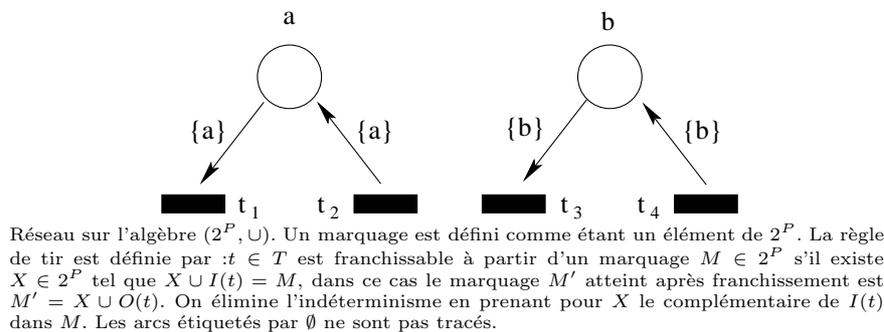
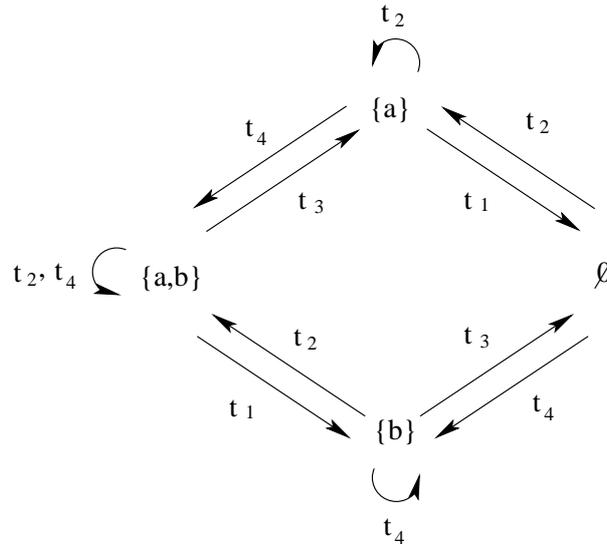


FIG. 6.5: Réseau sur l'algèbre $(2^P, \cup)$

Le graphe des marquages de ce réseau est donné figure 6.6 où l'on peut voir qu'à partir de l'état $\{a, b\}$ le franchissement de la séquence $t_2 t_1 t_3$ ne mène pas au même état que le franchissement de la séquence $t_1 t_3 t_2$!

On trouve une autre généralisation dans [Tix 96] où l'algèbre utilisé est le cône positif d'un groupe

² Julia Padberg appelle de tels réseaux des *unsafe elementary nets*



Le franchissement de la séquence $t_2 t_1 t_2$ à partir de $\{a, b\}$ conduit à l'état \emptyset alors que $t_1 t_3 t_2$ mène à $\{a\}$!

FIG. 6.6: Graphe des marquages du réseau 6.5

partiellement ordonné. Un réseau de Petri (non marqué) est ici encore un quadruplet (P, T, I, O) avec $I, O : T \rightarrow H$ et H l'algèbre choisie. De la même façon, une transition $t \in T$ est franchissable pour un marquage $M \in H$ si $\exists X \in H : X + I(t) = M$ et le tir de la transition conduit au nouveau marquage $M' = X + O(t)$. Si on considère un groupe non-commutatif on retrouve un graphe des marquages non nécessairement commutatif comme dans le cas de la figure 6.6.

Gabriel Juhás [Juhás 98] propose lui d'utiliser des algèbres partielles et plus précisément des magmas partiels inclus dans des groupes abéliens et dont les lois peuvent être vues comme des restrictions des lois de ces groupes³. Un magma partiel est un triplet $(H, \perp, +)$ où $\perp \subseteq H \times H$ est le domaine de $+$ et $+$: $\perp \rightarrow H$ est une opération partielle. La règle de tir pour une transition t consiste alors à chercher X tel que à la fois $X + I(t) \in \perp$ et $X + O(t) \in \perp$ et tel que $X + I(t) = M$, M étant le marquage courant. Dans ce cas le tir de t peut être effectué et conduit au marquage $M' = X + O(t)$. Il s'intéresse plus particulièrement aux cônes positifs de groupes abéliens partiellement ordonnés et appelle ces réseaux des *ACG nets* pour *Abelian cone group Petri nets*. Les extensions étudiées par Gabriel Juhás sont conduites dans le but de préserver un certain nombre de propriétés liées à la sémantique des processus concurrents, notamment dans le but de préserver des propriétés de déterminisme et de commutativité dans les graphes de marquages.

Il est à noter que dans toutes ces extensions l'algèbre des places et des transitions (i.e. les étiquettes) est la même. On peut imaginer distinguer les deux en posant que les inscriptions sur les arcs prennent leurs valeurs dans une algèbre de propriétés abstraites. Une précondition apparaît alors comme une garde stipulant qu'une propriété doit être satisfaite par les ressources figurant dans les places correspondantes et une postcondition est interprétée comme l'ajout de ressources qui forcent une propriété.

6.8 Des outils

De nombreux outils logiciels ont été développés pour éditer, simuler, aider à la conception, synthétiser ou encore analyser des réseaux de Petri. *Design/CPN* [Albert 89] développé à l'université de Aarhus au Danemark est un des plus utilisés, il permet la construction et la modification de réseaux, leur simulation interactive ou automatique ainsi que la construction et l'analyse de leurs graphes des marquages. Comme son nom l'indique, cet outil porte sur les réseaux de Petri colorés

³ Dans la terminologie de Gabriel Juhás [Juhás 98] ces réseaux sont appelés des *AGE nets* pour *Abelian group embeddable p/t net*.

qui sont, comme nous venons de le voir, une *extension* des réseaux places/transitions. *Design/CPN* a été remplacé par *CPN Tools* [Ratzer 03] depuis quelques années. *TINA* [Berthomieu 04] (LAAS Toulouse) permet de construire des espaces d'états abstraits pour les réseaux de Petri et les réseaux temporels. Le lecteur intéressé par une étude comparative des outils logiciels dédiés aux réseaux de Petri pourra consulter le rapport technique de Störle [Störle 98] accessible à partir du site *Petri Nets World* hébergé par l'université de Hambourg. On trouvera sur ce même site une page répertoriant la plupart d'entre-eux et en particulier des outils plus récents et ne concernant pas seulement les réseaux de Petri de haut niveau.

La théorie des régions est mise en oeuvre dans l'outil *Petrify* [Cortadella 96] pour calculer des régions minimales d'un automate représenté par un diagramme de décisions binaires. *SYNET* est un outil de synthèse de réseaux de Petri bornés à partir de systèmes de transitions finis [Caillaud 97]. Il repose sur des méthodes de programmation linéaire dans les nombres rationnels.

Dans le cadre des extensions algébriques des réseaux de Petri mentionnons le programme appelé *GENESIM* pour *GEneral NEt SIMulator* [Juhás 98] qui permet de dessiner et de simuler des *AGE nets* c'est-à-dire des *Abelian Group Embedable p/t nets*. A chaque place peut être attaché un groupe abélien ayant un nombre de générateurs fini et à chaque transition des gardes (restriction de la règle de tir par l'emploi d'une algèbre partielle). *Petri Net Kernel* [Ermel 01] offre des méthodes pour administrer et modifier les réseaux de Petri et permet à l'utilisateur de définir ses propres classes de réseaux en implémentant leurs caractéristiques spécifiques. *Petri Net Kernel* a été étendu pour pouvoir travailler avec les *Parameterized Net Classes* [Ehrig 97] issus des Abstract Petri Nets [Padberg 96].

6.9 Conclusion

Les réseaux de Petri sont fréquemment utilisés dans le but de modéliser et d'analyser les systèmes à événements discrets. Malheureusement nombre de caractéristiques courantes de ces derniers ne sont pas supportées par les réseaux de Petri usuels. Aussi, de nombreuses extensions ont été proposées pour répondre à ce problème mais bien souvent ce que l'on gagne en expressivité se perd en décidabilité.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux de Petri places/transitions usuels ainsi que leur outillage mathématique. Un de leurs grands intérêts est qu'ils permettent de représenter graphiquement, donc de manière naturelle et intuitive, de nombreux cas de figures comme le parallélisme, le choix ou encore le partage de ressources. Nous avons exposé ensuite leur pouvoir d'expression ainsi que les plus importants résultats de décidabilité. Pour le concepteur, le problème de la synthèse d'un réseau à partir de spécifications peut s'avérer crucial et nous l'avons abordé à travers la théorie des régions. Quelques extensions sont présentées, en particulier les extensions dites algébriques, car celles proposées dans les prochains chapitres sont de cette nature.

Bibliographie

- [Abdulla 96] Abdulla, P., Cerans, K., Jonsson, B., et Yih-Kuen, T. (1996). General decidability theorems for infinite-state systems. In *LICS '96 : Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, pages 313–321, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Achour 05] Achour, Z., Rezg, N., et Xie, X. (2005). Petri net controller synthesis using theory of regions. In *1st I*PROMS Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, IPROMS 2005*.
- [Albert 89] Albert, K., Jensen, K., et Shapiro, R. (1989). DESIGN/CPN : A Tool Package Supporting the Use of Colored Nets. *Petri Net Newsletter*, 32 :22–35.
- [André 81] André, C. (1981). *Systèmes à évolutions parallèles : modélisation pour réseaux de Petri à capacité et analyse par abstraction*. Université de Nice. Thèse d'état.
- [Arnold 76] Arnold, A. et Latteux, M. (1976). *Vector Addition Systems and Semi-Dyck Languages*. Université de Lille, Rapport de recherche 78.
- [Badouel 95] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1995). Polynomial algorithms for the synthesis of bounded nets. In *Proceedings of TAPSOFT'95*, volume 915 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 364–378. Springer.
- [Badouel 97a] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1997a). The synthesis problem for elementary net systems is NP-complete. *Theoretical Computer Science*, 186 :107–134.
- [Badouel 97b] Badouel, E. et Darondeau, P. (1997b). Stratified Petri Nets. In *Proceedings of FCT'97*, volume 1279 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 117–128. Springer.
- [Badouel 99] Badouel, E. et Darondeau, P. (1999). Theory of regions. *Lecture Notes in Computer Science*, 1491 :529–586.
- [Badouel 04] Badouel, E. et Darondeau, P. (2004). The synthesis of Petri nets from path-automatic specifications. *Information and Computation*, 193 :117–135.
- [Berthelot 83] Berthelot, G. (1983). *Transformations et analyse de réseaux de Petri : application aux protocoles*. Mémoire de Thèse, Université Paris VI.
- [Berthomieu 04] Berthomieu, B., Ribet, P.-O., et Vernadat, F. (2004). The tool TINA – Construction of Abstract State Spaces for Petri Nets and Time Petri Nets. *International Journal of Production Research*, 42(14).
- [Busi 97] Busi, N. et Pinna, G. (1997). Synthesis of nets with inhibitor arcs. In *Proceedings of Concur'97*, volume 1243 of *LNCS*, pages 151–165. Springer.
- [Bérard 01] Bérard, B., Bidoit, M., Finkel, A., Laroussinie, F., Petit, A., Petrucci, L., et Schnoebelen, P. (2001). *Systems and Software Verification. Model-Checking Techniques and Tools*. Springer.
- [Caillaud 97] Caillaud, B. (1997). SYNET : un outil de synthèse de réseaux de Petri bornés, applications. Rapport Technique 3155, INRIA Research Report.

- [Colom 86] Colom, J., Martinez, J., et Silva, M. (1986). Packages for validating discrete production systems modeled with Petri Nets. In *IMACS-IFAC Symposium on modelling and simulation for control of lumped and distributed parameter systems*, pages 457–462.
- [Cortadella 96] Cortadella, J., Kishinevsky, M., Kondratyev, A., Lavagno, L., et Yakovlev, A. (1996). Complete state encoding based on the theory of regions. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems*, pages 36–47.
- [Darondeau 04] Darondeau, P. (2004). Unbounded Petri net synthesis. *Lecture Notes in Computer Science*, 3098 :413–438.
- [David 92] David, R. et Alla, H. (1992). *Du Grafset aux Réseaux de Petri*. Hermès.
- [David 98] David, R. et Alla, H. (1998). Continuous and Hybrid Petri Nets. *Journal of Circuits Systems Computers*, 8(1) :159–188.
- [Diaz 03] Diaz, M., éditeur (2003). *Vérification et mise en oeuvre des réseaux de Petri*. Hermès.
- [Dufourd 98] Dufourd, C. (1998). *Réseaux de Petri avec Reset/Transfert : Décidabilité et Indécidabilité*. Mémoire de Thèse, ENS Cachan.
- [Dufourd 98] Dufourd, C., Finkel, A., et Schnoebelen, P. (1998). Reset nets between decidability and undecidability. In *Proceedings of 25th ICALP'98*, volume 1443, pages 103–115. LNCS, Springer.
- [Ehrenfeucht 90a] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990a). Partial 2-structures; Part I :Basic notions and the Representation Problem. *Acta Informatica*, 27 :315–342.
- [Ehrenfeucht 90b] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990b). Partial 2-structures; Part II : State Spaces of Concurrent Systems. *Acta Informatica*, 27 :343–368.
- [Ehrig 97] Ehrig, H. et Padberg, J. (1997). A Uniform Approach to Petri Nets. In *Foundations of Computer Science : Potential - Theory - Cognition, to Wilfried Brauer on the occasion of his sixtieth birthday*, volume 1337 of LNCS, pages 219 – 231. Springer.
- [Ehrig 94] Ehrig, H., Padberg, J., et Rozenberg, G. (1994). Behaviour and realization construction for Petri nets based on free monoid and power set graphs. In *Workshop on Concurrency, Specification & Programming*. Humboldt University. Extended version as Technical Report of University of Leiden.
- [Ermel 01] Ermel, C. et Weber, M. (2001). Implementation of Parameterized Net Classes with the Petri Net Kernel of the Petri Net Baukasten. In *Unifying Petri Nets, Advances in Petri Nets*, volume 2128 of LNCS, pages 79–102. Springer.
- [Finkel 98] Finkel, A. et Schnoebelen, P. (1998). Fundamental structures in well-structured infinite transition systems. In Lucchesi, C. L. et Moura, A. V., éditeurs, *Proceedings of the 3rd Latin American Symposium on Theoretical Informatics (LATIN'98)*, volume 1380 of LNCS, pages 102–118, Campinas, Brasil. Springer.
- [Genrich 79] Genrich, H., Lautenbach, K., et Thiagarajan, P. (1979). Elements of General Net Theory. In *Lectures Notes in Computer Science*, volume 84, pages 21–163. Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems : Net Theory and Applications.
- [Guia 92] Guia, A., DiCesare, F., et Silva, M. (1992). Generalized mutual exclusion constraints on nets with uncontrollable transitions. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 974–979.
- [Hack 75] Hack, M. (1975). *Petri Net Languages*. Computation Structures Group Memo 124, Project MAC, MIT.
- [Hack 76] Hack, M. (1976). *Decidability questions for Petri nets*. Mémoire de Thèse, MIT/LCS/TR-161, Massachusetts Institute of Technology, Lab. for Computer Science.
- [Haddad 07] Haddad, S. et Poitrenaud, D. (2007). Recursive Petri Nets - Theory and Application to Discrete Event Systems. *Acta Informatica*, 44(7-8) :463–508.
- [Jantzen 79] Jantzen, M. (1979). On the hierarchy of Petri net languages. *R.A.I.R.O. Informatique théorique*, 13 :19–30.
- [Jensen 92] Jensen, K. (1992). *Coloured Petri nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, volume 1 of *EATCS Monographs on Theoretical Computer Science*. Springer Verlag.

- [Juhás 98] Juhás, G. (1998). *Algebraically Generalised Petri Nets*. Mémoire de Thèse, Institute of Control Theory and Robotics. Slovak Academy of Sciences.
- [Karp 69] Karp, R. et Miller, R. (1969). Parallel Program Schemata. *Journal of Computer and System Sciences*, 3(2) :147–195.
- [Kasai 82] Kasai, T. et Miller, R. (1982). Homomorphism between models of parallel computation. *Journal of computer science*, 25.
- [Kosaraju 82] Kosaraju, S. R. (1982). Decidability of Reachability in Vector Addition Systems. In *Proc. of the 14th Annual ACM Symp. on Theory of Computing, San Francisco, May 5–7, 1982*, pages 267–281.
- [Lazić 07] Lazić, R., Newcomb, T., Ouaknine, J., Roscoe, A., et Worell, J. (2007). Nets with Tokens Which Carry Data. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 4546, pages 301–320. ICATPN’07.
- [Mayr 84] Mayr, E. W. (1984). An Algorithm for the General Petri Net Reachability Problem. *SIAM J. Comput.*, 13(3) :441–460.
- [Mayr 00] Mayr, R. (2000). Process Rewrite Systems. *Information and Computation*, 156(1-2) :264–286.
- [Meseguer 90] Meseguer, J. et Montanari, U. (1990). Petri Nets are Monoids. *Information and Computation*, 88(2) :105–155.
- [Padberg 96] Padberg, J. (1996). *Abstract Petri Nets : Uniform Approach and Rule-Based Refinement*. Mémoire de Thèse, Technical University of Berlin.
- [Pelz 92] Pelz, E. (1992). Normalization of place/transition-systems preserves net behavior. *Theoretical Informatics and Applications, R.A.I.R.O.*, 26(1).
- [Peterson 81] Peterson, J. (1981). *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, Inc.
- [Peterson 73] Peterson, J. L. (1973). *Modeling of Parallel Systems*. Stanford, California : Stanford University, Department of Electrical Engineering, PhD Thesis.
- [Petri 62] Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Bonn : Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 2.
- [Ramadge 89] Ramadge, P. et Woham, W. (1989). The Control of Discrete Event Systems. In *Special issue on Dynamics of Discrete Event Systems*, volume 77, pages 81–98. IEEE.
- [Ratzer 03] Ratzer, A., Wells, L., H.M.Lassen, Laursen, M., Qvortrup, J. F., Stissing, M., Westergaard, M., Christensen, S., et Jensen, K. (2003). CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets. In *Proceedings of the 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (ICATPN 2003), Eindhoven, The Netherlands, June 23-27, 2003 — Volume 2679 of Lecture Notes in Computer Science / Wil M. P. van der Aalst and Eike Best (Eds.)*, pages 450–462. Springer-Verlag.
- [Reisig 85] Reisig (1985). *Petri Nets : an introduction*. Monographs on Theoretical Computer Science. Springer Verlag.
- [Reutenauer 88] Reutenauer, C. (1988). *Aspects mathématiques des réseaux de Petri*. Masson.
- [Schwer 87] Schwer, S. (1987). *Décidabilité de l’algébricité des langages associés aux réseaux de Petri*. Mémoire de Thèse, Université Paris VII. Thèse 3^{ième} cycle.
- [Sifakis 79] Sifakis, J. (1979). *Le contrôle des systèmes asynchrones : concepts, propriétés, analyse statique*. Mémoire de Thèse, U.S.M. Grenoble. Thèse 3^{ième} cycle.
- [Silva 88] Silva, M. et Colom, J. M. (1988). On the computation of structural synchronic invariants in P/T nets. In *Advances in Petri Nets 1988*, pages 386–417, London, UK. Springer-Verlag.
- [Silva 98] Silva, M., Teruel, E., et Colom, J. (1998). Linear Algebraic and Linear Programming Techniques for the Analysis of Place or Transition Net Systems. In *Lectures on Petri Nets I : Basic Models, Advances in Petri Nets, the volumes are based on the Advanced Course on Petri Nets*, pages 309–373, London, UK. Springer-Verlag.
- [Störlle 98] Störlle, H. (1998). An Evaluation of High-End Tools for Petri-Nets. Rapport technique, Ludwig-Maximilians-Universität, Munich.
- [Tix 96] Tix, P. (1996). One FIFO place realizes zero-testing and Turing-machines. *Petri Net Newsletter*, 51 :3–15.

-
- [Uzam 06] Uzam, M. et Wonham, W. M. (2006). A hybrid approach to supervisory control of discrete event systems coupling RW supervisors to Petri nets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7-8) :747–760.
- [Valk 78] Valk, R. (1978). Self-Modifying Nets, a Natural extension of Petri nets. In *Proceedings of ICALP'78*, volume 62 of *LNCS*, pages 464–476. Springer.
- [Valk 77] Valk, R. et Vidal-Naquet, G. (1977). On the Rationality of Petri Net Languages. *Lecture Notes in Computer Science : Theoretical Computer Science, Darmstadt, March, 1977*, 48 :319–328.
- [Winskel 87] Winskel, G. (1987). Petri nets, algebras, morphisms and compositionality. *Information and Computation*, 72 :193–238.
- [Yamalidou 96] Yamalidou, K., Moody, J., Lemmon, M., et Antsaklis, P. (1996). Feedback control of Petri nets based on place invariants. *Automatica*, 32(1) :15–28.

Chapitre 7

Group-nets

7.1 Introduction

En mer les comportements cycliques sont légion : houle, oscillations du vent, roulis rythmique du bateau ... Ce chapitre démarre sur la proposition d'un nouveau type de réseau basé sur l'idée de pouvoir modéliser de manière extrêmement compacte des comportements cycliques étiquetés par un unique événement en utilisant des groupes cycliques en guise d'algèbre pour les places. Nous cherchons ensuite en utilisant le groupe des entiers relatifs à obtenir une extension des réseaux de Petri tout en préservant la décidabilité des (ou de certains) problèmes évoqués au chapitre 6. Dans ce cadre des algorithmes de décision sont donnés pour certaines classes de ces réseaux. D'autre part, afin de connaître le pouvoir d'expression de nos modèles, nous les comparons à des modèles connus. Nous ébauchons ainsi une classification de nos réseaux par rapport à des réseaux classiques comme les réseaux de Petri bornés ou les réseaux de Petri à arcs inhibiteurs et donnons, dans certains cas d'inclusion, les algorithmes permettant de passer d'un type de réseaux à l'autre.

Ce chapitre regroupe, réorganise et complète les articles [Guillou 04, Guillou 09] et est construit comme suit : après un bref rappel des définitions nécessaires à la lecture, la section 7.3 traite des *strict-group-nets*. Ce qui motive l'introduction de ces réseaux, où l'algèbre des places est un groupe privé de son élément neutre, est leur capacité naturelle à modéliser des cycles dans des systèmes de transitions étiquetées via l'utilisation de groupes cycliques. Mais cette piste est rapidement délaissée car le lien de l'algèbre des réseaux de Petri avec le groupe \mathbb{Z} incite vivement à étudier les *strict- \mathbb{Z} -nets*. La possibilité de définir un ordre partiel bien fondé sur \mathbb{Z} permet alors de s'attaquer aux problèmes de la décidabilité du caractère borné d'un réseau et plus particulièrement d'une place. Les *strict- \mathbb{Z} -nets* n'étendant pas les réseaux de Petri excepté lorsqu'ils sont purs, nous proposons dans la section 7.4 une extension commune appelée *\mathbb{Z} -net* en adjoignant un arc particulier dit « inconditionnel ». Les *\mathbb{Z} -nets* conservent des propriétés intéressantes des *strict- \mathbb{Z} -nets* et ne sont pas comparables en particulier aux réseaux de Petri à arcs inhibiteurs. Le fait que la notion de ressource *stricto sensu* disparaisse rend le fonctionnement de ces réseaux peu intuitif et les rend donc difficiles à manipuler. Mais le fait que l'on retrouve ou que l'on étende quelques grandes classes des réseaux de Petri (réseaux de Petri, réseaux de Petri purs, réseaux de Petri bornés, réseaux élémentaires) à partir des *group-nets* pour des groupes particuliers permet d'avoir une vision uniforme de ces classes et justifie l'intérêt de ce nouveau modèle. Pour se rapprocher encore plus des réseaux de Petri où une transition s'effectue en deux phases (une phase de consommation suivie d'une phase production), dans la section 7.5.1 nous définissons une classe de réseaux, les *group₂ - nets*, qui permet d'obtenir une vision unifiée des *strict- \mathbb{Z} -nets* et des *\mathbb{Z} -nets*. Enfin, la conclusion en 7.6 propose un certain nombre de pistes de recherche sur les modèles étudiés.

7.2 Préliminaires

Commençons par fixer la terminologie utilisée dans ce chapitre.

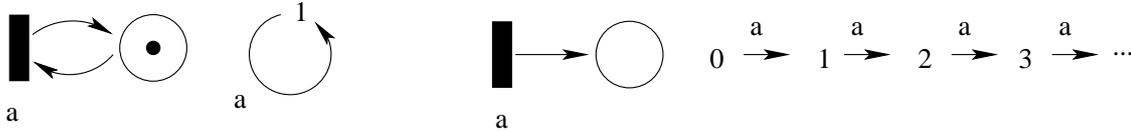
Définition 7.2.1 (Morphisme de systèmes de transitions) Soient (S_1, E_1, T_1) et (S_2, E_2, T_2) deux systèmes de transitions. Un morphisme de systèmes de transitions $(\sigma, \eta) : (S_1, E_1, T_1) \rightarrow (S_2, E_2, T_2)$ est une paire d'applications $\sigma : S_1 \rightarrow S_2$ et $\eta : E_1 \rightarrow E_2$ telle que $s \xrightarrow{e} s' \in T_1 \implies \sigma(s) \xrightarrow{\eta(e)} \sigma(s') \in T_2$.

Définition 7.2.2 (Equivalence de réseaux) Deux réseaux sont dits équivalents si leurs graphes des marquages sont isomorphes¹.

Ce choix est dû au fait que, d'une part, nous nous interdisons l'étiquetage et que, d'autre part, cette notion est centrale dans la synthèse de réseau, outil que nous utiliserons à plusieurs reprises dans la suite. Le problème de synthèse consiste à construire un réseau, après avoir décidé de son existence, dont le graphe des marquages est isomorphe à un graphe donné. Trivialement, nous avons le résultat suivant :

Lemme 7.2.1 L'équivalence des réseaux est plus fine que l'égalité des langages.

En effet deux réseaux équivalents ont nécessairement le même langage (à un isomorphisme près des alphabets), par contre, deux réseaux ayant même langage ne sont pas nécessairement équivalents. Il suffit pour s'en convaincre d'analyser la figure 7.1 qui présente deux réseaux dont le langage commun est l'ensemble des préfixes de a^* ainsi que leurs graphes des marquages (dessinés à droite des réseaux).



Dans le réseau de gauche une self-loop maintient le marquage à un, son graphe des marquages est donc réduit à un état avec une boucle, mais son langage est l'ensemble des séquences de a , i.e. $a^* = a^k | k \in \mathbb{N}$. Dans le réseau de droite a est franchissable indéfiniment et le tir de la transition accumule de la ressource dans la place. Le graphe des marquages est donc infini et donc non isomorphe à celui du réseau de gauche alors que les langages associés sont égaux.

FIG. 7.1: Deux RdP ayant même langage mais dont les graphes de marquages ne sont pas isomorphes

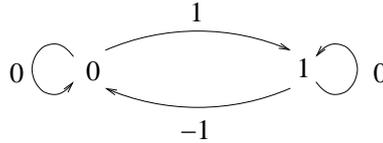
Nous utiliserons par la suite cette équivalence pour comparer deux réseaux de classes différentes (i.e. pas nécessairement des réseaux de Petri) à partir du moment où une notion de graphe des marquages est définie. Nous renvoyons le lecteur à l'article de Murata [Murata 89] pour une définition précise de l'arbre et du graphe de couverture d'un réseau de Petri. Rappelons simplement qu'il s'agit de structures finies qui donnent une description partielle de l'ensemble des marquages accessibles du réseau et qui permettent de vérifier de nombreuses propriétés comme la terminaison, la couverture ou le caractère borné d'une place ou d'un réseau.

Pour pouvoir comparer des classes de réseaux entre elles, outre les notions d'équivalence de réseaux et de langages de réseaux, nous utiliserons un certain nombre de notions propres à la synthèse des réseaux généralisés et à la théorie des régions [Badouel 99].

Définition 7.2.3 (Type d'un réseau) Le type d'un réseau est un système de transition $\tau = (Q, E, T)$ où Q et E sont des ensembles disjoints (respectivement l'ensemble des états et l'ensemble des événements) et $T \subseteq Q \times E \times Q$ (T est l'ensemble des transitions).

En guise d'exemple le type des réseaux élémentaires est donné figure 7.2. Par définition des réseaux élémentaires (voir chapitre 6) les places sont bornées par 1 et les réseaux sont purs. Les seules valeurs que peut prendre une place sont donc 0 et 1 et il n'y a pas de boucle exceptées celles étiquetées par 0.

¹ Rappelons que les graphes des marquages peuvent être vus comme des systèmes de transitions étiquetées



Les réseaux élémentaires sont par définition purs et 1-bornés. Par conséquent, les seules boucles possibles sont celles étiquetées par 0.

FIG. 7.2: Type des réseaux élémentaires

Dans ce chapitre, nous manipulerons des types de réseau déterministes, en d'autres mots, si $(q, a, q') \in T \wedge (q, a, q'') \in T$ alors $q' = q''$.

Le type sert de paramètre pour une définition plus générale de familles de réseaux, les réseaux de type un type donné qui peuvent être infinis à la fois en termes de nombre de places et en nombre de transitions.

Définition 7.2.4 (Réseaux de type τ et leurs marquages) *Un réseau de type $\tau = (Q, E, T)$ est une structure $N = (P, E', f, M_0)$ où P et E' sont des ensembles disjoints (respectivement de places et d'événements) et f est une application de $P \times E'$ vers E (appelée relation de flot). Un marquage de N est une application de P vers Q . M_0 est le marquage initial de N .*

Comme pour les réseaux de Petri, le comportement d'un réseau de type τ est complètement déterminé par la règle de tir.

Définition 7.2.5 Règle de tir pour les réseaux de type τ *Soit $N = (P, E', f, M_0)$ un réseau de type $\tau = (Q, E, T)$ et M un marquage de N . Un événement $e \in E'$ peut être tiré à partir de M , conduisant au franchissement $M[e]M'$ si et seulement si il existe pour tout $p \in P$, $(M(p), f(p, e), M'(p))$ dans T .*

Terminons par la notion de région que l'on peut définir de manière générale pour des systèmes de transitions.

Définition 7.2.6 (Région d'un système de transitions) *Soit (Q_1, E_1, T_1) un système de transitions et $\tau = (Q_2, E_2, T_2)$ un type. Une région d'un système de transition est un morphisme (σ, ρ) de (Q_1, E_1, T_1) vers (Q_2, E_2, T_2) .*

7.3 Strict-Group-nets

7.3.1 Motivation initiale et définitions

Il existe de nombreux phénomènes cycliques en mer dûs notamment aux mouvements générés par la houle. Par exemple, un barreur sait qu'après un virement son bateau change d'amure. La modélisation de l'amure d'un voilier en fonction de la manœuvre de virement est donnée figure 7.3. Qu'une même action permette de passer d'un état à un autre et vice-versa se retrouve fréquemment dans la vie courante. Par exemple, actionner une lampe via un bouton poussoir permet indifféremment de l'allumer ou de l'éteindre.

Il n'existe aucun réseau de Petri dont le graphe des marquages est isomorphe à ce système de transitions étiqueté, car tous les éléments non nul de l'algèbre des places d'un réseau de Petri sont d'ordre infini. On pourrait bien entendu le faire à l'aide d'un réseau de Petri étiqueté avec au moins deux transitions distinctes portant la même étiquette et au moins deux places (voir la figure 7.4).

L'idée de travailler sur un groupe contenant des éléments d'ordre 2 pourrait permettre de n'utiliser qu'une seule transition et qu'une seule place. Si on considère un système plus complexe avec des cycles

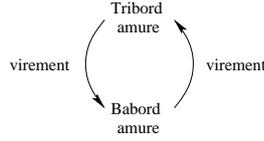
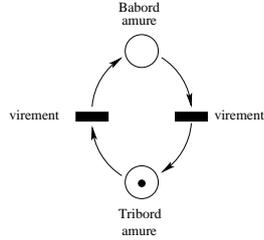


FIG. 7.3: Action du virement sur l'amure d'un voilier



Plus petit réseau de Petri étiqueté (en termes de nombre de places et de transitions) ayant son graphe des marquages isomorphe à celui de la figure 7.3.

FIG. 7.4: Solution au problème du virement par un RdP étiqueté

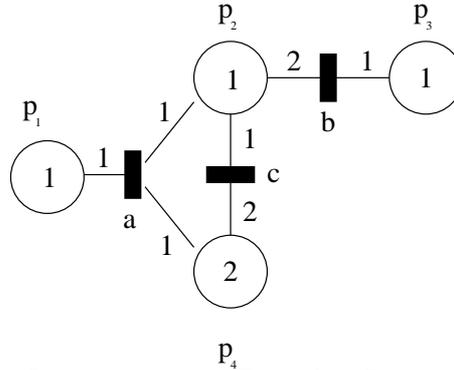
de longueurs différentes, chacun étiqueté par une seule étiquette, le nombre de transitions et de places nécessaires dans un réseau de Petri étiqueté augmentera en regard de la complexité du système. Dans le cadre de la vérification de systèmes parallèles et distribués, l'obtention de modèles compacts peut s'avérer crucial. L'idée d'utiliser des groupes cycliques a déjà été exploitée dans [Bourcerie 97] avec les réseaux de Petri $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$. Les réseaux de Petri $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ sont des extensions des réseaux colorés et servent à répondre aux problèmes de modélisation à séquençements complexes. Les étiquettes des arcs qui sont des fonctions sur des couleurs sont remplacées par des polynômes sur $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ avec p premier. Un des intérêts des réseaux de Petri $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ est de pouvoir faire de l'apprentissage dynamique en temps réel [Bourcerie 03]. Gabriel Juhás dans sa thèse [Juhás 98] propose d'utiliser des algèbres partielles permettant de restreindre ainsi la règle de tir, l'algèbre des réseaux de Petri étant vu comme cône positif du groupe des entiers relatifs. Mais, pour un groupe cyclique fini, la manière de restreindre la loi devient a priori arbitraire (car notamment, il n'est pas possible d'y définir un ordre compatible avec la loi du groupe). Une solution simple car universelle consiste à interdire le zéro du groupe. Reste alors une question : pourquoi continuer à tirer une transition en deux temps (phase de consommation et phase de production), sachant qu'il n'est plus nécessaire d'orienter le graphe car tout élément est inversible? Nous proposons donc de définir une nouvelle classe de réseaux appelée *strict-group-nets* de la manière suivante :

Définition 7.3.1 (strict-group-nets) Soit $(G, +, 0)$ un groupe (non nécessairement abélien) de cardinal au moins 2 et d'élément neutre 0. Un strict-group-net sur G est un quadruplet (P, T, f, M_0) où P et T sont des ensembles finis disjoints (respectivement l'ensemble des places et des transitions), $f : P \times T \rightarrow G$ est la fonction de poids et $M_0 : P \rightarrow G \setminus \{0\}$ est le marquage initial. Plus généralement, toute application de P dans $G \setminus \{0\}$ est appelée un marquage. Par souci de concision un strict-group-net sur G sera également noté *strict-G-net*, les *strict-group-nets* désignant la classe des *strict-G-nets* pour tout groupe G .

Définition 7.3.2 (Règle de tir pour les strict-group-nets) Soit $N = (P, T, f, M_0)$ un *strict-group-net*. Une transition $t \in T$ est franchissable à partir du marquage M si $\forall p \in P, M(p) + f(p, t) \neq 0$. Dans ce cas, le nouveau marquage M' obtenu après le tir de t est défini par $\forall p \in P, M'(p) = M(p) + f(p, t)$. On dénote cette transition par $M[t]M'$.

Il faut faire attention à l'ordre de composition de $M(p)$ et de $f(p, t)$ dans le cas où la loi du groupe est non commutative. L'adaptation des définitions et notations usuelles pour les réseaux de Petri aux *strict-group-nets* étant naturelle et directe, nous parlerons dans la suite de ce document sans les définir pour les *strict-group-nets* de séquence de tirs, de marquage accessible, de graphe des marquages ou encore de langage.

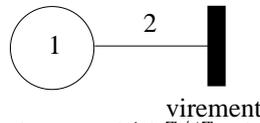
La figure 7.5 donne un exemple typique de strict-group-net. Pour conserver les conventions usuelles aux réseaux de Petri, les places sont représentées par des cercles et les transitions par des rectangles noirs. Notons que, contrairement aux réseaux de Petri, les arcs ne sont pas orientés car l'algèbre des places est un groupe et l'existence d'inverses permet de « soustraire » dans une place. Un arc entre une place $p \in P$ et une transition $t \in T$ est étiqueté par la valeur de $f(p, t)$. De la même manière que pour les réseaux de Petri, les arcs étiquetés par 0 sont omis. Par contre la valeur 1 apparaît dans notre exemple car 1 n'est pas une valeur universelle dans les groupes contrairement à l'élément neutre 0. Le marquage initial est défini par les valeurs respectives inscrites dans les places. Si $M_0(p) = a \neq 0$, a apparaît dans le cercle représentant p .



Un strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net avec $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ et $T = \{a, b, c\}$. Dans ce réseau a n'est pas tirable car $1 + 2 = 3 = 0$ dans p_2 ! De même b n'est pas franchissable, seul c l'est et mène au marquage $(1, 2, 1, 1)^t$. La seule exécution possible est la séquence cba suite à quoi le réseau est bloqué. Son graphe des marquages est par conséquent fini.

FIG. 7.5: Un strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -net

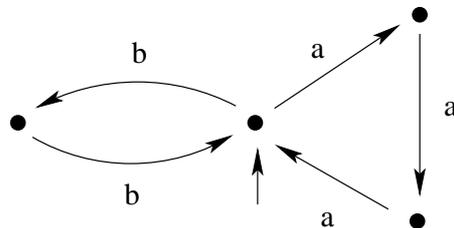
La figure 7.6 propose une solution au problème du virement à l'aide d'un strict- $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ -net muni d'une unique place et d'une unique transition.



Solution au problème du virement par un strict- $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ -net. Dans le réseau de cette figure le marquage initial 1 peut représenter par exemple l'état Tribord amure. La transition virement est franchissable car son tir conduit à l'état $1 + 2 = 3$ qui est bien différent de 0 et qui par conséquent représentera l'état Babord amure. Rappelons que dans $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ 4 vaut 0; un nouveau tir de virement nous ramènera donc à l'état initial.

FIG. 7.6: Strict- $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ -net modélisant l'action d'un virement sur l'amure d'un voilier

Etudions le comportement plus complexe composé de deux cycles de longueurs différentes de la figure 7.7.

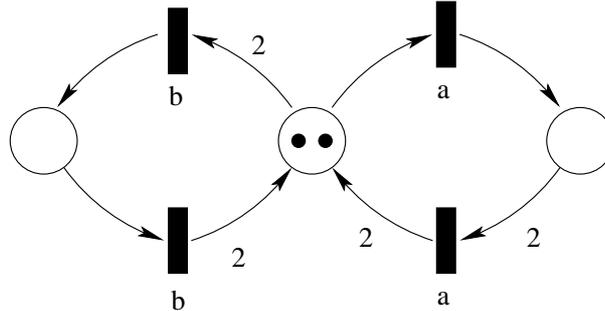


Deux cycles imbriqués avec état initial au centre. Dès que une des deux transitions a ou b est franchie il n'est plus possible de franchir l'autre tant qu'on n'est pas revenu à l'état initial.

FIG. 7.7: Deux cycles imbriqués

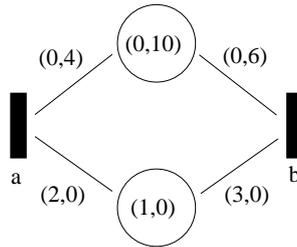
Un réseau de Petri étiqueté nécessite au minimum 4 transitions et 3 places pour résoudre ce problème comme on peut le voir sur la figure 7.8.

Le réseau de la figure 7.9 répond au problème grâce à l'utilisation du groupe produit $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ tout en n'usant que de deux places et de deux transitions distinctes.



On ne peut faire moins que de dupliquer les transitions a et b car aucun élément de \mathbb{N} n'est d'ordre fini. Il est également nécessaire d'avoir trois places pour pouvoir interdire le tir de a lorsque b est tiré et réciproquement.

FIG. 7.8: RdP étiqueté ayant le comportement de la figure 7.7



Strict- $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ -net répondant au problème du comportement de la figure 7.7 n'ayant que 2 places et 2 transitions.

FIG. 7.9: Strict- $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ -net ayant le comportement de la figure 7.7

7.3.2 Strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets

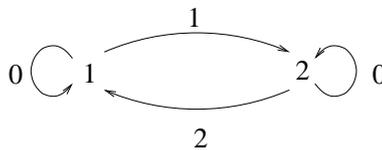
Nous allons explorer dans cette section les strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets pour $p \in \mathbb{N}$.

Le type des strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets est le graphe de Cayley ² de $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ restreint aux noeuds non nuls. Nous dénoterons les types des strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})$.

Un des grands intérêts des strict-group-nets est qu'ils permettent de retrouver les réseaux élémentaires :

Proposition 7.3.1 *Les strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets sont les réseaux élémentaires.*

Cette proposition découle directement de l'isomorphisme des types des strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets représenté figure 7.10 et des réseaux élémentaires.



Le type des strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets isomorphe au type des réseaux élémentaires de la figure 7.2.

FIG. 7.10: Type des strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets noté $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})$

Proposition 7.3.2 *Les réseaux de Petri purs et les strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets sont des extensions des strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets quel que soit $p \geq 3$.*

² Le graphe de Cayley d'un groupe G est un graphe orienté dont les sommets sont étiquetés par les éléments du groupe et toute paire ordonnée de sommets (x, y) est reliée par un arc menant de x à y étiqueté par l'élément z de G tel que $xz = y$ (dans le cas d'un groupe non abélien on peut également choisir $zx = y$)

Pour établir cette proposition nous utilisons le résultat suivant [Badouel 99] :

Théorème 7.3.1 *Si τ_1 est isomorphe au graphe des marquages d'un réseau de type τ_2 , alors les réseaux de type τ_1 sont inclus dans les réseaux de type τ_2 .*

Preuve[proposition 7.3.2] D'une part, le graphe des marquages du réseau de Petri de la figure 7.11 est isomorphe au type des strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets.

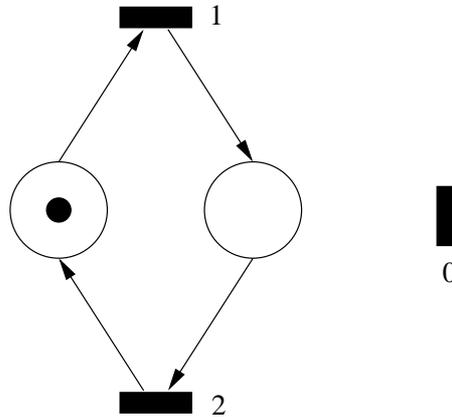


FIG. 7.11: RdP dont le graphe des marquages est isomorphe à $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})$

D'autre part, le type $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})$ est isomorphe au graphe des marquages du strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -net de la figure 7.12.

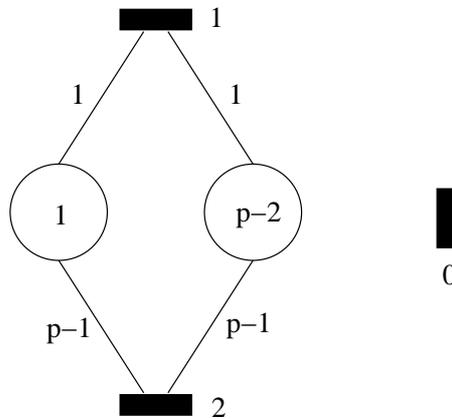


FIG. 7.12: Strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -net dont le graphe des marquages est isomorphe à $\mathcal{C}(\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})$

◇

Etablissons maintenant un résultat qui dépend de la primalité de p . Rappelons que dans le cas où p est premier le groupe $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ prend une nouvelle dimension puisqu'il devient un corps, de plus, tout élément non nul est un générateur du groupe. La preuve de la proposition qui suit use également de résultats issus de la théorie des régions [Badouel 99]. Les régions des graphes étiquetés servent entre autres à caractériser les graphes qui sont isomorphes aux graphes des marquages des réseaux élémentaires [Ehrenfeucht 90a, Ehrenfeucht 90b]. Nous rappelons la propriété dite de *séparation des états* qui est triviale dans cette caractérisation.

Définition 7.3.3 (Propriété de séparation des états) *Soit $Gr = (S, T, A, l)$ un graphe étiqueté où S est l'ensemble des sommets ou états, T est l'ensemble des arcs, A est un ensemble d'actions et $l : T \rightarrow A$ est une fonction d'étiquetage. Deux sommets s et s' sont séparés par une région (σ, ρ) de Gr si $\sigma(s) \neq \sigma(s')$.*

Nous utiliserons le résultat suivant : si dans un graphe donné Gr deux sommets ne peuvent être séparés par aucune région $(\sigma, \rho) : Gr \rightarrow \mathcal{C}(\mathbb{Z}/q\mathbb{Z})$, alors il n'existe aucun strict- $\mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$ -net avec un graphe des marquages isomorphe au graphe considéré. Il s'agit d'une application directe de résultats plus généraux que l'on peut trouver dans [Badouel 99].

Proposition 7.3.3 *Pour tous p et q strictement plus grands que 3, différents et premiers, les strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets et les strict- $\mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$ -nets sont incomparables.*

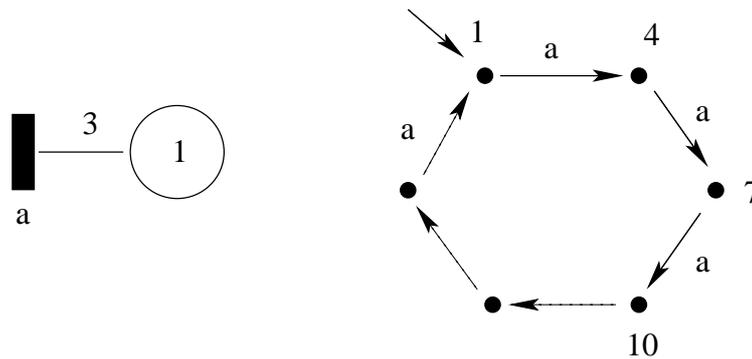
Preuve Supposons que $p > 3$. Soit $Gr = \mathcal{C}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})$ le type des strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets. Gr est clairement isomorphe à un graphe des marquages d'un strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -net. Supposons que Gr soit isomorphe au graphe des marquages d'un strict- $\mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$ -net pour $q > 3$ et différent de p . Alors, il devrait exister un morphisme de systèmes de transitions $(\sigma, \rho) : \mathcal{C}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \rightarrow \mathcal{C}(\mathbb{Z}/q\mathbb{Z})$ tel que $\sigma(1) \neq \sigma(2)$. Par définition des morphismes, on doit avoir $\sigma(1+2) = \sigma(1) + \rho(2)$ dans $\mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$ (comme $q > 3$, $\sigma(1+2)$ est défini), donc $\sigma(1+2) = (\sigma(1) + 2\rho(1)) \bmod q$, et donc $\rho(2) = 2\rho(1) \bmod q$. On doit avoir également $\sigma(p+1) = (\sigma(1) + (p-2)\rho(1) + \rho(2)) \bmod q$ donc comme $\rho(2) = 2\rho(1)$ dans $\mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$, $\sigma(p+1) = (\sigma(1) + p\rho(1)) \bmod q$ et, comme $\sigma(p+1) = \sigma(1)$ et que p, q sont premiers il s'en suit que $\rho(1) = 0$. Par conséquent $\sigma(1) = \sigma(2)$, ce qui montre que strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets et strict- $\mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$ -nets sont deux familles incomparables de réseaux. \diamond

7.3.3 Strict- \mathbb{Z} -nets

L'algèbre des places des réseaux de Petri usuels, c'est-à-dire le monoïde des entiers naturels $(\mathbb{N}, +, 0)$ est trop proche du groupe des entiers naturels $(\mathbb{Z}, +, 0)$ pour ne pas tenter d'explorer les strict- \mathbb{Z} -nets. Commençons par les situer par rapport aux strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets.

Proposition 7.3.4 *Strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets et strict- \mathbb{Z} -nets sont incomparables pour $p > 3$.*

Preuve Sur la gauche de la figure 7.13 est représenté un strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -net valide quel que soit $p > 3$ avec son graphe des marquages associé à droite. Ce dernier est un cycle de longueur l'ordre de 3 dans $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$. Comme $p > 3$ cet ordre est supérieur ou égal à 2. Il se trouve qu'aucun élément non nul de l'algèbre des places des réseaux de Petri usuels n'est d'ordre fini, par conséquent un tel comportement ne peut être celui d'un réseau de Petri.



Le comportement de droite ne peut être celui d'un réseau de Petri usuel car aucun élément non nul de l'algèbre des places des réseaux usuels n'est d'ordre fini.

FIG. 7.13: Strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -net ayant un comportement cyclique

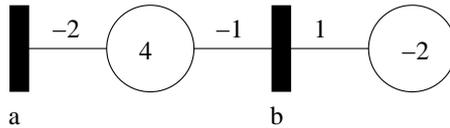
D'autre part, les graphes de marquages des strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets sont nécessairement finis puisque les $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ sont des groupes finis. Ce n'est pas le cas pour les réseaux de Petri. Par conséquent, strict- $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -nets et réseaux de Petri sont incomparables pour $p > 3$. \diamond

A première vue les réseaux de Petri et les strict- \mathbb{Z} -nets semblent proches, le théorème suivant permet de commencer à les situer, en donnant notamment l'algorithme qui permet de passer des réseaux de Petri purs aux strict- \mathbb{Z} -nets.

Théorème 7.3.2 *Les RdP purs sont strictement inclus dans les strict- \mathbb{Z} -nets.*

Preuve Commençons par donner la construction qui permet de passer d'un RdP pur à un strict- \mathbb{Z} -net. Soit $R = (P, T, f, M_0)$ un réseau de Petri pur. Pour une place $p \in P$ donnée on pose $n_p = \max_{t \in T} \{f(p, t)\}$. Si $n_p > 0$ on construit n_p places p_1, p_2, \dots, p_{n_p} marquées respectivement par $M_0(p)+1, M_0(p)+2, \dots, M_0(p)+n_p$. Soit P' l'ensemble des places ainsi construit lorsque l'on parcourt P . Soit $f' : P' \times T \rightarrow \mathbb{Z}$ la fonction de flot définie par $f'(p_i, t) = -f(p, t) + f(t, p)$. Le strict- \mathbb{Z} -net associé est alors $R' = (P', T, f', M'_0)$ avec M'_0 le marquage initial défini ci-dessus.

La correspondance σ entre les marquages de R et de R' est la suivante : un marquage M de R est envoyé sur le marquage M' de R' défini par $M'(p_i) = M(p) + i$ avec $1 \leq i \leq n_p$, par conséquent $M' > 0$. Montrons que la correspondance est préservée par le tir des transitions. Soit M un marquage de R et t une transition franchissable à partir de M . Par définition pour tout $p \in P$, $f(p, t) \leq M(p)$ et $M_1(p)$ le marquage obtenu après tir de t vaut $M(p) - f(p, t) + f(t, p)$. On a $(\sigma(M_1))(p_i) = M_1(p) + i = M(p) - f(p, t) + f(t, p) + i = M'(p_i) - f(p, t) + f(t, p)$, avec $M' = \sigma(M)$. Comme $M_1(p) + i > 0$, $M'(p_i) - f(p, t) + f(t, p) > 0$ et c'est bien le marquage obtenu par le tir de t dans R' à partir de M' . Maintenant si, pour un marquage M de R , $\sigma(M)[t]M'_1$ dans R' alors, si on note $M' = \sigma(M)$, pour toute place p_i de P' , $M'_1(p_i) = M'(p_i) - f(p, t) + f(t, p) = M(p) + i - f(p, t) + f(t, p) \neq 0$ quelque soit i entre 1 et n_p . Comme $n_p = \max_{t \in T} \{f(p, t)\}$ nécessairement $M'_1 > 0$. Donc $M(p) + i - f(p, t) + f(t, p) > 0$ pour $0 \leq i \leq n_p$ et, par conséquent, $M(p) - f(p, t) + f(t, p) \geq 0$. Le réseau étant pur, t est franchissable à partir de M et M_1 le marquage obtenu vaut $M_1(p) = M(p) - f(p, t) + f(t, p)$. On constate bien que $\sigma(M_1) = M'_1$.

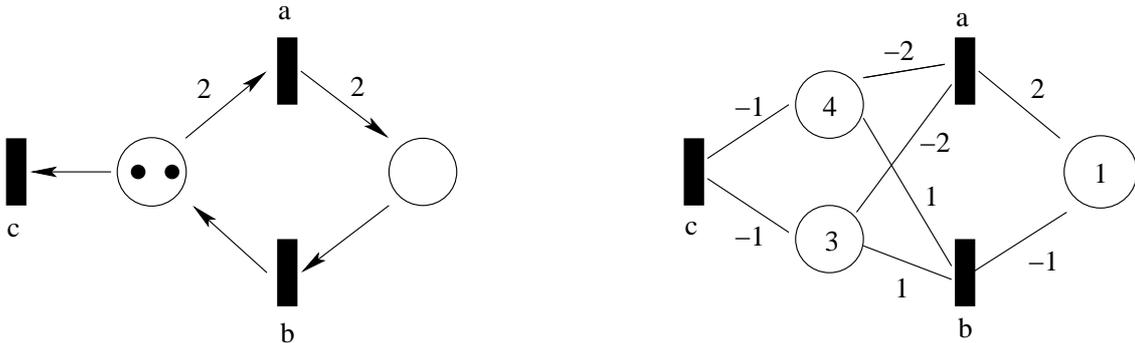


Dans ce strict- \mathbb{Z} -net b ne peut être tirée qu'une fois à cause de la place de droite. Après tir de b la place de gauche change de parité et a peut-être alors tirée autant de fois que l'on veut. Le langage de ce réseau est donc l'ensemble des préfixes de $ba^* + aba^*$.

FIG. 7.14: Un strict- \mathbb{Z} -net sans réseau de Petri équivalent

Enfin l'inclusion est stricte car le langage associé au strict- \mathbb{Z} -net de la figure 7.14 est l'ensemble des préfixes de $ba^* + aba^*$ et ne peut pas être le langage d'un RdP, même impur. En effet, dans un RdP, pouvoir faire a^* (après b) imposerait que a produise au moins autant de ressources qu'il en consomme. Or, il est possible dès le départ de tirer a , on devrait donc pouvoir le tirer de nouveau, mais aa n'appartient pas au langage. \diamond

La figure 7.15 donne à gauche un réseau de Petri et à droite son strict- \mathbb{Z} -net équivalent.



La place où figure deux jetons dans le réseau de Petri est remplacée par deux places dans le strict- \mathbb{Z} -net car le poids maximum des arcs sortant de cette place est 2. Ceci permet de balayer tous les cas possibles.

FIG. 7.15: Réseau de Petri et son strict- \mathbb{Z} -net équivalent

Pour poursuivre notre classification des réseaux, remarquons que tous les strict- G -nets avec G fini ont des graphes de marquages finis. Par conséquent, ils ne peuvent étendre les réseaux de Petri purs.

Du point de vue expressivité et décidabilité il est important de situer les strict- \mathbb{Z} -nets par rapport aux réseaux de Petri.

Théorème 7.3.3 *strict- \mathbb{Z} -nets et RdP sont incomparables.*

Preuve D'une part l'exemple précédent (cf. figure 7.14) montre qu'il existe des strict- \mathbb{Z} -nets dont le graphe des marquages n'est isomorphe au graphe d'aucun RdP. D'autre part, dans le RdP de la figure 7.16, l'action de t correspond à l'action de l'élément neutre dans un strict- \mathbb{Z} -net. Par conséquent, après le tir de u rien ne devrait interdire le tir de t dans le strict- \mathbb{Z} -net correspondant. \diamond

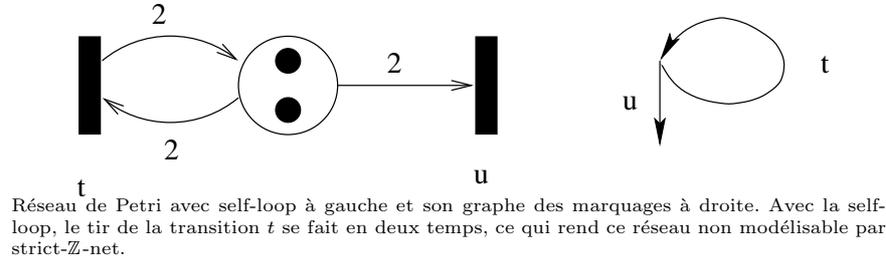


FIG. 7.16: RdP non modélisable par strict- \mathbb{Z} -net

Avant d'aller plus loin, nous présentons figure 7.17 un premier état de notre classification entre quelques classes de strict-group-nets et les réseaux de Petri purs ou usuels. Dans cette figure toutes les inclusions sont strictes et lorsqu'aucun chemin orienté n'existe entre deux noeuds alors les familles de réseaux correspondantes sont incomparables. Les strict- $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets apparaissent car ils jouent un rôle particulier : leur type est réduit à un sommet étiqueté par 1 et une boucle étiquetée par 0 sur ce sommet, il s'agit donc d'un objet terminal³ dans la catégorie des systèmes de transitions.

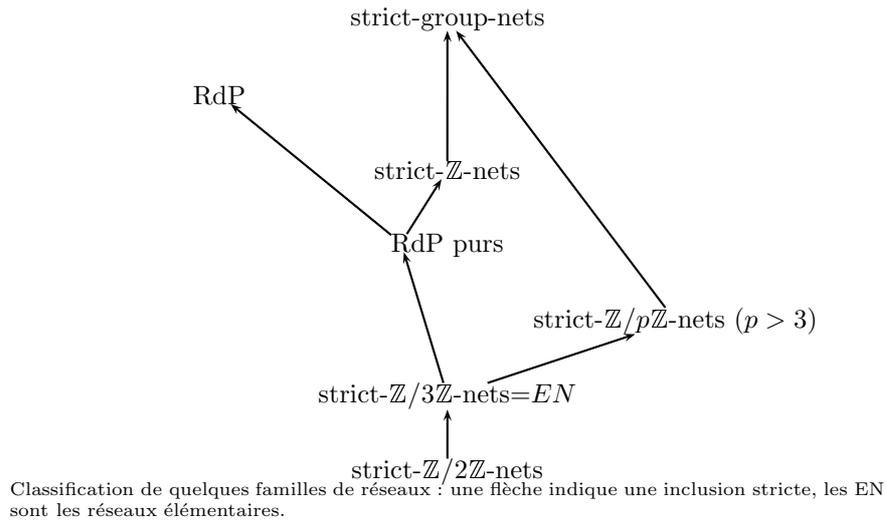


FIG. 7.17: Une première classification

7.3.4 Arbre et graphe de couverture pour les strict- \mathbb{Z} -nets

Nous allons montrer qu'il est possible de définir un arbre et un graphe de couverture, dans un sens plus faible que pour les RdP, rendant décidables les questions de savoir si un réseau est borné et si une place donnée est bornée. Pour cela nous avons besoin d'un ordre bien fondé sur \mathbb{Z}^P . La définition suivante nous en fournit un :

Définition 7.3.4 (\subseteq et \supseteq) Soient x et y deux éléments de \mathbb{Z}^P , on écrira $y \supseteq x$ ou $x \subseteq y$ si $\forall p \in P, y(p) \geq x(p) \geq 0 \vee y(p) \leq x(p) \leq 0$. \subseteq est un ordre partiel bien fondé sur \mathbb{Z}^P .

³ Un objet T est dit *terminal* dans une catégorie si quelque soit X dans la catégorie il existe un unique morphisme qui envoie X sur T

La définition suivante sera utile pour le prochain théorème :

Définition 7.3.5 (séquence sans saut à partir d'un marquage M) Une séquence $\sigma = t_1 t_2 \dots t_n$, ($n \geq 0$) est une séquence sans saut à partir de M si les composantes des marquages atteints à partir de M par franchissement de σ ne changent pas de signe.

Le résultat suivant est un classique des RdP, son adaptation aux strict- \mathbb{Z} -nets présente un piège :

Théorème 7.3.4 Soit σ une séquence infinie d'un strict- \mathbb{Z} -net, alors on peut extraire de σ une sous-séquence finie qui soit une séquence répétitive.

Preuve Soit $a_1 a_2 a_3 \dots$ une séquence infinie et $(M_i)_{i \in \mathbb{N}}$ la suite (infinie) des marquages associés $M_0[a_1]M_1[a_2]M_2 \dots$. On notera $M(j)$ la $j^{\text{ième}}$ composante du marquage M (i.e. on voit M comme un vecteur plutôt que comme une fonction).

On sépare en deux sous-ensembles C_1^1 et C_2^1 les indices des marquages :

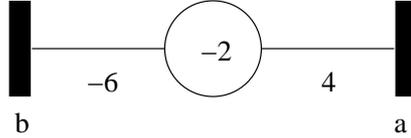
$$C_1^1 = \{i | M_i(1) > 0\} \quad C_2^1 = \{i | M_i(1) < 0\}$$

Au moins un de ces deux ensembles est infini, on peut supposer sans perte de généralité qu'il s'agit de C_1^1 . On recommence le procédé sur la deuxième composante :

$$C_1^2 = \{i | i \in C_1^1 \text{ et } M_i(2) > 0\} \quad C_2^2 = \{i | i \in C_1^1 \text{ et } M_i(2) < 0\}$$

et ainsi de suite jusqu'à la $|P|^{\text{ième}}$ composante.

On obtient donc un ensemble infini d'indices C_k^{lP} ($k = 1$ ou 2) pour lequel les marquages correspondant ont toutes leurs projections sur une composante donnée de même signe. Appelons $(M'_i)_{i \in \mathbb{N}^*}$ la suite $(M_i)_{i \in C_k^{lP}}$. De la même manière que de toute suite de \mathbb{N}^P on peut extraire une suite infinie croissante (pour l'ordre naturel), il est possible d'extraire de $(M'_i)_{i \in \mathbb{N}^*}$ une suite infinie croissante au sens de \subseteq . Notons $(M_i^c)_{i \in \mathbb{N}^*}$ cette suite. Malheureusement, rien ne dit que la séquence entre les marquages M_1^c et M_2^c est une séquence répétitive. En effet, si nous observons le réseau ci-dessous :



on s'aperçoit qu'après $-2[a]2[b] - 4$ on ne peut plus faire ab . Il reste à imposer aux composantes de ne pas changer de signe dans les marquages obtenus lors de la séquence de franchissements.

Dans $(M_i^c)_{i \in \mathbb{N}^*}$ un certain nombre de places sont bornées. Notons P_1 l'ensemble de ces places et P_2 son complémentaire. On extrait de $(M_i^c)_{i \in \mathbb{N}^*}$ la suite $(O_i)_{i \in \mathbb{N}^*}$ dont les composantes selon P_1 sont constantes (et égales au max ou au min de leurs valeurs). En particulier on note σ_0 la séquence qui permet de passer de O_1 à O_2 .

Intéressons nous maintenant aux places de P_2 . Pour $p \in P_2$, si $O_1(p) > 0$, comme $(O_i(p))_{i \in \mathbb{N}^*}$ est non bornée, $\exists j_p \in \mathbb{N}^*$ tel que $\forall k \geq j_p$, $O_k(p) > |\sigma_0| * \max_{t \in T} \{-f(p, t)\}$, où $|\sigma_0|$ représente la longueur de la séquence σ_0 . De même si $O_1(p) < 0$, $\exists j_p \in \mathbb{N}^*$ tel que $\forall k \geq j_p$, $O_k(p) < -|\sigma_0| * \max_{t \in T} \{f(p, t)\}$. On prend $d = \max\{j_p | p \in P_2\}$ et à partir du marquage O_d , σ_0 est croissante sans saut, donc répétitive. \diamond

Nous sommes en mesure maintenant de donner l'algorithme de construction de l'arbre de couverture d'un \mathbb{Z} -net. Nous notons $\mathbb{Z}^\infty = \mathbb{Z} \cup \{-\infty, +\infty\}$. L'ordre usuel de \mathbb{Z} est étendu à \mathbb{Z}^∞ par les conditions $-\infty < n < +\infty$ pour tout entier relatif n et nous posons $w \pm n = w$ avec $w \in \{+\infty, -\infty\}$ et $n \in \mathbb{Z}$. L'ordre \subseteq est également étendu de manière naturelle à $(\mathbb{Z}^\infty)^P$.

Définition 7.3.6 (arbre et graphe de couverture) Soit $N = (P, T, f, M_0)$ un strict-group-net. L'arbre de couverture de N , noté $AC(N)$, est un arbre où l'ensemble des sommets S est étiqueté par $(\mathbb{Z}^\infty)^P$ (étiquettes appelées « marquages généralisés ») et l'ensemble des arcs par T . $AC(N)$ est défini récursivement par l'application des règles de construction suivantes :

1. La racine r de $AC(N)$ est étiquetée par M_0 .
2. Soit s un sommet déjà construit de $AC(N)$ et étiqueté par $q \in (\mathbb{Z}^\infty)^P$.
 - a. Si l'étiquette de s est identique à l'étiquette d'un ancêtre de s , alors s n'a pas de fils.
 - b. Dans le cas contraire, s a un fils s' pour chaque transition t telle que $\forall p, f(p, t) + q(p) \neq 0$. L'arc (s, s') de $AC(N)$ est étiqueté par t , et s' est étiqueté par q' où l'on définit chaque composante $q'(p)$ pour $p \in P$ par :
 - i. Si, lors du parcours du chemin entre r et s' , il existe deux sommets distincts s_1 et s_2 pris dans l'ordre et si la séquence w entre s_1 et s_2 est une séquence strictement croissante (au sens de \subseteq) sans saut à partir du marquage généralisé $q + ft$ (où f est vue comme la matrice d'incidence du réseau) alors si $q(p) < q(p) + f(p, \cdot)\bar{w}$ (où \bar{w} est l'image commutative de w) on a $q'(p) = -\infty$ et si $q(p) > q(p) + f(p, \cdot)\bar{w}$ on a $q'(p) = +\infty$
 - ii. Dans le cas contraire $q'(p) = q(p) + f(p, \cdot)t$.

Le graphe de couverture de N , noté $GC(N)$, est obtenu en identifiant les sommets de même étiquette de $AC(N)$.

Remarque 1 : L'arbre de couverture est bien défini car il ne peut y avoir de conflit lors du passage d'une composante d'une étiquette à l'infini entre $+\infty$ et $-\infty$. En effet, la séquence devant être sans saut, une telle composante ne peut changer de signe et ceci quel que soit la séquence w choisie.

Remarque 2 : La notion de couverture que l'on vient de donner n'est pas aussi forte que celle que l'on manipule avec les RdP. Il ne s'agit pas en tous cas d'une couverture au sens de \subseteq . En effet, soit le réseau avec son graphe de couverture ci-dessous :



Si on tire la séquence $baaa$, le marquage obtenu est négatif alors qu'il est couvert par $+\infty$ dans le graphe de couverture.

Soit q l'étiquette d'un sommet d'un arbre de couverture, on note

$$q^\infty = \{p \in P \mid q(p) = +\infty \text{ ou } q(p) = -\infty\}$$

A titre d'exemple la figure 7.18 donne le graphe de couverture du réseau de la figure 7.14.

Théorème 7.3.5 *L'arbre de couverture est fini.*

Preuve Supposons qu'il soit infini, alors il contient au moins une branche infinie. Soit $(q_i)_{i \geq 0}$ la suite infinie de ses étiquettes. $+\infty$ et $-\infty$ étant héréditaires, il existe $k \in \mathbb{N}$ tel que $\forall i \geq k, q_i^\infty = q_k^\infty$ et $\forall p \in q_k^\infty, q_i(p) = q_k(p)$. De plus $q_k^\infty \neq P$ car sinon la branche serait finie. On peut alors extraire une suite strictement croissante $(q_{i_j})_{j \geq 0}$ avec $i_0 \geq k$ (strictement croissante au sens de \subseteq car aucune étiquette ne peut se répéter). De la suite $(q_{i_j})_{j \geq 0}$ on extrait une sous-suite $(q'_i)_{i \geq 0}$ telle que une partie des composantes soient constantes et l'autre strictement croissantes. Entre q'_0 et q'_1 on a une séquence strictement croissante et il existe $m \in \mathbb{N}$ tel que cette séquence soit franchissable à partir de q'_m et strictement croissante sans saut. Ce qui contredit le fait que $q'_m^\infty = q'_k^\infty$. \diamond

La proposition suivante justifie le terme de « couverture ».

Propriété 7.3.1 *Soit σ une séquence de franchissements telle que $M_0[\sigma]M$. Il existe un unique chemin dans $GC(N)$ partant de M_0 et étiqueté par σ , l'extrémité q de ce chemin vérifiant $\forall p \in P, q(p) = M(p)$ ou $q(p) = +\infty$ ou $q(p) = -\infty$.*

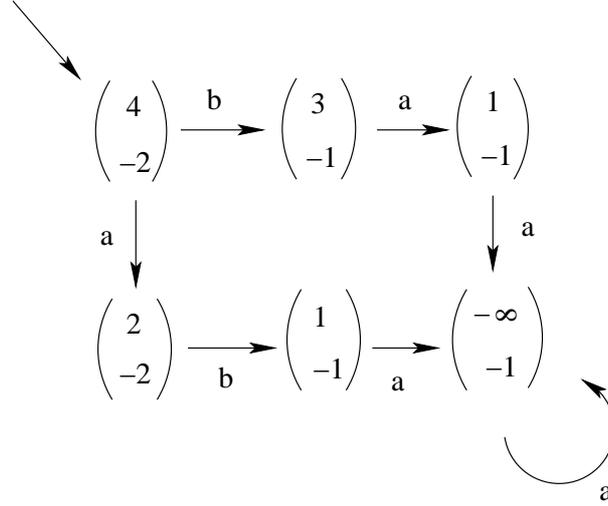


FIG. 7.18: Graphe de couverture du réseau de la figure 7.14

Preuve Par récurrence sur la longueur de σ . Si σ est de longueur 0, c'est le chemin d'origine et d'extrémité M_0 . Supposons la propriété vraie pour toute séquence de franchissements de longueur n avec $n \geq 0$. Prenons une séquence de franchissements σ de longueur $n + 1$. σ peut alors s'écrire sous la forme $\sigma = zt$ avec z de longueur n . On a l'exécution suivante $M_0[z]M'[t]M$. Par hypothèse de récurrence il existe un unique chemin dans $GC(N)$ partant de M_0 et étiqueté par z , l'extrémité q' de ce chemin vérifiant $\forall p \in P, q'(p) = M'(p)$ ou $q'(p) = +\infty$ ou $q'(p) = -\infty$. Comme $\forall p \in P, M'(p) + f(p, t) \neq 0$ le sommet q' admet un successeur q avec l'arc joignant ces deux sommets étiqueté par t . Les règles de construction de l'AC imposent à q d'avoir les valeurs souhaitées, l'unicité du chemin découlant du caractère déterministe du graphe. \diamond

Lemme 7.3.1 *Soit N un strict- \mathbb{Z} -net. Tout sous-graphe de $GC(N)$ ne contenant pas de $+\infty$ ni de $-\infty$ est un sous-graphe du graphe des marquages de N .*

Preuve Tant qu'il n'y a ni $+\infty$ ni $-\infty$ la règle de construction de l'AC(N) est la même que celle du graphe des marquages. \diamond

Théorème 7.3.6 (décidabilité du caractère borné d'un strict- \mathbb{Z} -net) *Soit N un strict- \mathbb{Z} -net. N est non borné ssi il existe un sommet q de $GC(N)$ tel que $q^\infty \neq \emptyset$.*

Preuve Soit q un sommet de $GC(N)$ tel que $q^\infty \neq \emptyset$. Dans $AC(N)$ q étiquette un sommet s . On peut supposer que s est le premier sommet construit ayant cette propriété. Donc tout sommet s' sur le chemin de r à s (s exclu) est étiqueté par un marquage M' accessible et si w est le mot étiquétant le chemin de r à s' on a $M[w]M'$. Il existe sur le chemin de r à s deux sommets s_1 et s_2 étiquetés respectivement par q_1 et q_2 tels que $q_1 \subseteq q_2$ et le mot qui étiquette le chemin de s_1 à s_2 est une séquence strictement croissante et sans saut à partir du marquage $q' + f(\cdot, t)$ où q' est l'étiquette du prédécesseur de s dans l'AC et t l'étiquette de l'arc reliant ce prédécesseur à s . $q' + f(\cdot, t)$ est un marquage accessible. Donc N est non borné.

Soit N non borné, alors il existe une séquence strictement croissante et sans saut. Cette séquence est obtenue avec la construction exhibée dans la preuve du théorème 7.3.4. Soit $u = wx$ un mot tel que x soit une séquence strictement croissante et sans saut à partir du marquage atteint après exécution de w . On note $M_0[w]M[x]M'$.

Il existe un unique chemin dans $GC(N)$ partant de M_0 et étiqueté par wx , l'extrémité q de ce chemin vérifiant $\forall p \in P, q(p) = M'(p)$ ou $q(p) = +\infty$ ou $q(p) = -\infty$. Supposons que $\forall p \in P, q(p) = M'(p)$. x étant une séquence strictement croissante et sans saut à partir du marquage q , nécessairement $q^\infty \neq \emptyset$. Par conséquent $\exists p \in P$ tel que $q(p) = \pm\infty$. \diamond

Lemme 7.3.2 *Soit N un strict- \mathbb{Z} -net et $AC(N)$ son arbre de couverture. Soit s un sommet de $AC(N)$ étiqueté par q , alors pour tout $k \in \mathbb{N}$, il existe un marquage M accessible tel que $M(p) = q(p)$ pour tout $p \notin q^\infty$, et, pour tout $p \in q^\infty$, $M(p)$ du même signe que $q(p)$ et $|M(p)| \geq k$.*

Preuve C'est vrai pour la racine. On suppose que c'est vrai pour un sommet s_1 de $AC(N)$. Montrons que c'est vrai pour tout successeur s_2 de s_1 . s_1 est étiqueté par q_1 et s_2 par q_2 .

On pose $P_1 = q_1^\infty$ et $P_2 = q_2^\infty$, on a $P_1 \subset P_2$ (hérédité des infinis). On pose enfin $P_3 = P_1 \cup P_2$ avec $P_1 \cap P_2 = \emptyset$.

On appelle t l'étiquette de l'arc joignant s_1 à s_2 . Si $P_3 = \emptyset$ prenons un $k \in \mathbb{N}$. Par hypothèse d'induction, il existe un marquage M accessible tel que $\forall p \notin P_1, M(p) = q_1(p)$ et $\forall p \in P_1, |M(p)| \geq k + \max_{p' \in P} \{|f(p', t)|\}$ et $M(p)$ du même signe que $q_1(p)$. Alors M' défini par $M[t]M'$ vérifie bien les conditions du lemme.

Si $P_3 \neq \emptyset$, soit $p \in P_3$ alors il existe deux sommets distincts s'_1 et s'_2 sur le chemin de r à s_2 tels que w_p la séquence entre s'_1 et s'_2 soit strictement croissante et sans saut (au moins pour p) à partir du marquage généralisé $q_1 + C(\cdot, t)$.

On va s'arranger pour mettre des valeurs assez grandes (en valeur absolue) dans les places de P_1 pour pouvoir obtenir ce que l'on veut dans P_2 .

Pour p' dans P_1 on pose $\alpha_{p'} = f(p', \cdot) \overline{w_p}$, $\alpha_p^{max} = \max_{p' \in P_1} \{|\alpha_{p'}|\}$ et $\alpha = \max_{p' \in P_1} \{|f(p', \cdot)t|\}$. Par hypothèse d'induction on peut trouver un marquage M accessible tel que $|M(p')| \geq k \sum_{p \in P_3} \alpha_p^{max} + k + \alpha$ et $M(p')$ de même signe que $q_1(p')$ pour $p' \in P_1$ et pour $p' \notin P_1, M(p') = q_1(p')$. Alors le marquage M'_2 défini par $M[t]M_2[w_{p_1}^k w_{p_2}^k \dots w_{p_{|P_3|}}^k]M'_2$, où $p_1, p_2, \dots, p_{|P_3|}$ sont les places de P_3 , vérifie la propriété demandée. \diamond

Théorème 7.3.7 (Décidabilité du caractère borné d'une place d'un strict- \mathbb{Z} -net) *Soit N un strict- \mathbb{Z} -net. Une place p est non bornée ssi il existe un sommet q de $GC(N)$ tel que $q(p) = \pm\infty$.*

Preuve Soit N un strict- \mathbb{Z} -net qui possède une place p non bornée. Pour tout $k \in \mathbb{N}$, il existe un chemin dans le GC tel que l'étiquette q de l'extrémité de ce chemin vérifie $|q(p)| \geq k$. Réciproquement, le lemme précédent permet de conclure. \diamond

7.4 Group-nets

Une manière classique d'augmenter l'expressivité d'une classe de réseaux consiste à lui adjoindre des arcs particuliers, c'est le cas par exemple des RdP avec arcs inhibiteurs ou avec arcs Reset. Dans l'optique d'obtenir une extension des RdP nous définissons les group-nets comme étant les strict-group-nets munis d'un arc inconditionnel qui autorise une marque à prendre la valeur de l'élément neutre du groupe.

7.4.1 Définitions

Définition 7.4.1 (Group-net) *Soit G un groupe. Un group-net sur G est un quadruplet $N = (P, T, f, M_0)$ où P est l'ensemble fini des places, T est l'ensemble fini des transitions (disjoint de P) et f est la relation de flot, c'est-à-dire une application de $P \times T$ vers $\{0, 1\} \times G$. Un arc est une paire $(p, t) \in \text{dom}(f)$. L'arc (p, t) est dit conditionnel si $\pi_1(f(p, t)) = 0$, inconditionnel si $\pi_1(f(p, t)) = 1$ où π_1 est la première projection. $M_0 \in G^P$ est le marquage initial du réseau. Comme pour les strict-group-nets un group-net sur G sera noté G -net et les group-nets de manière générale désignent la classe des G -nets pour tout groupe G .*

Définition 7.4.2 (Règle de tir pour les group-nets) *Soit $N = (P, T, f, M_0)$ un group-net sur G , $t \in T$ est franchissable à partir de $M \in G^P$ si pour tout $p \in P$, $\pi_1(f(p, t)) = 0 \implies M(p) + \pi_2(f(p, t)) \neq 0$ où π_1 est la première projection et π_2 la seconde. Dans le cas où t est franchissable à partir de M , le tir de t produit un nouveau marquage M' défini par $M'(p) = M(p) + \pi_2(f(p, t))$ pour toute place p de P .*

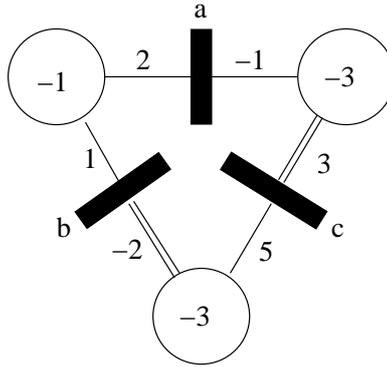


FIG. 7.19: Un \mathbb{Z} -net

La figure 7.19 montre un exemple typique de \mathbb{Z} -net, les arcs inconditionnels apparaissant comme des arcs doubles. Dans cet exemple, b ne peut être tirée, mais a et c le peuvent.

7.4.2 \mathbb{Z} -nets

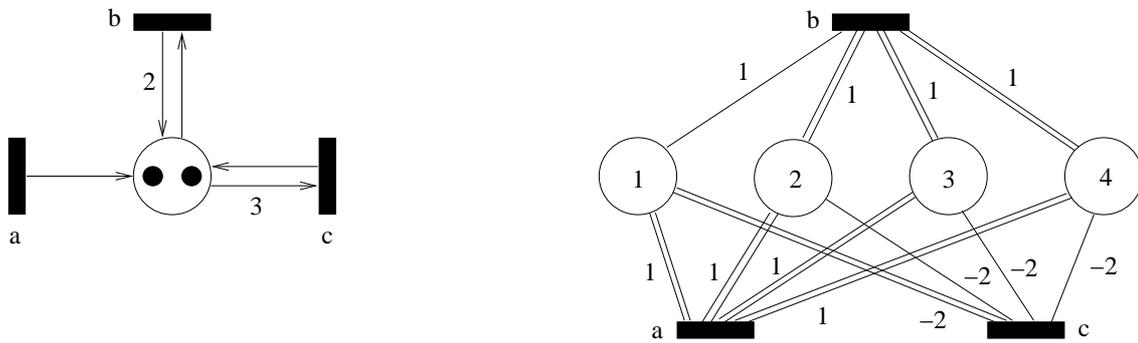
Le théorème suivant confirme que les \mathbb{Z} -nets étendent bien les RdP.

Théorème 7.4.1 *Les \mathbb{Z} -nets sont une extension des RdP.*

Preuve Soit $N = (P, T, f, M_0)$ un réseau de Petri. Pour tout $p \in P$, soit $E_p = \cup_{t \in T} \{M_0(p) - f(t, p) + 1, M_0(p) - f(t, p) + 2, \dots, M_0(p) - f(t, p) + f(p, t)\}$. Pour tout $p \in P$ et pour chaque $i \in E_p$, on définit une place p_i . Soit P' l'ensemble des places définies ainsi en faisant parcourir P à p . Le marquage initial de chaque place $p_i \in P'$ est son indice i . Soit $f' : P' \times T \rightarrow \mathbb{Z}$ la relation de flot définie ainsi : pour tout $p \in P$ et pour chaque $i \in E_p$, on pose $f'(p_\alpha, t) = (0, -f(p, t) + f(p, t))$ si $M_0(p) - f(t, p) + 1 \leq \alpha \leq M_0(p) - f(t, p) + f(p, t)$ et $f'(p_\alpha, t) = (1, -f(p, t) + f(p, t))$ sinon. Il suffit ensuite de vérifier que le graphe des marquages de $N' = (P', T, f', M'_0)$ est isomorphe à celui de N . \diamond

D'après la figure 7.14, l'inclusion est stricte car les \mathbb{Z} -nets étendent les strict- \mathbb{Z} -nets.

La figure 7.20 donne à gauche un réseau de Petri et à droite son \mathbb{Z} -net équivalent.

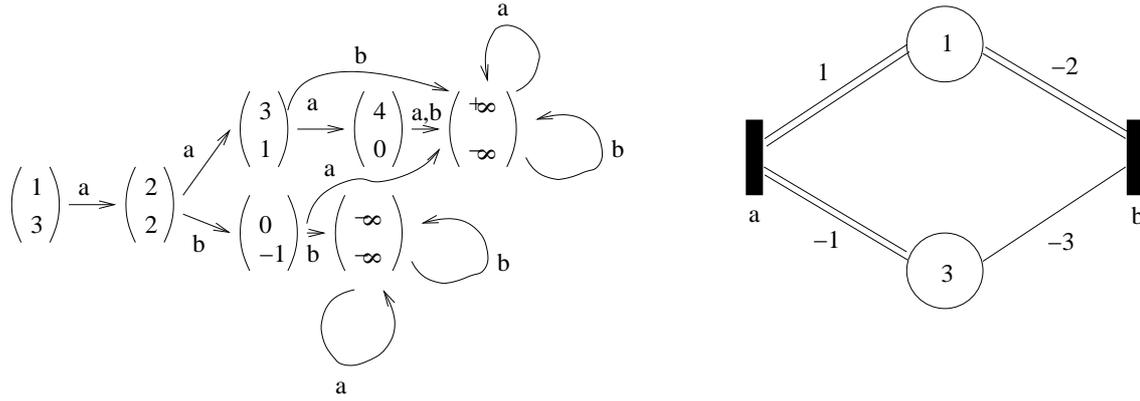


Pour passer d'un RdP au \mathbb{Z} -net correspondant, on ajoute des places comme pour les strict- \mathbb{Z} -nets.

FIG. 7.20: Réseau de Petri et son \mathbb{Z} -net équivalent

Il se trouve que la définition et les propriétés de l'arbre de couverture pour les strict- \mathbb{Z} -nets restent valides pour les \mathbb{Z} -nets (voir la figure 7.21 qui donne un \mathbb{Z} -net et son graphe de couverture à gauche).

Par conséquent, nous avons les résultats suivant :



La construction du graphe des marquages pour les \mathbb{Z} -nets est identique à celle pour les strict- \mathbb{Z} -nets.

FIG. 7.21: Graphe de couverture pour les \mathbb{Z} -nets

Théorème 7.4.2 (Décidabilité du caractère borné d'une place et d'un \mathbb{Z} -net) *Soit N un \mathbb{Z} -net. Le problème de savoir si une place donnée de N est bornée est décidable ainsi que le problème de savoir si N lui-même est borné.*

Beaucoup d'extensions strictes des RdP, tels les réseaux avec arcs inhibiteurs, ont la puissance des machines de Turing. La figure 7.22 exhibe un réseau avec arcs inhibiteurs qui ne peut-être modélisé à l'aide d'un \mathbb{Z} -net. En effet, si un tel réseau existait, l'action de a correspondrait à l'action de l'élément neutre du groupe et par conséquent a serait tirable après un ou deux tirs de b (pour tenir compte du fait que b pourrait être reliée par un arc inconditionnel) dont l'action n'est pas celle d'un élément neutre ; ce qui n'est pas le cas du réseau de la figure 7.22. Réciproquement la figure 7.14 donne un \mathbb{Z} -net qui ne possède pas de réseau avec arcs inhibiteurs équivalent. \mathbb{Z} -nets et réseaux de Petri avec arcs inhibiteurs sont incomparables ce qui laisse ouvertes des questions comme l'accessibilité pour les \mathbb{Z} -nets. De nombreux problèmes de décidabilité sont attaqués par le biais des machines à compteur ou encore des *systèmes d'addition de vecteurs avec états (VASS)* (introduits dans [Hopcroft 79]) qui sont équivalents aux réseaux de Petri. Par rapport aux VASS, le comportement des \mathbb{Z} -nets est fondamentalement différent, car, géométriquement parlant, les séquences de tirs possibles ne sont plus limitées à un espace défini comme une intersection de demi-espaces (liés au fait que le nombre de marques dans une place doit rester supérieur ou égal à zéro) mais doivent simplement éviter des hyperplans (liés au fait qu'une place ne peut prendre la valeur 0). Les techniques utilisables semblent donc très différentes.

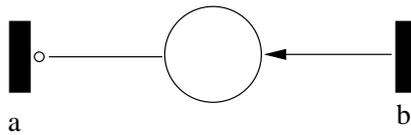


FIG. 7.22: Réseau avec arc inhibiteur non modélisable par \mathbb{Z} -net

7.4.3 $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ -nets

Les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets jouent un rôle particulier. D'une part il est possible de synthétiser le type des réseaux flip-flop [Schmitt 96] par un $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net (voir le chapitre 9), c'est à dire de construire un $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net dont le graphe des marquages est isomorphe au type des réseaux flip-flop (qui est lui même un graphe par définition), par conséquent les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets constituent une extension (il est facile de montrer qu'elle est même stricte) des réseaux flip-flop. D'autre part le type des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets (cf. figure 7.23) est extrêmement général dans l'ensemble des types des réseaux à places binaires. En effet, nous disposons à la fois d'un événement $(1, 1)$ permettant de switcher d'un état à l'autre (principe du flip-flop), d'un événement $(0, 1)$ induisant un changement d'état mais valide à partir d'un seul état (comme dans les réseaux élémentaires), d'un événement $(1, 0)$ jouant le rôle d'un élément neutre et d'un événement

$(0, 0)$ du même genre mais seulement valide à partir d'un seul des deux états. En particulier, les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets étendent les réseaux de Petri 1-sauf.

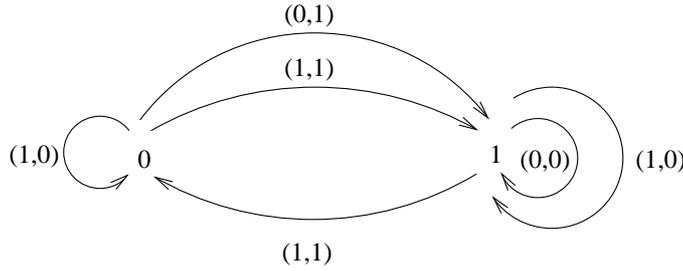


FIG. 7.23: Type des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets

De manière générale, les $\mathbb{Z}/(n + 1)\mathbb{Z}$ -nets étendent les réseaux de Petri n -bornés. En effet, il suffit de reprendre la construction du théorème 7.4.1, permettant de passer d'un RdP à un \mathbb{Z} -net, en manipulant chaque valeur en tant que classe de congruence modulo $(n + 1)$ (on travaille directement dans $\mathbb{Z}/(n + 1)\mathbb{Z}$ plutôt que dans \mathbb{Z} , ce qui est possible puisque le réseau de départ est réputé n -borné) pour obtenir un $\mathbb{Z}/(n + 1)\mathbb{Z}$ -net. La construction d'un $\mathbb{Z}/(n + 1)\mathbb{Z}$ -net ayant un comportement cyclique d'ordre $(n + 1)$ (par exemple une place marquée par 0 et une transition reliée à la place par un arc inconditionnel étiqueté par 1) permet de se convaincre que cette inclusion est stricte car aucun élément non nul de \mathbb{Z} n'est d'ordre fini. Enfin, $\mathbb{Z}/(n + 1)\mathbb{Z}$ est le plus petit groupe, du point de vue de son cardinal, dans l'ensemble des $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ qui étend les réseaux de Petri n -bornés.

La figure 7.24 résume l'état de notre classification des classes de group-nets que nous avons étudiées par rapport à un certain nombre de classes de réseaux de Petri usuelles. Les strict- $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets qui sont les $\{0\}$ -nets, réseaux dont les graphes de marquages se résument à un unique sommet avec un nombre arbitraire de boucles, apparaissent en tant qu'objet terminal dans la catégorie des systèmes de transitions. Les inclusions γ sont strictes et les classes incomparables si aucun chemin ne les relie.

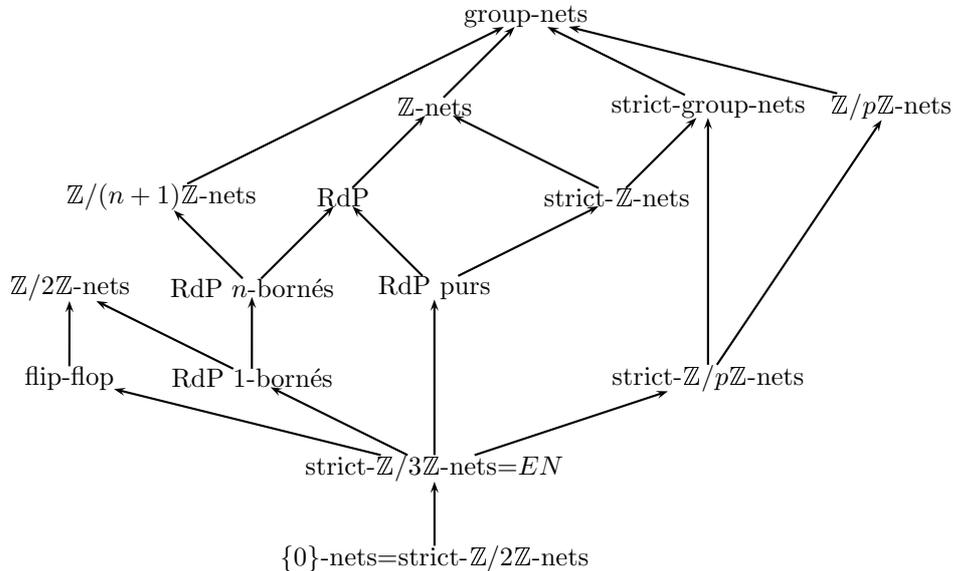


FIG. 7.24: Group-nets et réseaux de Petri

7.5 Group₂-nets et Group_n-nets

Le choix de ne pas orienter les représentations des group-nets était guidé par l'existence d'inverses dans un groupe. Ainsi, dans \mathbb{Z} , consommer de la ressource revient à ajouter un élément négatif.

Cependant la notion de ressource dans les \mathbb{Z} -nets, si elle existe, semble étrange et nous allons voir que d'imposer une règle de tir en deux temps (consommation puis production) comme dans les réseaux de Petri conduit étonnamment à une vision unifiée des \mathbb{Z} -nets et des strict- \mathbb{Z} -nets.

7.5.1 Group₂-nets

Soit $(G, +, 0)$ un groupe non trivial, d'élément neutre 0.

Définition 7.5.1 (G_2 -net) Un G_2 -net est un quintuplet $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ où P est un ensemble fini de places, T est un ensemble fini de transitions disjoint de P , $Pré$ et $Post$ sont des applications de $P \times T$ dans G et M_0 est une application de P dans $G \setminus \{0\}$ appelée marquage initial.

Définition 7.5.2 (Règle de tir pour les G_2 -net) Soit $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ un G_2 -net et M un marquage. La transition t de T est tirable ou franchissable à partir de M si $\forall p \in P, M + Pré(p, t) \neq 0$ et $M + Pré(p, t) + Post(p, t) \neq 0$ et, dans ce cas, on obtient un nouveau marquage M' défini par $\forall p \in P, M'(p) = M(p) + Pré(p, t) + Post(p, t)$. Cette étape est notée $M[t]M'$.

La figure 7.25 donne un \mathbb{Z}_2 -net où sont reprises les conventions usuelles aux réseaux de Petri. Par contre, si pour une place p et un transition t données $Pré(p, t) = 0 \vee Post(p, t) = 0$, on se contentera de représenter un seul arc non orienté étiqueté par $Pré(p, t) + Post(p, t)$. Dans ce réseau a n'est pas tirable (attention, on ne fait que de l'addition) mais b l'est. Après le tir de b , a n'est toujours pas tirable.

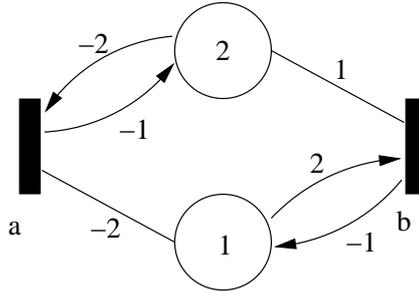


FIG. 7.25: Exemple de \mathbb{Z}_2 -net

On a trivialement le résultat suivant :

Propriété 7.5.1 Tout strict- G -net est un G_2 -net pur.

7.5.2 \mathbb{Z}_2 -nets

Théorème 7.5.1 Les \mathbb{Z}_2 -nets sont les \mathbb{Z} -nets.

Les deux lemmes suivants donnent les algorithmes permettant de construire le \mathbb{Z} -net correspondant à un \mathbb{Z}_2 -net donné et réciproquement.

Lemme 7.5.1 Les \mathbb{Z} -nets sont inclus dans les \mathbb{Z}_2 -nets.

Preuve Soit $N = (P, T, f, M_0)$ un \mathbb{Z} -net. On définit le \mathbb{Z}_2 -net N' de la façon suivante : $N' = (P, T, Pré, Post, M'_0)$ avec $\forall p \in P, M'_0(p) = 2M_0(p) - 1$

$\forall p \in P, \forall t \in T$, si $\pi_1(f(p, t)) = 1$ on pose $Pré(p, t) = 0$ et $Post(p, t) = 2\pi_2(f(p, t))$ et si $\pi_1(f(p, t)) = 0$, on pose $Pré(p, t) = 2\pi_2(f(p, t)) + 1$ et $Post(p, t) = -1$.

On termine en montrant que N et N' ont leurs graphes des marquages isomorphes. \diamond

Lemme 7.5.2 *Les \mathbb{Z}_2 -nets sont inclus dans les \mathbb{Z} -nets.*

Preuve Soit $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ un \mathbb{Z}_2 -net. On construit le \mathbb{Z} -net $N' = (P', T, f, M'_0)$ de la manière suivante : pour tout $p \in P$, pour tout $t \in T$, $M'_0(p) = M_0(p)$ et $f(p, t) = (0, Pré(p, t) + Post(p, t))$, si $Pré(p, t) \neq 0$ et $Post(p, t) \neq 0$ alors on ajoute une place p_t telle que $f(p_t, t) = (0, Pré(p, t) + Post(p, t))$, $M'_0(p_t) = M_0(p) - Post(p, t)$, et, $\forall t' \neq t$, $f(p_t, t') = (1, Pré(p, t') + Post(p, t'))$. P' est défini comme l'union de P et des $\{p_t\}$ ainsi créées.

On vérifie ensuite que les graphes des marquages de N et N' sont isomorphes. \diamond

\mathbb{Z} -nets et strict- \mathbb{Z} -nets sont donc des cas particuliers de \mathbb{Z}_2 -nets :

Corollaire 7.5.1 *Les strict- \mathbb{Z} -nets sont les \mathbb{Z}_2 -nets purs et les \mathbb{Z} -nets sont les \mathbb{Z}_2 -nets.*

L'existence d'un arbre de couverture pour les \mathbb{Z} -nets entraîne :

Corollaire 7.5.2 *Pour les \mathbb{Z}_2 -nets les problèmes de la terminaison, du caractère borné d'un réseau et du caractère borné d'une place sont décidables.*

Le théorème suivant découle directement des résultats précédents, cependant la preuve s'appuie sur la construction directe d'un \mathbb{Z}_2 -net équivalent à un RdP donné.

Théorème 7.5.2 *Les \mathbb{Z}_2 -nets sont une extension stricte des réseaux de Petri.*

Preuve Conséquence immédiate du fait que les \mathbb{Z}_2 -nets sont les \mathbb{Z} -nets. Nous donnons ci-après une manière de construire un \mathbb{Z}_2 -net à partir d'un RdP sans passer par un \mathbb{Z} -net.

Soit $N = (P, T, f, M_0)$ un réseau de Petri marqué. Pour $p \in P$, on pose $n_p = \max_{t \in T} \{f(p, t)\}$. On construit alors n_p places appelées p_1, p_2, \dots, p_{n_p} et marquées respectivement par $M_0(p) + 1, M_0(p) + 2, \dots, M_0(p) + n_p$. Soit P' l'ensemble des places ainsi construites lorsqu'on parcourt P . On définit $N' = (P', T, Pré, Post, M'_0)$ le \mathbb{Z}_2 -net pour lequel M'_0 le marquage initial a été donné ci-dessus et $\forall p_i \in P', \forall t \in T$, $Pré(p_i, t) = -f(p, t)$ et $Post(p_i, t) = f(p, t)$. \diamond

7.5.3 G_2 -nets et G -nets

On se pose maintenant la question naturelle : quelles sont les liens entre les G_2 -nets et les G -nets pour un groupe arbitraire G ?

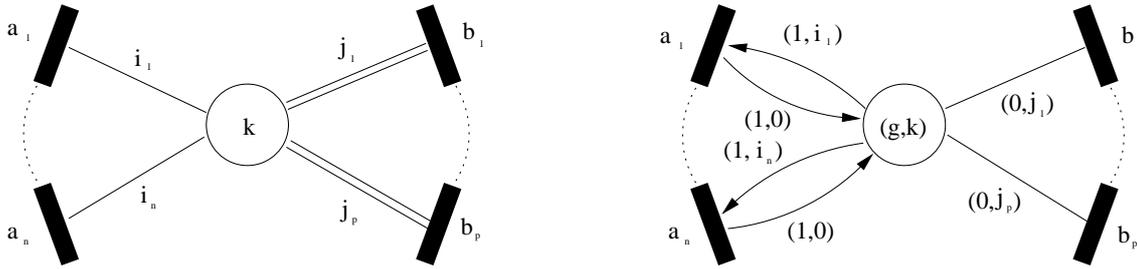
Théorème 7.5.3 *Les G_2 -nets sont inclus dans les G -nets.*

Preuve La construction décrite dans la preuve du lemme 7.5.2 permet d'associer un G -net équivalent à un G_2 -net donné. \diamond

La réciproque est évidemment fautive : prenons pour G le groupe à deux éléments $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$. Dans un tel groupe les $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})_2$ -nets ne peuvent changer d'état ce qui n'est évidemment pas le cas des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets. Cependant on peut se poser la question suivante : soit un G -net donné, existe-t-il un groupe G' tel qu'il est possible de construire un G'_2 -net équivalent ?

Proposition 7.5.1 *Soit G un groupe, alors à tout G -net on peut associer un $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times G)_2$ -net équivalent.*

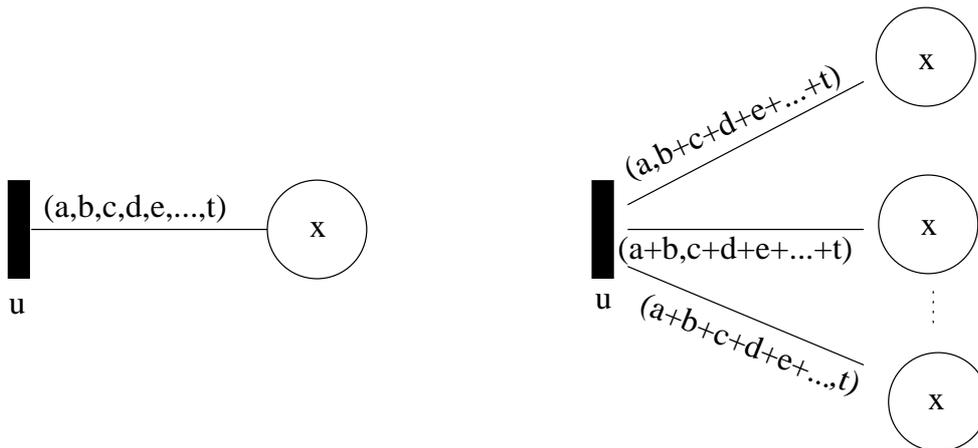
Preuve Il est facile de se convaincre que la construction ci-dessous généralisée à l'ensemble des places du G -net (à gauche) donne un $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times G)_2$ -net équivalent (à droite) :



◇

7.5.4 Les group_n-nets

Dans les réseaux de Petri le franchissement d'une transition se fait en deux temps : il y a tout d'abord consommation de ressource puis production de ressource. Dans les group-nets il se fait en un seul temps et on retrouve le franchissement en deux temps dans les group₂-nets. Pourquoi ne pas essayer de généraliser la règle de franchissement en se donnant la possibilité d'effectuer le franchissement d'une transition en n temps en conservant l'interdiction d'atteindre le zéro du groupe? On appellera de tels réseaux des group_n-nets. En particulier les strict-group-nets sont les group₁-nets. Nous allons voir que le seul gain effectif de cette généralisation est le passage des group₁-nets aux group₂-nets. Pour éviter d'avoir à dessiner n arcs numérotés dans l'ordre d'exécution des n étapes du franchissement d'une transition, on se contentera de n'en représenter qu'un seul étiqueté par un n -uplet comportant les n valeurs de flot dans l'ordre. Ainsi les arcs *Pré* et *Post* entre une transition t et une place p d'un group₂-net seront représentés par un seul arc non orienté étiqueté par le couple $(Pré(p, t), Post(p, t))$. De manière générale, dans un group_n-net, si $n > 1$, il suffit de remplacer chaque place par $n - 1$ places ayant toutes le marquage de la place d'origine et de les connecter aux transitions comme cela est décrit dans la figure 7.26 pour obtenir deux réseaux équivalents.



A gauche un group_n-net et, à droite, son group₂-net équivalent. Le trait en pointillés indique qu'il y a en tout $n - 1$ places portant toutes la valeur x .

FIG. 7.26: Passage d'un group_n-net à un group₂-net

7.6 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre nous proposons de changer l'algèbre des places des réseaux de Petri par un groupe privé de l'élément neutre. Les strict-group-nets ainsi obtenus permettent de généraliser les réseaux de Petri purs en choisissant pour groupe l'ensemble des entiers relatifs \mathbb{Z} et permettent également de retrouver les réseaux élémentaires. L'adjonction d'un arc dit « inconditionnel » conduit aux group-nets. Ces réseaux étendent les réseaux de Petri n -bornés, les réseaux de Petri places/transitions usuels ainsi que les strict-group-nets. Nous montrons que les problèmes de savoir si un réseau est borné et si une place d'un réseau est bornée sont décidables à travers une notion d'arbre de couverture. Nous donnons également une présentation unifiée des \mathbb{Z} -nets et des strict- \mathbb{Z} -nets à travers les \mathbb{Z}_2 -nets. Beaucoup de questions restent encore ouvertes sur ces réseaux. Par exemple : peut-on décider de leur régularité (au sens de la théorie des langages), de leur accessibilité ? Y a-t-il des liens entre groupe-produit et produit de réseaux ? Nous savons que les réseaux de Petri ont des liens étroits avec les groupes sans torsion, peut-on exploiter ce fait avec les group-nets ?

Bibliographie

- [Badouel 99] Badouel, E. et Darondeau, P. (1999). Theory of regions. *Lecture Notes in Computer Science*, 1491 :529–586.
- [Bourcerie 03] Bourcerie, M., Bousseau, F., et Mabed, M. (2003). Les RdP $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ un outil d'apprentissage et d'intégration des perturbations. In *Proceedings of the 4^{ième} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation*, Toulouse (France).
- [Bourcerie 97] Bourcerie, M. et Morel, J.-Y. (1997). Algebraically structured coloured Petri nets to model sequential processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-B*, 27(4).
- [Ehrenfeucht 90a] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990a). Partial 2-structures; Part I :Basic notions and the Representation Problem. *Acta Informatica*, 27 :315–342.
- [Ehrenfeucht 90b] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990b). Partial 2-structures; Part II : State Spaces of Concurrent Systems. *Acta Informatica*, 27 :343–368.
- [Guillou 04] Guillou, G. (2004). Group-nets and strict-group-nets. *Petri Net Newsletter*, 67 :17–25.
- [Guillou 09] Guillou, G. (2009). Group-nets et réseaux lexicographiques : expressivité et décidabilité. *Technique et Science Informatiques*, 28 :1171–1201. Numéro spécial « Réseaux de Petri et Algorithmes ».
- [Hopcroft 79] Hopcroft, J. et Pansiot, J. (1979). On the reachability problem for 5-dimensional vector addition systems. *Theoretical Computer Science*, 8 :135–159.
- [Juhás 98] Juhás, G. (1998). *Algebraically Generalised Petri Nets*. Mémoire de Thèse, Institute of Control Theory and Robotics. Slovak Academy of Sciences.
- [Murata 89] Murata, T. (1989). Petri nets : Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4) :541–588.
- [Schmitt 96] Schmitt, V. (1996). Flip-Flop Nets. In *Lectures Notes in Computer Science*, volume 1046, pages 517–528. STACS'96.

Chapitre 8

Réseaux lexicographiques

8.1 Introduction

Les extensions proposées au chapitre précédent partaient d'un choix d'algèbre qui permettait une règle de tir simple et universelle en interdisant les transitions qui menaient à l'élément neutre du groupe. L'inconvénient majeur de cette approche est de mener à des réseaux dont la notion de ressource disparaît car ce n'est pas elle qui a guidé le choix de l'algèbre. On peut tenter de choisir l'algèbre de telle manière qu'une notion de ressource similaire à celle des réseaux de Petri usuels soit préservée. C'est l'objet de ce chapitre qui présente les *réseaux lexicographiques* qui sont issus d'une axiomatisation de la notion de ressource et de la règle de tir des réseaux de Petri places/transitions et sont censés, par conséquent, se comporter comme eux. Les réseaux lexicographiques forment une extension algébrique des réseaux de Petri avec une notion de ressource très étrange : on peut consommer strictement indéfiniment ! Ces nouveaux réseaux ont malheureusement la puissance des machines de Turing ce qui rend indécidable tous les problèmes non triviaux les concernant. Cependant, nous montrons que les réseaux lexicographiques bornés sont les réseaux de Petri bornés ce qui achève d'une certaine manière leur description. Enfin, la conclusion propose un certain nombre de pistes de recherche sur les deux modèles étudiés.

8.2 Algèbres de Petri

Les algèbres que nous avons choisies au chapitre 7 pour tenter d'étendre les réseaux de Petri présentent le défaut de perdre la notion de ressource. Dans les réseaux de Petri l'algèbre linéaire permet de résoudre de nombreux problèmes tels que la synthèse, l'accessibilité ou encore le caractère structurellement borné lui-même lié aux semi-flots. Il paraît alors intéressant dans les extensions algébriques des réseaux de Petri de conserver une algèbre proche de celle du monoïde \mathbb{N} , algèbre des réseaux de Petri, afin de préserver la même théorie équationnelle ou inéquationnelle et par conséquent de préserver une bonne partie des résultats et techniques usuelles.

Un angle d'attaque assez technique que l'on trouve dans [Badouel 05] consiste à caractériser les algèbres qui permettent de conserver la même règle de tir ainsi qu'un certain nombre de propriétés naturellement associées à la notion de ressource. En particulier, le monoïde $(\mathbb{N}, +, 0)$ des entiers naturels qui est l'algèbre des places des réseaux de Petri doit en faire partie. Il nous faut donc un zéro, noté naturellement 0, constante qui signifie l'absence de ressource et une relation d'ordre, notons la \sqsubseteq , pour pouvoir avoir une condition de franchissement similaire à celle des réseaux de Petri. Enfin nous devons être capable d'accumuler de la ressource, notons cette opération \oplus que nous choisissons, à l'image de celle des réseaux de Petri, associative et commutative (il peut être intéressant d'ailleurs d'analyser le cas non commutatif), et de consommer ces mêmes ressources avec un opérateur \ominus dit de résiduation, c'est à dire un pseudo-inverse de \oplus défini seulement lorsque l'on dispose de suffisamment

de ressources (on ne fait $a \ominus b$ que lorsque $b \sqsubseteq a$). Supposons que nous disposions d'un réseau dans lequel les places et les flots prennent leurs valeurs dans une telle algèbre alors la relation de transition $M[t]M'$ peut s'écrire de manière tout à fait similaire à la relation de transition dans les réseaux de Petri usuels :

$$M[t]M' \Leftrightarrow \forall p \in P, M(p) \sqsupseteq \text{Pré}(p, t) \wedge M'(p) = (M(p) \ominus \text{Pré}(p, t)) \oplus \text{Post}(p, t)$$

Pour aller encore un peu plus loin dans l'analogie, on peut constater que le système de transitions associé à la relation de transition dans un réseau de Petri usuel est déterministe et co-déterministe, c'est à dire que la donnée de M et de t détermine M' et, inversement, la donnée de M' et de t détermine M . En analysant les algèbres qui permettent de retrouver l'ensemble de ces caractéristiques, on constate qu'il est nécessaire qu'elles soient des monoïdes commutatifs de divisibilité ($a \sqsupseteq b \iff \exists c$ tel que $a = b \oplus c$), simplifiables ($(a \oplus b) \ominus b = a$) munies donc d'une opération de résiduation adjointe à l'addition (l'opérateur \ominus) et vérifiant $b \sqsubseteq a \implies a = (a \ominus b) \oplus b$. On appellera de telles algèbres des *algèbres de Petri commutatives*. Le lecteur intéressé pourra trouver une démonstration complète du résultat qui suit dans [Badouel 07].

Théorème 8.2.1 *Les algèbres de Petri commutatives coïncident avec les cônes positifs des groupes commutatifs ordonnés en treillis.*

8.3 Définitions

Les réseaux lexicographiques que nous définissons ci-après constituent un exemple de classe de réseaux fonctionnant sur une algèbre de Petri tout en constituant une extension stricte des réseaux de Petri. Ces réseaux acquièrent une importance toute particulière du fait de leur universalité dans le sens où tout réseau associé à une algèbre de Petri peut être simulé par un réseau lexicographique [Badouel 07].

Prenons maintenant le cône positif du produit lexicographique de \mathbb{Z} avec lui-même : $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$. Le produit lexicographique (noté ici \circ) de \mathbb{Z} avec lui-même est tout simplement le groupe produit $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ muni de l'ordre lexicographique :

$$(u, v) \leq (z, t) \iff u < v \text{ ou } (u = z \text{ et } v \leq t)$$

Comme \mathbb{Z} muni de son ordre habituel est une chaîne, $\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z}$ muni de l'ordre lexicographique l'est aussi et est donc en particulier ordonné en treillis. Son cône positif est alors bien une algèbre de Petri commutative et

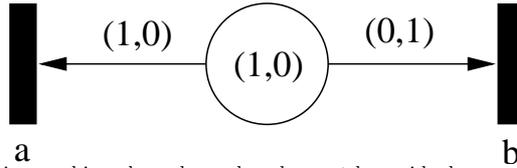
$$(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+ = \{(x, y) \mid (x = 0 \text{ et } y \geq 0) \text{ ou } (x > 0 \text{ et } y \in \mathbb{Z})\}$$

Le produit lexicographique est associatif et on peut définir inductivement $(\mathbb{Z}^n)^+$ pour tout entier n (on pourrait même l'étendre aux ordinaux) en posant $\mathbb{Z}^{n+1} = \mathbb{Z}^n \circ \mathbb{Z}$ et en le munissant de l'ordre lexicographique. Dans la suite nous appellerons *réseaux lexicographiques* les réseaux fonctionnant sur l'algèbre $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$.

Définition 8.3.1 (Réseau lexicographique) *Un réseau lexicographique est un quintuplet $(P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0)$ où P est un ensemble fini de places, T est un ensemble fini de transitions (disjoint de P), Pré et Post sont les relations de flot de $P \times T$ dans $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$. On appellera marquage une application de P dans $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$ et M_0 est le marquage initial.*

Comme pour les réseaux de Petri, le comportement d'un réseau lexicographique est complètement déterminé par la *règle de tir* :

Définition 8.3.2 (Règle de tir pour les réseaux lexicographiques) *Soit $N = (P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0)$ un réseau lexicographique. Le tir de la transition t à partir du marquage M est autorisé si $\forall p \in P, M(p) \geq \text{Pré}(p, t)$. Dans ce cas on peut franchir t ce qui donne le nouveau marquage M' défini par $\forall p \in P, M'(p) = M(p) - \text{Pré}(p, t) + \text{Post}(p, t)$ (où $-$ est l'opération de résiduation associée naturellement à $+$).*



Dans un réseau lexicographique les valeurs des places et les poids des arcs sont à valeurs dans $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+ = \{(x, y) | (x = 0 \text{ et } y \geq 0) \text{ ou } (x > 0 \text{ et } y \in \mathbb{Z})\}$. Son fonctionnement suit les mêmes règles que pour les réseaux de Petri standards.

FIG. 8.1: Réseau lexicographique

Nous reprenons par ailleurs les définitions usuelles sur les réseaux de Petri que nous étendons directement aux réseaux lexicographiques : séquence de tirs, langage d'un réseau N que nous noterons $L(N)$, ensemble d'accessibilité noté $R(N)$, graphe des marquages noté $MG(N)$...

Par exemple, le langage du réseau de la figure 8.1 est l'ensemble des préfixes de $a + b^*$ qui ne peut-être le langage d'un réseau de Petri. En effet, supposons que l'on dispose d'un réseau de Petri ayant un tel langage. b étant franchissable indéfiniment à partir du marquage initial, dans chaque place, b produit plus de ressources qu'elle n'en consomme et, par conséquent, par monotonie, a devrait être *a fortiori* franchissable après l'exécution de b . Ceci nous conduit à la proposition suivante :

Proposition 8.3.1 *Les réseaux lexicographiques sont une extension stricte des RdP.*

En fait, on peut même exhiber une famille infinie de réseaux strictement emboîtés : les réseaux lexicographiques sur les algèbres $(\mathbb{Z}^n)^+$. Pour s'en convaincre commençons par exhiber le réseau sur $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$ de la figure 8.2, non modélisable par un réseau lexicographique sur $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$.

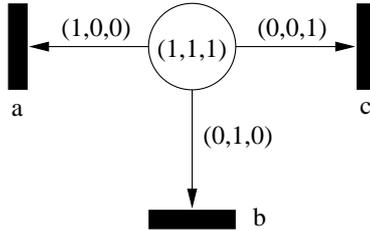
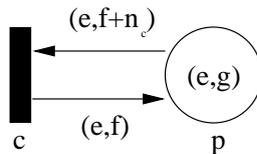


FIG. 8.2: Réseau sur $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$ non modélisable par un réseau sur $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$

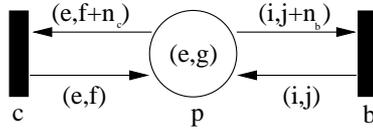
Supposons que nous ayons un réseau lexicographique (sur $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$) ayant même langage que le réseau ci-dessus. Comme b et c sont tous deux indéfiniment tirables à partir du marquage initial, nécessairement, quelle que soit la place $p \in P$ et la transition $t \in \{b, c\}$, il existe $n_t \in \mathbb{Z}$ tel que $Post(p, t) - Pré(p, t) \geq (0, n_t)$. De plus le marquage de la place p a sa première composante supérieure ou égale à 1 si $Post(p, t) - Pré(p, t) < 0$. Remarquons que ab et abc appartiennent au langage mais pas $abcc$. Plaçons nous alors dans la configuration atteinte une fois la séquence ab franchie. Comme c n'est tirable qu'une fois, on en conclut qu'il existe au moins une place p telle que c consomme strictement plus de ressources qu'elle n'en produit en cette place, on a alors d'après la remarque précédente $Pré(p, c) - Post(p, c) = (0, n_c)$ avec $n_c \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$. De plus c n'est tirable qu'une fois, on a donc la configuration suivante :



avec $g < f + 2n_c$ et $f \in \mathbb{Z}$.

Maintenant on s'aperçoit qu'avant de tirer b (c'est-à-dire après avoir tiré a à partir du marquage

initial) c est tirable indéfiniment. Bilan, b agit sur la place p et consomme globalement strictement de la ressource dans p . D'où $Pré(p, b) - Post(p, b) = (0, n_b)$ avec $n_b \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ car b est tirable indéfiniment à partir du marquage initial. Il s'ensuit que l'on a la configuration suivante (toujours après le franchissement de ab) :



où $j \in \mathbb{Z}$.

Après le tir de a à partir du marquage initial, le marquage de la place p vaut $(e, g) + (0, n_b)$ et on peut tirer indéfiniment c , donc :

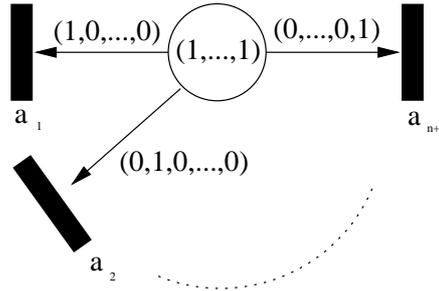
$$\forall q \in \mathbb{N}, (e, g) + (0, n_b) + q(0, -n_c) \geq (e, f + n_c)$$

soit :

$$\forall q \in \mathbb{N}, g \geq -n_b + qn_c + f + n_c$$

mais comme $n_c > 0$ et g est fini, c'est impossible.

De manière générale le réseau suivant sur $(\mathbb{Z}^{n+1})^+$ n'a pas le langage d'un réseau sur $(\mathbb{Z}^n)^+$ (pour $n \geq 1$) :



Prouvons cela de manière un peu moins formelle qu'auparavant. Supposons que nous ayons réussi à construire un réseau sur $(\mathbb{Z}^n)^+$ qui a même langage que le réseau ci-dessus. On notera M_i le marquage obtenu après le franchissement de $a_1 a_2 \dots a_i$ ($0 \leq i \leq n+1$) à partir de M_0 . Après l'exécution de la séquence $a_1 a_2 \dots a_n$ à partir du marquage initial, a_{n+1} n'est tirable qu'une fois. Il existe donc au moins une place $p \in P$ telle que $M_n(p) \geq Pré(p, a_{n+1})$ et

$$0 \leq M_n(p) - Pré(p, a_{n+1}) + Post(p, a_{n+1}) < Pré(p, a_{n+1}) \quad (1)$$

En particulier a_{n+1} consomme strictement de la ressource dans p . Dans $(\mathbb{Z}^\alpha)^+$, pour $\alpha \in \mathbb{N}$, on dira que y est d'un ordre de grandeur strictement plus grand que x , et on notera $y \gg x$, si, $\forall n \in \mathbb{N}, y > nx$. On a donc $(\alpha + 1)$ ordres de grandeur deux à deux différents dans $(\mathbb{Z}^\alpha)^+$: par exemple $(1, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots, 0) \dots (0, \dots, 0, 1), 0$ sont tous d'ordres de grandeur deux à deux différents. Après le franchissement de $a_1 a_2 \dots a_{n-1}$, a_{n+1} est indéfiniment tirable, donc a_n agit sur la place p en consommant strictement de la ressource dedans et son action est d'un ordre de grandeur strictement plus grand que celui de a_{n+1} . Soit :

$$Pré(p, a_n) - Post(p, a_n) \gg Pré(p, a_{n+1}) - Post(p, a_{n+1}) \quad (2)$$

D'autre part, après le franchissement de la séquence $a_1 a_2 \dots a_{n-2}$, a_n est indéfiniment tirable, donc :

$$M_{n-2}(p) - Pré(p, a_n) \gg Pré(p, a_n) - Post(p, a_n) \quad (3)$$

Montrons maintenant que a_{n-1} agit sur p et que son action est d'un ordre de grandeur strictement plus grand que celui de a_n . On a :

$$M_n(p) = M_{n-2}(p) - \text{Pré}(p, a_{n-1}) + \text{Post}(p, a_{n-1}) - \text{Pré}(p, a_n) + \text{Post}(p, a_n)$$

donc, d'après (3) :

$$\forall q \in \mathbb{N}, M_n(p) > q(\text{Pré}(p, a_n) - \text{Post}(p, a_n)) + \text{Post}(p, a_n) - \text{Pré}(p, a_{n-1}) + \text{Post}(p, a_{n-1}) \quad (4)$$

d'où, d'après (2) :

$$M_n(p) > q(\text{Pré}(p, a_{n+1}) - \text{Post}(p, a_{n+1})) + \text{Post}(p, a_n) - \text{Pré}(p, a_{n-1}) + \text{Post}(p, a_{n-1})$$

ce qui serait incompatible avec (1) si a_{n-1} avait une action positive sur p . De plus, d'après (4) et (1), son action est d'un ordre de grandeur strictement plus grand que celui de a_n , c'est-à-dire que

$$\text{Pré}(p, a_n) - \text{Post}(p, a_n) \ll \text{Pré}(p, a_{n-1}) - \text{Post}(p, a_{n-1})$$

On montre ainsi de proche en proche que les actions des a_i sont non nulles sur la place p et d'ordres de grandeurs deux à deux différents. Or il n'y a que n ordres de grandeurs autres que celui de 0 et différents dans $(\mathbb{Z}^n)^+$, d'où la contradiction.

8.4 Un peu d'algèbre linéaire

Les réseaux lexicographiques, par construction, sont de bons candidats comme extension des réseaux de Petri pouvant conserver les principaux résultats et techniques liés à ces derniers. Les techniques d'algèbre linéaire utilisées pour l'analyse des réseaux de Petri sont fondées sur l'équation fondamentale qui lie le marquage obtenu et le marquage de départ lors du franchissement d'une séquence de transitions grâce à une matrice dite d'*incidence*.

Définition 8.4.1 (matrice d'incidence) Soit $N = (P, T, \text{Pré}, \text{Post})$ un réseau lexicographique. On peut voir $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^P$ comme un \mathbb{Q} -espace vectoriel et donc tout marquage comme un vecteur de cet espace ainsi que $\text{Pré}(\cdot, t)$ et $\text{Post}(\cdot, t)$ pour tout $t \in T$.

La matrice d'incidence du réseau N , notée C , est définie ainsi :

$$\forall p \in P, \forall t \in T, C(p, t) = \text{Post}(p, t) - \text{Pré}(p, t)$$

La règle de tir et les règles algébriques étant les mêmes que pour les réseaux de Petri, nous avons bien entendu la règle dite de *franchissement* :

Propriété 8.4.1 (règle de franchissement) Soit $N = (P, T, \text{Pré}, \text{Post})$ un réseau lexicographique et $s \in T^*$.

$$M[s > M' \implies M' = M + C\bar{s}$$

où \bar{s} est l'image de Parikh ou image commutative de s .

Il est facile alors de déduire la propriété dite de *commutativité*.

Propriété 8.4.2 (commutativité) Soit $N = (P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0)$ un réseau lexicographique marqué (ie un réseau lexicographique muni d'un marquage initial M_0). Soient x et y deux séquences dont les images commutatives sont identiques, alors pour tout marquage M à partir duquel x et y sont franchissables on obtient le même marquage M' par franchissement de x ou de y .

et la propriété de monotonie :

Propriété 8.4.3 (monotonie) Soit $N = (P, T, Pré, Post)$ un réseau lexicographique. Soient M et M' deux marquages tels que $M[t > M'$. Quelque soit M_1 un marquage tel que $M_1 \geq M$ alors $M_1[t > M'_1$ et $M'_1 - M_1 = M' - M$.

De même, tout réseau lexicographique persistant est confluent :

Définition 8.4.2 (persistance) Soit $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ un réseau lexicographique marqué. N est dit persistant si pour tout marquage accessible, pour toutes transitions distinctes $t, t' \in T$, $M[t >$ et $M[t' >$ implique $M[tt' >$.

Propriété 8.4.4 (confluence) Soit $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ un réseau lexicographique marqué. Soient x et y deux séquences et M un marquage accessible tel que $M[x >$ et $M[y >$. Si N est persistant alors il existe deux séquences x' et y' et un marquage accessible M' tel que $M[xx' > M'$, $M[yy' > M'$ et $xx' = yy'$.

Preuve Par induction sur la longueur de la plus courte des séquences x et y .

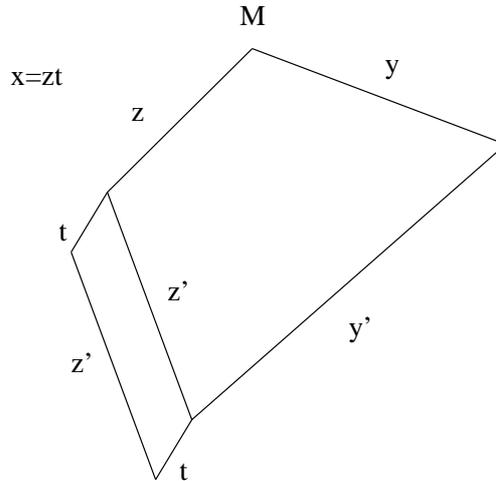
Prenons x par exemple.

- x est le mot vide ε , on prend $x' = y$ et $y' = \varepsilon$.
- $x = zt$ supposons la propriété démontrée pour les séquences z et y , donc il existe z' et y' tels que $zz' = yy'$ et $M[zz' > M'$ et $M[yy' > M'$.

Montrons par induction sur la longueur de z' que $M[ztz' > = M[zz't >$.

Si $|z'| = 0$ c'est évident car zz' est effectivement franchissable.

Si $z' = vt'$ avec $t' \in T$ alors supposons que $M[ztv > = M[zvt >$. Comme on a à la fois $M[zvt >$ et $M[zvt' >$ par persistance on a $M[zvtt' >$. Par commutativité, on a $M[ztvt' > = M[zvt't >$.



Finalement, les séquences z' et $y't$ conviennent car $M[xz' > = M[yy't >$. \diamond

Evidemment tous les réseaux ne sont pas confluents, car c'est le cas des réseaux de Petri qui sont strictement inclus dans les réseaux lexicographiques.

8.5 Réseaux lexicographiques et machines de Turing

Un outil fondamental qui permet de résoudre nombre de problèmes de décision pour les réseaux de Petri est l'arbre de couverture défini par Karp et Miller [Karp 69]. Cependant le caractère fini de cette construction est lié au fait que l'ordre naturel sur $\mathbb{N}^{|P|}$ est bien fondé, ce qui n'est plus le cas pour

$(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$. A priori, définir un arbre de couverture pour les réseaux lexicographiques semble difficile. On peut alors se demander si les réseaux lexicographiques ont la puissance des machines de Turing, auquel cas tous les problèmes de décidabilité non triviaux (terminaison, caractère borné, accessibilité ...) deviennent indécidables. Une classe de réseau qui a cette puissance est celle des réseaux de Petri avec arcs inhibiteurs. Comparons les aux réseaux lexicographiques. Commençons par remarquer que certains réseaux lexicographiques n'ont pas un comportement de réseau de Petri à arcs inhibiteurs. En effet, prenons le réseau de la figure 8.3 : son langage est l'ensemble des préfixes de $ab + b^*$ et ne peut être le langage d'un réseau de Petri avec arcs inhibiteurs. En effet, comme pour les réseaux de Petri standards, le fait que b soit indéfiniment tirable à partir du marquage initial impose à b de faire croître les marquages, c'est à dire que $M[b]M' \implies M \leq M'$, la présence possible d'arcs inhibiteurs entre certaines places et la transition b imposant simplement que le marquage de ces places reste à zéro (donc pas d'arcs *Post* correspondant). Cependant après a , b n'est tirable qu'une fois et comme b à une action croissante sur les marquages, c'est qu'au moins une place est en self-loop avec la transition b via un arc inhibiteur et un arc *Post* valué par une valeur strictement positive. Mais alors b ne serait plus tirable indéfiniment à partir du marquage initial...

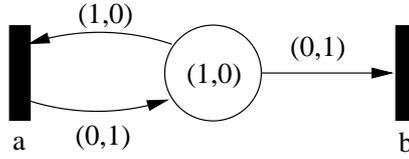


FIG. 8.3: Réseau lexicographique sans RdP à arcs inhibiteurs équivalent

Théorème 8.5.1 *Les réseaux lexicographiques contiennent strictement les réseaux de Petri à arcs inhibiteurs.*

Avant de passer à la preuve, fixons la terminologie en rappelant la définition d'un réseau de Petri à arcs inhibiteurs.

Définition 8.5.1 (Réseau de Petri à arcs inhibiteurs) *Un réseau de Petri à arcs inhibiteurs est un quadruplet $N = (P, T, Pré, Post)$ où P , T et $Post$ sont définis de manière identique à celle des réseaux de Petri, mais $Pré$ est une application de $P \times T$ dans $\mathbb{N} \cup \{\emptyset\}$ où \emptyset est un symbole. Une transition t est franchissable pour un marquage $M \in \mathbb{N}^P$ lorsque pour toute place p , $M(p) \geq Pré(p, t)$ si $Pré(p, t) \in \mathbb{N}$ ou $M(p) = 0$ si $Pré(p, t) = \emptyset$. Si t est franchissable à partir de M alors le marquage M' obtenu est défini par :*

$$\forall p \in P, M'(p) = \begin{cases} M(p) - Pré(p, t) + Post(p, t) & \text{si } Pré(p, t) \in \mathbb{N} \\ M(p) + Post(p, t) & \text{si } Pré(p, t) = \emptyset \end{cases}$$

Preuve Soit $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ un réseau de Petri marqué à arcs inhibiteurs. Commençons par distinguer les éléments de P . On pose $P_1 = \{p \in P \mid \forall t \in T, Pré(p, t) \in \mathbb{N}\}$ et P_2 son complémentaire dans P . P_2 contient donc les places qui sont reliées à au moins une transition par un arc inhibiteur. Soit maintenant $N' = (P', T, Pré', Post', M'_0)$ le réseau lexicographique défini ainsi : $P' = P \cup P'_2$ avec P'_2 un ensemble disjoint de P tel que $|P'_2| = |P_2|$. Pour des raisons pratiques on notera p' , pour chaque place p de P_2 , les places de P'_2 , et on dira que p' est la place *négative* associée à p . D'autre part :

$$\forall p \in P, M'_0(p) = (0, M_0(p))$$

$$\forall p' \in P'_2, M'_0(p') = (1, -M_0(p))$$

c'est à dire qu'une place négative a pour marquage 1 suivi du négatif (l'inverse) du marquage de la place du réseau de Petri initial alors que tout autre place contient 0 suivi du marquage initial de la place en question.

$$\forall p \in P, \forall t \in T, Pré'(p, t) = \begin{cases} 0 & \text{si } Pré(p, t) = \emptyset \\ (0, Pré(p, t)) & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\forall p \in P, \forall t \in T, Post'(p, t) = (0, Post(p, t))$$

$$\forall p' \in P'_2, \forall t \in T,$$

$$Pré'(p', t) = (0, \max(Post(p, t) - Pré(p, t), 0)) \text{ si } Pré(p, t) \in \mathbb{N}$$

$$\begin{aligned} \text{Pré}'(p', t) &= (1, 0) \text{ si } \text{Pré}(p, t) = \emptyset \\ \text{Post}'(p', t) &= (0, \max(\text{Pré}(p, t) - \text{Post}(p, t), 0)) \text{ si } \text{Pré}(p, t) \in \mathbb{N} \\ \text{Post}'(p', t) &= (1, -\text{Post}(p, t)) \text{ si } \text{Pré}(p, t) = \emptyset \end{aligned}$$

En fait, les transitions agissent de la même manière que dans le réseau de Petri de départ mais uniquement sur la deuxième composante des marquages des places $p \in P$ et de manière inverse sur les places négatives associées. Enfin l'arc inhibiteur et l'arc *Post* associé s'il existe sont remplacés par une self-loop.

La figure 8.4 donne un exemple de réseau lexicographique équivalent à un réseau de Petri à arcs inhibiteurs obtenu par l'algorithme qui vient d'être exposé.

La correspondance σ entre les marquages de N et de N' est définie par l'application qui envoie tout marquage M de N sur le marquage M' de N' tel que

$$\forall p \in P, M'(p) = (0, M(p))$$

$$\forall p' \in P'_2, M'(p') = (1, -M(p))$$

On constate que M' est bien un élément de $(\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$ car $M \in \mathbb{N}^P$.

On se convainc aisément ensuite que cette correspondance est préservée par tir de transitions. Enfin, l'inclusion stricte est donnée par le réseau de la figure 8.3. \diamond

Il est intéressant de constater que le test à zéro dans le réseau de Petri à arcs inhibiteurs initial est également remplacé par un test à zéro dans le réseau lexicographique associé. En effet une place p , de marquage k , reliée par un arc inhibiteur à une transition a est remplacée par deux places p et p' . Dans le réseau lexicographique a ne sera tirable que si $M(p) = (1, -k) \geq (1, 0)$, mais comme $M(p') = (0, k)$, a sera tirable si et seulement si $M(p') = 0$ (ou encore si et seulement si $M(p) = (1, 0)$). La figure 8.4 permet également d'illustrer ce fait.

Du théorème précédent découle le corollaire suivant :

Corollaire 8.5.1 *Les problèmes de la terminaison, de la couverture, du caractère borné d'un réseau, du caractère borné d'une place, du caractère structurellement borné, de l'accessibilité, du blocage, de la vivacité et de la t-vivacité sont indécidables.*

8.6 Réseaux lexicographiques bornés

Bien que le caractère borné d'un réseau soit indécidable, on peut se demander ce que sont les réseaux lexicographiques bornés. Pour lever toute ambiguïté, notons que, contrairement aux réseaux de Petri et afin de préserver la même notion, le caractère borné d'un réseau lexicographique ne peut être lié à l'ordre de l'algèbre sous-jacente, car l'ordre lexicographique n'est pas bien fondé.

Définition 8.6.1 (place bornée) *Soit $N = (P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0)$ un réseau lexicographique. Une place $p \in P$ est dite bornée si $\{M(p) / M \in R(N)\}$ est fini.*

Définition 8.6.2 (réseau lexicographique borné) *Soit $N = (P, T, \text{Pré}, \text{Post}, M_0)$ un réseau lexicographique. N est borné si toute place $p \in P$ est bornée.*

Si $x \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, on notera $x(1)$ sa première composante et $x(2)$ sa deuxième.

La preuve du théorème 8.6.1 montre qu'à partir d'un réseau lexicographique borné, il est possible de construire un réseau de Petri borné équivalent ayant le même nombre de places et de transitions car cette construction revient en général à choisir un hyperplan dans le faisceau linéaire d'hyperplans défini par les deux hyperplans (s'ils existent) associés à la première composante et à la deuxième composante du marquage de chaque place.

Théorème 8.6.1 (Caractérisation des réseaux lexicographiques bornés) *Les réseaux lexicographiques bornés sont les réseaux de Petri bornés.*

Preuve Tout réseau de Petri étant un réseau lexicographique, le sens réciproque est trivial. Soit maintenant $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ un réseau lexicographique borné. Par conséquent $R(N)$ l'ensemble des marquages accessibles de N est fini. Soit $N' = (P, T, Pré', Post', M'_0)$ le réseau de Petri dont la construction est détaillée ci-dessous.

Pour chaque place p de N on ordonne l'ensemble constitué des $M(p)$ pour $M \in R(N)$, des $Pré(p, t)$ pour $t \in T$ et des $Post(p, t)$ pour $t \in T$. Ceci nous donne pour chaque $p \in P$ une liste finie triée de manière strictement croissante que l'on notera L_p , on notera sa longueur n_p et $((a_{i,p}, b_{i,p}))_{i \in \{1, 2, \dots, n_p\}}$ ses éléments. L'idée est de chercher pour chaque place p de P un $\alpha_p \in \mathbb{Z}$ tel que la suite finie $(a_{i,p}\alpha_p + b_{i,p})_{i \in \{1, 2, \dots, n_p\}}$ soit strictement croissante et dans \mathbb{N} . Par conséquent il est nécessaire que d'une part $a_{1,p}\alpha_p + b_{1,p} \geq 0$ c'est à dire que $\alpha_p \geq -\frac{b_{1,p}}{a_{1,p}}$ si $a_{1,p}$ est non nul, et d'autre part, que pour tout i entre 1 et $n_p - 1$, $a_{i,p}\alpha_p + b_{i,p} < a_{i+1,p}\alpha_p + b_{i+1,p}$. Cette dernière inégalité étant vérifiée si $a_{i,p} = a_{i+1,p}$, on ne s'occupe que des cas pour lesquels $a_{i,p} < a_{i+1,p}$. Par conséquent il est nécessaire que $\alpha_p > \frac{b_{i,p} - b_{i+1,p}}{a_{i+1,p} - a_{i,p}}$ pour tout i entre 1 et $n_p - 1$ tel que $a_{i,p} < a_{i+1,p}$. Il suffit donc de choisir α_p tel que

$$\alpha_p = \begin{cases} \max(\{\lfloor \frac{b_{i,p} - b_{i+1,p}}{a_{i+1,p} - a_{i,p}} \rfloor + 1 \mid a_{i,p} < a_{i+1,p} \text{ et } 1 \leq i \leq n_p - 1\} \cup \{\lceil -\frac{b_{1,p}}{a_{1,p}} \rceil \mid a_{1,p} > 0\}) \\ 1 \text{ si l'ensemble ci-dessus est vide} \end{cases}$$

Le second cas n'intervenant que si $a_{i,p} = 0$ pour tout i dans $\{1, \dots, n_p\}$.

On peut maintenant définir M'_0 :

$$\forall p \in P, M'_0(p) = M_0(p)(1)\alpha_p + M_0(p)(2)$$

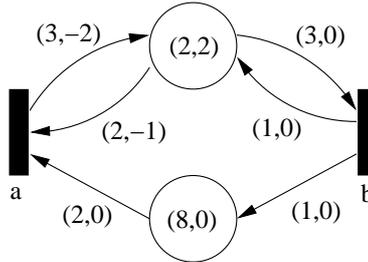
ainsi que $Pré'$ et $Post'$:

$$\forall p \in P, \forall t \in T, Pré'(p, t) = Pré(p, t)(1)\alpha_p + Pré(p, t)(2)$$

$$\forall p \in P, \forall t \in T, Post'(p, t) = Post(p, t)(1)\alpha_p + Post(p, t)(2)$$

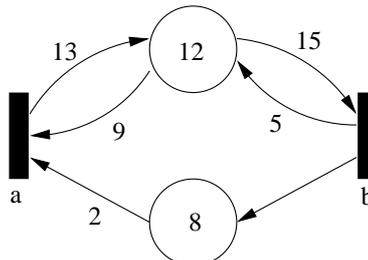
La correspondance entre les marquages est donnée par l'application σ de $R(N)$ dans $R(N')$ qui à tout marquage M de N associe le marquage M' de N' tel que $\forall p \in P, M'(p) = M(p)(1)\alpha_p + M(p)(2)$. On conclut en montrant que cette correspondance est préservée par tir de transition. \diamond

Appliquons l'algorithme que nous venons de voir au réseau suivant :



$L_a = \{(1, 0), (1, 1), (2, -2), (2, 0), (2, 2), (3, -2), (3, -1), (3, 0), (3, 1), (4, -2), (4, 0), (5, -1), (6, -2)\}$, $\alpha_a = 5$, $L_b = \{(0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0), (4, 0), (5, 0), (6, 0), (7, 0), (8, 0)\}$ et $\alpha_b = 1$.

Par conséquent, le réseau de Petri équivalent est :



Précisons maintenant ce que nous affirmons en introduisant le théorème 8.6.1 : la construction ci-dessus correspond en général à la construction pour chaque place d'un hyperplan appartenant au faisceau linéaire d'hyperplans définis, lorsqu'ils existent, par les deux hyperplans associés à la première composante et à la deuxième composante du marquage de la place considérée.

Soit $N = (P, T, Pré, Post, M_0)$ un réseau lexicographique marqué et borné et notons $N' = (P, T, Pré', Post', M'_0)$ le réseau de Petri équivalent construit comme ci-dessus. A chaque place $p \in P$ on peut associer les espaces $(H_{1,p})$ et $(H_{2,p})$ d'équations suivantes dans \mathbb{R}^T :

$$(H_{1,p}) \quad M_0(p)(1) - \sum_{t \in T} Pré(p, t)(1)x_t + \sum_{t \in T} Post(p, t)(1)x_t = 0$$

$$(H_{2,p}) \quad M_0(p)(2) - \sum_{t \in T} Pré(p, t)(2)x_t + \sum_{t \in T} Post(p, t)(2)x_t = 0$$

où l'ensemble des x_t pour $t \in T$ désignent les composantes du vecteur x de \mathbb{R}^T .

Notons qu'en général $H_{1,p}$ et $H_{2,p}$ sont des hyperplans, mais ils peuvent être l'espace tout entier ou encore réduits à l'ensemble vide. Regardons ce qu'est l'espace associé à une place du réseau de Petri équivalent construit comme précédemment en fonction des espaces associés à la place correspondante du réseau lexicographique borné d'origine. L'équation de cet espace, noté H_p , est alors :

$$(H_p) \quad \alpha_p(M_0(p)(1) - \sum_{t \in T} Pré(p, t)(1)x_t + \sum_{t \in T} Post(p, t)(1)x_t) + (M_0(p)(2) - \sum_{t \in T} Pré(p, t)(2)x_t + \sum_{t \in T} Post(p, t)(2)x_t) = 0$$

Premier cas : $H_{1,p} = \mathbb{R}^T$ alors $H_p = H_{2,p}$.

Deuxième cas : $H_{1,p} = \emptyset$ alors

$$(H_p) \quad \alpha_p M_0(p)(1) + M_0(p)(2) - \sum_{t \in T} Pré(p, t)(2)x_t + \sum_{t \in T} Post(p, t)(2)x_t = 0 \text{ et donc } H_p \text{ est parallèle à } H_{2,p} \text{ voire confondu.}$$

Troisième cas : $\dim H_{1,p} = |T| - 1$ (c'est un hyperplan). Si $H_{2,p} = \mathbb{R}^T$ alors $H_p = H_{1,p}$. Si $H_{2,p} = \emptyset$ alors H_p est un hyperplan parallèle à $H_{1,p}$ mais distinct. Enfin si $\dim H_{2,p} = |T| - 1$ alors H_p est un hyperplan appartenant au faisceau linéaire d'hyperplans défini par $H_{1,p}$ et $H_{2,p}$ mais différent de $H_{1,p}$.

Notons que la construction précédente est aisément généralisable aux réseaux sur l'algèbre $(\mathbb{Z}^n)^+$ pour $n \geq 1$. En effet, soit $L = (l_i)_{1 \leq i \leq k}$ une liste finie d'éléments distincts de $(\mathbb{Z}^n)^+$ triés par ordre croissant. Il est alors facile de trouver un $\alpha \in \mathbb{Z}$ (par essais successifs de valeurs de plus en plus grandes en partant de la valeur 0 par exemple) telle que la suite finie $((l_i(1)\alpha^{n-1} + l_i(2)\alpha^{n-2} + \dots + l_i(n-1)\alpha + l_i(n)))_{1 \leq i \leq k}$ soit strictement croissante dans \mathbb{N} car on ramène le problème à un système d'inéquations de la forme $P(\alpha) > 0$ ou (pour une d'entre elles) $P(\alpha) \geq 0$ avec P polynôme en α dont le coefficient de poids fort est strictement positif. Par conséquent, les P divergent vers $+\infty$ en $+\infty$, donc on peut trouver un α pour chaque polynôme vérifiant l'inégalité associée. La valeur maximale de ces α convient alors.

Corollaire 8.6.1 *Les réseaux lexicographiques bornés sur $(\mathbb{Z}^n)^+$ ($n \geq 1$) sont les réseaux de Petri bornés.*

8.7 Conclusion et perspectives

Les réseaux lexicographiques sont issus d'une approche basée sur une axiomatisation de la notion de ressource et de la règle de tir. Ces réseaux constituent une extension stricte des réseaux de Petri mais ont malheureusement la puissance des machines de Turing rendant indécidable tout problème non trivial. Cependant, pour parachever l'étude de ces réseaux, nous avons montré que les réseaux lexicographiques bornés sont les réseaux de Petri bornés. Les réseaux lexicographiques possèdent de plus les mêmes propriétés algébriques que les réseaux de Petri, en particulier, ils ont même théorie équationnelle et inéquationnelle. Malheureusement les espoirs de réutilisation des outils et propriétés algébriques liés aux réseaux de Petri tournent court du fait du caractère non artinien de l'ordre lexicographique sur le cône positif du produit de \mathbb{Z} avec lui-même. Par exemple les notions centrales de trappe et de verrou perdent leurs sens car l'on peut consommer strictement de la ressource sans jamais s'arrêter. Si les réseaux lexicographiques en tant que modèle semblent bien cernés, il demeure de nombreuses perspectives de développement vis-à-vis des algèbres de Petri. On peut se pencher sur le cas des algèbres de Petri non-commutatives pour distinguer des réseaux « à files » ou « à piles » [Badouel 03], d'algèbres de Petri non régulières où l'algèbre des places et les valeurs des relations de

flot n'opèrent pas sur la même algèbre et sont connectées par une relation de satisfaction ou encore d'algèbres « enrichies » permettant de mesurer le degré de franchissabilité d'une transition.

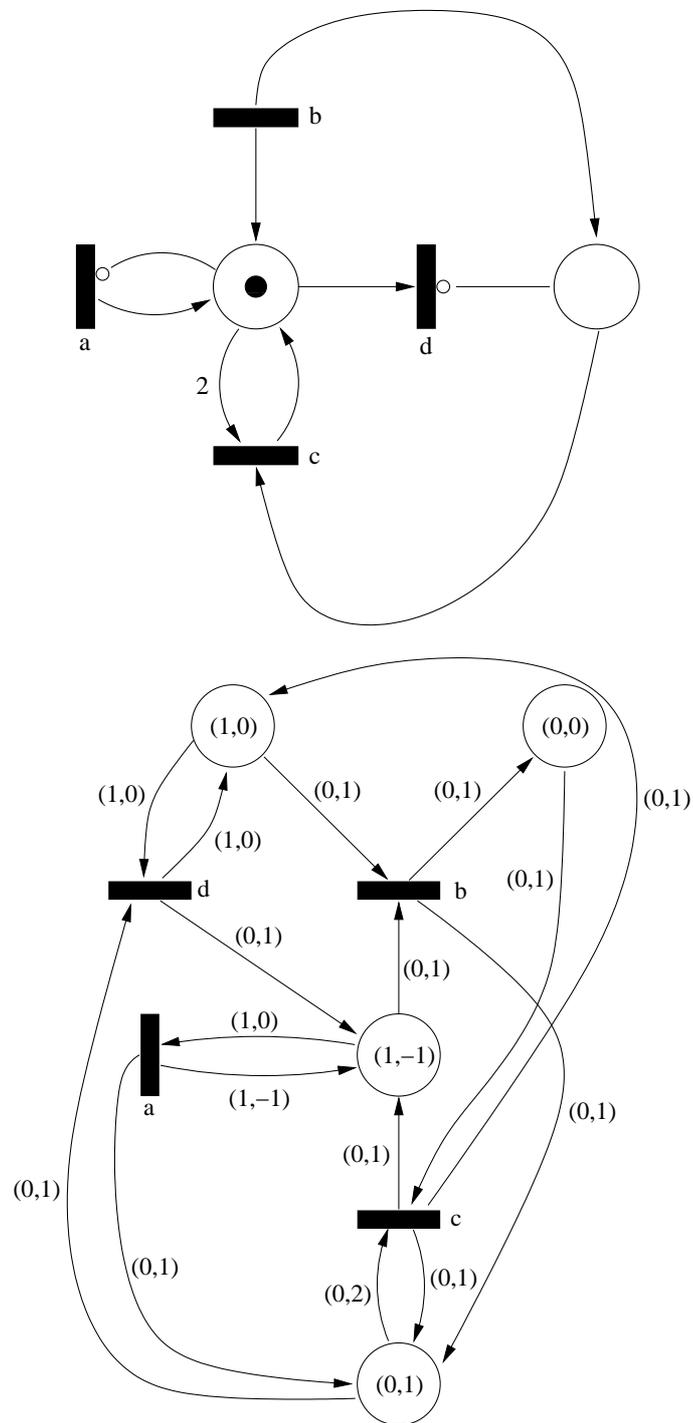


FIG. 8.4: RDP à arcs inhibiteurs et son réseau lexicographique équivalent

Bibliographie

- [Badouel 03] Badouel, E. et Chenou, J. (2003). Nets Enriched over Closed Monoidal Structures. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 2679, pages 64–81. ICATPN'03.
- [Badouel 05] Badouel, E., Chenou, J., et Guillou, G. (2005). Petri Algebras. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 3580, pages 742–754. ICALP'2005.
- [Badouel 07] Badouel, E., Chenou, J., et Guillou, G. (2007). An axiomatization of the token game based on Petri Algebras. *Fundamenta Informaticae*, 77(3) :187–215.
- [Karp 69] Karp, R. et Miller, R. (1969). Parallel Program Schemata. *Journal of Computer and System Sciences*, 3(2) :147–195.

Deux problèmes de synthèse

9.1 Introduction

Le problème de la synthèse de réseaux consiste à décider si un graphe étiqueté par des événements est isomorphe au graphe des marquages d'une certaine famille de réseaux. Ce sont Ehrenfeucht et Rosenberg [Ehrenfeucht 90a, Ehrenfeucht 90b] qui ont les premiers attaqué ce problème pour les réseaux élémentaires. Ils ont pour cela introduit la notion de région dans un graphe, c'est-à-dire un ensemble de sommets susceptible de représenter une place. Il s'agit des ensembles qui, pour un événement donné, toute transition étiquetée par cet événement modifie de façon uniforme la relation d'appartenance à ces ensembles. Les graphes de marquages des réseaux sont alors caractérisés en termes de deux propriétés de séparation. La première d'entre elles impose l'existence de suffisamment de régions pour pouvoir distinguer tous les sommets du graphe. D'autre part, il se peut que dans un état donné un événement ne soit pas autorisé, la seconde propriété de séparation stipule l'existence d'une région qui inhibe cet événement en cet état. La théorie des régions a été appliquée à de nombreuses classes de réseaux, par exemple les réseaux flip-flop [Schmitt 96] donnent lieu à un algorithme polynomial de synthèse alors que le même problème de synthèse est NP-complet pour les réseaux élémentaires [Badouel 90] et polynomial pour les réseaux de Petri [Badouel 95]. Le problème de synthèse n'a pas été traité qu'à partir d'un graphe étiqueté mais également à partir des langages [Badouel 95]. Il a été montré que le problème de la synthèse d'un réseau de Petri pur et borné à partir d'un langage rationnel est décidable [Badouel 95]. Par contre le réseau généré n'a pas nécessairement le même langage que le langage régulier de départ mais le plus petit langage le contenant (au sens de l'inclusion).

Le présent chapitre traite de deux problèmes de synthèse sur des classes de réseaux précédemment introduites dans les chapitres 7 et 8. Dans une première partie nous donnons une solution polynomiale au problème de synthèse pour les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets (introduits dans le chapitre 7). Nous commençons par rappeler la notion de type de réseau afin de définir le type \mathcal{T} des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets. Le concept de région est alors adapté à ce type de réseau. Puis nous nous occupons véritablement du problème de synthèse des réseaux de type \mathcal{T} . Nous montrons que tester la validité des conditions de séparation des régions de l'automate fini donné, se réduit à la résolution d'équations linéaires sur le corps $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$. Ceci conduit à un algorithme polynomial de synthèse de réseau. Enfin comme annoncé dans le chapitre 7, nous établissons que les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets sont une extension stricte des réseaux flip-flop et donc une extension stricte des réseaux élémentaires dont le problème de synthèse n'est pas polynomial [Badouel 90]. Dans une deuxième partie, nous nous intéressons au problème de la synthèse d'un réseau lexicographique à partir d'un langage régulier ou rationnel. Après quelques comparaisons rapides avec d'autres types de réseaux du point de vue des langages, nous définissons la notion de région d'un langage non vide et préfixe-clos par rapport aux réseaux lexicographiques. Nous montrons qu'une région peut être caractérisée par un ensemble de systèmes d'égalités ou d'inégalités linéaires. Nous nous intéressons alors aux langages rationnels qui ont la propriété d'avoir pour image de Parikh un ensemble semi-linéaire. La conséquence en est que l'ensemble des régions d'un langage régulier non vide et préfixe-clos pour les réseaux lexicographiques peut être décrit comme un cône polyédrique convexe, il suffit alors de

choisir ses rayons extrémaux qui sont en nombre fini comme places du réseau lexicographique que l'on souhaite construire. Le langage de ce réseau est alors la meilleure approximation au sens de l'inclusion des langages du langage rationnel donné.

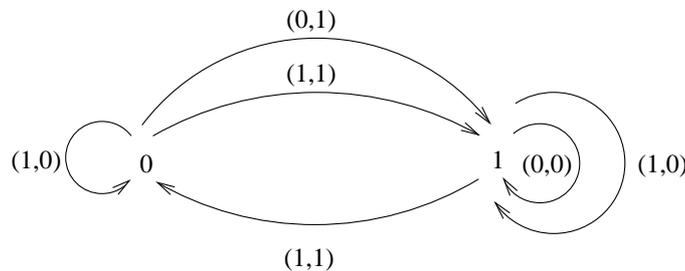
9.2 Synthèse des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets

9.2.1 Régions

Au début du chapitre 7 ont été définies les notions de type de réseau et de réseau de type τ , τ étant un type c'est-à-dire un système de transitions (Q, E, T) où Q est l'ensemble des états et E est l'ensemble des événements. Dans la suite les types de réseaux utilisés seront déterministes, c'est-à-dire que $(q, a, q') \in T \wedge (q, a, q'') \in T \implies q' = q''$, par conséquent les morphismes de systèmes de transitions dont le codomaine est déterministe sont déterminés par leurs composantes sur Q et E . La notion de marquage d'un réseau N de type τ a été également donnée, nous noterons $\mathcal{M}(N)$ l'ensemble des marquages de N dans ce chapitre. Comme nous nous intéressons à la synthèse, nous prendrons pour la suite des ensembles de places et d'événements finis pour les réseaux de type τ . Le graphe des marquages d'un réseau de type τ se définit alors de manière similaire à celle des réseaux de Petri.

Définition 9.2.1 (Graphe des marquages d'un réseau de type τ) *Le graphe des marquages d'un réseau de type τ $N = (P, E', f, M_0)$, noté $MG(N)$, est l'automate obtenu en restreignant le système de transitions $(\mathcal{M}(N), E', Trans)$ où $Trans = \{(M, e, M')/M[e]M'\}$ aux marquages accessibles depuis M_0 , avec M_0 comme état de départ.*

Les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets sont un cas particulier des group-nets (voir chapitre 7) et peuvent être vus comme des réseaux de type \mathcal{T} , type défini à la figure 9.1.



Le type des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets est plus général que celui des réseaux élémentaires et celui des réseaux flip-flop.

FIG. 9.1: Type des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets dit type \mathcal{T} .

Rappelons ce qu'est le problème de synthèse :

Problème de synthèse Etant donné un automate \mathcal{A} , décider s'il existe un réseau de type τ dont le graphe des marquages est isomorphe à \mathcal{A} , et dans l'affirmative construire un tel réseau.

La solution que nous exposons repose sur l'idée générale de région dans un système de transitions déjà définie dans le chapitre 7 et que nous adaptons au cas particulier des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets. En effet ces derniers sont des réseaux à places binaires permettant une définition alternative de la notion de région.

Soit $N = (P, E', f, M_0)$ un réseau de type $\tau = (Q', E, T)$ alors toute place p de P induit un morphisme de systèmes de transitions $(\sigma_p, \tau_p) : MG(N) \longrightarrow \tau$ avec $\sigma_p(M) = M(p)$ pour M un sommet de $MG(N)$ et $\tau_p(e) = f(p, e)$ pour $e \in E'$.

Pour un automate $\mathcal{A} = (Q, A, T, q_0)$ donné, l'idée pour synthétiser un réseau de type τ à partir de \mathcal{A} est de prendre tous les morphismes de systèmes de transitions $(\sigma, t) : \mathcal{A} \longrightarrow \tau$ comme des places

potentielles de N avec pour fonction de flot $f((\sigma, t), e) = t(e)$ et pour marquage initial $M_0((\sigma, t)) = \sigma(q_0)$.

Penchons nous maintenant sur le cas particulier du type \mathcal{T} .

Si pour un morphisme $(\sigma, t) : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{T}$ on pose $R = \sigma^{-1}(1)$ alors pour une étiquette a quelconque donnée, une des propositions (i) ou (ii) doit être satisfaite :

$$(i) \forall q, q' (q, a, q') \in T \implies (q \in R \iff q' \in R)$$

$$(ii) \forall q, q' (q, a, q') \in T \implies (q \in R \iff q' \notin R)$$

Réciproquement, à tout ensemble d'états R tel que pour chaque étiquette a (i) ou (ii) est satisfaite on peut associer un morphisme de système de transitions $(\sigma, t) : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{T}$ tel que $\sigma^{-1}(1) = R$. D'où la définition :

Définition 9.2.2 (Régions d'un système de transitions) Une région R dans un système de transitions (Q, A, T) est un ensemble d'états $R \subseteq Q$ satisfaisant : $\forall a \in A, (\forall q, q' \in Q, ((q, a, q') \in T \implies (q \in R \iff q' \in R))) \vee (\forall q, q' \in Q, ((q, a, q') \in T \implies (q \in R \iff q' \notin R)))$.

Remarquons tout de suite que par rapport au type \mathcal{T} le complémentaire d'une région est également une région.

9.2.2 Réseaux flip-flop et réseaux élémentaires

Il a été établi dans [Badouel 90] que le problème de synthèse pour les réseaux élémentaires est NP-complet. Un des buts de ce chapitre est d'exhiber une classe de réseaux à places binaires qui contiennent la classe des réseaux élémentaires tout en donnant lieu à des algorithmes de synthèse polynomiaux. Rappelons, pour commencer, le type des réseaux élémentaires :

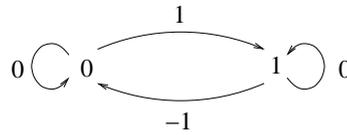
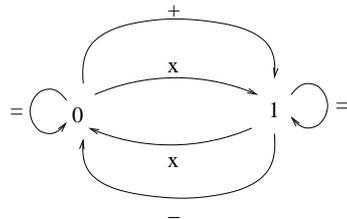


FIG. 9.2: Type des réseaux élémentaires.

Vincent Schmitt a proposé dans [Schmitt 96] les réseaux qu'il appelle *flip-flop* dont le type est donné à la figure 9.3. Les réseaux flip-flop, dits également réseaux à bascule, contiennent évidemment les réseaux élémentaires. Ces réseaux flip-flop ou réseaux à bascules sont un exemple de réseaux à places binaires qui contiennent les réseaux élémentaires et permettent d'avoir une solution polynomiale au problème de synthèse ([Schmitt 96]).

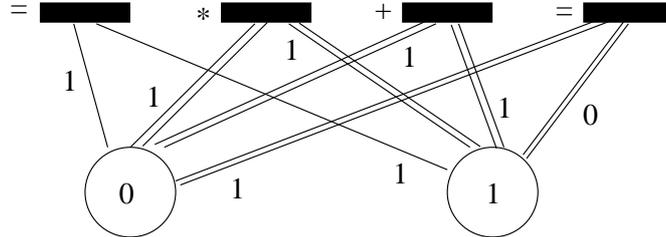


Dans les réseaux flip-flop un même événement permet de changer d'état quel que soit l'état de départ. Avec le type \mathcal{T} on a plus de possibilités encore.

FIG. 9.3: Type des réseaux à bascule ou flip-flop.

Montrons que les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets sont une extension des réseaux flip-flop et, par conséquent, des réseaux élémentaires. Pour cela on va tenter de synthétiser le type des réseaux flip-flop. Il est en

effet possible de considérer le type d'un réseau comme le graphe des marquages d'un réseau constitué d'une unique place sur laquelle agissent l'ensemble des événements (ici $\{=, +, -, *\}$). Des nombreux morphismes de systèmes de transition possibles, deux seulement donnent lieu à des places utiles, ce sont (id, t_1) où t_1 envoie $+$ sur $(0, 1)$ et $([0, 1], t_2)$ où $[0, 1]$ est la transposition qui envoie 0 sur 1 et t_2 est l'application qui envoie $-$ sur $(0, 1)$. Le $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net synthétisé est donné figure 9.4.



$\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net synthétisé à partir du type \mathcal{T} . Les arcs doubles, dits inconditionnels, autorisent localement le tir de la transition correspondante quel que soit le marquage atteint dans la place correspondante.

FIG. 9.4: $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net synthétisé à partir du type des réseaux flip-flop.

On peut constater en construisant le graphe des marquages de ce réseau qu'il est bien isomorphe au système de transitions des réseaux à bascules.

Soit, maintenant, un réseau flip-flop donné $N = (P, T, f, M_0)$ où P est l'ensemble des places, T l'ensemble des transitions, $f : P \times T \rightarrow \{=, +, -, *\}$ la fonction de flot et $M_0 : P \rightarrow \{0, 1\}$ le marquage initial. Soit alors le $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net $N' = (P \cup P', T, f', M'_0)$ où P' est une copie de P (si $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ on notera p'_1, p'_2, \dots, p'_n les éléments de P'), où f' est définie par :

$$\forall p \in P, \begin{aligned} f'(p, t) &= (0, 1) \text{ si } f(p, t) = + \\ &= (1, 1) \text{ si } f(p, t) = - \\ &= (1, 1) \text{ si } f(p, t) = * \\ &= (1, 0) \text{ si } f(p, t) = = \end{aligned}$$

$$\forall p' \in P', \begin{aligned} f'(p', t) &= (1, 1) \text{ si } f(p, t) = + \\ &= (0, 1) \text{ si } f(p, t) = - \\ &= (1, 1) \text{ si } f(p, t) = * \\ &= (1, 0) \text{ si } f(p, t) = = \end{aligned}$$

enfin, $\forall p \in P, M'_0(p) = M_0(p)$
 et $\forall p' \in P', M'_0(p') = M_0(p) + 1$ (dans $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$).

N' est alors équivalent à N (ie. ils ont des graphes de marquages isomorphes). En effet N' est obtenu en amalgamant sur T les réseaux à deux places obtenus par synthèse de toutes les places du réseau N prises isolément une par une. Le fait d'amalgamer sur T revient à faire l'intersection des comportements de chaque place de N .

En revanche, on ne peut synthétiser le type des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets avec un réseau flip-flop et donc les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets en sont une extension stricte. En particulier, $(0, 0)$ correspond au test à 1 dans les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets, ce qu'il n'est pas possible de faire avec un réseau à bascules. Par exemple le réseau de la figure 9.5 a son graphe des marquages représenté figure 9.6 et ce dernier ne peut être synthétisable en un réseau flip-flop car l'événement a correspondra à l'action de $=$ dans le réseau flip-flop qui ne pourra être interdite quelque soit le marquage atteint.

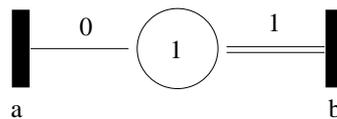


FIG. 9.5: $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net non simulable par réseau flip-flop.

Le type \mathcal{T} des $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets contient à la fois des événements exécutables quel que soit l'état et qui font soit changer d'état, soit rester dans le même état et des événements exécutables seulement dans un des deux états donnés et qui font soit changer d'état, soit rester dans le même état. Le type \mathcal{T} est

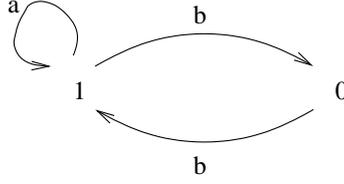


FIG. 9.6: Graphe des marquages du réseau de la figure 9.5.

un espèce de max pour les types de réseaux à places binaires que l'on connaît, c'est-à-dire le type le plus général.

9.2.3 Problème de synthèse pour les réseaux de type \mathcal{T}

Théorème 9.2.1 *Un automate est isomorphe au graphe des marquages d'un réseau de type \mathcal{T} si et seulement si il est accessible et séparé, la condition de séparation étant :*

1. *pour toute paire d'états distincts, il existe une région qui contient un seul des deux états.*
2. *pour toute étiquette a de l'automate non permise à l'état q soit il existe une région qui ne contient pas q mais contient tous les domaines et tous les codomains des transitions d'étiquette a , soit il existe une région qui contient q mais ne contient aucun des domaines et tous les codomains des transitions d'étiquette a .*

Preuve Soit $N = (P, E, f, M_0)$ un réseau de type \mathcal{T} , par construction son graphe des marquages est accessible. Pour $p \in P$ nous notons p^α l'ensemble $\{M \in MG(N) | M(p) = 1\}$. p^α est alors une région qui permet de séparer les marquages qui diffèrent en p . La première condition de séparation est donc vérifiée par $MG(N)$. Supposons que l'événement e ne soit pas permis au marquage M , d'après la règle de tir on a deux cas possibles. Premier cas, il existe une place p telle que $M(p) = 0$ et $f(p, e) = (0, 0)$ et alors $M'[e]M'' \implies (M' \in p^\alpha \wedge M'' \in p^\alpha)$ et $M \notin p^\alpha$. Deuxième cas, $M(p) = 1$ et $f(p, e) = (0, 1)$ alors $M'[e]M'' \implies (M' \notin p^\alpha \wedge M'' \in p^\alpha)$ et $M \in p^\alpha$. Donc $MG(N)$ satisfait la seconde condition de séparation.

Réciproquement, soit $\mathcal{A} = (Q, A, T, q_0)$ un automate auquel on associe le réseau $N = (P, A, f, M_0)$, P étant l'ensemble des régions de \mathcal{A} , M_0 étant défini par $M_0(p) = 1$ si $q_0 \in p$, 0 sinon et f par :

$$f(p, e) = (0, 1) \text{ si et seulement si } (q, e, q') \in T \implies (q \notin p \wedge q' \in p)$$

$$f(p, e) = (1, 1) \text{ si et seulement si } (\exists q \in p, (q, e, q') \in T) \wedge ((q, e, q') \in T \implies (q \in p \iff q' \notin p))$$

$$f(p, e) = (0, 0) \text{ si et seulement si } (q, e, q') \in T \implies (q \in p \wedge q' \in p)$$

$$f(p, e) = (1, 0) \text{ si et seulement si } (\exists q \notin p, (q, e, q') \in T) \wedge ((q, e, q') \in T \implies (q \in p \iff q' \in p))$$

Supposons maintenant que \mathcal{A} soit accessible et séparé, montrons alors qu'il est isomorphe au graphe des marquages de N . Soit q un état de \mathcal{A} , on note q^ϵ l'ensemble $\{p \in P | q \in p\}$ ou de manière équivalente la fonction caractéristique de q .

Si $(q, a, q') \in T$ alors pour toute place $p \in P$, $(q^\epsilon(p), f(p, a), q'^\epsilon(p))$ est une transition de \mathcal{T} par définition de la relation de flot, par conséquent, on a $q^\epsilon[a]q'^\epsilon$ dans N . Ceci prouve que $((-)^\epsilon, id_A)$ est un morphisme de systèmes de transitions qui envoie \mathcal{A} dans $\mathcal{M}(N)$ (avec $(-)^epsilon : Q \rightarrow \mathcal{P}(P)$ qui à q associe q^ϵ et id_A l'identité sur A). Comme, par définition, $q_0^\epsilon = M_0$ et que \mathcal{A} est accessible, $((-)^epsilon, id_A)$ envoie \mathcal{A} dans $MG(N)$. De plus la première condition de séparation implique que $(-)^epsilon$ est injective donc le morphisme précédent est injectif. Montrons que c'est en fait un isomorphisme.

Maintenant si $q^\epsilon[a]M$ alors pour toute région p qui contient tous les domaines et tous les codomains des transitions d'étiquette a on a $f(p, a) = (0, 0)$ (d'après la définition de f) et donc $q^\epsilon(p) = 1$, et pour toute région p qui ne contient aucun des domaines et tous les codomains des transitions d'étiquette a on a $f(p, a) = (0, 1)$ et donc $q^\epsilon(p) = 0$ et comme \mathcal{A} satisfait la seconde condition de séparation, il doit nécessairement exister une transition t de domaine q et d'étiquette a . De plus le codomaine de cette transition est déterminé de manière unique car $(q, a, q') \in T$ entraîne $q^\epsilon[a]q'^\epsilon$ donc $q'^\epsilon = M$ et $(-)^epsilon : Q \rightarrow \mathcal{P}(P)$ est injective. Du coup \mathcal{A} est déterministe et $(-)^epsilon$ est surjective. Par conséquent $((-)^epsilon, id_A)$ est un isomorphisme d'automates. \diamond

Remarquons que dans la preuve précédente, si \mathcal{A} est accessible et séparé, il suffit de disposer d'un

nombre suffisant de régions vérifiant les deux conditions de séparation pour construire un réseau de type \mathcal{T} dont le graphe des marquages soit isomorphe à l'automate donné.

Nous allons caractériser les régions par des systèmes d'équations dans le corps $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$. Pour cela nous avons besoin des conventions suivantes : soit $Trans = (Q, A, T)$ un système de transitions, T_{sym} est l'ensemble de transitions $\{(q, a, q') / (q, a, q') \in T \text{ ou } (q', a, q) \in T\}$. Une *chaîne* de $Trans$ est un chemin dans (Q, A, T_{sym}) et un *cycle* est une chaîne dont les extrémités sont identiques. Soit $c = ((q_i, a_i, q_{i+1}))_{1 \leq i \leq n}$, on pose $l(c) = a_1 \dots a_n \in A^*$.

La caractérisation algébrique des régions d'un automate accessible est alors :

Théorème 9.2.2 *Pour tout automate accessible $\mathcal{A} = (Q, A, T, q_0)$, les paires de régions complémentaires $(p, C(p))$ de \mathcal{A} sont en correspondance bijective avec les applications de ρ de A vers $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ telles que $\tilde{\rho}$, l'unique morphisme de monoïde de A^* vers $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ étendant ρ , satisfait pour tout cycle c : $\tilde{\rho}(l(c)) = 0$.*

Preuve Soit p une région dans \mathcal{A} , nous définissons $\tau_p : A \rightarrow \{(0, 0), (0, 1), (1, 1), (1, 0)\}$ par $\tau_p(a) = f(p, a)$ où f est la fonction de flot définie comme dans le théorème précédent.

Soit $\rho_p = chg \circ \tau_p$ avec $chg : \{(0, 0), (0, 1), (1, 1), (1, 0)\} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ définie par $chg(1, 0) = chg(0, 0) = 0$ et $chg(0, 1) = chg(1, 1) = 1$.

$\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ étant commutatif, deux mots avec la même image de Parikh ont la même image par $\tilde{\rho}_p$. Pour toute chaîne c de \mathcal{A} , $\tilde{\rho}_p(l(c))$ compte modulo 2 les arcs dans c ayant exactement une extrémité dans p , et donc pour tout cycle c nous avons bien $\tilde{\rho}_p(l(c)) = 0$.

Réciproquement, soit $\tilde{\rho}$ un morphisme de A^* vers $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ tel que $\tilde{\rho}(l(c)) = 0$ pour tout cycle c de \mathcal{A} . Soit q un état de \mathcal{A} et c_1 et c_2 deux chaînes menant de q_0 à q (il en existe au moins une puisque \mathcal{A} est accessible). Pour une chaîne $c = ((q_i, a_i, q_{i+1}))_{1 \leq i \leq n}$ nous noterons c^{-1} la chaîne $((q_{n+2-i}, a_i, q_{n-i+1}))_{1 \leq i \leq n}$. Alors $\tilde{\rho}(c_1) = \tilde{\rho}(c_1 c_2^{-1} c_2) = \tilde{\rho}(c_2)$ car $c_1 c_2^{-1}$ est un cycle. Par conséquent $p = \{q \in Q / \tilde{\rho}(l(c)) = 0 \text{ pour une chaîne } c \text{ de } q_0 \text{ vers } q\}$ est bien définie.

Alors $q_0 \in p$ et $C(p)$ est l'ensemble des états atteints par une chaîne initiale c tel que $\tilde{\rho}(l(c)) = 1$. Vérifions que p et $C(p)$ forment bien une paire de régions complémentaires. Soit $(q, a, q') \in T$ et c une chaîne arbitraire de q_0 vers q . Si $\rho(a) = 0$ alors $q \in p \iff \tilde{\rho}(l(c)) = 0 \iff \tilde{\rho}(l(c).a) = 0 \iff q' \in p$. Si $\rho(a) = 1$ alors $q \in p \iff \tilde{\rho}(l(c)) = 0 \iff \tilde{\rho}(l(c).a) = 1 \iff q' \notin p$. Donc p est une région et donc, comme nous l'avons déjà remarqué, $C(p)$ est également une région. \diamond

Pour simplifier nous noterons $\{a_1, \dots, a_n\}$ l'ensemble des événements A de l'automate fini $\mathcal{A} = (Q, A, T, q_0)$. $[i]$ désignera la classe modulo 2 de l'entier i , notation que l'on étend aux vecteurs de $(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^n$ en posant $[(i_1, \dots, i_n)] = ([i_1], \dots, [i_n])$ pour tout $(i_1, \dots, i_n) \in \mathbb{N}^n$. Pour une application $\rho : A \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ nous noterons $\vec{\rho} = (\rho(a_1), \dots, \rho(a_n))$. Dans un système de transition $Trans = (Q, A, T)$, à tout cycle c de $Trans$ peut être associé un vecteur de $\mathbb{Z}^{|T|}$ correspondant au nombre d'occurrences et aux orientations des transitions de c . L'espace vectoriel engendré par ces vecteurs est de dimension finie (car l'automate est fini). Un ensemble de cycles, $\mathcal{C}(Trans)$, constituant une base de cet espace est appelé une *base de cycles*. Le résultat suivant [Gondran 85] montre que la dimension de la base est polynomiale en la taille de \mathcal{A} .

Propriété 9.2.1 *Soit $G = (S, T)$ un graphe fini connexe, et soit (S, U) avec $U \subseteq T$ un arbre couvrant de G . Pour tout $t \in T \setminus U$, soit c^t l'unique cycle dont l'ensemble d'arcs est inclus dans $U \cup \{t\}$. Alors l'ensemble de cycles de la forme c^t , où t parcourt $T \setminus U$, forme une base de cycles de G , de cardinalité $|T| - |S| + 1$.*

Dans le cas où G est un automate accessible, l'arbre couvrant peut-être choisi avec q_0 pour racine. La construction d'un tel arbre est effectuable en un temps polynomial [Aho 76], donc le calcul d'une base de cycle aussi. Appelons $Span(\mathcal{A})$ et $\mathcal{C}(\mathcal{A})$ respectivement l'arbre couvrant et la base de cycles correspondante. Pour que l'automate soit isomorphe au graphe des marquages d'un réseau de type \mathcal{T} il faut vérifier les deux conditions de séparation. Cela revient à vérifier que toutes les instances du problème 9.2.1 et du problème 9.2.2 admettent des solutions :

Problème 9.2.1 Pour toute paire de chemins initiaux distincts ch_1 et ch_2 de $\text{Span}(\mathcal{A})$, résoudre le système S_{ch_1, ch_2}^1 , avec pour inconnu $\vec{\rho}$, constitué des équations :

Système S_{ch_1, ch_2}^1

$$E_c^0 : \vec{\rho} \cdot [\overrightarrow{\pi(l(c))}] = 0$$

pour tout $c \in \mathcal{C}(\mathcal{A})$ où pour tout mot $w \in A^*$, $\pi(w)$ désigne l'image de Parikh de w , et de l'équation :

$$E_{ch_1, ch_2}^1 : \vec{\rho} \cdot ([\overrightarrow{\pi(l(ch_1))}] + [\overrightarrow{\pi(l(ch_2))}]) = 1$$

Problème 9.2.2 Pour toute étiquette $a_i \in A$ et pour tout chemin ch de q_0 vers q dans $\text{Span}(\mathcal{A})$ tel qu'il n'existe pas de transition de \mathcal{A} de domaine q et d'étiquette a_i , résoudre le système $S_{a_i, ch}^2$ (d'inconnu $\vec{\rho}$) ou le système $S'_{a_i, ch}$ (d'inconnu $\vec{\rho}$) si $S_{a_i, ch}^2$ n'admet pas de solution, avec :

Système $(S_{a_i, ch}^2)$

$$E_c^0 : \vec{\rho} \cdot [\overrightarrow{\pi(l(c))}] = 0$$

pour tout $c \in \mathcal{C}(\mathcal{A})$, et pour tous chemins initiaux ch_1 et ch_2 dans $\text{Span}(\mathcal{A})$ atteignant des états distincts de \mathcal{A} permettant a_i

$$E_{a_i, ch_1, ch_2}^0 : \vec{\rho} \cdot ([\overrightarrow{\pi(l(ch_1))}] + [\overrightarrow{\pi(l(ch_2))}]) = 0$$

plus l'équation

$$\rho(a_i) = 0$$

et l'équation

$$\vec{\rho} \cdot ([\overrightarrow{\pi(l(ch))}] + [\overrightarrow{\pi(l(ch'))}]) = 1$$

pour un chemin arbitraire ch' de q_0 vers q' dans $\text{Span}(\mathcal{A})$ tel qu'il existe une transition de domaine q' et d'étiquette a_i dans \mathcal{A} .

Système $(S'_{a_i, ch})$

$$E_c^0 : \vec{\rho} \cdot [\overrightarrow{\pi(l(c))}] = 0$$

pour tout $c \in \mathcal{C}(\mathcal{A})$, et pour tous chemins initiaux ch_1 et ch_2 dans $\text{Span}(\mathcal{A})$ atteignant des états distincts de \mathcal{A} permettant a_i

$$E_{a_i, ch_1, ch_2}^0 : \vec{\rho} \cdot ([\overrightarrow{\pi(l(ch_1))}] + [\overrightarrow{\pi(l(ch_2))}]) = 0$$

plus l'équation

$$\rho(a_i) = 1$$

et l'équation

$$\vec{\rho} \cdot ([\overrightarrow{\pi(l(ch))}] + [\overrightarrow{\pi(l(ch'))}]) = 1$$

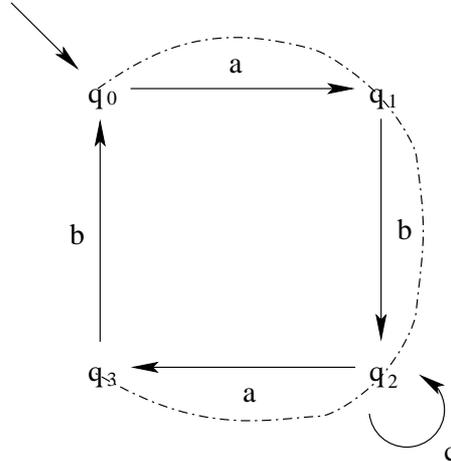
pour un chemin arbitraire ch' de q_0 vers q' dans $\text{Span}(\mathcal{A})$ tel qu'il existe une transition de domaine q' et d'étiquette a_i dans \mathcal{A} .

Les systèmes précédents sont tous de taille polynomiale en la taille de \mathcal{A} et chacun d'eux peut être résolu par la méthode de Gauss (car $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ est un corps) qui est également polynomiale et leur nombre est borné par $|S|^2 + 2 \cdot |S| \cdot |A|$. Donc décider si un automate est isomorphe à un graphe des marquages d'un réseau de type \mathcal{T} nécessite un temps polynomial. Enfin lorsque les systèmes (S_{ch_1, ch_2}^1) et, $(S_{a_i, ch}^2)$ ou $(S'_{a_i, ch})$, ont des solutions qui induisent des régions, il est alors possible de synthétiser le réseau de type \mathcal{T} souhaité. Nous pouvons donc conclure sur le théorème :

Théorème 9.2.3 Soit \mathcal{A} un automate fini alors le problème de décider s'il existe un réseau de type \mathcal{T} dont le graphe des marquages est isomorphe à \mathcal{A} et, dans l'affirmative, de le construire est résoluble en un temps polynomial.

9.2.4 Exemple

Cherchons à synthétiser le comportement donné par l'automate de la figure 9.7. Ce comportement ne peut être celui d'un réseau de Petri car ab y est d'ordre 2 tout menant à un état distinct de celui de départ. Il ne peut être non plus celui d'un réseau à bascule car l'événement c qui ne fait pas changer d'état ne pourrait être interdit dans aucun des états or il n'est autorisé qu'à l'état q_2 .

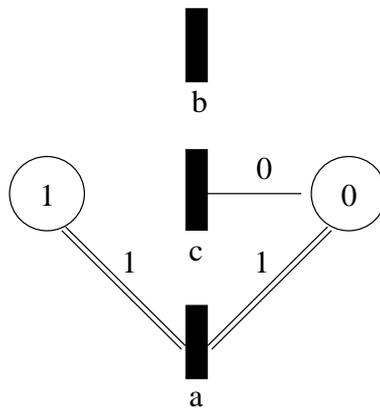


Nous cherchons à construire un $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net dont le graphe des marquages est isomorphe à cet automate. Pour ce faire un arbre couvrant qui apparaît en tireté-pointillé sur cette figure est construit.

FIG. 9.7: Automate et un de ses arbres couvrants.

Un arbre couvrant est construit (en tireté-pointillé sur la figure 9.7), on en déduit c et $abab$ les deux éléments de la base de cycles. Modulo 2 le cycle $abab$ n'apporte rien, par conséquent nous ne nous intéressons plus qu'au cycle élémentaire c .

Traisons tout d'abord le problème 9.2.1 c'est-à-dire le problème de la séparation des états. $S_{\varepsilon,a}^1$ donne les équations (dans $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$) $\rho(c) = 0$, $\vec{\rho} \cdot (1, 0, 0) = 1$ et $\rho(a) = 1$. Le morphisme $\vec{\rho} = (1, 0, 0)$ convient et est en correspondance avec le couple de régions complémentaires $(\{q_0, q_3\}, \{q_1, q_2\})$. Le réseau issu de ce couple de régions complémentaires est représenté figure 9.8. Il permet de différencier l'état initial de l'état atteint après tir de a mais également d'interdire le tir de c à partir de différents états.



La paire de régions $(\{q_0, q_3\}, \{q_1, q_2\})$ donne naissance à deux places qui permettent de distinguer l'état initial de l'état obtenu après tir de a et, incidemment, d'interdire le tir de c dans certains cas. Les arcs étiquetés par $(1, 0)$ c'est-à-dire les arcs doubles inconditionnels étiquetés par 0 n'apparaissent pas ici car ils n'apportent rien et ne font que surcharger la figure. On notera que la place marquée par 1 pourrait également être supprimée puisque tous ses arcs incidents sont inconditionnels.

FIG. 9.8: Réseau obtenu par résolution du système $S_{\varepsilon,a}^1$.

Les autres systèmes fournissent une seule autre paire de régions différente $(\{q_0, q_1\}, \{q_2, q_3\})$ liée au morphisme ρ tel que $\vec{\rho} = (0, 1, 0)$ qui donne lieu à un deuxième réseau à deux places. En amalgamant

les deux réseaux au niveau des transitions on effectue l'intersection des comportements et on obtient le réseau de la figure 9.9 qui répond au problème 9.2.1. Dans ce graphe les places inutiles (places pour lesquels tous les arcs incidents sont des arcs inconditionnels) sont supprimées pour alléger la figure. Son graphe des marquages est représenté à droite de la figure.

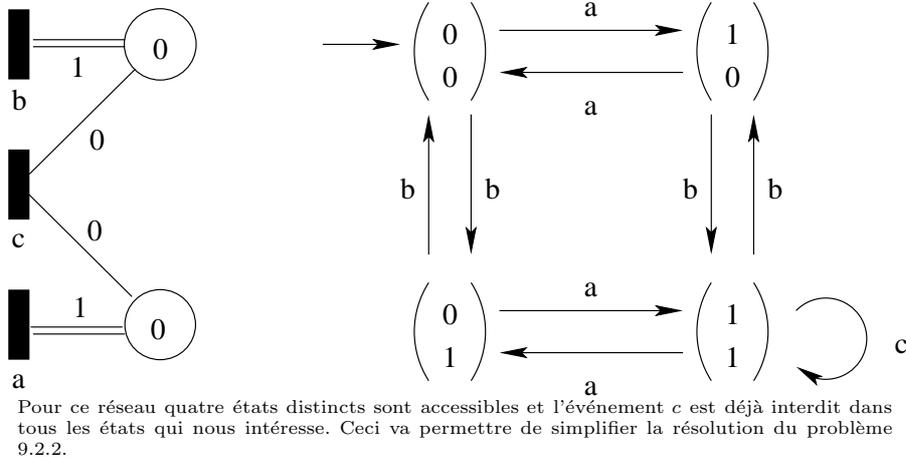
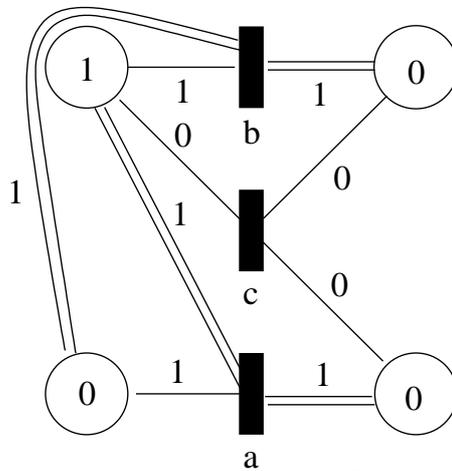


FIG. 9.9: Réseau obtenu après résolution du problème 9.2.1

L'événement c étant déjà correctement traité par le réseau de la figure 9.9 nous pouvons attaquer le problème 9.2.2 avec l'inhibition de b à l'état initial. Ceci conduit à la résolution du système $S_{b,\varepsilon}^{\prime 2}$ (car le système $S_{b,\varepsilon}^2$ n'admet pas de solution) pour donner le morphisme $\vec{\rho} = (1, 1, 0)$. Ce dernier est en correspondance avec la paire de régions $(\{q_0, q_2\}, \{q_1, q_3\})$. Ceci donne un réseau dont le graphe des marquages est réduit à deux états, a permet de passer du premier au deuxième, b de revenir au premier et c boucle sur l'état initial. Par conséquent lorsqu'on amalgame ce dernier réseau avec celui obtenu à la figure 9.9, on obtient le réseau de la figure 9.10 qui répond à la question.



Réseau obtenu par résolution des problèmes 9.2.1 et 9.2.2. La résolution n'ayant pas été exhaustive, le réseau obtenu est relativement compact. Lorsque toutes les places issues de tous les systèmes résolus apparaissent on parle de *réseau saturé*.

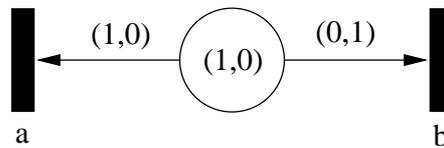
FIG. 9.10: Réseau final ayant le comportement spécifié figure 9.7

En fait il est possible de construire un $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -net plus petit en termes de nombre de places. En effet, en supprimant la place en bas à droite du réseau de la figure 9.10 on ne modifie pas son comportement.

9.3 Meilleure approximation d'un langage par un réseau lexicographique

9.3.1 Réseaux lexicographiques et langages

On sait que les réseaux lexicographiques [Badouel 05, Badouel 07] présentés au chapitre 8 contiennent évidemment les réseaux de Petri. Par conséquent tout langage de réseau de Petri est un langage de réseaux lexicographique. D'autre part, on a vu que cette inclusion était stricte, c'est-à-dire qu'il existe des réseaux lexicographiques qui ne sont pas modélisables par réseau de Petri, on a même vu au chapitre 8 que le langage du réseau de la figure 9.11 qui est l'ensemble des préfixes de $a + b^*$, ce que l'on notera $pr(a + b^*)$, ne peut être le langage d'un réseau de Petri.



Réseau lexicographique dont le langage est $pr(a + b^*)$ l'ensemble des préfixes de $a + b^*$.

FIG. 9.11: Réseau lexicographique dont le langage ne peut être celui d'un RdP.

Malheureusement (voir chapitre 8 toujours) ces réseaux ont la puissance des machines de Turing et on a montré que les réseaux lexicographiques bornés sont les RdP bornés. En tant que modèle ces réseaux sont donc plutôt bien cernés, en revanche on ne sait rien de leurs langages mis à part que les langages des réseaux lexicographiques étiquetés sont récursivement énumérables¹. Qu'en est-il des langages des réseaux lexicographiques tels qu'on les a définis c'est-à-dire des réseaux non étiquetés ou, si l'on préfère, des réseaux dont l'étiquetage est injectif et non effaçant ?

Par définition de tels langages sont préfixes-clos, c'est-à-dire qu'ils contiennent l'ensemble de leurs facteurs gauches. D'autre part, on sait qu'ils contiennent les langages des réseaux de Petri et que ces derniers non rien à voir avec les langages réguliers. Qu'en est-il pour les réseaux lexicographiques ? On a déjà vu que $pr(a + b^*)$ est un langage de réseau lexicographique. Compliquons un peu la tâche. Par exemple $pr(a^* + bca^*)$ est un langage de réseau lexicographique comme le montre la figure 9.12 mais n'est pas un langage de RdP pour la même raison que précédemment.

On peut se demander si tout langage rationnel n'est pas un langage de réseau lexicographique. En effet, les étoiles, si contraignantes pour les RdP car elles imposent globalement de produire de la ressource, peuvent-être simulées différemment avec les réseaux lexicographiques. On peut même imaginer construire un réseau lexicographique d'ordre $n + 1$, c'est à dire dans $(\mathbb{Z}^{n+1})^+$ pour obtenir un langage de hauteur d'étoile n . En fait une légère modification de l'expression précédente nous permet d'exhiber un contre exemple : $pr(a^* + bba^*)$ n'est pas le langage d'un réseau lexicographique. Et il y a même beaucoup plus simple : $pr(a + bba)$ n'est pas le langage d'un réseau lexicographique ! En effet après b on devrait pouvoir tirer a . En passant on peut noter que ce dernier est le langage du strict- \mathbb{Z} -net (voir le chapitre 7) de la figure 9.13.

Ceci prouve que les strict- \mathbb{Z} -nets et les réseaux lexicographiques sont incomparables car (voir le chapitre 7) tout réseau de Petri n'est pas un strict- \mathbb{Z} -net. Bilan, langages rationnels et langages des réseaux lexicographiques sont incomparables.

¹ Un ensemble L de mots écrits sur un alphabet A est dit *récursivement énumérable* ou *semi-décidable* s'il est égal à l'ensemble des mots acceptés par une machine de Turing.

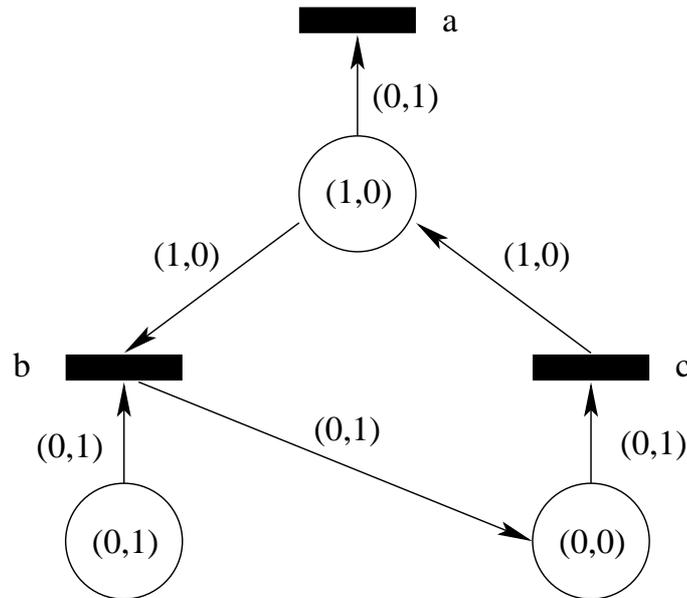
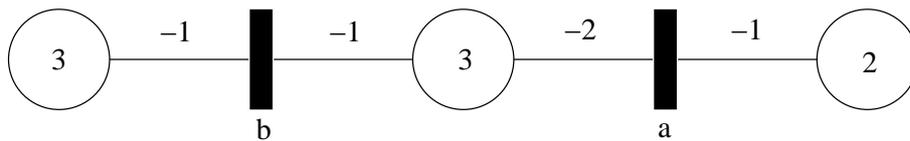
Réseau lexicographique dont le langage est $pr(a^* + bca^*)$.

FIG. 9.12: Exemple de réseau lexicographique ayant un langage qui ne peut être celui d'un réseau de Petri.

Strict- \mathbb{Z} -net qui a pour langage l'ensemble des préfixes de $a+bba$.FIG. 9.13: Strict- \mathbb{Z} -net dont le langage ne peut être celui d'un réseau lexicographique.

9.3.2 Meilleure approximation d'un langage

Pour continuer dans le domaine des langages, et on verra plus loin, dans le domaine des langages réguliers, on va essayer d'approximer au mieux un langage L fermé par préfixe et non vide par le langage d'un réseau lexicographique à déterminer, c'est-à-dire à construire. Il s'agit d'un problème de synthèse de réseau à partir d'un langage et les approximations choisies sont les approximations supérieures pour l'inclusion des langages. Les réseaux considérés sont non étiquetés (ou à étiquetage injectif et non effaçant) infinis (le nombre de places peut-être infini) dans lesquels tout marquage est vu comme un état accepteur. Alors le langage d'un réseau est l'intersection des langages de ses sous-réseaux atomiques (restrictions induites par l'élimination de toutes les places sauf une). Soit maintenant l'ensemble des langages des réseaux lexicographiques contenant un langage donné L , leur intersection est un langage de réseau et c'est la fermeture \bar{L} de L dans l'ensemble des langages des réseaux lexicographiques. Le réseau de langage \bar{L} est alors *a priori* infini. D'un point de vue pratique, nous souhaiterions savoir quelles sont les conditions suffisantes sur L pour que sa fermeture \bar{L} soit réalisable par un réseau fini. Ensuite nous voudrions pouvoir construire ce réseau à partir d'une description de L (par exemple à partir d'une expression rationnelle). Enfin il serait bon de pouvoir décider si l'approximation obtenue est exacte ou non. Pour cela on va de nouveau utiliser la théorie des régions ([Badouel 99]).

9.3.3 Régions d'un langage

Soit E un ensemble fini d'événements. Soit L un langage préfixe-clos sur E , c'est-à-dire un sous-ensemble de E^* où $(E^*, \cdot, \varepsilon)$ est le monoïde libre engendré par E . Le langage L peut être identifié

avec l'automate déterministe (mais en général non fini) $(L, E, T, \varepsilon, L)$ où les états de l'automate sont les mots de L , l'état initial est le mot vide, tous les états sont accepteurs et T est l'ensemble des transitions étiquetées $u \xrightarrow{e} v$ tel que $v = ue$ avec $u, v \in L$ et $e \in E$.

Définition 9.3.1 (Régions d'un langage) Une région de L est une paire d'applications (σ, η) avec $\sigma : L \rightarrow (\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+$ et $\eta : E \rightarrow ((\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+)^2$ telles que, en notant $\eta(e) = (\eta^-(e), \eta^+(e))$, on ait $\sigma(u) \geq \eta^-(e)$ et $\sigma(v) = \sigma(u) - \eta^-(e) + \eta^+(e)$ dès que $u, v \in L$ et $ue = v$. Soit $\mathcal{R}(L)$ l'ensemble des régions de L .

Remarque 1 : on peut définir les régions ainsi : ce sont les morphismes de systèmes de transitions entre l'automate déterministe associé à L et le système de transitions étiquetées $\tau = ((\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+, ((\mathbb{Z} \circ \mathbb{Z})^+)^2, T')$ avec $t_1 \xrightarrow{(\alpha, \beta)} t_2$ si $t_1 \geq \alpha$ et $t_2 = t_1 - \alpha + \beta$.

Remarque 2 : quelque soit L langage préfixe clos, $\mathcal{R}(L)$ est non vide puisqu'il contient $(0_L, 0_E)$ la région constituée des applications constantes nulles sur L et E .

Remarque 3 : soient maintenant L et L' deux langages tels que $L \subseteq L'$ comme tout morphisme qui envoie L' sur τ est, par restriction, un morphisme qui envoie L sur τ , on a $\mathcal{R}(L') \subseteq \mathcal{R}(L)$.

La donnée de l'application η et de la valeur de $\sigma(\varepsilon)$ (ou celle de $\sigma(w)$ pour un $w \in L$) détermine entièrement la région (σ, η) .

9.3.4 Régions d'un langage de réseau lexicographique

Dans le chapitre 8 les réseaux lexicographiques ont été définis comme des quintuplets $(P, T, Pré, Post, M_0)$ avec P et T ensembles finis. Pour les besoins de ce chapitre nous étendons cette définition au cas où l'ensemble des places peut être infini et définissons la notion de sous-réseau par rapport à l'ensemble des places.

Définition 9.3.2 (Sous-réseau d'un réseau lexicographique) Un sous-réseau d'un réseau lexicographique $N = (P, E, Pré, Post, M_0)$ est un réseau lexicographique $N' = (P', E, Pré', Post', M'_0)$ induit par la restriction des places P à un certain sous-ensemble de places $P' \subseteq P$.

Remarque 4 : N' sous-réseau de $N \implies \mathcal{L}(N) \subseteq \mathcal{L}(N')$ où $\mathcal{L}(N)$ désigne le langage de N .

A chaque place p d'un réseau lexicographique $N = (P, E, Pré, Post, M_0)$ on peut associer une unique région (σ, η) de $\mathcal{L}(N)$, telle que $\sigma(\varepsilon) = M_0(p)$ et $\forall e \in E, \eta(e) = (Pré(p, e), Post(p, e))$. Réciproquement, pour chaque région (σ, η) de $\mathcal{L}(N)$ on peut définir une unique place auxiliaire qui peut-être adjointe à N sans affecter son comportement et telle que $M_0(p) = \sigma(\varepsilon)$ et $Pré(p, e) = \eta^-(e)$, $Post(p, e) = \eta^+(e)$. De manière générale notons $\mathcal{N}(L) = (\mathcal{R}(L), E, Pré, Post, M_0)$ le réseau lexicographique ainsi construit à partir d'un langage préfixe-clos et non vide L avec $\forall (\sigma, \eta) \in \mathcal{R}(L), M_0((\sigma, \eta)) = \sigma(\varepsilon)$ et $\forall e \in E, Pré((\sigma, \eta), e) = \eta^-(e)$ et $Post((\sigma, \eta), e) = \eta^+(e)$.

Proposition 9.3.1

$$L \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$$

Preuve Tout mot de L est trivialement élément du langage du réseau $\mathcal{N}(L)$ construit à partir des régions de L . \diamond

Par contre, l'inclusion inverse est généralement fautive.

Exemple : $pr(a + bba) = \{\varepsilon, a, b, bb, bba\} = L$ et supposons que $L = \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$.

Comme $b \in L$ et $ba \notin L$, il existe $(\sigma, \eta) \in \mathcal{R}(L)$ telle que $\eta^-(a) > \sigma(b)$, d'autre part $bba \in L$ donc $\sigma(bb) = \sigma(b) - \eta^-(b) + \eta^+(b) \geq \eta^-(a) > \sigma(b)$ et donc $\eta^+(b) > \eta^-(b)$. Mais $a \in L$ donc $\sigma(\varepsilon) \geq \eta^-(a)$

et $b \in L$ donc $\sigma(b) = \sigma(\varepsilon) - \eta^-(b) + \eta^+(b) > \sigma(\varepsilon) \geq \eta^-(a)$ donc, en particulier, $\sigma(b) > \eta^-(a)$ ce qui contredit l'hypothèse de départ.

Montrons maintenant la proposition :

Proposition 9.3.2 *Soit L un langage non vide et préfixe-clos alors $\mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$ est le plus petit langage de réseau lexicographique contenant L .*

Preuve D'une part $L \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$ d'après la proposition précédente, d'autre part soit N un réseau lexicographique tel que $L \subseteq \mathcal{L}(N)$ alors chaque place de N peut être identifiée à une région de $\mathcal{L}(N)$ et par conséquent à une région de L (d'après la remarque 3). Ceci montre que N est un sous-réseau de $\mathcal{N}(L)$ et donc que $\mathcal{L}(\mathcal{N}(L)) \subseteq \mathcal{L}(N)$. \diamond

On peut donner une caractérisation des langages de réseaux lexicographiques :

Proposition 9.3.3 *Soit L un langage préfixe-clos et non vide sur un ensemble fini d'événements E . Les assertions suivantes sont équivalentes :*

i. L est le langage d'un réseau lexicographique.

ii. $L = \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$.

iii. $\mathcal{L}(\mathcal{N}(L)) \subseteq L$.

iv. $(\forall u \in L)(\forall e \in E) ue \notin L \implies \sigma(u) \geq 0 \wedge \sigma(u) < \eta^-(e)$ pour une région (σ, η) de $\mathcal{R}(L)$.

Preuve i. \implies ii. Soit N le réseau lexicographique dont le langage est L , on a alors N sous-réseau de $\mathcal{N}(L)$ car toute place de N va induire une unique région de L et, par la remarque 4, $\mathcal{L}(\mathcal{N}(L)) \subset \mathcal{L}(N) = L$. D'autre part, d'après la proposition 3.1 $L \subset \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$ donc $L = \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$ (rq : comme trivialement ii. \implies i. on a i. \iff ii.).

ii. \iff iii. Trivial.

iii. \implies iv. Soit $u \in L$ et $e \in E$ tels que $ue \notin L$. Comme $\mathcal{L}(\mathcal{N}(L)) = L$ (proposition 3.1), $u \in \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$ et $ue \notin \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$ alors il existe au moins une place (σ, η) de $\mathcal{N}(L)$ telle que $\sigma(u) \geq 0$ et e ne soit pas franchissable pour (σ, η) donc $\sigma(u) < \eta^-(e)$.

iv. \implies i. Soit $\mathcal{N}(L)$ le réseau lexicographique construit à partir de L . Alors, d'après la proposition 3.1, $L \subset \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$. Supposons qu'il existe $ue \in \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$ tel que $u \in L$ et $ue \notin L$. Alors, par hypothèse, il existe $(\sigma, \eta) \in \mathcal{R}(L)$ tel que $\sigma(u) \geq 0$ et $\sigma(u) < \eta^-(e)$. Mais alors $(\sigma, \eta) \notin \mathcal{R}(L)$. Par conséquent $L = \mathcal{L}(\mathcal{N}(L))$. \diamond

Pour synthétiser un réseau fini à partir d'un langage L préfixe-clos et non vide, il suffit d'exhiber un sous-ensemble fini de régions $\mathcal{R}'(L)$ de $\mathcal{R}(L)$ suffisantes pour assurer chaque instance de iv. afin d'obtenir un sous-réseau N de $\mathcal{N}(L)$ tel que $L = \mathcal{L}(N)$. Malheureusement ceci n'est pas en général facile à réaliser. Cette caractérisation est soluble pour les réseaux infinis, c'est-à-dire pour les réseaux avec un ensemble infini de places. Mais tout langage de réseau n'est pas le langage d'un réseau fini. En effet, reprenons l'exemple de Philippe Darondeau dans [Darondeau 98] en l'adaptant aux réseaux lexicographiques (voir la figure 9.14). Comme $a^{n(n+1)/2}b^n \in \mathcal{L}(N)$ et $a^{n(n+1)/2}b^{n+1} \notin \mathcal{L}(N)$ aucun réseau fini ne peut répondre à cette contrainte. Comme pour le problème de la synthèse les réseaux infinis ne nous intéressent guère, nous allons nous concentrer dans la suite sur les réseaux finis.

Une région (σ, τ) de L peut être identifiée avec le vecteur p d'entiers relatifs ($p \in \mathbb{Z}^{4n+2}$) :

$$p = (\pi_1(\sigma(\varepsilon)), \pi_2(\sigma(\varepsilon)), \pi_1(\eta^-(e_1)), \pi_2(\eta^-(e_1)), \pi_1(\eta^+(e_1)), \pi_2(\eta^+(e_1)), \pi_1(\eta^-(e_2)), \dots, \pi_2(\eta^+(e_n)))$$

où $E = \{e_1 \dots e_n\}$.

Comme L peut être vu comme un arbre, p représente une région de L si et seulement si la condition de franchissement est vérifiée :

$\forall u \in L, \forall e \in E$ tel que $ue \in L$

$$\sigma(\varepsilon) + \sum_{i=1}^n u(e_i) * (\eta^+(e_i) - \eta^-(e_i)) \geq \eta^-(e)$$

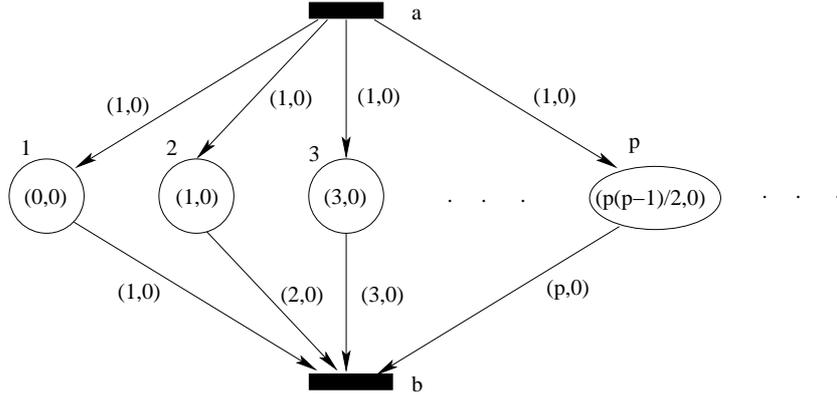


FIG. 9.14: Réseau infini ayant un langage qui ne peut être celui d'un réseau fini

où $u(e_i)$ donne le nombre d'occurrences de e_i dans u .

Mais ceci étant dans le cône positif de \mathbb{Z}^2 muni de l'ordre lexicographique, on peut encore le traduire par la disjonction suivante pour faire ainsi intervenir directement les composantes de p :

$$\pi_1(\sigma(\varepsilon)) + \sum_{i=1}^n u(e_i) * (\pi_1(\eta^+(e_i)) - \pi_1(\eta^-(e_i))) - \pi_1(\eta^-(e)) > 0$$

ou

$$\pi_1(\sigma(\varepsilon)) + \sum_{i=1}^n u(e_i) * (\pi_1(\eta^+(e_i)) - \pi_1(\eta^-(e_i))) - \pi_1(\eta^-(e)) = 0$$

$$\text{et } \pi_2(\sigma(\varepsilon)) + \sum_{i=1}^n u(e_i) * (\pi_2(\eta^+(e_i)) - \pi_2(\eta^-(e_i))) - \pi_2(\eta^-(e)) \geq 0$$

Ceci engendre en général un ensemble infini d'inégalités linéaires qui ne permet pas le calcul pratique de l'ensemble des régions. Par contre, on peut déjà affirmer la propriété suivante :

Propriété 9.3.1 $\mathcal{R}(L)$ est un cône convexe pointé.

Preuve Evidemment $0 \in \mathcal{R}(L)$ (en continuant à identifier une région à un élément de $\mathbb{Z}^{2(n+1)}$). Soit $p \in \mathcal{R}(L)$ alors quelque soit $\lambda \in \mathbb{R}^+$ (en fait dans \mathbb{Q}^+) tel que $\lambda p \in \mathbb{Z}^{2(n+1)}$ alors trivialement $\lambda p \in \mathcal{R}(L)$. $\mathcal{R}(L)$ est donc un cône pointé. Soient p et p' dans $\mathcal{R}(L)$ et $\lambda \in [0, 1]$ alors on a bien que $\lambda p + (1 - \lambda)p' \in \mathcal{R}(L)$ si $\lambda p + (1 - \lambda)p' \in \mathbb{Z}^{2(n+1)}$. \diamond

9.3.5 Cas des langages réguliers

On sait (voir par exemple le chapitre 3 de [Reutenauer 88]) que sur un monoïde commutatif ensembles réguliers et semi-linéaires coïncident. Soit $\psi : (E^*, \cdot, \varepsilon) \longrightarrow (\mathbb{N}^n, +, 0)$ avec $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ l'image de Parikh d'un mot u de E^* , c'est à dire que $\psi(u) = (u(e_1), u(e_2), \dots, u(e_n))$ où $u(e_i)$ donne le nombre d'occurrences de e_i dans u . ψ est un morphisme de monoïdes et $(\mathbb{N}^n, +, 0)$ est commutatif donc $\psi(L)$ est semi-linéaire. On peut alors toujours écrire que $\psi(L) = \psi(\bigcup_{j=1}^p v_j W_j^*)$ chaque W_j étant une réunion finie de mots de E^* . Une telle description n'est pas assez précise car les v_j par exemple ne sont pas forcément des mots de L . Pour rester dans L gardons à l'esprit que c'est un langage préfixe-clos et passons par sa description sous la forme d'une expression régulière ou rationnelle. Rappelons qu'une expression régulière sur E est générée par la grammaire (sous forme B.N.F.) suivante : $L ::= \varepsilon | e | L + L | L.L | L^*$ où $e \in E$ et confondons, comme il est d'usage, le langage lui-même avec son expression régulière. On définit les sous-expressions itérées de L comme étant les expressions S telles que S^* apparaît dans L , les branches $br(L)$ de L comme étant les mots de L dans lesquels les sous-expressions itérées sont remplacées par ε et enfin les boucles $lp(L)$ de L comme les branches des sous-expressions

itérées de L . Par définition d'une expression régulière les branches et les boucles de L sont en nombre fini. D'autre part, du fait que L soit préfixe-clos $br(L) \subseteq L$. Par conséquent on a $\psi(L) = \psi(\bigcup_{j=1}^p v_j W_j^*)$ avec pour tout j $v_j \in br(L)$ (donc $v_j \in L$) et $W_j \subseteq lp(L)$.

Pour que

$$p = (\pi_1(\sigma(\varepsilon)), \pi_2(\sigma(\varepsilon)), \pi_1(\eta^-(e_1)), \pi_2(\eta^-(e_1)), \pi_1(\eta^+(e_1)), \pi_2(\eta^+(e_1)), \pi_1(\eta^-(e_2)), \dots, \pi_2(\eta^+(e_n)))$$

soit une région de L il faut et il suffit donc de vérifier que pour tout v_j et pour tout e de E tel que $v_j e \in L$

soit

$$\pi_1(\sigma(\varepsilon)) + \sum_{i=1}^n v_j(e_i) * (\pi_1(\eta^+(e_i)) - \pi_1(\eta^-(e_i))) - \pi_1(\eta^-(e)) > 0$$

et pour toute boucle $w_{j,k}$ de W_j

$$\sum_{i=1}^n w_{j,k}(e_i) * (\pi_1(\eta^+(e_i)) - \pi_1(\eta^-(e_i))) \geq 0$$

soit pour chaque sous-ensemble W de W_j ($2^{|W_j|}$ choix possibles)

$$\pi_1(\sigma(\varepsilon)) + \sum_{i=1}^n v_j(e_i) * (\pi_1(\eta^+(e_i)) - \pi_1(\eta^-(e_i))) - \pi_1(\eta^-(e)) = 0$$

$$\pi_2(\sigma(\varepsilon)) + \sum_{i=1}^n v_j(e_i) * (\pi_2(\eta^+(e_i)) - \pi_2(\eta^-(e_i))) - \pi_2(\eta^-(e)) \geq 0$$

pour toute boucle de w de W

$$\sum_{i=1}^n w(e_i) * (\pi_1(\eta^+(e_i)) - \pi_1(\eta^-(e_i))) > 0$$

et pour toute boucle w' de $W_j \setminus W$

$$\sum_{i=1}^n w'(e_i) * (\pi_1(\eta^+(e_i)) - \pi_1(\eta^-(e_i))) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n w'(e_i) * (\pi_2(\eta^+(e_i)) - \pi_2(\eta^-(e_i))) \geq 0$$

Soit en tout pour chaque v_j , pour chaque e de E tel que $v_j e$ soit dans L , $1+2^{|W_j|}$ systèmes linéaires ! Ceci est dans le cas général considérable mais reste fini et les techniques de résolutions de tels systèmes étant polynomiales cela reste envisageable. Chaque système définit un polyèdre, l'ensemble des régions de L est alors vu comme une intersection finie (pour chaque v_j et chaque e tel que $v_j e \in L$) de réunions finies de polyèdres. $\mathcal{R}(L)$ est donc un polyèdre et comme $\mathcal{R}(L)$ est également un cône convexe pointé on peut en conclure que $\mathcal{R}(L)$ **est un cône polyédrique convexe**. Le théorème de Farkas-Minkowsky-Weil ([Schrijver 86]) qui porte plus généralement sur la décomposition des polyèdres nous permet de décrire $\mathcal{R}(L)$ comme une somme finie de demi-droites appelées rayons extrémaux du cône. Il suffit de prendre un point de \mathbb{Z}^{4n+2} distinct de l'origine (ce qui est toujours possible car les coefficients des systèmes étudiés sont tous dans \mathbb{Z}) sur chacun de ces rayons extrémaux pour obtenir alors les places suffisantes (par argument de convexité) à la construction d'un réseau lexicographique fini dont le langage est la meilleure approximation d'un langage rationnel donné.

9.4 Conclusion

Avant de conclure véritablement, regardons quel est le réseau lexicographique dont le langage est la meilleure approximation de $pr(a + bba)$. On sait déjà que ce langage n'est pas celui d'un réseau

lexicographique. Intuitivement le seul problème est l'impossibilité de tirer a après avoir tiré b . Est-il possible de construire un réseau lexicographique ayant pour langage $pr(a+ba+bba)$? Il suffit d'imposer à a de n'être franchissable qu'une fois, à b de n'être franchissable que deux fois et d'une self-loop pour obtenir le réseau de la figure 9.15.

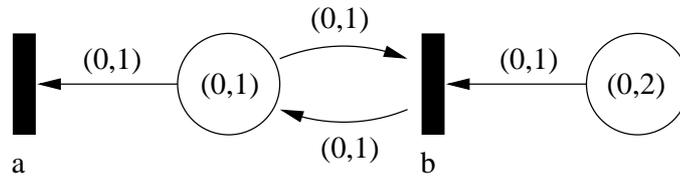


FIG. 9.15: Réseau lexicographique dont le langage est la meilleure approximation de $pr(a + bba)$.

En fait c'est un réseau de Petri et on peut en construire un autre plus compact représenté figure 9.16.

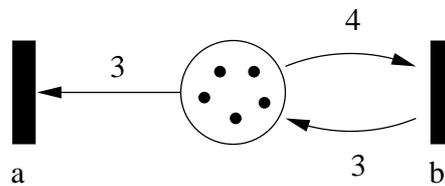


FIG. 9.16: Réseau de Petri ayant même langage que le réseau de la figure 9.15

Dans ce chapitre nous nous sommes attachés à résoudre deux problèmes de synthèse. Nous avons dans un premier temps appliqué la notion de région pour résoudre le problème de synthèse pour les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets de manière polynomiale et nous avons montré que ces réseaux sont une extension stricte des réseaux flip-flop donc des réseaux élémentaires. Dans le chapitre 7 nous avons présenté les strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets qui sont les réseaux élémentaires et, par conséquent, le problème de synthèse pour les strict- $\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$ -nets est NP-complet. Dans un deuxième temps nous avons montré comment construire un réseau lexicographique fini dont le langage est la meilleure approximation d'un langage régulier préfixe-clos et non vide donné sous la forme d'une expression régulière. Les systèmes d'équations/inéquations linéaires obtenus sont tous solubles polynomialement mais sont malheureusement en général plutôt grands. Restent le problème de la décidabilité de l'exactitude d'une telle approximation qui ne semble pas *a priori* simple ainsi que celui de l'extension à d'autres types de langages comme les langages algébriques (déterministes ou non).

Bibliographie

- [Aho 76] Aho, A., Hopcroft, J., et Ullman, J. (1976). *The design and analysis of computer algorithms*. Addison Wesley Publishing Company.
- [Badouel 90] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1990). The synthesis problem for elementary net systems is NP-complete. *Theoretical Computer Science*, 186 :107–134.
- [Badouel 95] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1995). Polynomial algorithms for the synthesis of bounded nets. In *Proceedings of TAPSOFT'95*, volume 915 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 364–378. Springer.
- [Badouel 05] Badouel, E., Chenou, J., et Guillou, G. (2005). Petri Algebras. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 3580, pages 742–754. ICALP'2005.
- [Badouel 07] Badouel, E., Chenou, J., et Guillou, G. (2007). An axiomatization of the token game based on Petri Algebras. *Fundamenta Informaticae*, 77(3) :187–215.
- [Badouel 99] Badouel, E. et Darondeau, P. (1999). Theory of regions. *Lecture Notes in Computer Science*, 1491 :529–586.
- [Darondeau 98] Darondeau, P. (1998). Deriving unbounded Petri nets from formal languages. Rapport technique, Inria Research Report RR-3365.
- [Ehrenfeucht 90a] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990a). Partial 2-structures; Part I :Basic notions and the Representation Problem. *Acta Informatica*, 27 :315–342.
- [Ehrenfeucht 90b] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990b). Partial 2-structures; Part II : State Spaces of Concurrent Systems. *Acta Informatica*, 27 :343–368.
- [Gondran 85] Gondran, M. et Minoux, M. (1985). *Graphes et algorithmes*. Eyrolles.
- [Reutenauer 88] Reutenauer, C. (1988). *Aspects mathématiques des réseaux de Petri*. Masson.
- [Schmitt 96] Schmitt, V. (1996). Flip-Flop Nets. In *Lectures Notes in Computer Science*, volume 1046, pages 517–528. STACS'96.
- [Schrijver 86] Schrijver, A. (1986). *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley.

Chapitre 10

Conclusion

Ce chapitre de conclusion dresse un bilan du travail réalisé et propose en perspectives quelques pistes de recherche. La première section résume notre approche du problème du pilotage automatique des voiliers dans le cadre de la compétition et nos travaux sur les extensions algébriques des réseaux de Petri. La deuxième section suggère quelques perspectives de recherche dans différentes directions qui associent la physique, l'automatique, l'informatique et la psychologie.

10.1 Bilan

Nous avons abordé le problème du pilotage automatique des voiliers de compétition par le biais de la réalité virtuelle et de la simulation ainsi que de sa modélisation par des réseaux de Petri.

10.1.1 Du pilotage automatique des voiliers de course

Si le problème du pilotage des voiliers a déjà été étudié directement par les automaticiens et les industriels (à travers les pilotes commerciaux), ou indirectement par les physiciens, la communauté informatique n'y a consacré que peu de travaux. Comme barrer un voilier est une activité complexe au sein d'un environnement complexe et qu'un barreur humain sait faire face à la plupart des contextes rencontrés, nous avons choisi de construire notre système de pilotage à partir d'une expertise de l'activité « barrer un bateau » dans le but d'en identifier les éléments importants. Nous avons ainsi listé et hiérarchisé les données capteurs importantes, identifié les contextes cruciaux, décrit les stratégies associées et mis à jour l'importance de l'anticipation.

Nous avons ensuite proposé et modélisé une architecture multi-agents pour le pilotage des voiliers dont la partie commande est basée sur trois agents autonomes, asynchrones, concurrents et communiquant entre eux. Chacun a sa propre fréquence et s'occupe des phénomènes dont les fréquences sont proches des leurs.

Nous avons implémenté le système avec le moteur de simulation d'objets actifs et de rendu 3D **ARéVi** développé au CERV. L'expérimentation montre que notre barreur virtuel réagit aux sollicitations de son voilier d'une manière proche de celle d'un homme. Le modèle de bateau implémenté rend difficile de juger du niveau de performance du système par rapport à un pilote qui se contente de conserver un cap, mais assure un niveau de sécurité intéressant pour un coureur au large pour qui il importe de finir sa course pour espérer la gagner. Nous montrons enfin qu'il serait possible grâce à de la simulation dans la simulation d'anticiper et, du coup, de prévenir des mouvements qui, s'ils avaient lieu, seraient difficiles à contrecarrer au moment où ils surviendraient.

10.1.2 Des extensions algébriques des réseaux de Petri

Dans le cadre de cette thèse, dans le but de modéliser, spécifier et valider au moins en partie notre système, nous nous sommes intéressés aux réseaux de Petri. Comme nombre de caractéristiques des systèmes à événements discrets ne sont pas pris en charge par les réseaux de Petri, nous avons proposé différentes extensions, dites algébriques, dans le but notamment de pouvoir faire de la synthèse via les notions de type de réseau et de région.

Nous avons tout d'abord proposé d'utiliser un groupe à la place de l'algèbre des places usuelle des réseaux de Petri dans lequel l'élément neutre est interdit afin que toutes les transitions ne soient pas autorisées. Ces réseaux, appelés strict-group-nets, étendent en particulier les réseaux de Petri purs si on choisit pour groupe l'ensemble des entiers relatifs. L'adjonction d'arcs dits « inconditionnels » conduit aux group-nets et permet d'englober également les réseaux impurs. Nous avons montré que les problèmes de savoir si les \mathbb{Z} -nets et les strict- \mathbb{Z} -nets sont bornés et si une place de ces réseaux est bornée sont décidables grâce à la définition d'un arbre proche de celle d'un arbre de couverture.

La notion de ressource disparaissant dans ces nouveaux réseaux, plutôt que de choisir une algèbre *a priori* nous avons ensuite cherché à caractériser les algèbres permettant de faire comme celle des réseaux de Petri usuels. Cette démarche conduit aux réseaux lexicographiques pour lesquels la notion de ressource reste étrange car on peut consommer indéfiniment strictement. Nous avons montré que les réseaux lexicographiques ont la puissance des machines de Turing et que les réseaux lexicographiques bornés sont les réseaux de Petri bornés.

Nous montrons enfin que le problème de la synthèse trouve une réponse polynomiale pour les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets ainsi que pour les réseaux lexicographiques.

Bien que passionnantes ces nouvelles familles de réseaux, du fait notamment d'une notion de ressource étrange ou absente, demeurent difficilement utilisables dans un but de modélisation des systèmes à événements discrets. Elles trouvent leur intérêt comme extensions de différentes classes de réseaux de Petri usuels et comme présentation homogène ou universelle de ces mêmes classes.

10.2 Perspectives

Notre système de pilotage virtuel tel qu'il existe aujourd'hui présente, aux yeux d'un marin aguerri, de nombreuses faiblesses qu'il conviendrait d'effacer. Nous présentons quelques voies d'amélioration aussi bien dans l'axe de la physique, de l'automatique, de l'informatique ou de la psychologie.

10.2.1 Vers un meilleur modèle de bateau

Le comportement du voilier sur la plate-forme ARÉVi pose de nombreux problèmes qui invalident certains choix de stratégies de barre pourtant guidées par un expert et maintes fois testées sur l'eau. Par exemple, un barreur tire toujours avantage à faire partir en surf son bateau sur chaque vague plutôt que de se contenter de le maintenir sur son cap. Dans notre application, parfois, le gain de vitesse ne compense pas l'excès de route réalisé. La faiblesse de la vitesse du bateau au près choquera également n'importe quel régatier sensible à la performance. Le modèle physique du voilier n'est donc pas pleinement satisfaisant et exigerait qu'un aéro-hydrodynamicien y travaille tout en veillant à conserver l'aspect « léger » du modèle pour ne pas oblitérer la possibilité d'effectuer de la « simulation dans la simulation ». Une première piste concerne les voiles. Actuellement seul leurs centres de poussée, leurs surfaces et leurs braquages interviennent. Il est impossible de les régler (creux, tension de drisse, vrillage ...) pour modifier leurs portances. Plus grave encore, il n'existe pas d'interaction voile/vent, en particulier, le foc n'influence pas la grand'voile et réciproquement (ce qui explique en partie la vitesse trop faible du bateau au près). Bien modéliser les voiles ouvrirait d'autres perspectives passionnantes comme aider au choix d'un jeu de voiles pour un programme de courses déterminé, aider à la conception grâce à la visualisation des efforts et au positionnement de la voile par rapport à différents éléments du

bateau comme le pont, le haubannage ou les barres de flèche. De manière générale, pour l'architecte, pouvoir visualiser les efforts en tout endroit du voilier serait un outil formidable pour sélectionner et échantillonner les matériaux de manière optimale.

Une fois un bon modèle de bateau obtenu avec des interactions vent/voiles pertinentes, il devient envisageable de simuler du match-race (régate au contact à deux bateaux) voire de la régates en flotte avec une vraie notion de cône de déventement qui impose des choix tactiques adaptés. Le système pourrait alors servir de simulateur en vue de la formation de skippers à la régates.

10.2.2 Vers un meilleur modèle de vent

Un marin sait parfaitement que le vent présente un phénomène de *cisaillement* c'est-à-dire qu'il n'a pas la même direction (ni la même force d'ailleurs) au ras de l'eau ou à trente mètres d'altitude¹. Dans le modèle de mer utilisé le vent est considéré comme homogène sur l'ensemble du plan d'eau et ceci à n'importe quelle altitude. Si l'absence de cisaillement permet finalement de simplifier le calcul des forces aérodynamiques au niveau des voiles et de la coque d'autres phénomènes typiques manquent cruellement. Dans une forte houle, une vague agit comme un écran vis-à-vis du vent et le barreur ressentira une forte baisse de la force du vent dans le creux de la vague et une rafale en son sommet. Ce type de phénomène influence considérablement la façon de mener son bateau et n'est pas modélisé aujourd'hui.

10.2.3 Vers un meilleur pilote

Le pilote lui-même n'est qu'une esquisse de ce que pourraient être les pilotes du futur. L'objectif visé se restreignait à négocier au mieux les accidents à courts termes en mer tels que les vagues, les rafales ou encore les refus. En effet, ce n'est pas au pilote de décider par exemple d'abattre pour passer une zone de clapot car ce choix est stratégique et constitue potentiellement un danger si la nouvelle route conduit sur des récifs ou à la rencontre d'un autre navire. Le pilotage doit de plus s'accommoder de la contrainte forte d'un réglage de voiles figé qui limite de fait les possibilités de trajectoires. Rien ne sert d'abattre pour relancer si le bateau se vautre sous l'effet d'un braquage de voiles devenu excessif. Cependant, pour améliorer le pilote, différentes voies méritent d'être explorées. En premier lieu, les agents concepts qui servent à la reconnaissance de contextes sont perfectibles. Bien qu'ils traduisent une expertise, certains sont de fait très liés au bateau et nécessitent d'être adaptés si l'on décide de changer de voilier. Pour les rendre universels, il semble difficile de faire autrement que de les doter de capacités d'apprentissage.

Dans sa forme actuelle, les stratégies appliquées par le pilote pour faire face aux aléas de la navigation se résument à commuter sur un mode de barre prédéterminé puis à revenir à un mode robuste de base lorsque certains critères sont remplis. Elles répondent grossièrement à ce que ferait un barreur humain dans les situations rencontrées mais pourraient être affinées. Par exemple, à l'issue d'un surf il est courant d'effectuer une relance prononcée dans l'espoir de favoriser un nouveau départ en surf. Chaque stratégie pourrait être ainsi plus détaillée dans l'optique d'obtenir un comportement encore plus réaliste.

Si la commande par PID a été choisie c'est pour sa popularité dans le milieu industriel et les bonnes performances globales des pilotes commerciaux qui en sont dotés. Mais l'architecture proposée dans cette thèse permet d'essayer aisément d'autres lois de commande, l'opération se limitant à adapter en conséquence la partie du code du barreur réactif concernée.

L'ergonomie du pilote pour un compétiteur soumis au stress et à des fatigues extrêmes est essentielle s'il souhaite pouvoir tirer toute la quintessence de son installation. A ce titre, la réalité virtuelle offre la possibilité de développer des plate-formes de tests pour confronter des prototypes à des experts et opérer une sélection. Bien que du domaine de la psychologie, un travail dans cette direction

¹ Phénomène dû tout simplement au frottement du vent sur la surface de l'eau. Le vent ralentit et tourne alors vers les basses pressions.

apporterait beaucoup à la compréhension de certains mécanismes cognitifs liés à l'activité du barreur de voiliers de course.

10.2.4 Vers une utilisation réelle

Evidemment, le but ultime de tout ce travail est de faire fonctionner notre pilote sur un vrai voilier durant une vraie course. Un voilier (voir en annexe B) a été intégralement équipé et il ne subsiste plus que quelques problèmes temps réel pour que notre pilote soit opérationnel. De plus, de nombreux contacts avec différentes écuries de course au large² sur des supports très divers (monocoques IMOCA, maxi multicoques, Figaro, mini-transat) sont d'ores et déjà établis et ne demandent qu'à se lancer dans l'aventure!

Bref, de quoi occuper de nombreuses personnes et pour longtemps!

² On peut citer entre autres Mer Agitée (Michel Desjoyeaux), Kairos (Roland Jourdain), Virbac-Paprec Sailing Team (Jean-pierre Dick), Sodebo (Thomas Coville) ou encore Cercle Vert (Gildas Morvan).

Annexe A

L'expertise du chapitre 3 s'appuie en grande partie sur de nombreux échanges avec des coureurs de haut-niveau ainsi que sur ma propre expérience. Nous retranscrivons dans ces annexes quelques discussions portant sur la manière de mener à la barre un voilier de compétition. Les coureurs choisis permettent de couvrir un large spectre dans les pratiques de voile sportive. Nous découvrons ainsi le barreur de course au large (Jacques Caraës, Hugues Destremau), des jeux olympiques (Jean-Yves Le Déroff), de match-racing (Philippe Legros), de monotype (Gildas Morvan sur le bateau de la Solitaire du Figaro) ou encore le point de vue du technicien (Gaël Le Cléach). Les entretiens se sont déroulés dans un lieu choisi par la personne interrogée, souvent son lieu de travail, et ont été enregistrés sur un dictaphone après accord de la personne concernée. Ils ont été ensuite couchés sur le papier de manière presque littérale, expurgés seulement des hésitations de langage. Les textes apparaissant entre crochets ont été ajoutés pour préciser des points implicites. Il se peut que certains propos aient ainsi été légèrement tronqués et peut être déformés malgré mon souci de préserver le caractère spontané de ces entretiens. Ces retranscriptions écrites ont ensuite été diffusées aux intéressés pour correction et accord. Les textes qui suivent sont le résultat de ce processus et recèlent, à mon avis, de véritables trésors pour le compétiteur désireux d'améliorer ses performances à la barre. Je remercie ces coureurs de leur disponibilité et des quelques « trucs » qu'ils ont bien voulu me révéler, contribuant ainsi à la compréhension et à l'amélioration de ma propre technique de barre.

Chaque entretien est daté et précédé d'un petit curriculum vitae donnant quelques points clés du parcours de chaque marin tout en dessinant le type de compétition pratiquée. Les coureurs une fois présentés sont désignés par leurs initiales tout comme moi-même, soit G.G., pour Goulven Guillou. Etant un ancien membre de l'équipe **Finistère Course Au Large**, les points les plus importants de mon CV nautique sont également donnés ci-dessous pour souligner ma qualité d'expert dans le domaine de la voile de compétition.

Goulven Guillou (interviewer)

Vainqueur en bateaux de série de la Mini-Transat 1991.

21^{ème} de la Solitaire du Figaro 1992.

7^{ème} de la transat en double Lorient-Saint Barth. 1992.

12^{ème} de la Solitaire du Figaro 1993.

Triple vainqueur de la Transmanche en double (2003, 2004, 2005).

Vainqueur des 110 milles en solitaire de Concarneau 2006.

Vainqueur de la solo-duo Atlantique 2009 catégorie solitaire.

Vainqueur Vannes-Horta-Vannes 2010.

A1. Gildas Morvan (19/01/2006)

3^{ème} de la Solitaire du Figaro en 2000.

Vainqueur de la Route du Ponant en 2002.

Vainqueur de la Generali Méditerranée en 2003.

Vainqueur du Tour de Bretagne avec Bertrand Pacé en 2003.

2^{ème} de la Route du Rhum 2006 en Class 40.

GG : Quel pilote as-tu sur ton bateau ?

GM : NKE Gyropilot, obligatoire du fait de la jauge. Avec tous les modes mais pas de gîtomètre.

GG : Dans quelles conditions tu trouves que le pilote n'est pas à la hauteur ?

GM : Ben, au près je trouve qu'il pourrait barrer un peu mieux.

GG : Qu'est ce qu'il fait au près en fait ?

GM : Au près, quand il y a du vent instable ou de la mer, il est un peu ...

GG : parce que au près tu te mets en quel mode ?

GM : vent apparent.

GG : Quand le vent bouge, le bateau bouge en même temps...

GM : Oui, après il y a peut être des paramétrages à faire, à affiner et tout, mais bon.

GG : Tu trouves qu'il fait quoi ? Qu'il va ...

GM : Ben, qu'il est pas assez régulier quoi.

GG : Qu'il suit pas le vent ?

GM : Euh... ouais. On peut dire cela.

GG : Il suit trop tard ?

GM : Ouais. Ben disons que ... tu vois si le vent est varié, des fois c'est des gros refus des fois c'est des petits refus et tout ça, il a du mal à bien jouer à bien suivre. Bon c'est assez dur aussi, tu sais de temps en temps tu as un gros refus, c'est vraiment un gros coup de barre. Lui n'est pas capable de donner un gros coup de barre pour abattre et pour relofer dans la foulée. Tu vois ?

GG : Oui.

GM : Il n'est pas capable d'anticiper le vent, tu vois. A la limite tu es à la barre tu vas sentir, putain tu sens le refus qui arrive tu tires déjà sur ta barre. Lui n'est pas capable de le faire.

GG : Comment tu sens le refus qui arrive ?

GM : Ben ça c'est des sensations.

GG : Oui mais comment pourrais-tu analyser cela ? Tu le vois sur l'eau ?

GM : Je pense que c'est tout de suite une histoire de gîte. Sur tes fesses tu sens que le truc il revient à plat, donc déjà tu tires sur la barre.

GG : D'accord.

GM : Je pense que lui il ne le fait pas. Dès que le bateau contre-gîte déjà tu tires sur la barre.

GG : Et sinon au niveau de la girouette, normalement le vent en tête va refuser avant ?

GM : Normalement oui.

GG : Cela tu l'utilises ou pas ?

GM : Ben...euh. Normalement lui doit le savoir, il a l'info presque avant toi.

GG : Oui, c'est vrai. Utilises-tu le lissage de ta girouette ?

GM : Oui. Je joue un peu avec, maintenant il faudrait sûrement bidouiller plus là dedans.

GG : Mais comment utilises-tu ton lissage ?

GM : Ben j'avais essayé différents réglages en nav en mode vent j'ai changé. J'ai essayé lissage 4 lissage automatique, mais sur le lissage j'ai pas vu de différences.

GG : Donc tu restes sur un lissage fixe ?

GM : Maintenant oui.

GG : Est ce que tu enregistres des configurations ?

GM : Non.

GG : Utilises-tu les réglages de gain ?

GM : Oui ça je joue pas mal avec.

GG : En fait tu mets moins de gain au près, plus de gain au portant ?

GM : Oui. Je mets le gain à 1 ou 2 je crois.

GG : Ah bon, parce que d'après la notice NKE si le gain est inférieur à 3 le gyro n'est plus pris en compte...et cela c'est pas gênant ?

GM : Ben non. Apparemment non.

GG : Et ça c'est quand il y a peu de vent mer plate ?

GM : Oui. Après je pense qu'il donne vachement de coups de barre, si tu mets gain 4. Vachement de gros coups de barre au près donc le bateau il n'est pas fluide.

GG : Oui et par rapport au réglage de coefficient de barre ?

GM : Au début tu essayes quand tu vois que cela ne bouge pas beaucoup tu ne passes pas ton temps sans arrêt à changer tous tes paramètres.

GG : Non mais vu que tu as la possibilité de mémoriser des configurations ...

GM : Ouais ça peut être intéressant.

GG : Et le réglage de contre-barre ?

GM : C'est quoi ?

GG : Par exemple quand tu abats, naturellement tu relofes après. La contre-barre est un amortissement qui évite de trop relofer après.

GM : Je sais que j'ai joué avec deux trucs, mais c'est quoi ...

GG : En fait le gain est accessible directement sur la console, par contre les autres réglages il faut rentrer dedans. Du coup je pense que tu les utilises moins.

GM : Le problème c'est que personne ne détient la vérité. NKE ne sont même pas capable de te dire ce que c'est et tu vois un mec à Port La Forêt il va te dire que c'est mieux. En fait tu ne joues pas beaucoup dessus car cela n'a pas beaucoup de gain.

GG : Y a t'il eu des paramétrages établis par le centre d'entraînement [Port La Forêt]? Est ce qu'il y a des documents?

GM : Ouais, il y a eu des échanges. En fait pendant les entraînements ils demandent à relever tous les paramétrages de pilote.

GG : Quelques situations qui me semblent critiques. Si tu as du largue serré sous spi?

GM : Le pilote barre mais il faut adapter un petit peu tes réglages en fonction de cela. Je me souviens avoir fait du largue sous spi, bon c'est un spi asymétrique donc c'est un peu différent, en mode vent apparent/réel je crois ...

GG : Donc ça marche bien, il ne part pas au lof, il ne part pas à l'abattée après avoir contré un départ au lof...

GM : Tu es obligé d'être un tout petit peu plus bas, un peu plus d'angle.

GG : Même quand il y a de la houle?

GM : Il y avait de la mer, du vent.

GG : Donc ça marche bien.

GM : Oui.

GG : Et au portant sous spi dans la brise et la houle? Parce que dans la notice NKE ils disent de se mettre en vent réel.

GM : Oui.

GG : Donc l'idée c'est qu'il va aller tout droit.

GM : Si tu veux, si tu mets en compas, lui il va quoi qu'il arrive il va décider d'aller tout droit. Après si le vent il change ça fout le bordel dans les voiles. Donc c'est pas jouable. Donc l'idéal c'est quand t'es vent arrière tu essaies d'être tout le temps au meilleur angle par rapport au vent. Après il faut surveiller que le vent il ne bouge pas énorme. Mais si tu le mets à 160 à peu près là il peut barrer vraiment super bien. Même dans la mer et du vent fort.

GG : Mais habituellement, quand tu barres sous spi dans la houle, au planing dans la vague tu abats...

GM : Oui cela il le fait.

GG : Oui mais s'il est en vent réel il ne devrait pas le faire.

GM : Si, il le fait aussi.

GG : Il y a quelque chose que je ne comprends pas. En vent apparent c'est logique mais pas en vent réel.

GM : Je pense que le vent réel bouge un peu.

GG : Il bouge un peu parce qu'il est différent au sommet de la vague par rapport au bas de la vague mais la différence est faible.

GM : Je pense en fait qu'il y a du retard entre le moment où le vent apparent change et où le calculateur le compense.

GG : Oui, en fait le pilote en vent réel suit un peu le vent apparent parce qu'il y a du retard, alors qu'en vent apparent il fera trop de lacets?

GM : Je pense qu'il zigzague trop.

GG : Oui parce que ce qui est bizarre, c'est que normalement en vent réel il ne va pas suivre le vent apparent, et donc au pire le spi va déventer. Et en fait il barre bien en réel, il va descendre dans la vague et relover après?

GM : Oui il le fait.

GG : C'est super ça !

GM : Ce n'est pas tout à fait normal mais entre la doc NKE et ce qui se passe sur l'eau nous on fait notre business avec ce qu'on a. Nous on fait des tests et on estime qu'il barre super bien vent arrière vent réel avec gain 5 gain 6. Alors il abat, il relofe super bien. A tel point que sur les parcours bananes tu fais tout le vent arrière sous pilote et toi tu es aux écoutes.

GG : A tel point que si NKE améliore leur TWA alors il marchera peut-être moins bien !

GM : Oui mais peut être qu'à ce moment là on passera en vent apparent, je ne sais pas pourquoi il marche bien en vent réel.

GG : Dans la pétrole en général est-ce que le pilote barre bien ?

GM : Ben au vent arrière il ne barre pas trop mal, tu vois, parce que avec très peu de gain au portant tu mets à 140° ou 130° du vent réel à la limite il barre bien. Toi tu joues aux écoutes. Tu relances le pilote dans les risées tout ça.

GG : Dans les risées il n'abat pas sinon ?

GM : Non. Tu es sous pilote mais tu joues avec ta télécommande. Il ne réagit pas. S'il y a 4 noeuds de vent et que tu as une bouffe à 5, 6 noeuds de vent, lui il ne comprend rien, je vais lui mettre moins deux pour qu'il abatte.

GG : Et au près [toujours dans la pétrole] ?

GM : Au près il est pas mal, je me souviens que de nuit souvent il barre mieux que moi.

GG : Pourquoi il barre mieux que toi ? Parce que tu es fatigué ou que tu as moins de sensations ?

GM : Parce que je pense que je lui demande de naviguer toujours à 50° du vent réel, et bien lui il va le faire. Et je me demande si à ce moment là il n'arrive pas à anticiper les rotations là haut. Dans le noir tu n'as plus de repère, tu ne vois pas tes penons, toi tu joues un peu sur tes sensations et la fatigue intervient aussi. On pense que le pilote barre mieux de nuit que nous.

GG : Y a t'il eu des tests à Port La'f entre un bateau sous pilote et le même avec barreur sans toucher au réglages ?

GM : Ca arrive que le pilote s'en sorte mieux. C'est à toi de trouver le bon réglage entre ton pilote et tes voiles. Dans ce cas cela peut être super bien.

GG : Et pétrole plus houle ?

GM : Là il est un peu perdu.

GG : Et pétrole plus clapot ? C'est le désastre ?

GM : Ben ... ouais. Ou alors tu mets vachement abattu.

GG : Et toi dans ces conditions tu abats pas mal ?

GM : Non parce que toi tu restes un peu plus bout au vent, tu regardes ta vitesse, tu as ton speedo tu te dis je suis à 4 noeuds c'est bon et dès que tu vois que ça ralentit tu tires un peu plus sur ta barre. Alors que lui il va abattre en grand il va relofer en grand il va faire de grosses variations de barre, un coup il ira très vite un coup très lentement il sera moins régulier que toi.

GG : En figaro 1 il m'arrivait d'amarrer la barre et cela marchait mieux que sous pilote parfois.

GM : Là c'est toujours possible [en mode barre]. Mais c'est rare que je le fasse. Une fois dans le gros temps à Penmarc'h le bateau était imbarrable en compas et en mode vent, je l'ai mis en mode barre de nuit à Penmarc'h. Le mode vent il n'y arrivait pas parce qu'il y avait des grosses vagues donc il n'arrêtait pas de sauter, et en mode compas c'était pareil.

GG : Pourquoi barre amarrée cela peu bien marcher ?

GM : Parce que le safran est dans l'axe.

GG : Quelles améliorations aimerais-tu avoir sur le pilote ?

GM : ... c'est dur à dire !

GG : Il est bien en fait !

GM : Il est pas trop mal oui.

GG : Pour toi c'est quoi un pilote intelligent ?

GM : Un pilote intelligent c'est un pilote qui peut barrer non stop à ma place.

GG : Plus précisément, une consigne du style "fais du près tribord amure" plutôt que "sois à 40° du vent apparent".

GM : C'est pareil non ? Ce n'est pas pareil ?

GG : Non, tu peux par exemple te caler sur la polaire correspondant à la force du vent.

GM : Oui mais après si tu veux faire un près près ou un près océanique, tu vas rentrer tout ces paramètres là ?

GG : Oui, on pourrait envisager ce style de consignes.

GG : Ta manière de barrer maintenant. Dans pétrole mer plate au près comment tu barres ?

GM : Je barre sous le vent en général en pouvant voir le génois et les penons sans trop piper en gardant les penons au vent bien remplis.

GG : Et avec de la houle en plus ?

GM : C'est assez dur, il faut arriver à rester assez haut. Tu as des mecs qui arrivent à rester haut qui déventent la moitié du génois. Le génois il "flappe". Ils y en a qui arrivent à naviguer comme cela vachement en disant que l'optimum de l'angle du bateau c'est ça. Moi je n'y arrive pas.

GG : En terme de mouvements de barre tu en fais le moins possible ?

GM : Oui.

GG : Là tu mets le pilote tu es bien ?

GM : Ben...ouais. Le problème le pilote lui c'est qu'il est en retard. Quand il dévente entièrement, lui il sait pas trop où il habite donc après il tire sur la barre il abat un grand coup (au lieu de laisser la barre dans l'axe) à ce moment là le génois se regonfle, il est à 60° il repousse la barre il relofe. Là il y a peut être quelque chose à gagner. Qu'il réagisse mieux au dévent du génois.

GG : Et quand tu as du clapot dans la pétrole ?

GM : Le mieux est d'être un peu plus bas.

GG : Comment barres-tu dans les vagues en général, quand il y a du vent établi ? Tu suis les penons ?

GM : C'est toujours un compromis. Tu sais quand tu es perdu tu regardes ta vitesse, tu sais que tu dois naviguer à ta vitesse cible.

GG : Tu connais ta vitesse cible par expérience ou par polaires ?

GM : Les deux.

GG : Tes polaires sont fournis par Lombard ?

GM : Non c'est des polaires perso que j'ai faites avec Optima.

GG : Barre-t-on intrinsèquement différemment lorsqu'il y a beaucoup de vent, pétole où est-ce juste des paramètres que l'on ajuste ?

GM : Oui la technique de barre est très différente en fonction des conditions. Dans la pétole tu es sous le vent à vouloir remplir ton génois, dans la brise tu es au vent à essayer presque d'effacer ton génois pour que ton bateau soit à plat. En girouette cela n'a rien à voir.

GG : Je pose la question parce que tu ne changes pas les paramètres de ton pilote.

GM : Non pas dans le petit temps, je joue sur le gain. Et NKE dit de naviguer en vent réel dans le petit temps.

GG : Parce que le vent apparent varie trop ?

GM : Oui peut-être.

GG : Donc il y a de bons barreaux de petit temps, de brise ?

GM : Oui peut être. Après il y a le réglage.

GG : Barre-t-on très différemment un multi d'un mono ?

GM : Oui.

GG : Et entre monos ? Mini, Figaro 2, Open 60' ?

GM : Oui cela est proche. Sauf au portatif ou un 60' ou un mini aura de grosses accélérations que tu n'auras pas en Figaro.

GG : Barres-tu beaucoup aux instruments ?

GM : Oui.

GG : Sans instruments es-tu perdu ?

GM : Oui c'est comme si on t'enlevait un oeil. C'est plus dur.

GG : Tu penses que tu perds en performance ?

GM : Oui.

GG : Qu'est ce que tu utilises le plus comme instruments ?

GM : La vitesse, angle du vent réel, direction du vent réel. La force du vent n'intervient pas pour barrer.

GG : Comment barres-tu aux instruments ? Si la vitesse tombe tu abats au près et lofes au portant ?

GM : Oui.

GG : Et le vent apparent tu essayes de le garder constant en angle ?

GM : Pour le portant tu vas regarder aussi ta force de vent. Si un moment ta vitesse tombe c'est soit une histoire d'angle soit une histoire de force. Là ce n'est pas pareil, soit tu es trop bas il faut relofer, soit le vent a molli et là il faut lofer plus que ton angle que tu avais. Là c'est la vitesse, la direction du vent réel et la force du vent qui interviennent.

GG : Les sensations ? Sensations de barre ?

GM : Oui cela dépend si tu la veux dure ou molle. Il faut aussi que le bateau soit le plus facile à barrer possible. Lui le pilote ne le saura pas.

GG : Sinon en termes de vitesse, tu sens la vitesse à la barre ?

GM : Oui.

GG : Sens tu la baisse de vitesse avant le speedo ?

GM : Oui je pense car le speedo est en retard.

GG : Et au près c'est pareil ?

GM : Au près c'est pareil. Tu vois ton safran est dans l'axe il est neutre. Le bateau revient à plat, à la limite le safran il tire tout seul sur la barre. Le safran change de direction et il abat tout seul. La risée arrive, le bateau gîte, le safran part sous le vent.

GG : Toi tu limites les mouvements du safran.

GM : Voilà normalement tu le laisses partir tu le laisses suivre le vent dans un sens comme dans l'autre et là le bateau il abat il vient à plat la barre tire le bateau abat c'est presque une fluidité dans les fesses et dans la barre. Ses sensations là tu les as souvent avant l'électronique qui va être en retard là dessus.

GG : Au niveau des oreilles ? Tu sens le vent non ?

GM : Ouais au niveau du visage en général et des oreilles plus particulièrement.

GG : Et les yeux ? Pour les penons ok mais aussi pour les vagues.

GM : Ben ouais si tu vois une grosse vague tu vas abattre pour aller plus vite pour pouvoir franchir cette vague, le pilote lui ira tout droit.

GG : Lors d'une houle régulière tu l'enregistres inconsciemment ?

GM : Oui. Mais le pilote aussi. Souvent quand tu branches le pilote c'est pas terrible puis au bout de 1 ou 2 minutes il barre super bien.

GG : Dans quelles situations te fies tu plus à l'électronique qu'aux sensations ?

GM : La nuit. Dans la pétrole dans le noir. Les deux mais surtout la nuit.

GG : Situations où le pilote barre mieux que toi et très différemment de toi ?

GM : Portant vent arrière. Risée pas risée molle ou pas molle lui il barre à 160, il reste super stable. Tu te dis putain là il ne relofe même pas dans la molle mais c'est pas grave il reste vachement bas il est trop abattu la risée revient il repart.

GG : Mais pourquoi cela marche mieux ?

GM : Parce qu'il fait moins de route bien qu'il aille moins vite.

GG : Donc nous on cherche trop les sensations à garder de la vitesse du coup on fait trop de route.

GM : Oui. Kito de Pavant navigue hyper bas dans le petit temps. Son spi se dégonfle mais ça marche. Pour moi c'est très difficile à faire alors que le pilote lui le fera.

A2. Jacques Caraës (25/01/2006)

Quatre tours du monde.

Recordman de l'Atlantique sur Marie-Cha IV en 1998.

Co-détenteur du Trophée Jules Verne sur Orange 2 (2005).

*Vainqueur de la transat en double Lorient-Saint Barth. 92 (avec Michel Desjoyeaux).
Directeur de course de la Solitaire du Figaro depuis 2007.*

GG : Le mode vent est-il important sur les multis ?

JC : C'est là que c'est vachement important. Ce sont des bateaux très particuliers. Fila qui s'est retourné [sur la Jacques Vabre 2005] c'était sous pilote. Le mode compas est dangereux car lorsque tu as une accélération il n'abat pas.

GG : Sur ces bateaux quand tu abats ils ont tendance à lever un peu plus au début ?

JC : Oui, maintenant cela dépend à quel angle du vent tu es. A 70-80° du vent réel abattre peut être très dangereux car tu peux donner l'impulsion qui te feras cabaner. Par contre sous gennak là c'est différent, le bateau se calme.

GG : Sous gennak le bateau est rarement sur une coque...

JC : Il ne doit pas être sur une coque (sauf grand prix). En solo ou en double ils ont peur de mettre le pilote. Ce n'est pas évident pour le pilote car il y a de telles accélérations, le vent apparent change brusquement. Ma dernière expérience de pilote en multi date de l'avant avant dernière Jacques Vabre avec Jean Le Cam (Bonduelle). On panachait mode vent, mode compas. Mode compas quand on était dans le range haut près du vent comme cela on était sûr qu'il n'y aurait pas une abattée et dans le petit temps même si le vent bougeait. Par contre dans la brise ... c'est plus chaud. Sur Figaro 2 ça marche très bien parce qu'il n'y a pas d'accélérations brutales. Les 60' open et les minis se rapprochent plus des multis.

GG : Barre-t-on très différemment sur un mono par rapport à un multi ?

JC : Plus ça va les monos se rapprochent du comportement des multis en tout cas de la génération précédente on se rapproche de la même manière de barrer.

GG : Entre un Figaro et un multi ?

JC : Oui c'est très différent. Surtout dans les situations un peu d'urgence. Autant en monocoque l'urgence est moins élevée alors qu'en multicoque tu as des zones rouges où si ce n'est pas très rapide à la barre c'est irréversible. C'est ça la grosse différence. Dès que ça fume c'est les mecs qui barrent. Le pilote intervient plus dans le petit temps, là il va être peut être meilleur que le mec qui barre en mode compas quand le vent est relativement stable. Toi tu te mets aux réglages. Pour calmer le jeu sur multicoque tu abats sur mono 60' c'est un peu pareil. Il y a aussi le fait de relever les safrans. Cela change tout en multi. Le central dans un puits est relevé il n'y a plus que le safran sous le vent le bateau est génial à barrer. Si tu es sur un patin et que tu ralentis la surface du safran sous le vent devient insuffisante et tu n'as plus d'action sur le bateau. Tu pars au lof sous gennak. Sous pilote il faut garder le safran. En solo il faut des conditions idéales. Le risque c'est de l'oublier.

GG : Barrer un géant comme Orange, c'est vraiment différent ?

JC : A mon avis c'est plus proche du Figaro. C'est un gros camion. Il n'y a pas de grosses accélérations.

GG : Sur un même type de bateau penses-tu que l'on barre très différemment lorsqu'il y a du petit temps par rapport à de la brise ?

JC : Oui. Dans le petit temps au près on cherche à tirer sur sa barre, dans la brise on va chercher à lofer pour déventer. La notion de pilotage s'inverse. Au portant c'est l'inverse, tu lofes dans le petit temps pour chercher la vitesse et dans la brise à abattre pour gagner en cap.

GG : Gildas [Morvan] au portant pétrole va se mettre en mode vent apparent pour essayer de suivre un peu les bascules, et en mode compas au près sur un cap moyen pour éviter de faire de la route. Combien y a t-il pour toi de modes différents comme cela ?

JC : 2 je pense. (Petit temps, brise). Eventuellement un mode survie gros temps.

GG : Penses-tu qu'il y a des changements de modes liés au changement de mer.

JC : Les variations mer plate vont être plutôt dans un range très étroit, par contre clapot dur si tu n'as pas de marge d'évolution nette tu vas vite planter. L'effet mer est un paramètre important.

GG : Les sensations ?

JC : Yves Parlier a travaillé un peu là-dessus.

GG : Gîte et tangage. Sensations de fesse ?

JC : Oui. L'idée est de garder le bateau plat au portant pour un mono. Pour un multi c'est un peu différent tu cherches à monter beaucoup pour redescendre beaucoup. En multi tu n'as pas de sensations de barre c'est traitre tu ne sais jamais à quel angle de vent [réel] tu es. Sensations de barre en mono oui mais je barre beaucoup au speedo. Parce que j'ai besoin d'une référence. Je pense qu'un bon barreur c'est quelqu'un qui trouve sa vitesse les yeux bandés. Sur un multi tu n'as plus de sensations. Les penons de jour oui, mais de nuit non c'est souvent collé. Surtout dans des allures intermédiaires de reaching, tu es surbordé souvent, en multi cela arrive très très vite.

GG : Et les oreilles [le vent] ?

JC : C'est pas mal. Mais sur les multis ils se protègent du coup ils n'ont plus de sensation de vent.

A3. Hugues Destremau (25/01/2006)

Whitbread³ 1993 sur La Poste.

Solitaire du Figaro en 1995.

Transat en double Lorient Saint-Barth. en 1996.

3^{ième} de la transat Jacques Vabre 2005 sur Géant avec Michel Desjoyeaux.

GG : Dans quelles conditions le pilote merde sur Géant ?

HD : Déjà, il y a eu un problème, on n'avait pas le mode vent mais seulement le mode compas. Le mode compas ça va bien quand on est au portant et que tu n'as pas besoin de relancer, abattre ... Au près il ne faut pas y penser, sauf si il fait beau. En approchant de l'île d'Ascension [durant la Jacques Vabre 2005 avec Michel Desjoyeaux] j'ai mis le pilote pour aller remettre un poisson volant à l'eau on a failli chavirer ! Le bateau s'est levé, il a abattu.

GG : Donc en fait, vous ne l'avez jamais mis.

HD : On l'a mis mais essentiellement dans le pot au noir et quand le vent était stable et pas de mer. Pendant la qualif le mode vent fonctionnait et je n'ai jamais réussi à faire aller le bateau d'une manière acceptable en mode vent. Dès que je mettais en mode vent, le bateau mettait tellement de temps à se stabiliser, il zigzagait un petit peu, il ondulait un peu, et sur ces bateaux tu ne peux pas te permettre de zigzaguer. Par moment tu es au près appuyé à 18 noeuds, tu mets le pilote, le bateau abat, il se lève, il part à 30 noeuds. Le vent apparent, tout cela part en couilles complet. Le bateau est en vrac complet sur un patin. Un moment j'ai serré les dents, j'avais le doigt sur le bouton pour voir jusqu'où cela allait. Bon, il est revenu, il s'est remis pratiquement face au vent, on marchait à 8 noeuds. On ne peut pas se permettre d'attendre que ça se stabilise. Mon expérience en mode vent avec Géant c'est ça. Mich est plus à l'aise que moi en mode vent. Il m'a dit que c'était un peu lent à la détente. Il m'a parlé des mêmes effets, peut-être pas aussi amples avec lui. C'est peut être un manque

³ Ancienne dénomination de la course autour du monde en équipage

de réactivité du pilote et d'autre part est ce que les infos transmises par les capteurs sont valides ? Avec le mât tourné, etc, on a très rarement eu une vitesse surface, car le speedo dans la dérive...un coup il marche, un coup il ne marche pas, avec le pilote tu ne peux pas te permettre d'avoir une chute de speedo brutale, tu chavires instantanément. Du coup on marchait avec le speedo GPS qui a plus d'amplitude. Il y a moyen de faire beaucoup mieux que ce que l'on avait.

GG : Sur la plupart des multis ce sont des NKE.

HD : NKE et Brooks.

GG : Comparaison ?

HD : Sur le Vendée Globe le Brooks était bien en mode compas et le NKE en mode vent ou inversement.

GG : Comment barres-tu ? Au près dans la pétrole pour commencer.

HD : De manière générale j'ai un fonctionnement qui est circulaire. Je regarde ce qui se passe sur le pont, sur la mer, les penons avant, arrière et je recommence.

GG : Sur le pont ?

HD : Les instruments, l'équipage ... Puis après la mer, la surface de la mer s'il y va y avoir des vagues ou pas etc. Dans le petit temps j'essaye de plutôt remplir ma voile. J'essaye d'avoir le bateau qui a une vitesse à peu près linéaire ou au moins la plus régulière possible, pas planter le bateau trop haut. Pour ça le pilote c'est bien.

GG : En mode vent ou compas ?

HD : Je n'ai qu'une expérience réduite du mode vent, mais il me semblerait plus logique de le mettre en mode vent. Surtout au près.

GG : Plutôt en vent réel pour qu'il y ait moins de variations ?

HD : Oui.

GG : S'il y a de la houle ?

HD : Si le bateau ne ralentit pas si c'est juste la voile qui flappe, je ne change pas de cap. J'essaye d'aller droit. Si les voiles reviennent trop et que le bateau ralentit j'essaye d'aller un peu plus bas mais toujours droit. Trajectoire assez linéaire. Si la houle est latérale et qu'à chaque fois tu te prends les voiles dans la gueule ça ne sert à rien d'abattre. Tu sais que si tu le fais ça va être très adonnant et donc tu vas relofer. Cela ne me dérange pas d'avoir les voiles qui reviennent si je sais que cela va repartir, si ça fait un compromis haut pourquoi pas.

GG : Clapot ?

HD : Il faut surtout travailler les voiles. Régler le bateau de manière à ce qu'il y ait moins de pression dans la barre (pour la garder droite). Si le bateau ne passe toujours pas malgré un bon réglage (car les voiles sont pourries par ex.) alors il faut donner de la barre un petit peu mais c'est vraiment le dernier recours.

GG : Et au niveau instruments ?

HD : Speedo, compas, angle du vent réel. Plus un répéteur [jumbo] pour des infos sur le vent : vitesse réel, angle de vent apparent. Plus le pupitre du pilote : tension de batterie, baromètre, ça c'était vachement bien.

GG : Qu'est ce qu'on regarde en priorité ?

HD : La vitesse, cap compas, angle de vent réel.

GG : Dès que la vitesse tombe tu ...

HD : Tu confirmes avec la vitesse du vent réel, il y a une molle ou alors je suis à la rue ou une vague.

GG : Maintenant vent établi au près, tu barres de la même manière ?

HD : Non moi j'ai tendance à pointer, mettre le nez dedans et à caper un peu. Plutôt bordé et avec une barre ferme. Un petit peu ardent, pas trop pour ne pas freiner avec la pelle [le safran]. C'est ce que je fais quand je ne connais pas le bateau. J'ai fait beaucoup de classe 8 et là je navigais neutre, pareil en dériveur [ne pas tirer sur la barre].

GG : Au niveau sensations, si tu as une petite rise et que le bateau se met à gîter, tu vas l'accompagner ?

HD : Oui. C'est pour cela que j'ai tendance à caper car je ne choque pas, je mets du temps à choquer. Ou alors j'adapte au pataras.

GG : Inversement si le bateau se met à plat tu as tendance à abattre ?

HD : Oui.

GG : En gros tu laisses aller le bateau où il veut en le bridant ?

HD : C'est ça. En essayant d'amortir à la barre et en accompagnant aux réglages. Dans une molle je choquerais du pataras avant d'abattre.

GG : Et dans la brise ?

HD : C'est un problème de stabilité, si tu donnes trop d'amplitude, trop d'angle, tu peux vraiment perdre beaucoup de terrain. Parce que tu ralentis ou tu dérives. Encore pareil, on va travailler beaucoup les voiles pour que le bateau soit le plus neutre possible et surtout à plat, avec des voiles vrillées et le bateau légèrement neutre. Sous pilote je veux que le bateau marche pareil, je vais le régler pour qu'il aille pareil.

GG : Au niveau sensations pareil, en cas de gîte tu le laisses aller s'en trop ?

HD : Ouais c'est ça, en gardant de la fermeté dans la barre pour garder le contrôle de la giration si tu veux.

GG : Et dans le clapot ?

HD : Non, dans le genre passage de raz là je mayonnaise, je place le bateau là où je veux, je joue beaucoup sur la barre, mais dans la brise.

GG : Pour passer une vague isolée tu vas accélérer pour aider à passer ?

HD : Si c'est une vague normale où je sais que le bateau ne va pas casser dedans, oui je vais accélérer.

GG : Cela ne dépend pas de la direction de la vague ? Si tu es perpendiculaire le bateau risque de tomber après.

HD : Oui mais si tu ralentis avant et qu'il tape alors là tu as tout perdu. Mais si tu sais que le bateau va casser dedans, j'aurais plutôt tendance à ralentir avant pour éviter qu'il tombe d'arrière, pour ne pas perdre le contrôle du bateau.

GG : Naturellement tu as tendance à lofer en montant la vague car le vent apparent est moins pointu ...

HD : On lofe, on passe la vague, on tape un peu mais il ne faut pas que le bateau se couche.

GG : Maintenant sous spi grand largue, pétrole ?

HD : Si je pouvais, un pilote ...

GG : En vent réel ?

HD : Oui ou en compas.

GG : Le problème du compas c'est que tu es obligé d'être à la télécommande.

HD : Oui. J'aime bien avoir le compas car alors tu es vigilant sur la trajectoire. En mode vent dans le petit temps, par principe le vent est un petit peu merdeux, il y a de la houle ...

GG : Au portant tu auras tendance à plonger dans la vague puis lofer pour reprendre de la vitesse ?

HD : Oui. Après cela dépend ce que tu veux faire. Si tu souhaites descendre j'aurais tendance à prolonger le surf.

GG : Quels sont tes critères pour relancer ? Par exemple la nuit, sans voir la vague, tu vas jusqu'où dans le surf ?

HD : Je me suis assez souvent poser la question.

GG : Moi je fais beaucoup aux sensations de barre, au niveau pression.

HD : Oui il y a de cela mais aussi l'assiette. Plus la barre est dure, plus tu vas contrer pour l'assouplir. Pareil à l'abattée. En fait ces deux pics d'efforts sur la barre, il faut rester dedans pour être avec la barre la plus souple possible.

GG : L'assiette pour toi c'est ce que j'appelle des sensations de fesses ? Tu sens au niveau de l'assiette si le bateau gîte ou contre-gîte, si il pique du nez (plongée dans la vague) et les accélérations.

HD : Oui de toutes façons ça passe par les fesses.

GG : Y a-t-il des sensations de barre sur Géant ?

HD : Non pas grand chose cela devient très vite très dur à la barre.

GG : Tu fais beaucoup aux instruments sur Géant ?

HD : Oui tu es obligé ! Si tu n'as pas les répétiteurs sur les bras tu es mort. Tu en prends plein la gueule, tu es sous une protection plexi donc tu n'as pas la sensation du vent et tu marches à 30 noeuds. Tu n'as pas de visi., tu ne sais pas à quelle hauteur tu te situes sur l'eau. Aussi bien la coque centrale est hors de l'eau et tu ne t'en aperçois pas. Si tu n'as pas les compteurs qui te disent tu es à 35 noeuds...là il faut peut être ralentir. Tu es en dehors de l'angle par rapport aux réglages. Il faut un ris de plus ou changer. Tu as des sensations similaires aux monocoques au portant. Le problème c'est que tu doubles les vagues. Tu surfes ... tu plantes dans la vague de devant, tu la doubles. Ça c'est nouveau ! Quand tu plantes et que tu rattrappes la vague, c'est long il faut relancer mais pas trop haut sinon tu lèves. Puis après tu abats car le vent apparent refuse. De nuit c'est difficile. Dès fois il faut relancer car tu n'arrives pas à dépasser la vague, tu es à 15 noeuds, là dès que cela part tu te mets sur un patin, il y a 15 noeuds de vent, et là il faut absolument abattre sinon tu cabanes.

GG : On lit dans la presse que tu as failli mettre le bateau sur le toit sur une erreur de barre ?

HD : C'était ça. 15 noeuds de vent sous gennak. Le bateau accélère un peu, j'abats mais pas assez. La tendance rapide excessive se poursuit et je me dis je vais choquer un petit peu pour éviter de faire trop d'écart de route. On est parti à 25 noeuds sur un patin, au lieu d'abattre pour reprendre le contrôle du bateau, je me suis dit je vais choquer un peu devant. J'ai choquer du gennak mais le bateau ne redescend pas car je ne tire pas assez sur la barre. Je choque encore et le bateau devient ardent puisque je choque [plus de pression sur la GV]. J'ai de l'effort dans la barre et le bateau ne se redresse pas. Je choque encore 2 mètres. Tout était dans la GV et le bateau s'est mis à lofer, plus il ralentissait plus il lofait, autant il y avait de vent dans le gréement et la coque centrale ne redescendait pas. Je me suis retrouvé bout au vent sous gennak. Mich pensait que ça avait décroché [les safrans].

GG : Sur ce type de bateau quand tu commences à abattre et que tu es déjà sur une coque, il se cabre un peu plus avant de retomber ?

HD : Oui. Quand tu enclenches l'abattée il se lève un peu en se mettant sur l'étrave du flotteur et ceci d'autant plus que l'abattée est grande.

GG : Est-ce-qu'on barre de manière très différente quand il y a du petit temps ou du vent plus soutenu ?

HD : Je pense que c'est vachement différent et si tu ne te dis pas il faut que je change de mode, Eh ! il y a de la brise maintenant ! , si tu n'as pas fait le changement dans ta tête tu n'avances pas.

GG : Comment changes-tu de mode ?

HD : Non c'est assez brutal. Si je m'aperçois que j'ai les mêmes tendances qu'une heure avant... ta question c'est qu'est-ce qui fait que tu changes ? Quels repères ? La force du vent, le clapot. Brise mer plate c'est moins loin du petit temps.

GG : Par exemple petit temps tu as tendance à abattre pour remplir tes voiles, dans la brise à lofer pour dégonfler tes voiles. C'est un exemple typique d'action opposée sur la barre.

HD : Oui en multi il y a un angle, au portant dans la brise (départ Jacques Vabre), le vent était un petit peu sur l'arrière, je me suis dit pour ralentir il faudra abattre. Je l'ai fait une fois, j'ai essayé d'abattre dans une vague pour ralentir je me suis planté. On dit que le salut est dans l'aulofée jusqu'à ce que le vent soit à 90° (en apparent) au delà c'est dans l'abattée.

GG : Mich appelle cela être tricare ?

HD : Pour Mich être tricare c'est être mal. Sous gennak tu ne peux pas lofer donc tu descends, tu te retrouves vent arrière à 10 noeuds.

A4. Jean-Yves Le Déroff (1/02/2006)

Vice-champion du monde de Tornado en 1987.

Médaille d'or en Tornado au Jeux Olympiques de Séoul en 1988 avec Nicolas Hénard.

Entraîneur national à la Fédération Française de Voile.

GG : Quelles infos utilises-tu pour barrer ?

JY : L'électronique donne une aide supplémentaire mais ce n'est pas nécessaire, enfin pour moi habitué à la voile légère au Tornado par exemple. Le pilotage du bateau se fait sur des repères que l'on peut énumérer. Il y a une grande différence entre la voile légère et l'habitacle. En voile légère comme en voile olympique on n'a que le compas de route. Les indications sont déjà, quand les voiles sont bien réglées, le penon mais en fonction des formes des voiles, du volume et de leurs tolérances il y a une façon différente de barrer si le profil est tolérant ou pas. Donc la position des penons est importante, la vitesse sera optimale en fonction des penons. Cela s'apprend à l'entraînement par des sensations de vitesse et par comparaison entre deux bateaux. En sensation de savoir si le bateau est facile, il va vite ou peu. Le premier repère en visuel c'est le penon.

GG : En termes de sensations ?

JY : C'est compliqué, certainement des sensations kinesthésiques à la barre, du corps qui permet de dire le bateau glisse bien ou je n'ai pas de tension dans la barre ou le bateau est équilibré. C'est tout ces petites choses qui font qu'on peut aller aussi vite que le bateau d'à côté en étant facile à la barre comme des fois on va aussi vite avec un effort de concentration beaucoup plus important. Donc sensation dans la barre c'est un autre repère, donc les penons en visuel et la girouette.

GG : Donc le vent apparent ?

JY : Ouais. On peut naviguer sans mais pourquoi s'en priver alors que c'est une aide supplémentaire. Plus un bateau est rapide plus la girouette sera importante. Sur notre tornado c'était un penon sur

la martingale, c'était très précis surtout au portant. Les différences de direction de vent apparent sont assez importantes à cause des accélérations du bateau, c'était un des repères qui était essentiel en Tornado.

GG : Comment l'utilisais tu ?

JY : C'est une question de prise de repère donc d'angulation.

GG : Tu suis le vent apparent ?

JY : Oui il y a un angle à respecter pour que le bateau aille vite. Et ceci à toutes les allures.

GG : Ce vent apparent tu le vois aussi sur les penons ?

JY : Oui et non. Si tu supprimes la girouette tu peux être parfaitement réglé et te faire torcher par le bateau d'à côté, tu as un VMG qui n'est pas satisfaisant.

GG : Comment réagis-tu alors ?

JY : En voile légère un des meilleurs référent c'est le bateau d'à côté.

GG : Comment fais-tu si tu vas moins vite alors que tes penons sont biens ?

JY : Tu règles tes voiles, tu fais moins de cap ...

GG : Et la gîte ?

JY : L'assiette du bateau oui. Cela dépend du bateau.

GG : Plutôt en mono.

JY : En mono, on dit naviguer à plat mais en fait c'est plutôt avec une légère gîte en fonction des formes de carènes.

GG : Oui moins de surface mouillée et le bateau lofe naturellement.

JY : On peut avoir un bateau qui marche bien à plat mais il va être neutre, cela diminue les sensations à la barre. C'est plus tolérant à la barre quand on a plus de sensations.

GG : Et sur un habitable ?

JY : Il y a de l'inertie, les mouvements sont plus lents. En voile habitable le speedo est important et la notion de vitesse cible. Donc regarder son speedo ! Après le vent apparent en direct en regardant la girouette. Une girouette toute simple est beaucoup plus juste qu'une électronique. Il y a moins d'erreur. Sur habitable, si je n'ai pas d'électronique cela ne me gêne pas trop mis à part le speedomètre. Un bon barreur peut se débrouiller sans électronique. On retrouve les repères vent apparent, c'est-à-dire l'angle optimum pour aller vite au près ou au portant. C'est ça le repère essentiel.

GG : Et le TWD ?

JY : C'est plus une indication pour la tactique.

GG : Et la AWS ou la TWS ?

JY : En fonction de la force du vent on n'aura pas un vent apparent identique. Pour bien barrer je pense que tout le monde a les mêmes repères après c'est une question de bien connaître son bateau, bien connaître les angles de remontée, de descente.

GG : Quelles sont les sensations qui permettent d'anticiper ?

JY : C'est beaucoup d'observation plutôt.

GG : Par exemple la nuit sous spi dans la houle on arrive à bien barrer. Pour Gildas Morvan c'est l'assiette du bateau qui permet cela.

JY : Je ne sais pas [pas convaincu]. Le départ au surf, l'exploitation des petites vagues est dépendante de la vitesse du bateau au départ. Si tu abats quand la vague arrive et que le bateau ne part pas en surf tu perds beaucoup, alors que lofer pouvait peut-être suffire pour atteindre cette vitesse et partir au surf. Les deux solutions sont possibles et dépendent de l'appréciation du barreur. La différence entre un bon et un mauvais barreur se fait sur des petits trucs comme cela. Sur un habitable ces différences sont encore moins marquées il faut de longues distances pour les remarquer. En quillard j'ai très peu d'expérience sous pilote.

GG : Sinon un petit scénario : au portant ta vitesse tombe...

JY : Première chose : orientation par rapport au vent apparent. Au portant comme au près : est-ce-que je suis trop haut ou trop bas ? Au près la gîte est importante. Tu peux barrer dans le vent qu'à la gîte, sans regarder les penons.

GG : C'est ce que l'on fait la nuit.

JY : Oui. Ensuite au portant, vent apparent, ou le vent mollit éventuellement, dans les deux cas on relance, on lofe. Cela dépend aussi de la tactique.

GG : Par exemple en multi 60' tu n'as aucune sensation d'après Hugues Destremau. Sans les instruments tu es mort. Apparemment il y aurait une manière de barrer rien qu'aux instruments.

JY : Moi je n'ai pas d'expérience là dessus.

GG : Et les modes ? Penses-tu qu'il y a des changements de mode ?

JY : Moi je crois que cela dépend des barreaux. Il y a des barreaux qui privilégient le cap au près plutôt que la vitesse par petit ou par gros temps. Il y a un style de pilotage.

GG : Avec d'autres coureurs on a conclu pour deux grands modes : petit temps ou brise. En vois-tu d'autres ? L'état de la mer par exemple ?

JY : C'est clair que l'orientation par rapport au vent apparent va changer en fonction de l'état de la mer. Plus abattu par clapot. Par houle c'est différent, c'est une conduite ample dans la trajectoire. On sait que lorsqu'on sera en haut de la vague le vent sera plus fort et on prendra un petit coup de gîte.

GG : Y a t'il un mode jour, un mode nuit.

JY : Je pense que la nuit, parce qu'on a moins de sensations, on a intérêt à prendre les trajectoires les plus tolérantes. Dans le petit temps on privilégie la vitesse, dans la piaule l'assiette.

GG : Utilises tu tes oreilles, ton visage ?

JY : Oui sans doute pour la force du vent et pour la direction non peut être pas. De nuit dans le petit temps là les instruments sont utiles. De nuit quand tu es perdu tu regardes les instruments. Et on regarde en premier le vent apparent.

A.5. Gaël Le Cléach (8/02/2006)

Vainqueur de la Transat Jacques Vabre avec Roland Jourdain en 2001.

Vainqueur de la Route du nouveau monde en 2003.

Préparateur de SILL et VEOLIA jusqu'en 2006.

Préparateur de BRITAIR depuis 2006.

GG : Comment utilises-tu le pilote sur SILL ?

GLC : Mode vent réel, un peu comme les multis parce que le bateau il va vachement vite.

GG : Ce que je ne comprends pas c'est que le vent réel est relativement faux, car il dépend de la vitesse, du AWA et du AWD, sans compter le courant, la dérive ...

GLC : Oui mais on n'a que ça.

GG : Moi j'ai le sentiment que quand tu barres ce qui est important c'est le vent apparent.

GLC : Oui mais quand tu accélères, ton vent apparent il adonne, il refuse ...

GG : Essayes-tu de garder le même angle par rapport au vent apparent en limitant pour ne pas faire trop de lacets ?

GLC : Au près oui mais pas au portant. En fait sur le bateau on utilise pratiquement tout le temps le vent réel, on affiche que le vent réel sur le bateau, pour tout ce qui est range de voile, changement de voile.

GG : Oui mais c'est surtout la vitesse du vent réel.

GLC : Oui et pour le choix des voiles c'est l'angle du vent réel également.

GG : Oui mais quand tu barres ...

GLC : Tu barres pas sur ces bateaux là tu fais que du pilote.

GG : Sous pilote tu seras plutôt en mode vent apparent ou en mode vent réel ?

GLC : Tu fais de l'apparent au près jusqu'à 70 du vent réel et après en réel. En compas pour tout ce qui est travers, reaching jusqu'à 100 110 du vent car tu vas tellement vite que le vent réel n'est pas assez précis. Et après en réel. Le mode vent réel ça marche bien par mer plate, dès qu'il y a de la mer ça ne marche plus. Le bateau zigzague, il relofe trop, pour essayer de contrer ça on avait développé avec NKE un dérivé du vent réel, le mode relance.

GG : Si tu dis au bateau va à 60 du vent réel, normalement le bateau va tout droit ?

GLC : Non le vent réel n'est pas très stable, il est recalculé en permanence.

GG : Normalement le vrai vent réel ne bouge pas ou peu.

GLC : Si les capteurs sont bons tu veux dire ...

GG : Oui et là ce n'est pas le cas ?

GLC : Aujourd'hui le bateau il zigzague de + ou - 10 degrés de chaque côté, il va accélérer quand il va lofer et ça va amplifier.

GG : Et ceci est dû à l'imperfection des capteurs ?

GLC : On se dit que c'est ça. Tous les réglages de pilote que l'on a pu essayer, toutes les combinaisons, le mode relance qu'on a développé pour contrer ça, c'est-à-dire quand le vent réel augmentait on donnait une consigne d'abattée et inversement quand le vent réel diminuait on lui disait de relofer. Malgré tout ça, ça aide un peu mais ce n'est pas encore ça.

GG : Le mode relance c'est suivre le vent réel ?

GLC : Oui en force, si ça fraichit tu abats, au portant.

GG : Et au près c'est l'inverse ?

GLC : Oui, c'est justement pour compenser ce problème de zigzag en vent réel.

GG : Et en vent apparent c'est pire, il zigzague encore plus ?

GLC : Oui.

GG : Paul Fraisse [NKE] me disait que si le vent réel est bon alors ce mode relance marchera.

GLC : C'est ce qu'on dit. Jusqu'à présent on a travaillé sur les capteurs qui faisaient le calcul du vent réel, speedo et girouette. En faisant des aériens plus raides plus dégagés de la grand'voile, des speedo qui ne partent pas en vrille quand le bateau part en vrac, aujourd'hui on arrive en butée sur cela les capteurs sont maintenant bons.

GG : Et si on met la girouette sur le balcon avant ou proche du centre de gravité ?

GLC : Le haut c'est protégé ...

GG : Oui mais cela peut être une idée ...

GLC : On avait essayé dans mettre derrière sur un mâtereau ...

GG : Oui mais là c'est vachement perturbé...

GLC : C'est hyper perturbé avec la grand-voile bordée dans l'axe.

GG : Il y a un capteur qui donne l'angulation du mât ?

GLC : Oui. Mais il faut aussi savoir si le mât pompe ou vrille. Sous spi de tête il y a 3 à 4 degrés de vrillage.

GLC : Sur la Jacques-Vabre ils ont eu du vent fort et ils n'arrivaient pas à mettre le pilote. Le pilote dans la mer ne suit pas. Il a trop de retard. Quand le bateau bute dans la vague, il ne va pas lofer pour soulager.

GG : L'assiette est importante pour barrer ?

GLC : Oui mais sur un 60' tu n'as pas beaucoup de sensations. Mais la gîte on l'a sent bien car c'est un bateau large.

GG : Qu'est ce que tu lui reproches au pilote actuellement ?

GLC : Dès qu'il y a de la mer tu es obligé d'augmenter énormément ton gain et donc ta consommation. Plus il y a de la mer plus c'est le bordel. En vent apparent au près, on revient un peu au souci qu'avait eu Vincent [Riou] à l'arrivée du Vendée, c'est que le bateau s'arrête de temps en temps si ton angle de vent apparent est trop proche de ton VMG il va s'arrêter. Il va aller trop haut et il ne relance pas. Ça c'est le mode vent apparent, le mode compas marche bien, c'est qu'un automate là. En vent apparent tu es obligé de naviguer un peu dessous de l'optimum. Et le vent réel le problème aujourd'hui c'est la mer.

GG : Modes dans la manière de barrer ?

GLC : Dans le mode relance on a une bascule, le mode s'inverse entre le portant et le près [au lieu d'abattre on lofe et vice-versa].

GG : Oui mais pour moi ce n'est pas un changement de mode. Cela peut dépendre de la mer, du vent ou même de la nuit. La nuit comme tu as moins de sensations tu vas privilégier plutôt la vitesse au détriment du cap pour éviter de planter le bateau.

GLC : C'est plus la vitesse cible que tu recherches.

GG : Vous utilisez beaucoup les penons sur ces bateaux là ?

GLC : Si, si au près même pour régler les voiles d'avant [gennak, voiles d'avant, GV]. Sinon on a des bandes de visu phosphorescentes pour mieux voir. Combien de modes ? L'idéal c'est qu'il y en ait plus qu'un.

GG : Oui mais combien estimes-tu qu'il en existe réellement. Parfois as-tu le sentiment d'être obligé de te concentrer, d'être vigilant sur ta manière de barrer parce qu'il ne faut pas qu'elle soit habituelle ?

GLC : Le convoyage retour du bateau du Brésil, j'ai essayé de tout faire avec le mode relance, pour voir si il était applicable à toutes les allures. En fait on a eu presque que du près. Ce que tu peux changer dans le mode relance c'est ton gain d'abattée ou de lof. Tu dis pour un noeud de vent en plus j'abats de 2, 4, 5 degrés. Ce rapport là change, si tu as beaucoup de vent il va diminuer. Par contre si tu as du petit temps tu vas amplifier le mouvement. Tu peux dire aussi que ce gain n'est pas symétrique dans l'abattée ou dans le lof. Tu peux lui dire dans la brise je ne veux surtout pas que tu lofes ou très peu par contre je veux bien que tu abattes à bloc. Par contre dans le petit temps tu peux lui dire je veux bien que tu lofes parce que cela va me relancer mais surtout pas abattre parce que là ça va l'arrêter. Pour moi l'idéal serait d'avoir un seul mode comme cela et qui en fonction des conditions s'adapte tout seul.

GG : Moi je parle de ta manière de barrer.

GLC : En général plus t'as du vent plus t'as de la mer, en tout cas au large, et moins tu vas serrer le vent au près et moins tu vas lofer au portant car c'est des risques de partir en vrac.

GG : Et au niveau instruments quand tu barres ?

GLC : Le speedo.

GG : C'est le plus important, vitesse cible ?

GLC : Il y en a tellement qu'il faut faire la part des choses. On a des vitesses cibles, des rendements sur polaire.

GG : Ta vitesse cible tu la connais par expérience ?

GLC : Non elles sont fournies par les instruments.

GG : Elles sont théoriques, sont-elles pondérées par l'expérience ?

GLC : C'est difficile, car ce type de bateau est optimisé chaque saison et est de plus en plus performant, ta vitesse cible évolue sans cesse, tu es toujours au-dessus de ta vitesse cible affichée !

GG : Donc tu as la vitesse ...

GLC : Au près tu as l'angle de vent apparent, le pilote il fonctionne au vent apparent donc ça reste.

GG : Quand on navigue au près on navigue aux penons, ça c'est du vent apparent.

GLC : Oui.

GG : Vitesse du vent réel ?

GLC : Oui. Si t'es pas à ta vitesse cible soit c'est toi qui ne barre pas bien [trop lofé par exemple], soit t'es mal réglé.

GG : Pour toi les instruments les plus importants c'est vitesse du bateau et angle du vent apparent ?

GLC : Au près oui. Puis TWS en 3.

GG : Et au portant ?

GLC : C'est ton angle de vent réel. Parce que tu as un paquet de voiles d'avant.

GG : Mais une fois que tu as choisi ta voile, pour barrer ? C'est vraiment le vent réel ?

GLC : Oui angle de vent réel et speedo.

GG : Tu vas vraiment barrer aux instruments même de jour ?

GLC : Oui.

GG : Et des sensations en termes d'assiette et de barre ?

GLC : Non. Le bateau est assez mou, très équilibré au près. Au portant tu as des sensations dans la barre. Tu te sers des instruments énormément et sous spi tu regardes tes voiles (même sous spi tu regardes ton guindant). Ça plus des sensations à la barre et des sensations de gîte. Tu sens si tu lofes que tu commences à gîter que tu es un peu trop haut et tu commences à abattre. T'es obligé car le vent réel est un peu lent.

GG : Et le vent apparent n'est pas utilisable ?

GLC : On ne s'en sert pas.

GG : Pourquoi ?

GLC : Je ne sais pas. On a fait des essais ...

GG : Apparemment sous pilote cela fait trop de lacets. Mais quand tu barres toi ?

GLC : Au portant je pense que le truc il doit être trop volage. Le vent réel c'est dès que tu manœuvres qu'il est vachement lent. Si tu fais une abattée ou un virement de bord ton vent réel c'est n'importe quoi. Ce qui est intéressant c'est d'avoir un vent réel qui soit tout le temps bon, pour les changements de voile.

A6. Philippe Legros (9/02/2006)

Double champion de France de class 8.

Champion de France de match-racing en 2005.

Vainqueur du Tour des Iles britanniques avec Sill et Veolia en 2005.

4^{ième} de la Route du Rhum 2006 en 40 pieds.

GG : Qu'utilises-tu comme instruments pour barrer ?

PL : Cela dépend du bateau. Plus tu en as mieux c'est. Mon expérience où tu as le plus d'info c'est le 60 pieds.

GG : En premier ?

PL : C'est dur de hiérarchiser car tout va ensemble.

GG : Mais par exemple si tu fais du près.

PL : Si je fais du près je dirais vitesse. On barre pas mal à la vitesse cible. En Mumm par exemple on a les polaires affichées dans le cockpit, on regarde la force du vent réel et on voit quelle est la vitesse cible. Après on fait de l'escalier, on atteint la vitesse cible on cape tout doucement de 2 ou 3 degrés, on voit que la vitesse tombe on relance on essaye de réduire au minimum l'écart autour de la vitesse cible. Cela se passe en coordination avec le régleur de grand-voile en général qui annonce la vitesse cible et qui dit "ok vitesse cible atteinte on peut caper". Hop, on cape doucement attention vitesse chute on relance

GG : Et par rapport aux penons ? S'ils décrochent déjà tu ne vas pas caper ?

PL : Non. Après, les penons c'est plus une info que tu prends au départ. Tu te règles avant la régatée. Ce qui te fera ne pas décrocher si tu es déjà à ta vitesse cible, c'est la gîte en fait. Dès que tu as lofé un petit peu trop ton bateau tu vas le sentir venir sur toi. La gîte est une très très grosse information. On peut barrer les yeux fermés on barre à gîte constante.

GG : Mais avec du vent ?

PL : Un peu de vent sinon c'est le safran qui parle. Sur des petits bateaux genre Melges 24 les safrans donnent beaucoup d'informations.

GG : Comment gères-tu cette information de safran ? Tu essayes de garder un peu de pression sur ton safran ?

PL : Oui un peu voire neutre. En Melges 24, on règle le bateau, on pose le stick sur le caisson, on lâche la barre et on borde notre grand'voile jusqu'à ce que notre bateau aille droit. L'idée c'est de chercher un safran très neutre.

GG : Et en termes de sensations ?

PL : Dès que tu as une petite sensation qui apparaît, tu la sens.

GG : Quand tu as un peu de pression...

PL : Si tu es au près tu capes, au reaching tu règles tes voiles. Au près tu chermeras un bateau très neutre, pour du médium. Dans le petit temps tu vas chercher à avoir un bateau ardent pour mieux le sentir. Par contre si tu es au reaching, tu vas admettre d'avoir un peu plus d'angle de barre parce que tu auras besoin de placer ton étrave dans les vagues ou autre chose. Donc tu vas réguler un peu en trajectoire et un peu dans la grand'voile.

GG : Dans quel sens dans le petit temps le safran te parle ?

PL : Dans le petit temps tu cherches de la puissance, donc cela se traduit par un bateau un petit peu ardent donc tu cherches à avoir un bateau qui lofe un tout petit peu. Un tout petit peu de pression qui fait que ta barre n'est jamais en dessous du zéro. Pour cela tu mets aussi tout le monde sous le vent pour faire gîter ton bateau pour que l'effet de carène fasse lofer ton bateau et mette un peu de pression dans ton safran. La gîte donne un peu cette sensation là tout bêtement parce que tu es obligé de retenir ton bateau qui a tendance à lofer.

GG : Est-ce que tu sens l'angle optimal dans le safran ?

PL : Non je pense que c'est une compilation d'informations. Tu ne peux pas en détacher l'une de l'autre. Si tu n'en prends qu'une tu peux faire complètement fausse route, tu peux te retrouver au portant avec un petit peu de pression dans le safran si tu n'as aucun repère tu peux avoir la même pression au portant que au près. Tu es obligé de rajouter d'autres informations. Par exemple la gîte te dira si tu es au près ou si tu es au portant.

GG : Et l'AWA ?

PL : Moi j'utilises très peu ça. C'est à mon avis un défaut.

GG : Mais tu as besoin de ton VMG aussi. Tu peux être à ta vitesse cible mais trop abattu.

PL : Tu fais cela en rapport avec les autres informations. Quelque part pas vraiment car si tu es trop abattu tu iras plus vite que ta vitesse cible. Tu seras vite corrigé et tu mets cela en rapport avec la force de vent. Et pour utiliser une info d'angle tu utilises le vent réel. L'info d'angle de vent réel on l'utilise aussi pour nos lay-lines. Cela me positionne par rapport à mon moment de virement. Si j'ai trois infos à afficher et bien ce sera vitesse, force du vent réel et angle du vent réel.

GG : Le pb c'est que le vent réel est pas toujours terrible.

PL : C'est pour cela que si on hiérarchise c'est en premier la vitesse. Et après la gîte, les penons. Cela permet de ne pas faire d'erreur. J'utilise le vent apparent plutôt la nuit, et au près. Au portant vent réel. La polaire te dira 10 noeuds de vent il faut naviguer à 160 du réel mais c'est une moyenne tu iras à 165 des fois 150. Par contre ta vitesse cible tu vas raisonner de façon beaucoup plus précise autour d'elle.

GG : Et le compas ?

PL : Le compas visuellement n'est pas assez précis. Après on l'utilise au reaching pour faire de la route. Pour aller droit. Mais même là on passera très vite à l'info cap fond au GPS.

GG : Et même sur un près océanique sur SILL ?

PL : Pareil vitesse cible, car dans le cadre d'un près océanique au lieu d'être à 9.4 on sera plus à 9.9 ou 10.1. C'est plus avec cela que l'on raisonne.

GG : Et de nuit ?

PL : Aux instruments, à l'assiette et aux penons avec les projecteurs de pont, pression sur le safran. Mais les bi-safrans sont très neutres et on ne sait pas quand le bateau va décrocher. Moins de sensations sur 60 pieds que sur un Mumm ou un Melges. Une des infos que l'on utilise aussi c'est l'angle de safran.

GG : Affichage pilote.

PL : Oui. Je l'utilise beaucoup pour régler le bateau quand on est sous pilote, cela permet de te dire si tu es trop chargé ou non. C'est une traduction de la pression exercée sur les safrans.

GG : Comment barres-tu de nuit sur SILL.

PL : Tu regardes ta vitesse, vent réel.

GG : Tu essayes de rester dans une fourchette proche de la vitesse cible et pas trop ...

PL : De pas trop zigzaguer, ça c'est une contrainte qu'on s'impose aussi pour pas faire de route.

GG : Pas trop zigzaguer cela dépend de la force du vent ?

PL : Cela dépend de la force du vent et de l'allure dans laquelle tu es. Par exemple au près si tu zigzagues ce n'est pas négatif, cela peut vouloir dire qu'il y a des moments tu grimpes bien. Alors qu'au reaching c'est vraiment de la perte sèche. On fait une moyenne entre l'augmentation de vitesse au reaching et l'augmentation de la route. La tendance générale attendue au niveau du vent changera la façon de barrer. Soit on attend du refus on hésitera pas à relancer un peu plus bas.

GG : Et ce qui te permet d'anticiper ?

PL : C'est l'assiette. On a l'impression que cette info arrive toujours un peu avant l'électronique. Souvent l'électronique on la prend après pour confirmer les sensations. Au portant sur SILL on va se fixer des limites à ne pas dépasser. Par exemple à 145 du réel si à 135 il commence à partir on se fixe des butées, et c'est à partir des sensations qu'on trouve ces butées. Quand cela devient chaud tu ne peux plus regarder devant, tu ne vois plus les instruments et tu ne regardes que la mer par exemple au portant. Au bout d'un moment tu abandonnes les instruments tu y reviens de temps en temps pour être sûr que tu es toujours dans les cordes.

GG : Sill sans les instruments et de nuit ?

PL : Là tu peux perdre beaucoup. Les instruments sont essentiels. Si tu as du petit temps et que le bateau ne dit vraiment rien tu peux faire n'importe quoi.

GG : Dans ce cas vous mettez le pilote ?

PL : Non c'est un à la barre, un au réglage, et penons éclairés. A deux c'est mieux qu'un pilote. En match-racing quand les penons ne portent même pas, de temps en temps on choque le foc pour savoir s'il dévente tout de suite ou plus tard. Dans le tout petit temps les infos de la girouette sont complètement fausses, surtout sur un mât de 28 ou 30 mètres. C'est souvent le cas lors de l'établissement de la brise. Dans le tout petit temps c'est des informations visuelles, tu n'as plus de gîte et pas de pression sur le safran.

GG : Quand est-ce que le pilote n'est pas bon ?

PL : Dès que tu as des histoires de relance. Au près on barre mieux qu'un pilote. Dès qu'il faut aller droit je trouve que le pilote barre bien.

GG : S'il y a du clapot ?

PL : Le pilote barre beaucoup moins bien. C'est l'idée que tu as besoin de placer l'étrave et une fois que tu as fait l'erreur et que tu as tapé et bien tu as besoin de relancer. Là tu as l'impression d'être barré par un aveugle qui ne voit pas la mer.

GG : Mais est-ce qu'il va trop près du vent ?

PL : Non, non quand tu le mets vent apparent ou réel au près plutôt apparent, ça barre très bien. Ca barre super bien au reaching quand il y a beaucoup de vent parce qu'il va droit.

GG : Tu n'as pas de problème lié aux accélérations ?

PL : Au reaching tu as des vitesses très régulières, tu planes tout le temps, du coup tu n'as pas de grandes différences. Maintenant au portant dans la houle, le pilote pareil ne barre pas bien. Il rate les vagues, il n'est pas en phase avec la houle. En 60 pieds si tu relances 3 degrés trop haut tu vas le sentir vite fait, ça part très fort. Si tu abats trop comme tu es quillé au vent tu vas très vite être en contre-gîte, l'effet de carène et le centre de poussée des voiles vont accentuer cela. Au portant dans la houle on n'est pas très confort avec le pilote. En plus on est matossé à bloc et l'efficacité des safrans sur Sill est très améliorable. Du coup on barre tout le temps. Les seuls moments où on ne barre pas c'est reaching quand on ne peut pas être sur le pont.

GG : Modes de barre ? Avec Hugues on en avait dégagé 2 : petit temps et brise avec 2 actions de barre opposées au près.

PL [pas convaincu] : Tu as en commun que pour relancer il faut abattre et dès que tu vas trop vite tu lofes. Maintenant les marges ne sont pas les mêmes. Dans le petit temps tu règles très facilement. Tu vas coordonner énormément réglages/barre car en plus les variations de vent sont lentes dans le petit temps. Dans le petit temps si cela adonne on ne va pas pousser tout de suite, on va d'abord choquer la voile pour qu'elle ne décroche surtout pas, le bateau va accélérer et on va relofer progressivement en bordant progressivement. Dès que tu as du vent tu vas réguler beaucoup plus avec la barre. On va moins compenser les variations d'angle de vent par les réglages que par la barre. Surtout au près.

GG : Donc pas vraiment de changement de mode.

PL : C'est plus une différence de procédure, de hiérarchisation des paramètres, tu passes d'abord par le réglage des voiles ou d'abord par la modification de trajectoire. L'échelle de temps varie un peu. La façon de barrer ne change pas vraiment. Une notion que tu intègres dans le gros temps et pas dans le petit temps c'est la sécurité du bateau. Sur un bateau technologique et fragile tu t'interdis le départ au lof ou à l'abattée car alors forcément il y a casse ce qui n'est pas le cas sur un Mumm 30.

Annexe B

B1. Introduction

Dans cette annexe nous présentons le travail effectué en vue du portage de notre pilote sur un voilier de course réel. Equiper un bateau est très coûteux et nous tenons à remercier la société **nke** pour nous avoir fourni une partie du matériel ainsi que l'écurie de course au large **Mer agitée** dirigée par Michel Desjoyeaux pour nous avoir prêté leurs locaux, leurs équipements et leur connaissance des jauges de contrainte. Positionner, fixer et câbler l'ensemble du système prend beaucoup de temps car les contraintes sont celles d'un milieu très agressif (humidité, sel, mouvements violents ...) et sa fiabilité est essentielle pour garantir sécurité et performance au skipper. Une grosse partie de l'équipement consiste en capteurs qu'il s'agit d'étalonner. Pour ce faire, quelques sorties en mer sont nécessaires dans des conditions délicates à obtenir (mer plate et vent médium régulier et loin de grandes masses magnétiques). Rien que cette phase prend un temps considérable dans les équipes de course au large car les jours où toutes les conditions sont réunies sont relativement rares et l'opération occupe au moins deux personnes car il est difficile de manœuvrer son bateau et de s'occuper de son électronique en même temps. Ensuite tous les matériels d'origines très diverses doivent pouvoir communiquer entre eux et cela nécessite de définir un protocole. Dans le cadre de cette thèse nous avons choisi de porter notre application sur le PC du bord et d'utiliser le protocole **SailNet** pour communiquer avec le **processeurHR** de **nke**. Malheureusement des problèmes temps réel sont apparus (retards lors de la transmission de commandes) qui demandaient de se plonger dans le code propriétaire **nke**, lui-même écrit par différentes personnes dont certaines avaient quitté la société ... Le temps nous manquant, nous avons fait le choix de reporter l'implémentation réelle de notre application à un moment plus propice à sa réalisation.

B2. Le bateau

Kikibigoudi est un *First Class Figaro Bénéteau* de 9m14 de long et 3m25 de large. Dessiné en 1989 par les architectes Jean-marie Finot et Jean Berret pour la course en Solitaire du Figaro, il est doté de ballasts et bénéficie d'une grande surface de voilure ($58m^2$) pour un poids raisonnable ($2700kg$). Cela reste un bateau relativement lourd mais qui grâce à ces fonds plats est capable de surfer assez facilement. Son point faible est sa *lourdeur* de barre. Son unique safran elliptique suspendu n'est pratiquement pas compensé et de grande surface ce qui rend la barre dure surtout à haute vitesse (au-delà de 13 à 14 noeuds). Les départs à l'abattée sous spi sont particulièrement violents et presque impossibles à prévenir et à contrecarrer.



Kikibigoudi le First Class Figaro Bénéteau laboratoire.

A cause de la largeur relativement importante du bateau, la barre est une *raquette* directement solidarisée à la tête de mèche du safran qui traverse la coque et le fond de cockpit.



La raquette permet de compenser la relative largeur du bateau. Un *stick* (rallonge de barre télescopique ici) permet d'autre part au skipper de se positionner au rappel tout en barrant. On remarquera les deux taquets coinçeurs permettant d'amarrer la barre.

Le *First Class Figaro Bénéteau* a été le monotype de la Solitaire du Figaro de 1990 à 2002 et les coureurs ont passé beaucoup de temps à paramétrer leurs pilotes pour en tirer le meilleur parti. Ce bateau très sensible et très exigeant à la barre constitue donc une excellente plate-forme de test.

B3. Capteurs et actionneur

La plupart des capteurs installés sur *Kikibigoudi* sont commercialisés par la société **nke** leader sur le marché français de l'électronique pour les voiliers de compétition.

B3.1. Girouette/Anémomètre

La détermination du vecteur vent nécessite deux capteurs. La force du vent est déterminée par un anémomètre et sa direction par une girouette. Les données obtenues sont donc relatives au bateau, il s'agit du AWS et du AWA aux points où se situent les capteurs.

Le matériel installé est l'anémo-girouette HR pale carbone fabriqué par nke qui offre une précision en mesure d'angle inférieure au degré et de l'ordre de 1 % pour la linéarité de mesure de vitesse. En effet, la vitesse de rotation des godets de l'anémomètre n'est pas proportionnelle à la vitesse du vent car, quand ce dernier augmente, l'écoulement de l'air perturbé par les godets devient turbulent. La girouette offre une lecture de l'angle de vent sur 360 ° et l'anémomètre démarre à des vitesses inférieures à 2 noeuds. Les informations sont délivrées à 25Hz sur le bus.



La girouette/anémomètre installée en tête de mât. Pour les anémomètres, la technologie à trois godets est la plus courante. Girouette et étoile à godets sont montées sur roulement, la vitesse du vent étant déduite du nombre de tours effectués dans un intervalle de temps fixé.

La girouette nécessite un étalonnage pour corriger le décalage dû au montage mécanique en tête de mât. Il s'effectue par l'introduction d'un offset calculé à partir des données d'angle de vent apparent obtenues en tirant des bords de près.

B3.2. Speedomètre

Le Capteur Ultrasonic Speedo fabriqué par la société nke utilise les ultrasons pour mesurer la vitesse des particules d'eau au delà de la couche limite (entre 10 et 20 cm de la coque). La vitesse est délivrée au centième de noeud avec une précision de l'ordre de 1% et à une fréquence de 25Hz. Sa plage d'utilisation s'étend de 0.3 noeuds à 50 noeuds.



L'ultrasonic de la société nke est « flush » et ne présente donc aucune discontinuité à la surface de la coque.

Sur Kikibigoudi, le speedomètre est placé dans l'axe du bateau à l'avant de la quille. Il est ainsi toujours dans l'eau quelque soit l'amure. La grande largeur des 60 pieds IMOCA nécessite souvent de

poser deux speedomètres placés symétriquement par rapport à l'axe longitudinal du bateau. La vitesse fournie est alors une combinaison des deux. Sur un trimaran ORMA, il y a souvent trois speedomètres, un sur la coque centrale et les deux autres en bout de foil. La donnée délivrée doit tenir compte des brusques sorties d'eau relativement courantes sur ces bateaux.

B3.3. Angle de barre

Le pilote envoie une commande d'angle de barre au vérin. Encore faut-il s'assurer que cet angle soit bien atteint mécaniquement. C'est le rôle du capteur d'angle de barre. Celui installé sur Kikibigoudi est distribué par nke. Son corps est monté sur un point fixe du bateau et son bras articulé (un compas) est solidarisé au bras de levier de la mâchoire du pilote qui enserme la mèche. Ce capteur est initialisé par l'utilisateur en plaçant la barre en position milieu, ensuite, le pilote récupère également les angles de butée babord et tribord pour éviter d'amener le vérin en bout de course (mécaniquement risqué). Il délivre une information au degré près.



Les capteurs d'angle de barre sont de simples potentiomètres ou mieux des capteurs magnétiques à effet Hall.

B3.4. Compas fluxgate

Le compas fluxgate (un magnétomètre) permet de fournir la mesure du cap au pilote. Il n'est précis qu'à un degré près et supporte mal les accélérations à cause des inerties et amortissements liés au cardan qui maintient une partie du système dans le plan horizontal. Il est donc moins précis que la centrale inertielle présentée dans la suite et n'est monté qu'en secours en cas de panne de cette dernière.



Le compas fluxgate pour être précis doit être monté loin des masses métalliques telles que moteur, ancre ou chaînes. Il est intéressant de le monter le plus près possible du centre de gravité du bateau afin qu'il soit moins exposé aux mouvements du bateau.

Le compas doit être positionné loin de masses métalliques qui pourraient le perturber. Malgré cette précaution, il est souvent nécessaire de procéder à un réglage d'offset puis à une opération d'auto compensation qui consiste à effectuer un tour complet à vitesse constante (les corrections sont alors tabulés de dix degrés en dix degrés).

B3.5. Centrale inertielle

La centrale inertielle est une XSens reconditionnée par nke. Le boîtier contient en fait trois capteurs : un magnétomètre, un accéléromètre et un giromètre. Elle délivre 12 données qui sont le champ magnétique sur les trois axes (repère local lié au boîtier), les accélérations sur chacun des axes, les angles d'Euler (gîte, assiette, cap) ainsi que les vitesses de rotation autour des trois axes. Les angles sont calculés avec une presque totale indépendance aux accélérations dans la limite des capteurs en giration (moins de 150 degrés par seconde) et en accélération (moins de 5g). Le cap vrai (géographique) est calculé à partir du modèle magnétique terrestre établi par le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). La centrale se monte avec les mêmes précautions qu'un compas c'est-à-dire loin de masses métalliques et de câbles véhiculant du courant et proche du centre de gravité du bateau.



La centrale inertielle fait la taille d'une boîte d'allumette et pèse 270g. Elle délivre ses informations à 25Hz.

La centrale inertielle nécessite une opération d'auto compensation suivie d'un réglage d'offset sur les trois angles d'Euler.

B3.6. GPS

Le GPS (Global Positioning System) est de marque Furuno. Il peut éventuellement servir de speedomètre de secours et, couplé à la centrale inertielle, permet de calculer précisément le cap géographique du bateau.



Un des rares GPS sans cartographie intégrée donc moins gourmand en énergie. La cartographie est prise en charge par le PC du bord.

B3.7. Pont de jauge sur la mèche de safran

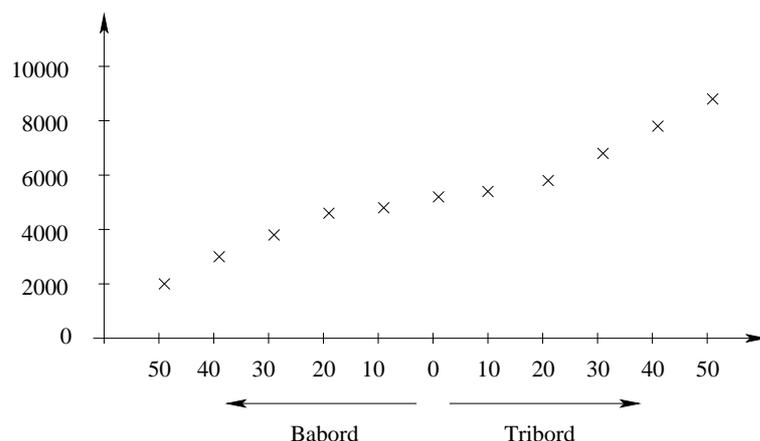
Un bon barreur utilise beaucoup les sensations de barre pour à la fois régler son bateau et répondre aux sollicitations de son appareil à gouverner (cf. chapitre 3). Nous avons tout d'abord tenté de les approximer par la mesure des déformations de la barre elle-même en y collant des jauges de contraintes en un pont de Wheatstone. La mesure des déformations se traduit alors par la mesure de la résistance du pont qui varie en fonction des allongements ou contractions des jauges qui le constituent. La barre en aluminium a posé deux problèmes rédhibitoires : la colle ne pénètre pas le matériau et a tendance à casser sous les contraintes entraînant le décollement des jauges. D'autre part la barre est tellement raide qu'elle ne se déforme presque pas. Les mesures effectuées en atelier ont d'ailleurs été décevantes car quasi inexploitable.

Nous avons alors tenté un collage à la cyanoacrylate directement sur la mèche de safran en résine. Elle est conique et deux paliers au niveau de la coque et du fond de cockpit permettent de l'aligner. Les jauges ont été placées au milieu de ces deux paliers dans la zone où on peut supposer avoir les déformations les plus importantes.



Deux des quatre jauges collées directement sur la mèche de safran. Un méplat a été pratiqué sur la surface conique de la mèche de safran car les jauges sont plates et doivent le rester si on veut conserver leurs caractéristiques techniques. Un autre méplat identique a été creusé de l'autre côté pour accueillir les deux autres jauges qui sont alors reliées entre-elles pour former un pont de Wheatstone.

Une fois les jauges collées et protégées par un glacis à l'époxy on procède à l'étalonnage en atelier. Pour cela le montage sur le bateau est reproduit avec des serre-joints et une corde et une poulie permettent d'appliquer différents poids à la fois à tribord et à babord pour régler l'interface pont de jauge (boîtier électronique fournit par nke qui permet d'émettre sur le bus la donnée correspondante). Une estimation de l'effort maximum (environ 50kg) a permis de centrer les valeurs délivrées et le réglage du gain (via un potentiomètre) de les étaler le plus possible afin d'avoir des données le plus exploitable possible. Les mesures obtenues ne sont pas linéaires et on peut avancer deux grandes explications à ce fait : d'une part la mèche est conique et non cylindrique et, d'autre part, le collage et l'alignement des jauges sont perfectibles.



Etalonnage du pont de Wheatstone. Sur l'axe horizontal les masses (en kg) appliquées en babord et tribord, en vertical les données récupérées en sortie d'interface. Le pont répond mieux aux efforts appliqués vers tribord que vers babord.

Après montage sur le bateau subsistent encore quelques surprises. Au repos les données sont légèrement décalées par rapport à celles mesurées en atelier. Ceci est certainement dû au fait que le vérin du pilote est relié à la mèche par une machoire qui enserre étroitement cette dernière. La mèche se trouve donc précontrainte et un réglage d'offset permet de corriger ce problème.

A quai le pont est suffisamment sensible pour réagir à un léger clapot. En mer, les valeurs fluctuent beaucoup mais lorsque le bateau est ardent ou mou, elles sont alors suffisamment stables pour être exploitables. Les efforts semblent avoir été sous-estimés car le pont sature bien avant que la barre ne soit plus contrôlable par le skipper. Expérimentalement il y a un lien certain entre sensations de barre et déformation de la mèche et son instrumentation paraît prometteuse !

B3.8. Vérin de pilote

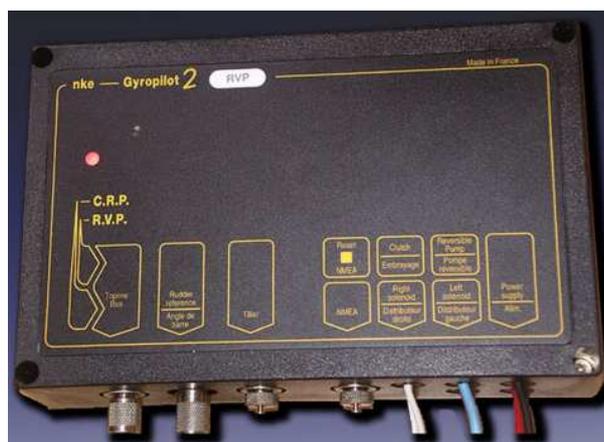
Le vérin du pilote est un Autohelm 6000. Il est équipé d'un moteur électrique alimenté par les batteries du bord en 12V (ses pics de consommation nécessitent un convertisseur 12V-12V pour garantir une tension constante sur le bus). Ses avantages par rapport aux vérins hydrauliques sont une consommation plus faible et une vitesse de sortie de vérin plus rapide (mais dépendante de l'effort à fournir malheureusement). Son inconvénient est sa moindre fiabilité liée au nombre de pièces mécaniques dans un milieu salin, humide et soumis à de permanentes vibrations.



Vérin du pilote. La puissance développée par ce type de vérin exige un montage fiable et robuste pour éviter des bris de matériel. La mèche est prisonnière d'une machoire munie d'un petit bras de levier sur lequel est solidarisé le piston du vérin. Le bas de la mèche est étanchéifié avec une chambre à air d'automobile (la ligne de flotaison ne dépassant jamais le haut de cette chambre à air). On remarque le câble gainé en noir du pont de jauge dans le fond de l'image et les butées de barre (bouts blancs amarrés en tête du bras de levier) qui limitent la course du vérin.

B4. L'intelligence

Dans la configuration actuelle il y a trois processeurs sur le bateau. Un premier correspond au pilote commercial de base et se situe dans le boîtier du **gyropilot 2** de chez **nke**. Son rôle essentiel consiste à récupérer les données nécessaires pour la commande de barre par PID. La caractéristique de ce pilote est d'intégrer dans le même boîtier un gyromètre ce qui à l'époque de sa sortie a permis d'obtenir un bien meilleur pilotage. Si on le monte avec une légère inclinaison plutôt que verticalement on peut espérer récupérer un peu de l'information de roulis en plus du lacet et améliorer encore un peu la réactivité du système.



Le gyropilot2 de nke intègre un gyromètre qui va permettre un pilotage beaucoup plus précis.

Un deuxième processeur a été ajouté pour traiter les données de ou des centrales inertielles et calculer un vent réel précis. Il s'agit du **processorHR** commercialisé également par **nke** qui se charge aussi de récupérer et organiser l'ensemble des données qui circulent sur le bus et de les datalogger sur une clé USB. En fait le **processorHR** est choisi comme maître à l'initialisation du système et prend aussi en charge la commande de barre si bien que le **gyropilot 2** ne sert plus que de relais tout en continuant à réguler la course du vérin.



Le **processorHR** a été conçu à l'origine pour traiter les données de centrales inertielles à hautes cadences. Il prend finalement en charge la commande de barre et permet d'intervenir à façon sur l'ensemble de l'installation (on peut par exemple définir un autre graphisme pour les caractères ou symboles apparaissant sur les répéteurs).

Enfin, un PC sous Windows XP supporte un logiciel de navigation avec cartographie et est relié par câble Internet au **processorHR** (il récupère ainsi les données GPS utiles pour la carte en cours). Le PC peut communiquer avec le **processorHR** par **http**, **ftp** ou **IP**. On peut ainsi directement régler des paramètres divers comme des réglages d'offset de capteurs plutôt que de passer par des afficheurs aux fonctionnalités réduites. Le protocole **SailNet** (voir la section suivante) autorise le PC à prendre la main, le **processorHR** ne servant plus qu'à la transmission de la commande d'angle de barre.



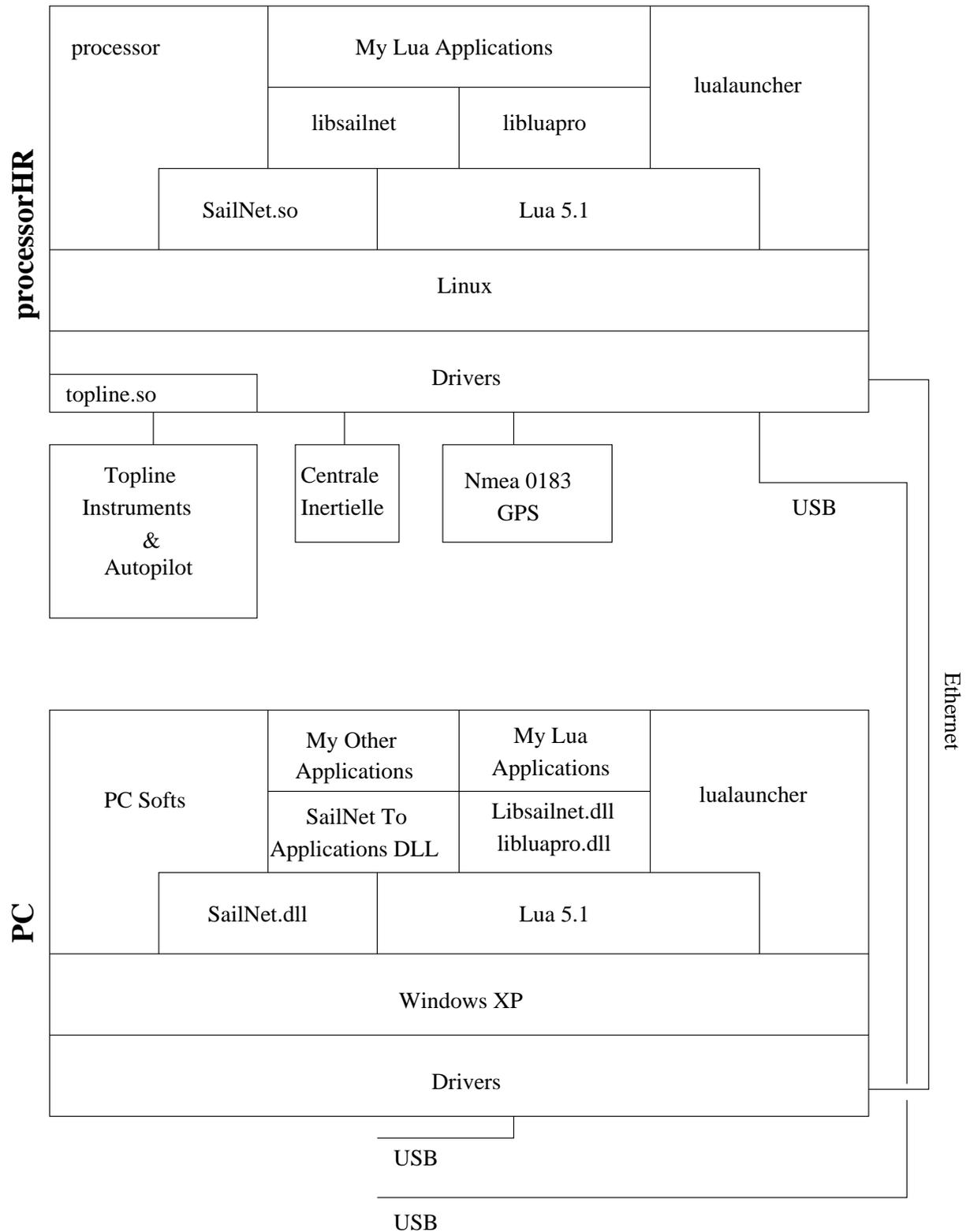
Le PC communique via un câble Internet avec le processorHR et peut prendre éventuellement la main pour commander le pilote.

Pour des questions de consommation le PC est un ultra portable fixé directement sur la table à cartes pour un accès aisé.

B5. La communication

L'ensemble des capteurs, des répéteurs ainsi que des autres matériels **nke** communique au travers d'un bus en utilisant le protocole **topline**. Ce protocole est extrêmement fruste puisqu'il se contente d'envoyer des trames comportant l'identifiant du capteur suivi de la donnée. Les collisions et altérations sont fréquentes et entraînent parfois des comportements étranges (à ce titre il est probable que le récent démâtage de Liz Wardley sur le monotype **SolOcéane** soit lié à ce problème).

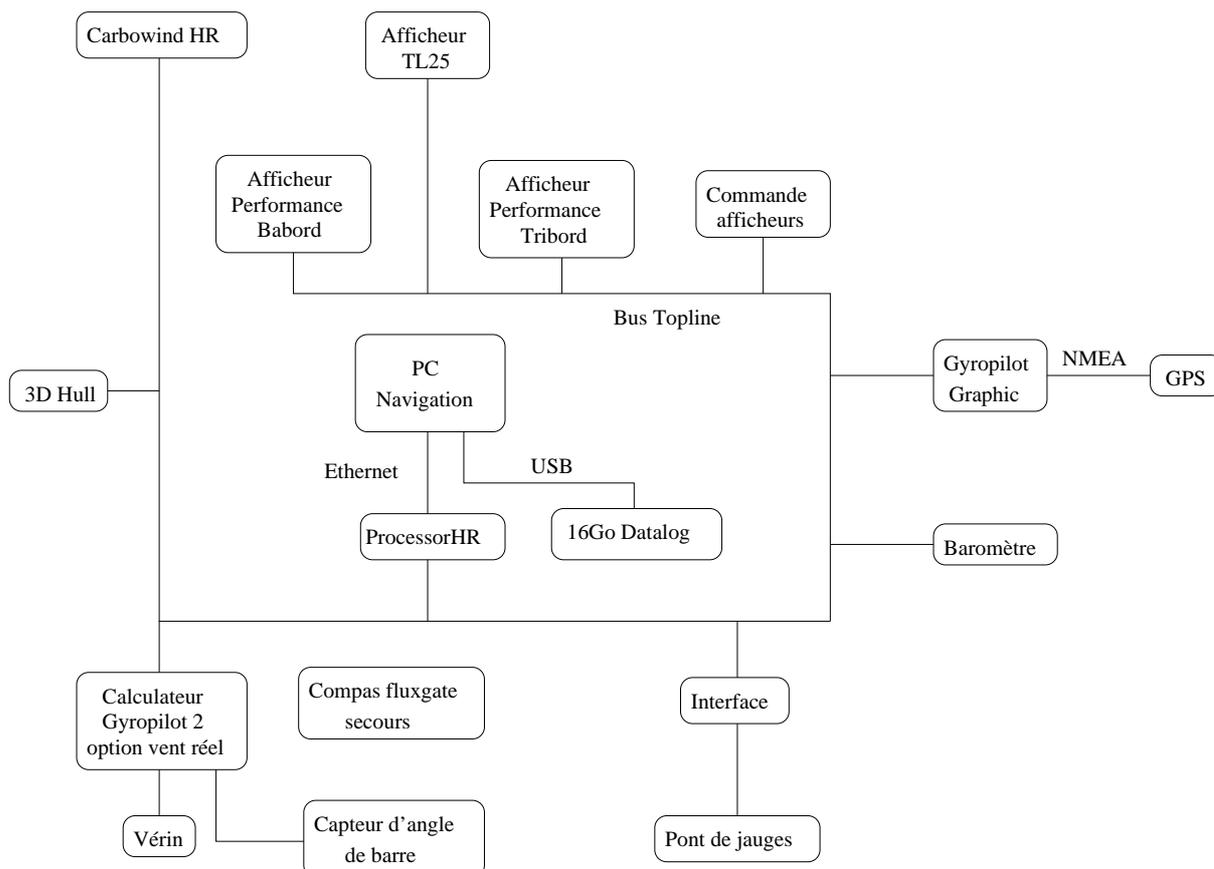
Comme nous l'avons déjà évoqué, le PC peut communiquer avec le **processorHR** par IP ou même par Wifi. Un protocole dit **SailNet** permet d'identifier chaque donnée présente sur le bus et de les échanger avec le PC. Il est possible d'écrire en C ou en Lua sa propre commande de pilotage et il suffit de se placer en mode *barre externe* (un des nombreux modes offerts par le **processeurHR**) pour qu'il soit choisi. Le code ainsi développé peut être aussi directement chargé dans la mémoire du **processeurHR**.



Architecture logicielle du protocole **SailNet**. Les fichiers **Sailnet** contiennent les définitions de variables et permettent de les partager en temps réel entre le **processorHR** et le **PC**.

B6. Synoptique de l'installation

La figure suivante résume l'ensemble de l'installation effectuée sur *Kikibigoudi* qui comprend également les répéteurs ou afficheurs qui renseignent en permanence le skipper.



L'installation complète. La **carbowind** est une girouette/anémomètre, l'afficheur TL 25 est au pied du mât pour une vision optimale quelle que soit l'amure et les performances sont deux afficheurs (un sur chaque bord) avec indication des tendances pour le régatier. Pour choisir les données à afficher on peut utiliser une commande spécifique ou passer par le **processorHR** via le PC du bord. La **3DHull** est la centrale inertielle. Le compas fluxgate n'est relié au bus qu'en cas de panne de cette dernière.

B7. Conclusion et perspectives

Une installation électrique et électronique d'un bateau de compétition exige un fort investissement à la fois en temps et en moyens. Il convient de bien étudier l'emplacement des différents matériels à la fois pour des raisons de sécurité (éviter les zones où l'eau pourrait s'accumuler et les endroits de passage) et des raisons physiques (loin de masses magnétiques, près du centre de gravité ...). La calibration des capteurs est cruciale pour espérer obtenir les bonnes informations et nécessite d'effectuer des sorties en mer dans des conditions optimales de mer et de vent. L'ensemble du système est actuellement opérationnel sur Kikibigoudi. Les tests du mode « barre externe » proposé sur le pilote **nke** pour lequel notre propre programme côté PC peut prendre la main ont fait apparaître des problèmes temps réel. En effet les ordres sont bien pris en compte mais arrivent avec de forts délais de retard au vérin. Ce problème ne pouvant être résolu de manière rapide que par la société **nke** nous avons reporté nos essais sur un voilier réel à plus tard lorsque nous aurons le loisir d'y consacrer quelque temps. Le bateau est prêt et son skipper est impatient de confronter le système de pilotage de cette thèse à la réalité!

Bibliographie

- [Abdulla 96] Abdulla, P., Cerans, K., Jonsson, B., et Yih-Kuen, T. (1996). General decidability theorems for infinite-state systems. In *LICS '96 : Proceedings of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science*, pages 313–321, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Abril 97] Abril, J., Salom, J., et Calvo, O. (1997). Fuzzy control of a sailboat. *International Journal of Approximate Reasoning*, 16(3-4) :359–375.
- [Acheson 90] Acheson, D. (1990). *Elementary Fluid Dynamics*. Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series, Oxford University Press.
- [Achour 05] Achour, Z., Rezg, N., et Xie, X. (2005). Petri net controller synthesis using theory of regions. In *1st I*PROMS Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, IPROMS 2005*.
- [Aho 76] Aho, A., Hopcroft, J., et Ullman, J. (1976). *The design and analysis of computer algorithms*. Addison Wesley Publishing Company.
- [Albert 89] Albert, K., Jensen, K., et Shapiro, R. (1989). DESIGN/CPN : A Tool Package Supporting the Use of Colored Nets. *Petri Net Newsletter*, 32 :22–35.
- [Albus 87] Albus, J., McCain, H., et Lumia, R. (1987). NASA/NBS standard reference model for telerobot control system architecture (NASREM). Rapport Technique 1235, NBS.
- [Alessandrini 93] Alessandrini, B. (1993). *Etude numérique de l'écoulement visqueux autour d'une carène en présence d'une surface libre : résolution des équations de couche limite et de Navier-Stokes*. Mémoire de Thèse, Ecole Centrale de Nantes.
- [Alla 00] Alla, A., David, R., Mascolo, M. D., et Ferrier, J. (2000). *Analyse et commande des systèmes à événements discrets*. Hermès.
- [Allgöwer 99] Allgöwer, F., Badgwell, T., Qion, J., Rawlings, J., et Wright, S. (1999). Nonlinear Predictive Control and Moving Horizon Estimation - An introduction overview. In *European Control Conference ECC*, pages 392–449.
- [André 81] André, C. (1981). *Systèmes à évolutions parallèles : modélisation pour réseaux de Petri à capacité et analyse par abstraction*. Université de Nice. Thèse d'état.
- [Araki 77] Araki, T. et Kasami, T. (1977). Some decision problems related to the reachability problem for Petri nets. *Theoretical Computer Science*, 3(1) :85–104.
- [Arnold 76] Arnold, A. et Latteux, M. (1976). *Vector Addition Systems and Semi-Dyck Languages*. Université de Lille, Rapport de recherche 78.
- [Asken 83] Asken, C. (1983). *Nouveau traité de navigation. Tomes I et II*. Chiron.
- [Astrom 95] Astrom, K. et Hagglund, T. (1995). *PID Controllers : Theory, Design and Tuning*. Research Triangle Park, NC : Instrument Society of America.
- [Azevedo 02] Azevedo, C., Poignet, P., et Espiau, B. (2002). Moving Horizon Control For Biped Robots Without Reference Trajectory. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, pages 2762–2767.

- [Badouel 98] Badouel, E. (1998). Representations of Reversible Automata and State Graphs of vector Addition Systems. Inria Research Report No 3490.
- [Badouel 90] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1990). The synthesis problem for elementary net systems is NP-complete. *Theoretical Computer Science*, 186 :107–134.
- [Badouel 95] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1995). Polynomial algorithms for the synthesis of bounded nets. In *Proceedings of TAPSOFT'95*, volume 915 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 364–378. Springer.
- [Badouel 97a] Badouel, E., Bernardinello, L., et Darondeau, P. (1997a). The synthesis problem for elementary net systems is NP-complete. *Theoretical Computer Science*, 186 :107–134.
- [Badouel 03] Badouel, E. et Chenou, J. (2003). Nets Enriched over Closed Monoidal Structures. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 2679, pages 64–81. ICATPN'03.
- [Badouel 04a] Badouel, E. et Chenou, J. (2004a). Les algèbres de Petri commutatives. Draft, soumis pour publication.
- [Badouel 04b] Badouel, E., Chenou, J., et Guillou, G. (2004b). Petri Algebras. Rapport technique, Inria Research Report RR-5355.
- [Badouel 05] Badouel, E., Chenou, J., et Guillou, G. (2005). Petri Algebras. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 3580, pages 742–754. ICALP'2005.
- [Badouel 07] Badouel, E., Chenou, J., et Guillou, G. (2007). An axiomatization of the token game based on Petri Algebras. *Fundamenta Informaticae*, 77(3) :187–215.
- [Badouel 97b] Badouel, E. et Darondeau, P. (1997b). Stratified Petri Nets. In *Proceedings of FCT'97*, volume 1279 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 117–128. Springer.
- [Badouel 99] Badouel, E. et Darondeau, P. (1999). Theory of regions. *Lecture Notes in Computer Science*, 1491 :529–586.
- [Badouel 04c] Badouel, E. et Darondeau, P. (2004c). The synthesis of Petri nets from path-automatic specifications. *Information and Computation*, 193 :117–135.
- [Benveniste 03] Benveniste, A., Caspi, P., Edwards, S., Halbwachs, N., Guernic, P. L., et de Simone, R. (2003). The synchronous languages 12 years later. *Proceedings of the IEEE*, 91(1) :64–83.
- [Bernicot 02] Bernicot, L. (2002). *La croisière d'Anahita*. Voiles Gallimard.
- [Bernot 94] Bernot, J.-Y. (1994). *Vent et Régate : Les Stratégies*. Biblio Voile FFV Chiron.
- [Bernot 95] Bernot, J.-Y. (1995). *Météorologie locale : Croisière et régates*. Biblio Voile FFV Chiron.
- [Berthelot 83] Berthelot, G. (1983). *Transformations et analyse de réseaux de Petri : application aux protocoles*. Mémoire de Thèse, Université Paris VI.
- [Berthomieu 04] Berthomieu, B., Ribet, P.-O., et Vernadat, F. (2004). The tool TINA – Construction of Abstract State Spaces for Petri Nets and Time Petri Nets. *International Journal of Production Research*, 42(14).
- [Berthoz 97] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.
- [Bonasso 97] Bonasso, R. P., Firby, J., Gat, E., Kortenkamp, D., Miller, D. P., et Slack, M. G. (1997). Experiences with an Architecture for Intelligent, Reactive Agents. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 9(2/3) :237–256.
- [Bourcerie 03] Bourcerie, M., Bousseau, F., et Mabed, M. (2003). Les RdP $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ un outil d'apprentissage et d'intégration des perturbations. In *Proceedings of the 4^{ième} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation*, Toulouse (France).
- [Bourcerie 97] Bourcerie, M. et Morel, J.-Y. (1997). Algebraically structured coloured Petri nets to model sequential processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-B*, 27(4).
- [Bourcier 06] Bourcier, P. (2006). *Quel pilote pour demain ?* Course Au Large numéro 17.
- [Bourdais 06] Bourdais, R., Perruquetti, W., et Yim, P. (2006). Modélisation multi-agents à l'aide des réseaux de Petri. In *Conference Internationale Francophone d'Automatique, CIFA*.
- [Brams 83a] Brams, G. W. (1983a). *Réseaux de Petri : théorie et pratique. Tome 1*. Masson.
- [Brams 83b] Brams, G. W. (1983b). *Réseaux de Petri : théorie et pratique. Tome 2*. Masson.
- [Braun 91] Braun, P., Brosowski, B., Fisher, T., et Helbig, T. (1991). A group theoretical approach to General Petri Nets. Rapport technique, University of Franckfurt.

- [Brooks 86] Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, pages 14–23.
- [Brown 89] Brown, C. (1989). Relating Petri Nets to Formulae of Linear Logic. Rapport Technique ECS LFCS 89-87, University of Edinburgh.
- [Brunia 99] Brunia, C. (1999). Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, 101 :213–242.
- [Busi 97] Busi, N. et Pinna, G. (1997). Synthesis of nets with inhibitor arcs. In *Proceedings of Concur'97*, volume 1243 of *LNCS*, pages 151–165. Springer.
- [Bérard 01] Bérard, B., Bidoit, M., Finkel, A., Laroussinie, F., Petit, A., Petrucci, L., et Schnoebelen, P. (2001). *Systems and Software Verification. Model-Checking Techniques and Tools*. Springer.
- [Cadoret 03] Cadoret, B., Duviard, D., Guillet, J., et Kérisit, H. (2003). *Ar Vag Voiles au travail en bretagne atlantique, Tome 1*. Editions de l'estran.
- [Caillaud 97] Caillaud, B. (1997). SYNET : un outil de synthèse de réseaux de Petri bornés, applications. Rapport Technique 3155, INRIA Research Report.
- [Celaya 09] Celaya, J., Desrochers, A., et Graves, R. (2009). Modeling and Analysis of Multi-agent Systems using Petri Nets. *Journal Of Computers*, 4(10).
- [Chéret 00] Chéret, B. (2000). *Les Voiles*. Gallimard.
- [Chéret 06] Chéret, B. (mars 2006). *Changer de vitesse au près*. Cahier des régates numéro 104.
- [Chevaillier 99] Chevaillier, P., Harrouet, F., et Loor, P. D. (1999). Application des réseaux de Petri à la modélisation des systèmes multi-agents de contrôle. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*.
- [Coles 90] Coles, A. (1990). *Navigation par gros temps*. Voiles Gallimard.
- [Colom 86] Colom, J., Martinez, J., et Silva, M. (1986). Packages for validating discrete production systems modeled with Petri Nets. In *IMACS-IFAC Symposium on modelling and simulation for control of lumped and distributed parameter systems*, pages 457–462.
- [Cortadella 96] Cortadella, J., Kishinevsky, M., Kondratyev, A., Lavagno, L., et Yakovlev, A. (1996). Complete state encoding based on the theory of regions. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems*, pages 36–47.
- [Cudennec 06] Cudennec, C. (2006). Communication personnelle.
- [Darondeau 98] Darondeau, P. (1998). Deriving unbounded Petri nets from formal languages. Rapport technique, Inria Research Report RR-3365.
- [Darondeau 04] Darondeau, P. (2004). Unbounded Petri net synthesis. *Lecture Notes in Computer Science*, 3098 :413–438.
- [David 92] David, R. et Alla, H. (1992). *Du Grafset aux Réseaux de Petri*. Hermès.
- [David 98] David, R. et Alla, H. (1998). Continuous and Hybrid Petri Nets. *Journal of Circuits Systems Computers*, 8(1) :159–188.
- [Desrochers 95] Desrochers, A. et Al-Jaar, R. (1995). *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems : Modeling, Control, and Performance Analysis*. IEEE Press.
- [Diaz 03] Diaz, M., éditeur (2003). *Vérification et mise en oeuvre des réseaux de Petri*. Hermès.
- [Dufourd 98] Dufourd, C. (1998). *Réseaux de Petri avec Reset/Transfert : Décidabilité et Indécidabilité*. Mémoire de Thèse, ENS Cachan.
- [Dufourd 98] Dufourd, C., Finkel, A., et Schnoebelen, P. (1998). Reset nets between decidability and undecidability. In *Proceedings of 25th ICALP'98*, volume 1443, pages 103–115. LNCS, Springer.
- [Dumas 91] Dumas, V. (1991). *La route impossible*. EMOM.
- [Ehrenfeucht 90a] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990a). Partial 2-structures; Part I :Basic notions and the Representation Problem. *Acta Informatica*, 27 :315–342.
- [Ehrenfeucht 90b] Ehrenfeucht, A. et Rozenberg, G. (1990b). Partial 2-structures; Part II : State Spaces of Concurrent Systems. *Acta Informatica*, 27 :343–368.

- [Ehrig 97] Ehrig, H. et Padberg, J. (1997). A Uniform Approach to Petri Nets. In *Foundations of Computer Science : Potential - Theory - Cognition, to Wilfried Brauer on the occasion of his sixtieth birthday*, volume 1337 of *LNCS*, pages 219 – 231. Springer.
- [Ehrig 94] Ehrig, H., Padberg, J., et Rozenberg, G. (1994). Behaviour and realization construction for Petri nets based on free monoid and power set graphs. In *Workshop on Concurrency, Specification & Programming*. Humboldt University. Extended version as Technical Report of University of Leiden.
- [E.J. de Ridder 04] E.J. de Ridder, J.A; Keuning, K. V. (2004). A mathematical model for the tacking maneuver of a sailing yacht. In *International Symposium on Yacht Design and Yacht construction*.
- [Ermel 01] Ermel, C. et Weber, M. (2001). Implementation of Parameterized Net Classes with the Petri Net Kernel of the Petri Net Baukasten. In *Unifying Petri Nets, Advances in Petri Nets*, volume 2128 of *LNCS*, pages 79–102. Springer.
- [Ferziger 02] Ferziger, J. et Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
- [Finkel 98] Finkel, A. et Schnoebelen, P. (1998). Fundamental structures in well-structured infinite transition systems. In Lucchesi, C. L. et Moura, A. V., éditeurs, *Proceedings of the 3rd Latin American Symposium on Theoretical Informatics (LATIN'98)*, volume 1380 of *LNCS*, pages 102–118, Campinas, Brasil. Springer.
- [Finot 77] Finot, J.-M. (1977). *Eléments de vitesse des coques*. Arthaud.
- [Fliess 09] Fliess, M. et Join, C. (2009). Model-free control and intelligent PID controllers : towards a possible trivialization of nonlinear control? In *15th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2009)*, Saint-Malo France. IFAC.
- [Forthmann 01] Forthmann, P. (2001). *Tout savoir sur le pilotage automatique*. Loisirs Nautiques.
- [Fossen 02] Fossen, T. I. (2002). *Marine control systems*. Marine Cybernetics AS.
- [Gat 91] Gat, E. (1991). Integrating planning and reacting in a heterogeneous asynchronous architecture for mobile robots. *SIGART Bulletin 2*, pages 70–74.
- [Gehlot 89] Gehlot, V. et Gunter, C. (1989). Nets as tensor theories. In Michelis, G. D., éditeur, *Proceedings of the tenth International Conference on Application and Theory of Petri nets*, pages 174–191, Bonn, Germany.
- [Genrich 79] Genrich, H., Lautenbach, K., et Thiagarajan, P. (1979). Elements of General Net Theory. In *Lectures Notes in Computer Science*, volume 84, pages 21–163. Advanced Course on General Net Theory of Processes and Systems : Net Theory and Applications.
- [Ghaffari 02] Ghaffari, A. (2002). *Les réseaux de Petri pour la synthèse de contrôle des systèmes à événements discrets*. Mémoire de Thèse, Université de Metz.
- [Gibson 77] Gibson, J. (1977). The theory of affordances. *Perceiving, acting and knowing*.
- [Girard 87] Girard, J.-Y. (1987). Linear logic. *Theoretical Computer science*, 50 :1–102.
- [Glénans 65] Glénans (1965). *Cours de navigation des Glénans. Tomes I et II*. Editions du compas.
- [Glénans 04] Glénans (2004). *Le cours des Glénans*. Seuil.
- [Gondran 85] Gondran, M. et Minoux, M. (1985). *Graphes et algorithmes*. Eyrolles.
- [Gouard 88] Gouard, P. (1988). *Nouvelles techniques pour gagner*. Chiron.
- [Gouard 99] Gouard, P. (1999). *Les nouvelles stratégies en voile*. Chiron.
- [Guia 92] Guia, A., DiCesare, F., et Silva, M. (1992). Generalized mutual exclusion constraints on nets with uncontrollable transitions. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 974–979.
- [Guillou 04] Guillou, G. (2004). Group-nets and strict-group-nets. *Petri Net Newsletter*, 67 :17–25.
- [Guillou 09] Guillou, G. (2009). Group-nets et réseaux lexicographiques : expressivité et décidabilité. *Technique et Science Informatiques*, 28 :1171–1201. Numéro spécial « Réseaux de Petri et Algorithmes ».
- [Guillou 07] Guillou, G. et Parenthoën, M. (2007). Modèle multi-agents pour le pilotage temps réel d'un voilier. In *6ème Colloque Francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs - MSR 2007*, pages 145–157, Lyon France. Hermes-Lavoisier.
- [Gutelle 01] Gutelle, P. (2001). *Architecture du voilier. Tome 1. Théorie*. Loisirs nautiques.

- [Gédouin 08] Gédouin, P., Join, C., Delaleau, E., Bourgeot, J., Arbab-Chirani, S., et Calloch, S. (2008). Model-free control of shape memory alloys antagonistic actuators. In *17th IFAC World Congress*, Seoul Korea, Republic of.
- [Hack 75] Hack, M. (1975). *Petri Net Languages*. Computation Structures Group Memo 124, Project MAC, MIT.
- [Hack 76] Hack, M. (1976). *Decidability questions for Petri nets*. Mémoire de Thèse, MIT/LCS/TR-161, Massachusetts Institute of Technology, Lab. for Computer Science.
- [Haddad 07] Haddad, S. et Poitrenaud, D. (2007). Recursive Petri Nets - Theory and Application to Discrete Event Systems. *Acta Informatica*, 44(7-8) :463–508.
- [Hanisch 00] Hanisch, H. et Lüder, A. (2000). A Signal Extension for Petri Nets and its Use in Controller Design. *Fundamenta Informaticae*, 41(4) :415–431.
- [Hayes-Roth 85] Hayes-Roth, B. (1985). A blackboard architecture for control. *Artificial intelligence*, 26 :251–321.
- [Hinrichsen 05] Hinrichsen, D. et Pritchard, A. (2005). *Mathematical Systems Theory. Modelling, State Space Analysis, Stability and Robustness*. Springer.
- [Holloway 90] Holloway, L. et Krogh, B. (1990). Synthesis of feedback logic for a class of controlled Petri nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(5) :514–523.
- [Holloway 97] Holloway, L., Krogh, B., et Giua, A. (1997). A Survey of Petri Net Methods for Controlled Discrete Event Systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 7(2) :151–190.
- [Hopcroft 79] Hopcroft, J. et Pansiot, J. (1979). On the reachability problem for 5-dimensional vector addition systems. *Theoretical Computer Science*, 8 :135–159.
- [Hugo 75] Hugo, A. M. (1975). Theory of sailing applied to ocean racing yachts. *Marine Technology*, 12(3) :223–242.
- [Ingrand 03] Ingrand, F. (2003). Architectures Logicielles pour la Robotique Autonome. In *JNRR 03 Journées Nationales de Recherche en Robotique*, Clermont-Ferrand. France.
- [Jantzen 79] Jantzen, M. (1979). On the hierarchy of Petri net languages. *R.A.I.R.O. Informatique théorique*, 13 :19–30.
- [Jaulin 04] Jaulin, L. (2004). Modélisation et commande d’un bateau à voile. In *actes de CIFA’04*, Douz Tunisie. CIFA.
- [Jensen 92] Jensen, K. (1992). *Coloured Petri nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, volume 1 of *EATCS Monographs on Theoretical Computer Science*. Springer Verlag.
- [Juhás 98a] Juhás, G. (1998a). *Algebraically Generalised Petri Nets*. Mémoire de Thèse, Institute of Control Theory and Robotics. Slovak Academy of Sciences.
- [Juhás 98b] Juhás, G. (1998b). The essence of Petri nets and transition systems through abelian groups. *Electronic Notes in Theoretical Computer science*, 18.
- [Juhás 99] Juhás, G. (1999). Petri nets with generalized algebras : a comparison. *Electronic Notes in Theoretical Computer science*, 27.
- [Juhás 03] Juhás, G., Lorenz, R., et Neumair, C. (2003). Modelling and Control with Modules of Signal Nets. In *Lectures on Concurrency and Petri Nets*, volume 3098, pages 585–625.
- [Karp 69] Karp, R. et Miller, R. (1969). Parallel Program Schemata. *Journal of Computer and System Sciences*, 3(2) :147–195.
- [Kasai 82] Kasai, T. et Miller, R. (1982). Homomorphism between models of parallel computation. *Journal of computer science*, 25.
- [Kosaraju 82] Kosaraju, S. R. (1982). Decidability of Reachability in Vector Addition Systems. In *Proc. of the 14th Annual ACM Symp. on Theory of Computing, San Francisco, May 5–7, 1982*, pages 267–281.
- [Kosko 86] Kosko, B. (1986). Fuzzy Cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24 :65–75.
- [Lazić 07] Lazić, R., Newcomb, T., Ouaknine, J., Roscoe, A., et Worell, J. (2007). Nets with Tokens Which Carry Data. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 4546, pages 301–320. ICATPN’07.
- [Lin 89] Lin, L.-J., Simmons, R., et Fedor, C. (1989). Experience with a task control architecture for mobile robots. Rapport Technique CMU-RI-TR-89-29, Carnegie-Mellon University.

- [Loisirs Nautiques 80] Loisirs Nautiques (1980). *Connaissance du Pilote Automatique*. Loisirs Nautiques Hors Série 9.
- [Mandani 74] Mandani, E. et Assilian, S. (1974). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 :1–13.
- [Marie 89] Marie, M. (1989). *Vent Dessus Vent Dedans*. Voiles Gallimard.
- [Martí-Oliet 91] Martí-Oliet, N. et Meseguer, J. (1991). From Petri nets to linear logic through categories : a survey. *Journal of Foundations of Computer science*, 2(4) :297–399.
- [Masayuma 95] Masayuma, Y., Fukasawa, T., et Sasagawa, H. (1995). Tacking Simulations of Sailing Yachts - Numerical Integration of Equations of Motions and Application of Neural Network Technique. In *12th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, pages 117–131.
- [Mayençon 82] Mayençon, R. (1982). *Météorologie marine*. E.M.O.M.
- [Mayr 84] Mayr, E. W. (1984). An Algorithm for the General Petri Net Reachability Problem. *SIAM J. Comput.*, 13(3) :441–460.
- [Mayr 00] Mayr, R. (2000). Process Rewrite Systems. *Information and Computation*, 156(1-2) :264–286.
- [Meseguer 90] Meseguer, J. et Montanari, U. (1990). Petri Nets are Monoids. *Information and Computation*, 88(2) :105–155.
- [Moalla 78] Moalla, M., Pulou, J., et Sifakis, J. (1978). Réseaux de Petri synchronisés. *Revue RAIRO Automatique*, 12(2) :103–130.
- [Moitessier 67] Moitessier, B. (1967). *Cap Horn à la voile*. Arthaud.
- [Moitessier 88] Moitessier, B. (1988). *Vagabond des mers du sud*. Arthaud.
- [Morineau 01] Morineau, T. (2001). Eléments pour une modélisation de la notion d’affordance en psychologie ergonomique. In *actes d’EPIQUE’01*, Nantes, France. Congrès EPIQUE de la Société Française de Psychologie.
- [Morineau 04] Morineau, T. (2004). L’émergence d’une perspective écologique en psychologie ergonomique, à travers la distinction entre différents niveaux de contrôle cognitif dans l’activité. In *actes du colloque ARCo’04*, Compiègne, France. Colloque de l’Association pour la Recherche Cognitive (ARCo).
- [Morineau 03] Morineau, T., Hoc, J., et Denecker, P. (2003). Cognitive levels of control in Air-Traffic Radar Controller Activity. *International Journal of Aviation Psychology*, 13 :107–130.
- [Murata 89] Murata, T. (1989). Petri nets : Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4) :541–588.
- [Muscettola 02] Muscettola, N., Dorais, G., Fry, C., Levinson, R., et Plaunt, C. (2002). Idea : Planning at the core of autonomous reactive agents. In *3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space*.
- [Newell 90] Newell, A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Harvard University Press.
- [Nilsson 69] Nilsson, N. (1969). A mobile automation : an application of artificial intelligence techniques. In *Proc. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pages 509–520.
- [Nilsson 84] Nilsson, N. (1984). Shakey the robot. Rapport Technique 323, SRI, Menlo Park, CA.
- [Nomoto 75] Nomoto, K. et Tatano, H. (1975). Balance of helm of sailing yachts. In *4th HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*.
- [Oliver 87] Oliver, J., Lechter, J., et Salvesen, N. (1987). Performance prediction for Stars and Stripes. In *SNAME*.
- [Oossanen 81] Oossanen, P. V. (1981). Method for the calculation of the resistance and side force of sailing yacht. In *Small Craft Group Conference*.
- [Padberg 96] Padberg, J. (1996). *Abstract Petri Nets : Uniform Approach and Rule-Based Refinement*. Mémoire de Thèse, Technical University of Berlin.
- [Pajot 77] Pajot, Y. et Pajot, M. (1977). *Voile et régates*. E.M.O.M.
- [Parenthoën 02] Parenthoën, M., Tisseau, J., et Morineau, T. (2002). Perception active pour acteurs virtuels. *Actes des Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA’02)*, pages 219–226.

- [Parenthoën 04] Parenthoën, M. (2004). *Animation phénoménologique de la mer : une approche énaïve*. Mémoire de Thèse, Université de Bretagne Occidentale.
- [Parenthoën 05] Parenthoën, M., Tisseau, J., Buche, C., et Reignier, P. (2005). Comportements perceptifs d'acteurs virtuels autonomes. *RSTI-TSI*, 24(10) :1259–1293.
- [Pelz 92] Pelz, E. (1992). Normalization of place/transition-systems preserves net behavior. *Theoretical Informatics and Applications, R.A.I.R.O.*, 26(1).
- [Peterson 81] Peterson, J. (1981). *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, Inc.
- [Peterson 73] Peterson, J. L. (1973). *Modeling of Parallel Systems*. Stanford, California : Stanford University, Department of Electrical Engineering, PhD Thesis.
- [Petri 62] Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Bonn : Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 2.
- [Pnueli 77] Pnueli, A. (1977). The Temporal Logic of Programs. In *FOCS-77*, pages 46–57, Providence, RI, USA.
- [Poirey 03] Poirey, T. (2003). La communication à bord en équipage. Match Racing. Rapport technique, Ecole Nationale de Voile.
- [Ponceau 06] Ponceau, L. (2006). Réglages Figaro 2 pilote nke. Communication personnelle.
- [Pontryagin 65] Pontryagin, L., Boltyanskii, V., Gamkrelidze, R., et Mishchenko, E. (1965). *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. CRC Press.
- [Prouvost 03] Prouvost, P. (2003). *Automatique Contrôle et Régulation*. Dunod.
- [Puterman 94] Puterman, M. (1994). *Markov Decision Processes, Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons.
- [Quinlan 93] Quinlan, J. R. (1993). *C4.5 : Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann.
- [Ramadge 89] Ramadge, P. et Woham, W. (1989). The Control of Discrete Event Systems. In *Special issue on Dynamics of Discrete Event Systems*, volume 77, pages 81–98. IEEE.
- [Ratzer 03] Ratzer, A., Wells, L., H.M.Lassen, Laursen, M., Qvortrup, J. F., Stissing, M., Westergaard, M., Christensen, S., et Jensen, K. (2003). CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets. In *Proceedings of the 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (ICATPN 2003), Eindhoven, The Netherlands, June 23-27, 2003 — Volume 2679 of Lecture Notes in Computer Science / Wil M. P. van der Aalst and Eike Best (Eds.)*, pages 450–462. Springer-Verlag.
- [Ravon 00] Ravon, D. et Dumard, C. (2000). *La régatée. Tactique et stratégie*. Gallimard.
- [Régate Internationale 91] Régate Internationale (1991). *Spécial Technique. Hors série numéro 2*. Régate Internationale.
- [Reisig 85] Reisig (1985). *Petri Nets : an introduction*. Monographs on Theoretical Computer Science. Springer Verlag.
- [Reisig 98] Reisig, W. (1998). *Elements of distributed algorithms : modeling and analysis with Petri nets*. Springer-Verlag.
- [Reutenauer 88] Reutenauer, C. (1988). *Aspects mathématiques des réseaux de Petri*. Masson.
- [Roncin 04] Roncin, K. et Kobus, J. (2004). Dynamic simulation of two sailing boats in match racing. *Sport Engineering*, 7(3) :139–152.
- [Roux 00] Roux, O. (2000). Langages réactifs synchrones et asynchrones. *Techniques de l'ingénieur*, S8060.
- [Roux 05] Roux, Y., Ba, M., Boin, J.-P., Guilbaud, M., Hauville, F., et Huberson, S. (2005). Sailing Boat Performance Prediction. *Ship Technology Research*, 52 :54–64.
- [Sassone 96] Sassone, V., Nielsen, M., et Winskel, G. (1996). Models for concurrency. *Theoretical Computer Science*, 170(1-2) :297–348.
- [Scarponi 07] Scarponi, M. (2007). *Including human performance in the dynamic model of a sailing yacht : a combined ship science - behavioural science approach towards a winning yacht-sailor combination*. Mémoire de Thèse, Università degli Studi di Perugia, Italy.
- [Schmitt 96] Schmitt, V. (1996). Flip-Flop Nets. In *Lectures Notes in Computer Science*, volume 1046, pages 517–528. STACS'96.

- [Schrijver 86] Schrijver, A. (1986). *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley.
- [Schwer 87] Schwer, S. (1987). *Décidabilité de l'algèbre des langages associés aux réseaux de Petri*. Mémoire de Thèse, Université Paris VII. Thèse 3^{ième} cycle.
- [Sifakis 79] Sifakis, J. (1979). *Le contrôle des systèmes asynchrones : concepts, propriétés, analyse statique*. Mémoire de Thèse, U.S.M. Grenoble. Thèse 3^{ième} cycle.
- [Silva 88] Silva, M. et Colom, J. M. (1988). On the computation of structural synchronic invariants in P/T nets. In *Advances in Petri Nets 1988*, pages 386–417, London, UK. Springer-Verlag.
- [Silva 98] Silva, M., Teruel, E., et Colom, J. (1998). Linear Algebraic and Linear Programming Techniques for the Analysis of Place or Transition Net Systems. In *Lectures on Petri Nets I : Basic Models, Advances in Petri Nets, the volumes are based on the Advanced Course on Petri Nets*, pages 309–373, London, UK. Springer-Verlag.
- [Simmons 97] Simmons, R., Goodwin, R., Haigh, K., Koenig, S., et O'Sullivan, J. (1997). A layered architecture for office delivery robots. In Johnson, W. et Hayes-Roth, B., éditeurs, *First International Conference on Autonomous Agents (Agents'97)*, pages 245–252, New-York.
- [Simonnet 02] Simonnet, M. (2002). *Voile et cécité*. Mémoire de maîtrise de S.T.A.P.S. Université de Bretagne Occidentale.
- [Slocum 03] Slocum, J. (2003). *Seul autour du monde sur un voilier de onze mètres*. Chiron.
- [Stelzer 08] Stelzer, R. et Pröll, T. (2008). Autonomous sailboat navigation for short course racing. *Robotics and Autonomous Systems*, 56 :604–614.
- [Stelzer 07] Stelzer, R., Pröll, T., et John, R. (2007). Fuzzy Logic Control System for Autonomous Sailboats. In *Fuzzy Systems Conference. FUZZ-IEEE 2007*, pages 1–6.
- [Störle 98] Störle, H. (1998). An Evaluation of High-End Tools for Petri-Nets. Rapport technique, Ludwig-Maximilians-Universität, Munich.
- [Tabarly 64] Tabarly, E. (1964). *Victoire en solitaire*. Arthaud.
- [Tabarly 77] Tabarly, E. (1977). *Guide pratique de manoeuvre*. Editions du Pen Duick.
- [Tabarly 90] Tabarly, E. (1990). *Pen Duick VI*. Editions du Pen Duick.
- [Tabarly 98] Tabarly, E. (1998). *De Pen Duick en Pen Duick*. Editions du Pen Duick.
- [Takagi 83] Takagi, T. et Sugeno, M. (1983). Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions. In *Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*.
- [Tan 99] Tan, K., Wang, Q., et Hagglund, T. (1999). *Advances in PID Control*. Springer-Verlag.
- [Tix 96] Tix, P. (1996). One FIFO place realizes zero-testing and Turing-machines. *Petri Net Newsletter*, 51 :3–15.
- [Tolman 48] Tolman, E. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55(4) :189–208.
- [Uzam 06] Uzam, M. et Wonham, W. M. (2006). A hybrid approach to supervisory control of discrete event systems coupling RW supervisors to Petri nets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7-8) :747–760.
- [Valk 78] Valk, R. (1978). Self-Modifying Nets, a Natural extension of Petri nets. In *Proceedings of ICALP'78*, volume 62 of LNCS, pages 464–476. Springer.
- [Valk 77] Valk, R. et Vidal-Naquet, G. (1977). On the Rationality of Petri Net Languages. *Lecture Notes in Computer Science : Theoretical Computer Science, Darmstadt, March, 1977*, 48 :319–328.
- [van Aartrijk 03] van Aartrijk, M. et Samoocha, J. (2003). Learning to Sail. In *European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their implementation on Smart Adaptive Systems (EUNITE 2003)*, Verlag Mainz, Aachen.
- [van der Aalst 98] van der Aalst, W. (1998). The Application of Petri Nets to Workflow Management. *The journal of Circuits, Systems and Computers*, 8(1) :21–66.
- [Vanek 97] Vanek, T. (1997). Fuzzy Guidance Controller for an Autonomous Boat. *IEEE Control Systems Magazine*, 17 :43–51.
- [Vans 00] Vans, L. (2000). *An Introduction To Mathematical Optimal Control Theory*. University of California Berkeley.

- [Warden 91] Warden, W. (1991). A control system model for autonomous sailboat navigation. In *IEEE Proceedings of Southeastcon*, volume 2, pages 944–947. School of Industry and System Engineering, Georgia Inst. of Technol., Atlanta.
- [Winskel 87] Winskel, G. (1987). Petri nets, algebras, morphisms and compositionality. *Information and Computation*, 72 :193–238.
- [Yamalidou 96] Yamalidou, K., Moody, J., Lemmon, M., et Antsaklis, P. (1996). Feedback control of Petri nets based on place invariants. *Automatica*, 32(1) :15–28.
- [Yeh 92] Yeh, E. et Bin, J. (1992). Fuzzy Control For Self-steering Of A Sailboat. In *Singapore International Conference on Intelligent Control and Instrumentation*, volume 2, pages 1339–1344.
- [Yu 99] Yu, C. (1999). *Autotuning of PID Controllers*. Springer-Verlag.

Keywords : self-steering, sailing competition, complex systems, virtual reality, Petri nets, expressiveness, decidability, synthesis.

Abstract

The first part of this thesis approaches the question of the self-steering of race sailing boats by using virtual reality and simulation which avoids constraining and risky expensive real tests. We propose a multi-agents architecture and its Petri nets modelisation. The second part of this thesis presents and studies several algebraically generalized Petri nets in order to cover some features of discrete event systems not shared by usual place/transition nets.

A state of art presents various approaches of the problem of the self-steering of sailboats and underlines its complex nature. Nevertheless a sailor does the task well and we ground our multi-agents system on a fine valuation of its practice. In this way we identify and characterize the main elements of the art of helm. Then we present a multi-agents architecture in which the command part is based on three autonomous, asynchronous and concurrent agents and we model it with synchronous Petri nets. The system is implemented with **ARÉVi** a library for the simulation of autonomous entities and 3D rendering. The experimentation shows that the virtual helmsman supplies a good security level and reacts to the requests of its environment like a human competitor. In terms of performance, the results are less interesting because the model of ship is relatively far from a real race sailing boat.

In the second part of this thesis we propose several algebraically extensions of Petri nets. We firstly choose to use a group in place of the monoid \mathbb{N} with a specific firing rule. These nets, named group-nets, containing themselves several subclasses and we study their links with various classes of usual Petri nets. In particular strict- \mathbb{Z} -nets extend pure Petri nets and \mathbb{Z} -nets extend Petri nets. Tools are given to resolve the decidability problems of boundedness and place-boundedness for strict- \mathbb{Z} -nets and \mathbb{Z} -nets. With these new nets the notion of resource disappears and the characterization of algebras for which one can mimic the token game of Petri nets leads to a strict extension called lexicographic nets. However the notion of resource remains strange because one can consume strictly and indefinitely! We show that lexicographic nets are Turing powerful whereas bounded lexicographic nets are exactly bounded Petri nets. Finally we give algorithms solving in polynomial time the synthesis problem for $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets from marked graphs and for lexicographic nets from regular languages.

Mots clés : pilotage automatique, voile de compétition, systèmes complexes, réalité virtuelle, réseaux de Petri, expressivité, décidabilité, synthèse.

Résumé

Cette thèse s'attaque dans une première partie au problème du pilotage automatique des voiliers de compétition en s'appuyant sur la réalité virtuelle qui, via la simulation, permet de s'affranchir de tests en situation réelle généralement coûteux, contraignants et risqués. Une architecture multi-agents est proposée ainsi que sa modélisation en termes de réseaux de Petri. Une deuxième partie est consacrée à la présentation et à l'étude de plusieurs extensions algébriques de ces réseaux dans le but initial de prendre en charge certaines caractéristiques des systèmes à événements discrets non couvertes par les réseaux places/transitions usuels.

Un état de l'art présente différentes approches du problème du pilotage des voiliers et souligne son caractère complexe. Partant du constat que malgré tout, l'homme parvient généralement à faire face à la plupart des situations rencontrées en mer, nous proposons d'asseoir notre système sur une expertise très fine de la pratique du barreur de compétition. Cette dernière permet d'identifier et de caractériser les éléments importants liés à la technique de barre. Nous proposons ensuite une architecture multi-agents dont la partie commande est basée sur trois agents autonomes, asynchrones et concurrents ainsi que sa modélisation par réseaux de Petri synchronisés. Le système est implémenté sous ARÉVi, moteur de simulation d'objets actifs et de rendu 3D développé au CERV. L'expérimentation montre que le barreur virtuel ainsi créé assure un niveau de sécurité intéressant pour un coureur au large en réagissant aux sollicitations de son voilier d'une manière proche de celle d'un homme. Le gain en performance semble plus limité du fait, en particulier, des faiblesses du modèle de bateau implémenté mais pourrait s'avérer intéressant sur un voilier réel.

Dans la deuxième partie de cette thèse nous proposons différentes extensions algébriques des réseaux de Petri. Nous choisissons tout d'abord d'utiliser un groupe à la place de l'algèbre des places usuelle des réseaux de Petri et d'en priver l'accès à l'élément neutre pour interdire certaines transitions. Ces réseaux, appelés strict-group-nets, étendent en particulier les réseaux de Petri purs si on choisit pour groupe l'ensemble des entiers relatifs. L'adjonction d'arcs dits « inconditionnels » conduit aux group-nets et permet d'englober également les réseaux impurs. Nous montrons que les problèmes de savoir si les \mathbb{Z} -nets et les strict- \mathbb{Z} -nets sont bornés et si une place de ces réseaux est bornée sont décidables via la définition d'un arbre proche de celle d'un arbre de couverture. La notion de ressource disparaissant dans ces nouveaux réseaux, plutôt que de choisir une algèbre *a priori* nous cherchons à caractériser les algèbres permettant de singer le comportement des réseaux de Petri usuels. Cette démarche conduit aux réseaux lexicographiques pour lesquels la notion de ressource reste étrange car on peut consommer indéfiniment strictement. Nous montrons que les réseaux lexicographiques ont la puissance des machines de Turing et que les réseaux lexicographiques bornés sont les réseaux de Petri bornés. Nous démontrons enfin que le problème de la synthèse trouve une réponse polynomiale pour les $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ -nets ainsi que pour les réseaux lexicographiques en termes de meilleure approximation d'un langage régulier donné.