



**HAL**  
open science

# Modèle multi-agents pour le pilotage temps réel d'un voilier

Goulven Guillou, Marc Parenthoën

► **To cite this version:**

Goulven Guillou, Marc Parenthoën. Modèle multi-agents pour le pilotage temps réel d'un voilier. Colloque Francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, Oct 2007, Lyon, France. hal-01259920

**HAL Id: hal-01259920**

**<https://hal.science/hal-01259920>**

Submitted on 21 Jan 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

---

# Modèle multi-agents pour le pilotage temps réel d'un voilier

**Goulven Guillou — Marc Parenthoën**

*Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (LISyC - EA 3883)*

*Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV)*

*25 rue Claude Chapé, BP 38*

*F-29280 Plouzané, FRANCE*

*goulven@univ-brest.fr, parenthoen@enib.fr*

---

*RÉSUMÉ. Nous proposons d'implémenter un système temps réel de pilotage de voilier à l'aide d'une architecture composée de trois agents asynchrones, chargés respectivement du contrôle réactif à court terme, de la simulation prédictive à moyen terme et de l'apprentissage à plus long terme. Les graphes cognitifs flous sont utilisés dans cette architecture pour spécifier un comportement respectant une expertise maritime.*

*ABSTRACT. A real time sailboat autopilot system is implemented by an architecture build on three asynchronous agents. These agents are respectively dealing with short-term reactive control, mid-term predictive simulation and long-term learning. Fuzzy Cognitive Maps are used here to specify a behavior defined by a sailing expertise.*

*MOTS-CLÉS : pilotage, voilier, architecture multi-agents, graphes cognitifs flous, système temps réel embarqué*

*KEYWORDS: auto-pilot, sailboat, multiagents architecture, fuzzy cognitive maps, real time embedded system*

---

## 1. Introduction

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 [GOU 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.

Si nous regardons ce qui est proposé en termes de commande pour les bateaux, nous croisons tout d'abord ce qui se trouve dans les pilotes commerciaux, c'est à dire de l'automatisme classique pour systèmes asservis. Les pilotes automatiques performants sont constitués d'un vérin qui agit, pour plus d'efficacité, directement sur la mèche de safran, de capteurs et d'un calculateur. La commande employée est une régulation de type PI (c'est le cas par exemple du gyropilot de la société nke) sur la partie mécanique car le safran est soumis à des efforts très variables et parfois considérables et une régulation de type PID pour l'asservissement par rapport à une consigne qui est en général de cap compas, ou d'angle au vent. Ces pilotes sont donc des systèmes asservis et plus exactement des régulateurs de cap ou d'allure et s'avèrent insuffisants dans un contexte de performance ou de sécurité bien que l'adjonction d'un gyromètre mesurant la vitesse de rotation du bateau autour grossièrement d'un axe vertical dans le milieu des années 90 constituât un véritable bond en performances en permettant de repérer plus tôt les variations de cap. Bien avant la voile, des pilotes ont été conçus pour la marine marchande, ils partagent la même architecture, un compas gyroscopique remplaçant le compas fluxgate moins onéreux des voiliers.

Dans [JAU 04], Luc Jaulin élabore son modèle sur le principe fondamental de la mécanique. Par linéarisation par bouclage et ajout d'un automate discret il propose une méthode de stabilisation de cap par un régulateur de haut niveau générant la séquence de caps permettant de maintenir un bateau dans une zone fixée. Ce modèle d'une part ne vise pas à la performance (rejoindre un point le plus vite possible) et suppose, d'autre part, le système en équilibre ce qui est l'exception. En navigation habituelle la rupture d'équilibre est quasi permanente.

Dans [FOS 02], référence internationale en matière de commande de navire, on trouve de nombreux modèles basés sur les résultats des équations de la mécanique du point et des fluides (Navier-Stokes). Ces modèles supposent également des conditions idéales au sens de : proche d'un équilibre physique stable. Ils sont de plus conçus pour des navires de commerce, cargos, méthaniers ou super tankers, ne prennent donc 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, en terme d'interaction avec les vagues.

Enfin les VPP (Velocity Prediction Program) développés avant tout comme outils de conception pour les architectes en évitant ainsi de longs et coûteux essais en bassin des carènes, fournissent par éléments finis de nombreuses données comme vitesse, efforts ou encore gîte pour un angle et une force de vent donnés [ROU 05]. Ces valeurs optimales pour des conditions idéales de mer plate et de vent constant permettent d'une part d'évaluer le type de matériau et son échantillonnage pour un niveau de sécurité maximal mais d'autre part, et surtout pour notre propos, de construire des polaires de vitesse du voilier. Ces dernières donnent pour un angle et une force de vent fixés les vitesses maximales atteignables, appelées vitesses cibles par les marins, et sont souvent représentées en coordonnées polaires d'où leur nom. Un bon barreur cherchera à atteindre ces vitesses cibles à tout moment en sachant, par expérience, les pondérer en fonction des conditions rencontrées. On trouve d'ailleurs plusieurs logiciels sur le marché permettant la capture et l'optimisation de polaires en temps réel. Ces polaires constituent déjà un modèle du bateau et si elles donnent des indications sur la manière par exemple d'effectuer une relance en indiquant vers quelle direction aller, elles ne disent pas jusqu'où aller, pendant combien de temps ni avec quelle vitesse de rotation de la barre.

Les pilotes électriques modernes dédiés aux voiliers se composent d'une unité de puissance (un vérin électrique ou hydraulique), d'un calculateur, de capteurs (girouette, anémomètre, speedomètre, gyromètre ...) et d'une interface comportant un écran et des touches généralement placée à l'extérieur à portée de main du barreur. Ils montrent rapidement leurs lacunes sur les voiliers de compétition comme par exemple les 60 pieds Open, monocoques destinés entre autres au Vendée Globe, ou de manière encore plus significative aux multicoques de la classe ORMA que l'on peut observer sur la Route du Rhum. 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. Un effort important est actuellement consacré à l'amélioration des capteurs [BOU 06].

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, lofer<sup>1</sup> sous gennaker<sup>2</sup> alors que le bateau accélère et monte sur un flotteur conduit généralement à une catastrophe. 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 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. Un pilote automatique se contente de mesurer, comparer puis agir alors qu'un bon barreur mesure en agis-

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

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

sant, anticipe, relance et adapte son niveau de vigilance et sa vitesse d'exécution aux conditions l'environnement [GUI].

La difficulté majeure, dans le pilotage des voiliers de course, est que ces bateaux doivent être menés à leurs limites, loin d'un équilibre stable. Il n'existe pas de modèle physique utilisable en temps réel pour de la commande permettant de décrire un voilier dans ces conditions. C'est pourquoi, nous proposons une modélisation du pilotage permettant d'intégrer la pratique des marins.

Dans cet article, nous proposons une méthode de modélisation du pilotage d'un voilier à partir d'une expertise menée auprès de marins s'appuyant sur les graphes cognitifs flous et sur une architecture à trois niveaux (réactif, prédictif, adaptatif). La section suivante apporte une preuve expérimentale des capacités prédictives du barreur humain (section 2). Puis nous présentons l'architecture à trois niveaux pour la commande, s'inspirant de travaux d'ergonomie cognitive (section 3). Enfin nous construisons des graphes cognitifs flous traduisant l'expertise maritime du pilotage des voiliers de course (section 4). Nous concluons sur notre modèle et évaluons les perspectives d'une telle approche de la commande.

## 2. L'Homme anticipe-t-il ?

Dans cette section nous cherchons des indices expérimentaux prouvant la capacité de prédiction d'un barreur humain. Nous précisons d'où viennent les mesures, comment nous avons reconstitué la consigne de direction à suivre, et les résultats obtenus lors de l'identification d'un modèle réactif simple du pilotage.

Des mesures ont été effectuées lors de la mini-transat 1997 (course en solitaire traversant l'atlantique sur des prototypes ultra-puissants de 6 mètres cinquante) sur le voilier "ARÉVi". 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 sont réalisés au minimum à 2Hz. Le bateau était mené soit sous pilote automatique, soit manuellement par le solitaire.

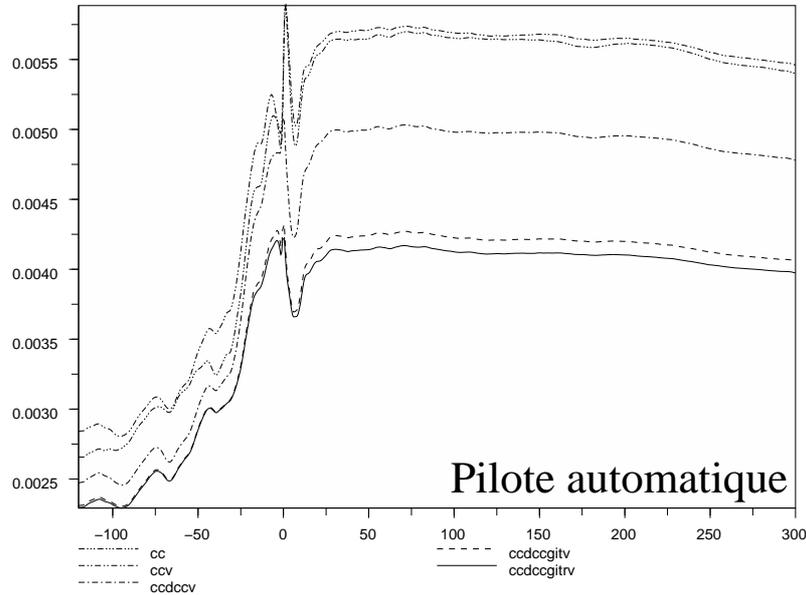
Nous avons étudié les différences de comportements entre le pilote automatique et le barreur humain en identifiant par une méthode des moindres carrés quelques formules élémentaires de commande :

$$\theta = \mu(cc - consigne) \quad [1]$$

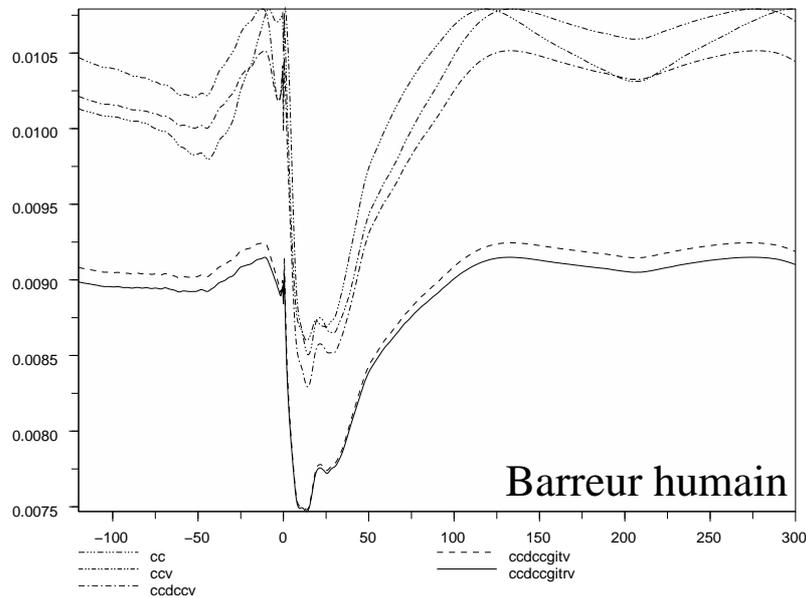
$$v\theta = \mu_{cc}(cc - consigne) + \mu_{dcc}dcc + \mu_{gite}gite + \mu_{roulis}roulis \quad [2]$$

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  $\theta$  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.

erreur d'identification MC : plage 351-551 --> anticipation optimale : -95 secondes



erreur d'identification MC : plage 761-961 --> anticipation optimale : 13.5 secondes



Ces deux graphiques reportent l'erreur quadratique selon les moindres carrés de cinq formules notées "cc" (écart au cap compas), "ccv" (idem/vitesse), "ccdecv" (ccv + vitesse de virage), "ccdecgitr" (ccdecv + gite), "ccdecgitr" (ccdecgitr + roulis), en fonction de la durée d'anticipation en secondes pour le calcul de la consigne. Chaque identification est réalisée sur une plage de 3 minutes et 20 secondes. Ces deux plages ne sont pas éloignées de plus de 4 minutes, assurant un état de mer similaire. Le pilote automatique suit plutôt une consigne correspondant au cap suivi environ une minute avant, tandis que le barreur humain suivrait une consigne correspondant au cap moyen qu'aura pris le voilier une dizaine de secondes après.

**Figure 1.** Homme et pilote sur ARévi. Mini Transat 1997.

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 :  $consigne_T(t)$ . Elles correspondent 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 1) font apparaître exclusivement pour le barreur humain un minimum pour  $T \approx +9s$ , 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. La reconstruction de la consigne est certes élémentaire, mais elle suffit à mettre en évidence ce phénomène d'anticipation. Cependant, cette étude ne donne pas de solution pour calculer en temps réel une consigne d'après les capteurs disponibles à ce moment là.

La prochaine section décrit une architecture à trois niveaux (réactif, prédictif et adaptatif) pour la commande temps réel.

### 3. Proposition d'architecture pour la commande temps-réel

Appréhender, dans la contrainte temps réel, une activité humaine par un modèle physique relève du challenge. Dans l'action de barrer un voilier ; l'homme, le bateau, la mer et le vent interagissent en un système complexe.

En robotique, la définition fonctionnelle d'une architecture générique pour la commande d'un système de contrôle s'appuie généralement sur une décomposition hiérarchique du système en différents modules autonomes, au sein desquels les tâches réactives et délibératives interagissent [VER 07]. Il est souligné qu'il est important que les tâches réactives actionnant des effecteurs puissent agir quel que soit le temps pris par les tâches délibératives faisant des inférences pour prendre des décisions. L'expertise maritime ne permet pas naturellement d'obtenir un tel découpage hiérarchique pour l'ensemble du système mer-voilier-vent-barreur, et nous avons voulu chercher une alternative à ces solutions systématiquement hiérarchisées.

Au cours de la dernière décennie, la robotique s'est inspirée des connaissances apportées par la biologie et la psychologie pour inventer des robots autonomes apprenant selon les principes des réseaux de neurones, de l'apprentissage par renforcement ou de l'algorithmique génétique [SHA 98]. Ce point de vue bio-inspiré a permis de d'obtenir des systèmes asservis qui atteignent de meilleures performances si on effec-

tue une prévision de l'état des capteurs pour apporter une correction plutôt que de se contenter d'attendre les données issues des capteurs. C'est par exemple l'objet de la commande prédictive basée sur un modèle interne du système qui permet de "prévoir" son état pour mieux contrôler son comportement [CLA 87].

Cependant, nous ne disposons pas d'équations permettant d'aborder la commande temps-réel pour le pilotage d'un voilier par ces méthodes prédictives usuelles. Nous avons donc poursuivi la démarche en nous inspirant de résultats issus de psychologie écologique [GIB 77] et de neurophysiologie pour concevoir notre architecture. Plus précisément, nous nous appuyons d'une part, sur des travaux en neurophysiologie mettant à jour la notion de *perception active* [BER 97, BRU 99] et, d'autre part, sur des travaux en psychologie écologique exhibant la coopération en parallèle et non supervisée de différents niveaux cognitifs [MOR 04].

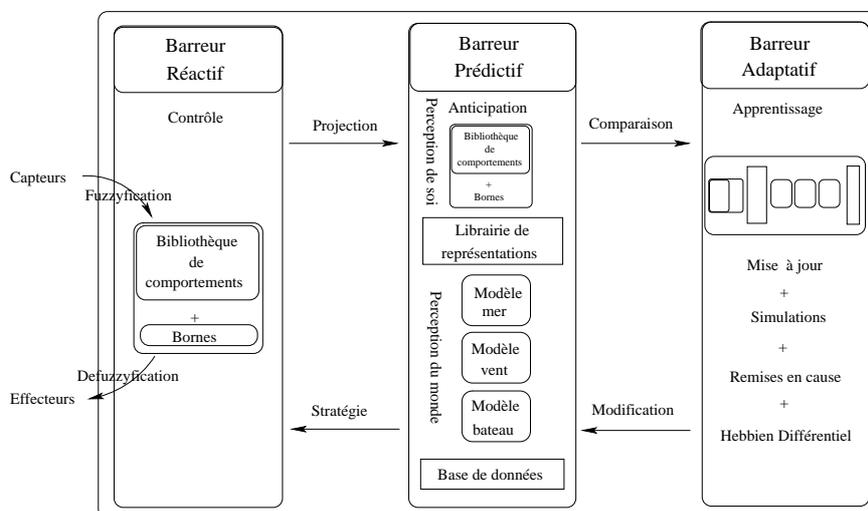
Le principe de perception active stipule que perception et action sont liées par l'existence de modèles internes permettant de simuler les conséquences d'une action par des mécanismes d'inhibition comme si l'individu agissait réellement [BER 97]. Pendant le déroulement d'une action, le cerveau mettrait 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.

Des travaux récents [MOR 03] sur l'analyse de l'activité de contrôleurs de trafic aérien sur simulateur mettent en évidence l'existence de plusieurs niveaux cognitifs fonctionnant en parallèle. Les deux premiers niveaux semblent correspondre aux modes réactif et prédictif de la perception active. Un troisième niveau, fonctionnant en arrière plan, mettrait en oeuvre la faculté d'apprentissage. Enfin la mémoire semble jouer un rôle déterminant à la fois dans la perception active [BER 97] et dans l'apprentissage.

Guidés par ces idées nous proposons l'architecture multi-agents de la figure 2, comme modèle permettant d'implémenter un pilote de voilier vu comme la coopération en parallèle d'un barreur réactif, d'un barreur prédictif et d'un barreur adaptatif.

L'agent réactif ou barreur réactif agit selon un comportement parmi une bibliothèque de comportements. Le barreur réactif est également chargé de vérifier que les valeurs de variables sensorimotrices ne sortent pas de fourchettes imposées. Dans le cas contraire, il prévient par message l'agent prédictif (ici le barreur prédictif). L'agent réactif obéit à une boucle perception/décision/action et fonctionne à haute fréquence car proche de celle des capteurs (dans les pilotes automatiques les capteurs envoient leurs données sur un bus selon des fréquences  $f_p$  qui leurs sont propres ( $10 Hz < f_p < 100 Hz$ )).

L'agent prédictif ou barreur prédictif, choisit un comportement dans la bibliothèque de prototypes prédéfinis et les bornes sensorimotrices associées à son utilisation robuste par l'agent réactif ; ce que l'on appellera une *stratégie*. Pour effectuer la sélection



**Figure 2.** Architecture d'un barreur de voilier.

tion, il simule en parallèle, à moyenne fréquence ( $0,1 Hz < f < 1 Hz$ ), différentes stratégies de la bibliothèque de comportements de l'agent réactif ainsi qu'un modèle du voilier, un modèle de mer et un modèle de vent. Ces simulations ne sont pas des raisonnements logiques, mais des simulations d'actions. Le résultat de ces simulations permet au barreur prédictif de spécifier une nouvelle stratégie déterminée par la donnée d'un comportement de la bibliothèque, de nouvelles bornes pour les variables sensorimotrices et l'inhibition d'un certain nombre de capteurs considérés comme non significatifs. Une fois la stratégie choisie, il détecte ses erreurs significatives de prédiction et en informe le barreur adaptatif.

L'agent adaptatif ou barreur adaptatif se charge de l'apprentissage sur le long terme ( $10^{-4} Hz < f < 10^{-2} Hz$ ) à partir des périodes pour lesquelles le barreur prédictif a signalé une erreur, en comparant les comportements simulés aux comportements mesurés soit du pilote lui-même soit d'un barreur humain devant être imité. Le rôle du barreur adaptatif est d'identifier les différents modèles internes aux barreurs prédictif (modèle du voilier, des vagues, du vent) et réactif (paramètres des comportements de la bibliothèque). Il est donc essentiel que les modèles de comportements continuent de respecter une expertise maritime quel que soit l'état de leurs paramètres.

Ces trois agents – réactif, prédictif, adaptatif – fonctionnent de manière a priori asynchrone sauf lors des échanges de messages. Ce type de communication apporte de la réactivité (le barreur réactif n'entrant jamais en phase d'attente). Ce type d'architecture apporte de la robustesse : le barreur réactif contrôlant la direction du voilier est toujours en action, selon sa propre autonomie, indépendamment de ce que peuvent faire les agents prédictifs et adaptatifs respectant ainsi les critères pour la commande

d'un système de contrôle temps-réel [VER 07]. Sans oublier que l'apprentissage ne demande de ressources CPU qu'aux périodes ayant généré des erreurs de prédiction.

Par exemple, un modèle élémentaire du voilier pour le barreur prédictif consiste à prendre la polaire de vitesse, indiquant une vitesse cible pour une direction et une force de vent données. Le rôle du barreur adaptatif est alors de mettre à jour les polaires théoriques par rapport aux conditions d'état de mer et de voilure pour indiquer au barreur prédictif un rendement moyen correspondant. Avec ce modèle de polaires mis à jour en temps réel, le barreur prédictif sélectionne une stratégie la mieux adaptée selon des critères de sécurité et de performance ; stratégie qu'il fournit dynamiquement au barreur réactif. Ce dernier applique alors cette stratégie. L'expertise maritime a notamment permis d'extraire différentes stratégies ; l'une d'entre elles consiste en réguler le cap compas ("barrer au cap"), une autre en réguler l'angle du vent apparent ("barrer au vent").

En ce qui concerne la mer et le vent, un modèle simple consiste pour la mer en la donnée d'une période, d'une amplitude et d'une direction de houle moyenne principale, et pour le vent d'une force et d'une direction. Le rôle de l'agent adaptatif étant de mettre à jour ces différents modèles.

La prochaine section examine l'utilisation des graphes cognitifs flous pour traduire l'expertise des skippers au sein de la structure réactive, prédictive, adaptative.

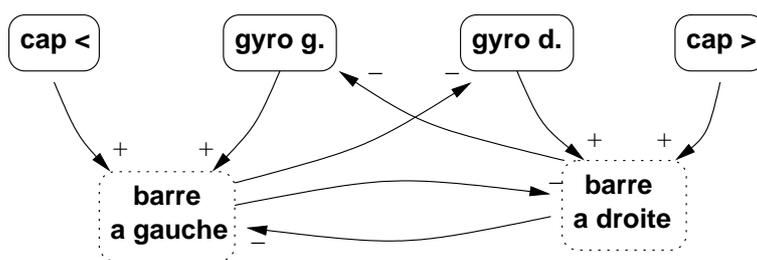
#### 4. Graphes cognitifs flous

La littérature pourtant abondante sur la mer et les voiliers [GLÉ 65] ne recèle pas de modèle ni de description de la technique de barre. Le principe usuellement clamé étant de pratiquer pour apprendre, tout au plus trouve-t-on quelques conseils pour négocier une vague ou une rafale. Dans ce but, une expertise a été menée [GUI ] auprès de coureurs de haut niveau de cultures et pratiques maritimes différentes (course au large, olympisme, match race ...), les auteurs de ce papier étant eux-mêmes des marins. Cette expertise a permis de définir la bibliothèque de comportements de l'agent réactif, ainsi que les modèles du bateau, de la mer et du vent perçus par le barreur.

Les graphes cognitifs flous (GCFs) ont été inventés dans le but de traduire des expertises [KOS 86], leur mise en œuvre étant basée sur de simples calculs matriciels, plutôt que sur des inférences logiques. La complexité algorithmique de tels calculs est donc parfaitement maîtrisée, ce qui nous paraît important dans le cadre du contrôle temps-réel. D'autre part, l'utilisation des GCFs est pertinente pour la spécification, le contrôle et l'apprentissage du comportement d'acteurs virtuels perceptifs [TIS 05]. Dans les GCFs, l'apprentissage respecte l'expertise, ce qui serait très difficile à faire avec des réseaux de neurones. Aussi, nous distinguons la perception de la sensation chez un agent autonome, la perception étant la sensation modifiée par l'état interne de l'agent. Les GCFs permettent de spécifier des comportements perceptifs, et non uniquement des comportements sensitifs comme avec des arbres de décision flous.

On peut voir les GCFs comme des réseaux sémantiques permettant de retranscrire de manière simple et intuitive un comportement complexe ; ils sont ainsi compréhensibles visuellement sous forme de graphes par les marins qui, en tant qu'utilisateurs du système peuvent les valider, voire modifier leurs structures. Dans ce but, on associe les sommets de tels graphes, appelés également concepts, aux affordances marines. La notion d'affordance est issue du domaine de la psychologie écologique [MOR 01]. Gibson [GIB 77] montre que les individus basent leurs comportements sur certaines informations critiques provenant de leur environnement immédiat. Ces informations, appelées affordances sont perçues directement sans effort cognitif et dirigent les modalités de l'action. Les graphes cognitifs sont également nés de travaux de psychologues qui les ont définis pour décrire des comportements complexes de mémorisation topologique chez le rat [TOL 48]. Kosko [KOS 86] y associe la logique floue les transformant en graphes cognitifs flous. Nous ne conservons pas l'idée qu'ils puissent modéliser une topologie spatiale, mais les utilisons comme un outil formel, en tant que graphes d'influence entre concepts sémantiques. Les GCFs sont des graphes orientés dont les noeuds sont des concepts et les arcs des liens d'influence entre ces concepts. Les affordances mises à jour par l'expert vont fournir les concepts. L'expertise va permettre également de dégager des relations d'excitation ou d'inhibition entre affordances et de définir ainsi une matrice des liens, sa matrice d'adjacence ou matrice des flots. Un degré d'activation interne associé à chaque concept est combiné par un opérateur de logique floue avec une activation externe.

La figure 3 propose un modèle du mode compas d'un pilote automatique doté d'un gyromètre, d'un compas fluxgate et d'un capteur d'angle de barre. Le poids d'un arc traduit pour les activations internes, une relation d'inhibition (poids négatif) ou d'excitation (poids positif) du concept à la source de l'arc vers le concept but. Dans cet exemple les poids indiqués par souci de simplicité sont purement sémantiques mais l'expertise permet d'affirmer que les informations **gyro g.** et **gyro d.** pèsent plus lourd que **cap <** et **cap >** et donne ainsi un premier ordre de grandeur. Comment interpréter un tel graphe ?



**Figure 3.** Graphe cognitif flou du mode compas pilote

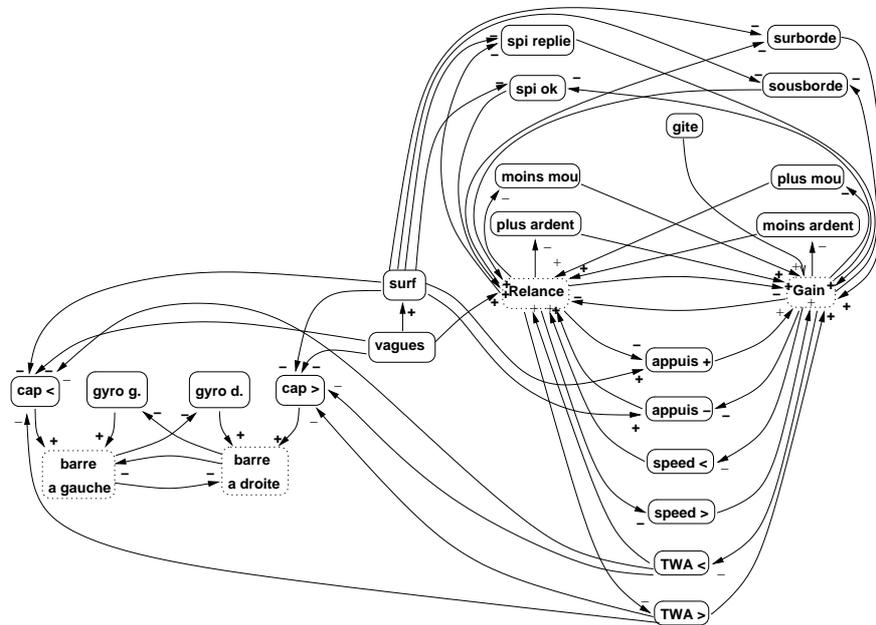
Avoir un cap inférieur au cap cible (**cap <**) excite le concept **barre à gauche** (un marin dira qu'il faut lofer ou abatter selon les cas). Le fait de mettre la barre à gauche inhibe le concept **gyro d.** car alors il est normal d'avoir un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre qu'il ne faut pas alors chercher à compenser.

Une fois le cap à peu près stabilisé, les concepts **gyro d.** et **gyro g.** le régulent finement en anticipant en quelque sorte les embardées.

Un graphe cognitif flou possède des concepts sensitifs (représentés en traits pleins) dont les activations externes sont obtenues par fuzzyfication des données issues des capteurs, c'est à dire l'association d'un vecteur de valeurs analogiques à la valeur de logique floue de l'activation externe du concept. Elle possède des concepts moteurs (représentés en tiretés) dont les activations internes sont défuzzyfiées (c'est à dire l'opération réciproque de la fuzzyfication) pour être combinées et envoyées sur les effecteurs de l'agent. Des concepts intermédiaires peuvent traduire des états internes de l'agent (le plaisir, la crainte, la fatigue ...) permettant ainsi de distinguer sensation (issue des capteurs seuls) de la perception (sensation influencée par l'état interne) comme cela a déjà été utilisé avec succès pour décrire le comportement perceptif d'acteurs virtuels autonomes [TIS 05]. Dans la figure 3 les concepts moteurs sont également sensitifs car les données issues du capteur d'angle de barre servent de référence. La commande à appliquer sera alors en partie fonction d'une combinaison des degrés d'activation interne défuzzyfiés obtenus grâce à la dynamique du graphe, les activations internes du graphe étant calculées par produit matriciel normalisé (pour une définition formelle et complète des graphes cognitifs flous, le lecteur pourra se référer à [TIS 05]). Par exemple, figure 3, **barre à gauche** et **barre à droite** s'excluent mutuellement d'un point de vue action, aussi l'angle de barre dépendra à la fois de la vitesse du bateau et de la différence des degrés d'activation défuzzyfiés de ces deux concepts moteurs.

L'expertise a permis de fournir trois graphes cognitifs flous constituant la bibliothèque de comportements du barreur réactif. La figure 4 présente le comportement "barrer au cap", un autre graphe décrit le comportement "barrer au vent" et un dernier traite du mode très particulier dit de "sécurité". Trois autres graphes donnent respectivement l'image que se fait le barreur de son bateau, de la mer et du vent. Ils fournissent ainsi une image physique de son environnement. Un barreur sait si son bateau est ardent ou mou, comment il réagit à un mouvement de barre, comment il se situe par rapport aux vagues, leur fréquence approximative, comment le vent évolue, etc. Ces graphes permettent au barreur prédictif de comparer la projection qu'il se fait d'une stratégie avec ce qui est renvoyé par les capteurs.

Outre leurs capacités naturelles à traduire une expertise, à mettre en oeuvre, via leur dynamique, le parallélisme observé dans l'activité neuronale et à s'approcher des modes d'évaluations de l'homme par l'usage de la logique floue, les graphes cognitifs flous présentent l'intérêt supplémentaire que plusieurs algorithmes d'apprentissages ont été définis pour eux. L'apprentissage va consister, dans les graphes cognitifs flous, à des remises en cause déterminées en remontant pas à pas le long du graphe des concepts moteurs vers les concepts perceptifs. La mise à jour des poids des arcs se faisant en appliquant un apprentissage hebbien différentiel discret (le lecteur intéressé peut étudier un cas détaillé de ce type d'apprentissage dans [TIS 05]). L'apprentissage consiste également à mettre à jour la base de données à laquelle se réfère le barreur adaptatif, c'est à dire, entre autres, affiner les polaires, compléter ou modifier les



**Figure 4.** *Grappe cognitive floue du mode "barrer au cap"*

angles de barre adopter pour la relance ou le gain en fonction de nombreux paramètres ou encore les vitesses d'exécution de l'action sur la barre.

L'absence d'inférence dans les graphes cognitifs flous ainsi que leur faible connectivité, car un expert relie rarement plus de trois ou quatre concepts à un autre, mènent à des algorithmes de complexité généralement polynomiale voire linéaire, ce qui les rend d'autant plus intéressants dans le cadre d'applications temps réel.

## 5. Conclusion

Barrer un voilier de manière performante tout en tenant compte d'un facteur de sécurité est une tâche complexe car mer, vent voilier et barreur interagissent. Les pilotes automatiques d'aujourd'hui ne répondent pas à ces attentes et les modèles disponibles issus de la physique sont à la fois trop réducteurs et inexploitable dans l'optique d'une utilisation temps réel. Nous nous sommes donc intéressés aux théories des neurophysiologistes décrivant les liens complexes entre action et fonctionnement cérébral et basées sur la notion de perception active. Nous exhibons ainsi une architecture mettant en jeu trois agents qualifiés de réactif, prédictif et adaptatif et fonctionnant en parallèle de manière asynchrone. Nous utilisons les graphes cognitifs flous pour modéliser non seulement le comportement réactif du barreur mais aussi l'image que se fait celui-ci de son bateau, de la mer qui l'entoure et du vent qu'il subit. Ces graphes

sont basés sur la notion d'affordances et de leurs liens qui sont dégagés à partir d'une expertise et permettent d'envisager une forme d'apprentissage.

Se pose maintenant des problèmes de stabilité, d'analyse des comportements et de leurs preuves. C'est d'autant plus difficile dans un cadre complexe où l'environnement est la mer, le voilier et le vent.

Nous espérons valider ce nouveau type de modèle par deux voies en parallèles. Une première consiste à implémenter un tel système sur un voilier réel pour mesurer sa pertinence. Une seconde consiste à expérimenter le modèle de pilotage dans un environnement de réalité virtuelle où seront modélisés la mer, le vent et le voilier. Le passage par un système de réalité virtuelle devrait permettre d'une part de fournir un cadre scientifique à l'expérimentation, où l'environnement est mieux maîtrisé, d'autre part de s'affranchir en partie de l'utilisation d'un vrai voilier de compétition à la disponibilité limitée et au coût exorbitant.

## Remerciements

Merci à Loïc Ponceau, Michel Desjoyeaux, Dimiti Voisin, Christophe Cudennec, Philippe Legros, Jacques Caraës, Hugues Destremeau, Gildas Morvan, Jean-Yves Le Déroff, Gaël Le Cléach, Mathieu Simonnet.

## 6. Bibliographie

- [BER 97] BERTHOZ A., *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, 1997.
- [BOU 06] BOURCIER P., *Quel pilote pour demain ?*, Course Au Large numéro 17, avril/mai 2006.
- [BRU 99] BRUNIA C., « Neural aspects of anticipatory behavior », *Acta Psychologica*, vol. 101, 1999, p. 213-242.
- [CLA 87] CLARKE D., MOHTADI C., TUFFS P., « Generalized Predictive control », *Automatica*, , 1987.
- [FOS 02] FOSSEN T. I., *Marine control systems*, Marine Cybernetics AS, 2002.
- [GIB 77] GIBSON J., « The theory of affordances », *Perceiving, acting and knowing*, , 1977.
- [GLÉ 65] GLÉNANS, Ed., *Cours de navigation des Glénans. Tome I et II.*, Editions du compas, 1965.
- [GOU 99] GOUARD P., *Les nouvelles stratégies en voile*, Chiron, 1999.
- [GUI ] GUILLOU G., « Modélisation d'un barreur de voilier en vue de l'élaboration d'un pilote automatique performant », Document disponible sur demande à goulven@univ-brest.fr.
- [JAU 04] JAULIN L., « Modélisation et commande d'un bateau à voile », *actes de CIFA'04*, Douz Tunisie, 2004, CIFA.
- [KOS 86] KOSKO B., « Fuzzy Cognitive maps », *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 24, 1986, p. 65-75.

- [MOR 01] MORINEAU T., « Éléments pour une modélisation de la notion d'affordance en psychologie ergonomique. », *actes d'EPIQUE'01*, Nantes, France, 2001, Congrès EPIQUE de la Société Française de Psychologie.
- [MOR 03] MORINEAU T., HOC J.-M., DENECKER P., « Cognitive levels of control in Air-Traffic Radar Controller Activity. », *International Journal of Aviation Psychology*, vol. 13, 2003, p. 107-130.
- [MOR 04] MORINEAU T., « L'émergence d'une perspective écologique en psychologie ergonomique, à travers la distinction entre différents niveaux de contrôle cognitif dans l'activité », *actes du colloque ARCo'04*, Compiègne, France, 2004, Colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCo).
- [ROU 05] ROUX Y., BA M., BOIN J.-P., GUILBAUD M., HAUVILLE F., HUBERSON S., « Sailing Boat Performance Prediction », *Ship Technology Research*, vol. 52, 2005, p. 54-64.
- [SHA 98] SHARKEY N., ZEIMKE T., « A consideration of the biological and psychological foundations of autonomous robotics », *Connection Science*, vol. 10, n° 3-4, 1998, p. 361-391.
- [TIS 05] TISSEAU J., PARENTHOËN M., BUCHE C., REIGNIER P., « Comportements perceptifs d'acteurs virtuels autonomes », *RSTI-TSI*, vol. 24, n° 10, 2005, p. 1259-1293.
- [TOL 48] TOLMAN E., « Cognitive maps in rats and men », *Psychological Review*, vol. 55, n° 4, 1948, p. 189-208.
- [VER 07] VERFAILLIE G., LEMAÎTRE M., « A generic architectural framework for the closed-loop control of a system », *proceedings of Control Architectures of Robots (CAR'07)*, Paris, France, 2007, p. 19-31.