

# Méthodologie pour la validation du simulateur de voilier par des essais en mer, une première tentative

Kostia Roncin, Jean-Michel Kobus, Paul Iachkine, Sophie Barré

► **To cite this version:**

Kostia Roncin, Jean-Michel Kobus, Paul Iachkine, Sophie Barré. Méthodologie pour la validation du simulateur de voilier par des essais en mer, une première tentative. Workshop Science-Voile École Navale, May 2005, Lanveoc-Poulmic., France. pp.1-10, 2005. <hal-00527638>

**HAL Id: hal-00527638**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00527638>**

Submitted on 21 Oct 2010

**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.

## Méthodologie pour la validation du simulateur de voilier par des essais en mer, une première tentative.

Kostia Roncin<sup>1</sup>, Jean-Michel Kobus<sup>2</sup>, Paul Iackine<sup>3</sup>, Sophie Barré<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Chercheur associé, Laboratoire de Mécanique des Fluides, Ecole Centrale de Nantes  
UMR -CNRS n°6598. 1 rue de la Noë, BP92101 44321 Nantes.

<sup>2</sup> Maître de conférences LMF, UMR ECN-CNRS n°6598, Nantes

<sup>3</sup> Service Recherche, Ecole Nationale de Voile, Beg Rohu, 56510 Saint Pierre Quiberon  
[kostia.roncin@free.fr](mailto:kostia.roncin@free.fr), [jean-michel.kobus@ec-nantes.fr](mailto:jean-michel.kobus@ec-nantes.fr)

### Résumé

La réalisation du simulateur a été motivée par la perspective de son utilisation à des fins sportives. L'objectif est de disposer d'un outil d'analyse tactique et stratégique afin d'apporter des réponses quantifiées aux questions des coureurs. La dernière partie de cet article présente un exemple du type de réponse que peut apporter le simulateur pour l'évaluation de scénarii tactiques. Pour que ces réponses soient pertinentes, il faut que le simulateur soit validé par des essais en navigation accompagnés de la mesure du vent sur le plan d'eau.

Ces validations ont commencé et nous exposerons nos premières expériences dans ce domaine. Une première campagne de mesure a eu lieu lors d'une compétition de match racing. Une deuxième campagne a été réalisée sur un seul bateau avec une chaîne de mesures plus complète fournissant une position plus précise, l'attitude du bateau et l'angle de barre. Cette campagne comportait des essais de manœuvrabilité (sans voiles) en vue d'une validation partielle du simulateur et des essais sous voiles pour une validation globale.

### Introduction

Le travail présenté est une collaboration entre le LMF et l'Ecole Nationale de Voile. L'ENV assure la logistique des essais dont la définition et la réalisation sont communes. Cette collaboration vise également à améliorer le transfert de résultats de la recherche vers les utilisations sportives. L'E.N.V., conformément à sa vocation, assure l'interface entre les scientifiques et les praticiens sportifs. Dans ce domaine, les essais en navigation constitueront un bon moyen d'établir le dialogue si les procédures et les résultats sont utilisés à deux niveaux ; à savoir une utilisation directe pour les analyses sportives et une utilisation scientifique, comme la validation des simulations. Le matériel de mesure embarqué est développé en collaboration avec l'IUT de Nantes (GEII), avec le soutien de Thales Navigation et de la Société Cadden.

Les deux campagnes d'essais en navigation réalisées à ce jour l'ont été dans des conditions totalement différentes : la première pendant une compétition de match racing en août 2003 sur six bateaux et uniquement du positionnement, la seconde en juin 2005 à Quiberon sur un seul bateau hors compétition mais avec un dispositif de mesure plus complet. Pour les deux campagnes, la méthode et le matériel de mesure du vent étaient les mêmes.

### **Première campagne de mesure lors des Internationaux de France de match racing (Pornichet août 2003)**

La première campagne de mesures, effectuée lors des Internationaux de match racing en août 2003 à Pornichet, avait comme principal objectif de s'assurer de la faisabilité de ce type de mesures et d'appréhender les problèmes techniques et logistiques.

### Mesure de la position des voiliers



Depuis 2002, les GPS sont utilisés couramment et de façon autonome comme outils d'aide à l'entraînement au même titre que la caméra vidéo. L'opportunité du développement d'un modèle portable, réalisé pour la Fédération de Vol Libre et disposant d'une capacité de mémoire étendue, a permis cette utilisation. Durant les Internationaux de France, sur les trois paires de bateaux, un GPS portable était installé et récupéré à la fin de la régatée. Ces GPS peuvent enregistrer jusqu'à 8000

points. Les contraintes d'organisation ne permettant pas de débarquer les appareils entre les régates, une cadence de 5 secondes a dû être adoptée pour pouvoir enregistrer la position des bateaux durant une journée complète de compétition.

### Mesure du vent

Les capteurs et l'électronique associée sont ceux utilisés par le Défi français pour la coupe de l'America. Ils ont été re-conditionnés par l'E.N.V. et quatre supports mobiles (petits catamarans de sport) sont actuellement utilisés pour positionner les dispositifs de mesure sur l'eau. Chaque système est composé d'un anémomètre à ultrason CV3F de LCJ Capteurs, d'un compas électronique, d'un GPS et d'un modem UHF.



Figure 1 : Anémomètre sonique CV3F



Figure 2 : unités de mesure

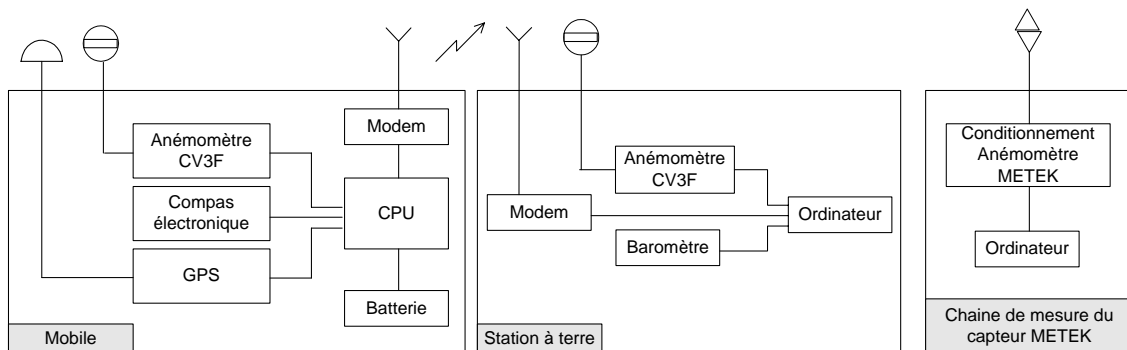


Figure 3 : principe du dispositif expérimental pour la mesure du vent

Lors des essais, le vent était mesuré en quatre points du plan d'eau, comme indiqué sur la figure 4. Cette disposition fournissait un maillage exploitable pour évaluer ensuite le vent en chaque point de la zone de course. Les mesures sont transmises par liaison UHF vers un ordinateur à terre. Ces mesures sont complétées par un point de mesure fixe du même type (vent et pression atmosphérique) directement relié à cet ordinateur.

L'installation comporte également un anémomètre à ultra son METEK dont la grande précision (cm/s) permet un recalage des autres capteurs.

A partir de ces quatre points de mesure, le vent est interpolé pour chaque instant et chaque point du plan d'eau. Cette méthode permet d'estimer le vent que reçoivent les bateaux sans les instrumenter et donc de fournir une mesure normalisée du vent quels que soient la taille et le type de bateau. Contrairement à la mesure directe du vent apparent sur le bateau, Elle a l'avantage de ne pas être perturbé par l'écoulement autour des voiles et par les mouvements[6].

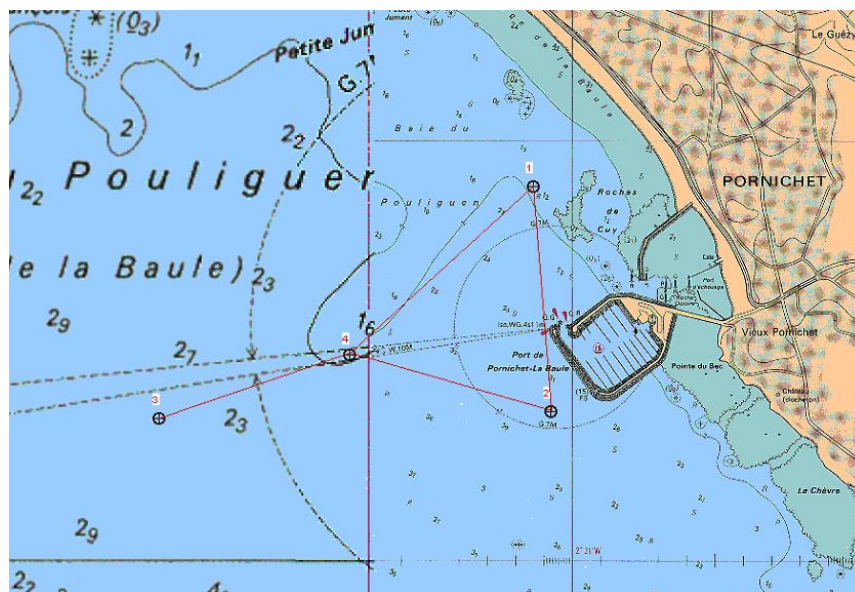


Figure 4 : positions des mobiles le 02 août 2003

Les données enregistrées sur les plans d'eau seront utilisées ultérieurement pour caractériser l'évolution spatio-temporelle du vent et pour valider les modèles micro-météorologiques en cours d'élaboration [2].

### Interpolation du vent

Les mesures de vent sont prises en des points situés obligatoirement à l'extérieur de la zone de régates pour ne pas gêner les coureurs. Déduire le vent à chaque instant en tout point de cette zone et en particulier le vent réel à l'emplacement des bateaux est un problème délicat. Pour l'instant, la technique utilisée est une interpolation linéaire sur une maille triangulaire. Cette interpolation élémentaire au regard de la complexité de la structure du vent n'est acceptable que si l'écoulement est relativement stable. Disposant de quatre mobiles, il est possible de tester la méthode en calculant le vent à l'emplacement d'un mobile à partir des trois autres.

Les figures 5 et 6 donnent un exemple de comparaison entre le vent mesuré sur le mobile 4 et le vent interpolé à sa position en utilisant les mesures des mobiles 1,2 et 3.

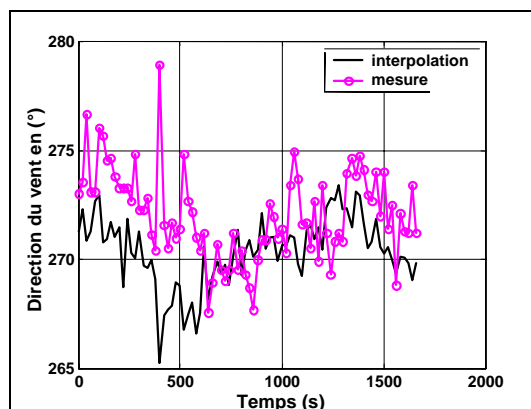


Figure 5 : Directions mesurées et interpolées

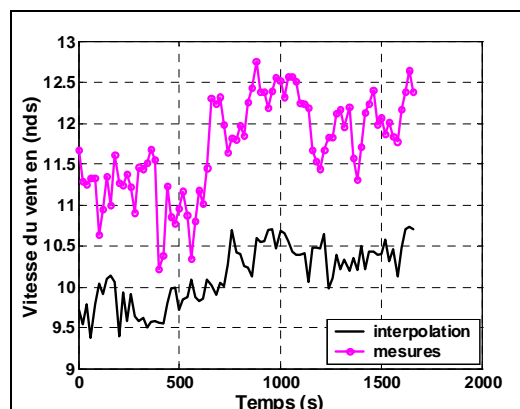


Figure 6 : Vitesses mesurées et interpolées

L'interpolation et la mesure sont bien corrélées. En moyenne, les écarts en direction sont en deçà des incertitudes de mesure actuelles des capteurs. En revanche, l'interpolation de la vitesse du vent n'est pas encore satisfaisante avec un écart moyen de 1,7 nœuds, soit un écart relatif de 13%.

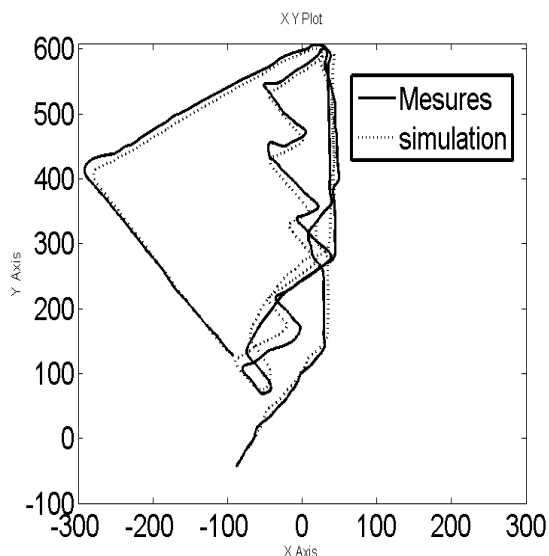
Il faut cependant remarquer que le mobile test se situe à l'intérieur d'un triangle très allongé puisqu'on prend en compte le mobile le plus éloigné de la bouée au vent qui est aussi le plus

exposé. En appliquant cette méthode à une zone de grande dimension, il ne faut pas espérer extrapoler les fluctuations fines de la direction et de la vitesse du vent. La voie de recherche dans ce domaine sera de tenir compte de la vitesse de propagation des fluctuations du vent. Les résultats s'amélioreront probablement également avec la précision des mesures.

Avec le matériel actuel et en réduisant la distance entre les mobiles, on pourra atteindre une précision acceptable dans l'interpolation. Cela permettra de mesurer la performance d'un voilier navigant à l'intérieur de la zone circonscrite par les mobiles en disposant de données de vent correctement quantifiées. Des essais spécifiques de validation des méthodes d'interpolation devront être menés avec trois mobiles en triangle équilatéral et un mobile test au centre.

### **Validation globale du simulateur**

La figure 7 montre une première comparaison entre la trajectoire d'un bateau mesurée par GPS lors d'une régates et la simulation. Le bateau virtuel est asservi à chaque instant au vent apparent mesuré sur le bateau réel. Pour calculer le vent sur le bateau en mouvement, seules les trois unités de mesure du vent disposées autour de la zone de régates ont été utilisées. Bien qu'on ne puisse pas le vérifier, on peut espérer dans ce cas une interpolation acceptable. Une précaution supplémentaire a été de choisir, pour la comparaison, une phase durant laquelle le vent était relativement stable et l'adversaire pas trop proche. Les trajectoires et les mesures de vent sont interpolées et sur-échantillonnées pour fournir la donnée de vent apparent au simulateur avec une fréquence supérieure.



**Figure 7 : Validation du simulateur (Internationaux de France 2003)**

La cadence de mesure de 5s est cependant insuffisante pour détecter précisément les virements de bord sur le bateau réel. Le suivi est pourtant globalement satisfaisant et l'écart entre mesure et simulation est en tout point inférieur à l'incertitude de mesure qui est environ de 15m.

Bien qu'encourageante, cette première comparaison conduit à deux constats :

1. Il faut améliorer la précision du système de mesure et augmenter la cadence de mesure.
2. La validation globale ne permet pas de savoir quelle modélisation il faut améliorer pour se rapprocher de la réalité. Il faut donc mettre en place des protocoles de mesures spécifiques qui permettent de valider indépendamment les différents modules du simulateur.

Depuis les essais un Data logger miniature de plus grande capacité a été testé avec succès. Il permet d'obtenir une mesure de position toutes les deux secondes avec des données complémentaires comme le cap fond et la vitesse. Une antenne active, à la place des GPS actuels, a également été essayée. La précision est la même mais la cadence d'acquisition passe à 1 seconde. La conclusion est cependant que la précision des GPS "grand public", suffisante pour une analyse tactique, est encore insuffisante pour une analyse fine des manœuvres ou de la conduite (technique de barre) et pour la validation précise du simulateur.



La réponse au premier point est apportée par l'adoption de GPS plus précis et plus rapides. Pour satisfaire le second point il est nécessaire de compléter les essais sous voiles par des essais de manœuvrabilité sans voile et de mesurer d'autres quantités.

### Deuxième campagne d'essais avec mesure du comportement du voilier

A partir des conclusions de la première campagne un cahier des charges a été établi pour réaliser un système embarqué adapté à la mesure sur les voiliers. Une collaboration avec le département GEII de l'IUT de NANTES, les sociétés Cadden et Thales a abouti à la réalisation du système embarqué. Ces mesures sont principalement la trajectoire et la vitesse obtenues grâce à un GPS différentiel sub-métrique DG16, le cap, la gîte et l'assiette et toutes les données dynamiques obtenues par une centrale inertielle miniature MT9 de Xsens (figure 8). Le système permet en outre la mesure de l'angle de barre. L'architecture du système est fondée sur une carte PC104, un bus CAN et un modem UHF. Ce système permet de gérer les capteurs, de stocker les données brutes et de transmettre une partie de ces données pour un contrôle à distance. Une station DGPS à terre permet un post-traitement des données GPS pour obtenir une précision inférieure au décimètre. Une caméra embarquée et des microphones complètent le dispositif (figure 9). Les enregistrements audio-vidéo fournissent des informations sur la position de l'équipage dans le bateau et les réglages utilisés. L'incrustation de l'heure GPS sur les images vidéo permet de les synchroniser avec les autres mesures.

Ce matériel installé sur un seul bateau a été utilisé pour la seconde campagne d'essais. Le dispositif de mesure du vent était le même que lors de la première campagne. Sans les contraintes de la compétition, un maillage plus serré et une disposition différente des capteurs sur le plan d'eau ont été adoptés pour valider la méthode d'interpolation du vent.

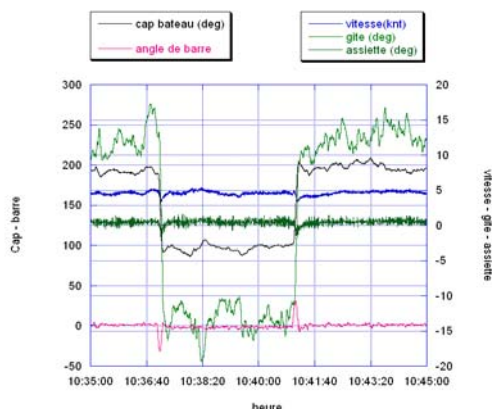


Figure 8 : exemple d'enregistrements de données des différents capteurs.



Figure 9 : vue de la caméra embarquée.

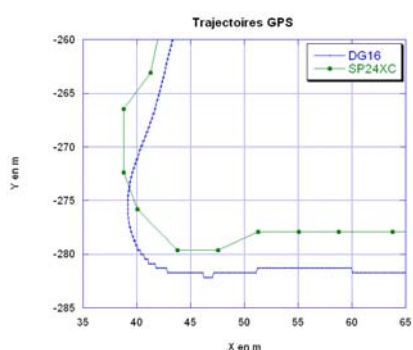


Figure 10: Comparaison des mesures entre DGPS professionnel (20Hz) et GPS grand public (0,5Hz)

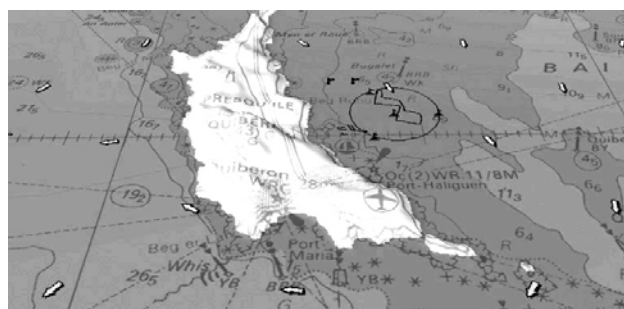


Figure 11 : exemple de visualisation parcours, mobiles, courant.

## Essais de giration sans voiles

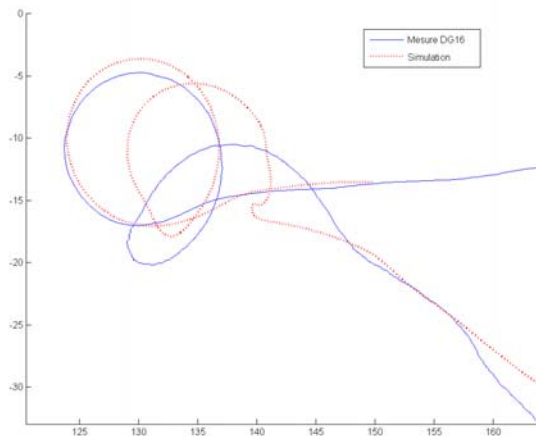


Figure 12 : exemple d'essais de giration

Le bateau est tracté par un pneumatique à vitesse constante entre 5 et 6 nœuds dans la direction du vent, puis il est lâché. On distinguera 4 types d'essais selon que le bateau est tracté face au vent ou au vent arrière et selon qu'il tourne dans un sens ou dans l'autre. Ensuite, le barreur pousse la barre jusqu'à une butée qui correspond à un angle de  $50^\circ$ . Il maintient la barre ainsi jusqu'à la fin de la manœuvre.

La figure 12 est une comparaison entre simulation et mesure pour le premier essais de giration. Les trajectoires sont celles de l'antenne DGPS qui se situe dans le balcon arrière bâbord à 2m50 environ au-dessus de l'eau. A l'instant initial de la simulation le

bateau est placé au même endroit que la position mesurée, avec la même attitude, la même vitesse angulaire et la même vitesse en translation. Toutes ces mesures proviennent respectivement du GPS différentiel et de la centrale inertielle. A partir de ce moment, le bateau est considéré comme libre, c'est-à-dire qu'il est soumis à la seule consigne de l'angle de barre, la mesure de l'angle de barre étant réinjecté dans la simulation sans aucun asservissement supplémentaire. Il est à noter que le bateau ralentit très vite et que la trajectoire est fortement affectée par le courant et le fardage. Ces deux influences sont modélisées dans la simulation.

Il est encourageant de constater que les trajectoires ont des allures similaires est que les rayons de giration du premier tour sont du même ordre de grandeur. Au début de la giration, la trajectoire chasse vers la gauche, ce qui correspond à un mouvement normal pour l'arrière du bateau. Ce phénomène est visible pour la simulation comme pour la mesure. Néanmoins les écarts entre simulation et mesure montrent la nécessité d'affiner les modèles de manœuvrabilité. Une étude est en cours pour exploiter les outils numériques du LMF et affiner la représentation de l'influence des vitesses de rotation sur les efforts hydrodynamiques.

## Validation sur un parcours sous voiles

Est présenté ici un exemple de comparaison entre mesure et simulation sur un parcours comprenant une remontée au vent puis une descente au portant.

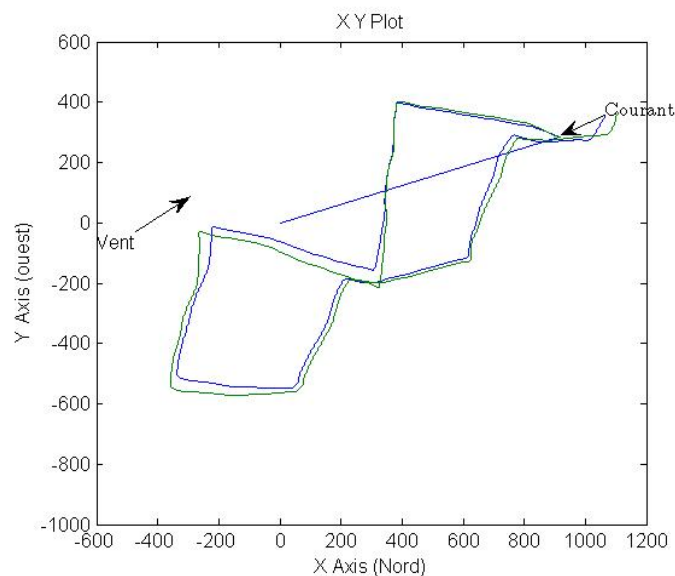


Figure 13 : Parcours P1 (trace foncée) : bateau réel, trace claire : bateau virtuel

**La remontée au vent.** Comme le courant est pris en compte, ce qui est tracé est la route surface. La bouée sous le vent, qui correspond au point de départ de la simulation au près et à la fin de la simulation au portant, se trouve donc décalée. La simulation suit les mesures sur le premier bord de près puis sur les deux tiers du second bord. Les mesures montrent qu'à ce point le bateau réel est ralenti brusquement. Le bateau simulé conserve le même vent apparent que le bateau réel, mais comme il va plus vite, il fait moins de cap sur le fond c'est à dire que l'angle de vent réel est plus important. C'est pourquoi les deux traces divergent à cet endroit. L'écart qui est ainsi créé au terme du deuxième bord est maintenu jusqu'à la bouée au vent.

**Le portant.** Sur le premier bord de portant, le bateau virtuel va plus vite que le bateau réel. Ensuite, mesures et simulation restent parallèles jusqu'au dernier empannage. Il faut noter que dans la simulation, les manœuvres sont modélisées de façon parfaite. Aucun temps mort, on passe du foc au spi instantanément et vice et versa. A noter aussi que, contrairement aux Internationaux de France, les mesures donnent une vitesse globalement plus faible que la simulation. Dans le premier cas, on a un équipage au meilleur niveau mondial, la carène est nue. Dans le second cas, l'équipage est constitué de régatiers de bon niveau mais non entraînés ensemble et la carène est peinte à l'anti-fouling offrant d'avantage de résistance de frottement. Rappelons que le modèle aérodynamique est un modèle auto réglé à l'optimum (en principe). Il n'est donc pas surprenant de constater des écarts de performance entre la mesure et la simulation en route et durant les manœuvres.

### Comparaison d'un virement de bord réel avec un virement simulé.

Pour réaliser la comparaison, les conditions initiales, attitudes et vitesses, sont celles qui sont mesurées. La seule commande pour la simulation est ensuite l'angle de barre mesuré.

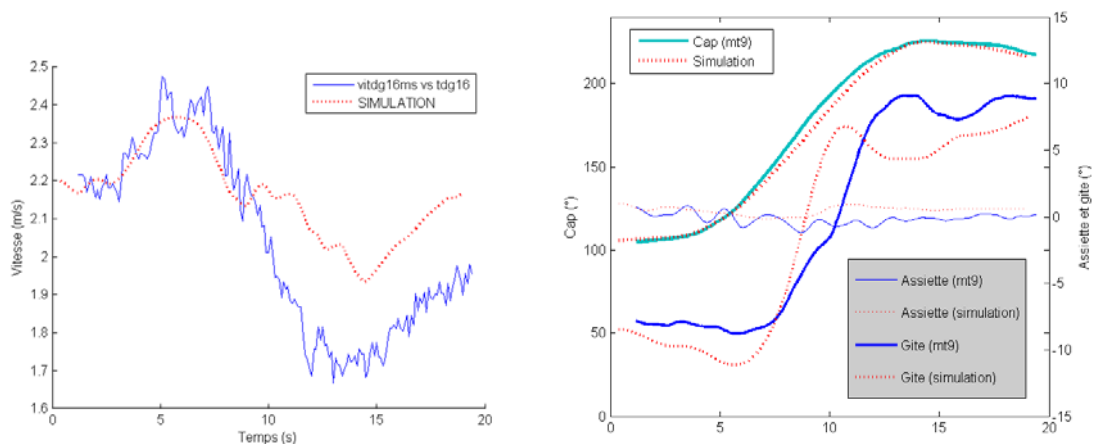


Figure 14: comparaison d'un virement de bord réel et de sa simulation.

Le cap est relativement bien suivi durant le virement. La vitesse est mesurée au niveau de l'antenne GPS, c'est à dire dans le balcon arrière bâbord à 2m50 de hauteur environ. L'arrière du voilier « chassant » au début de la manœuvre on retrouve ce phénomène avec l'augmentation de la vitesse dans la mesure comme dans la simulation. Le déficit de vitesse en sortie de virement est par contre moins important dans la simulation. La gîte varie beaucoup plus rapidement dans la simulation ce qui induit d'ailleurs des irrégularités dans la courbe de vitesse, mais il est difficile de dire si ces écarts proviennent du déplacement de l'équipage, du modèle de manœuvrabilité ou du modèle aérodynamique. On ne retrouve pas non plus les oscillations en tangage dues probablement à la houle.

### Conclusion sur les comparaisons

Le principal problème dans l'interprétation des comparaisons réside dans les incertitudes sur l'environnement. La précision sur la mesure du vent doit encore être améliorée, le courant n'est pas mesuré, mais pris en compte grâce aux données du SHOM en de rares points. Il s'agit de données statistiques qui peuvent varier en fonction des données climatiques. Les vagues ne sont



pas mesurées mais prises en compte dans la simulation comme vagues du vent avec le modèle IMS.

### Exemple d'analyse tactique

Lors des Internationaux de France à Pornichet, Mathieu Richard pose la question suivante : « Lorsqu'on arrive dans les dernières longueurs à l'approche de la bouée au vent et que l'on est devant, vaut-il mieux couvrir son adversaire jusqu'au bout ou éviter deux virements? »

Le cas de référence est le Match 1 du Flight 5 des Internationaux de France 2003 où Eugeni Neugodnikov couvre jusqu'au bout Mathieu Richard. Nous essayons de répondre en utilisant le simulateur. La situation de départ de la simulation est la suivante : a) le vent est de 4.5 m/s soit environ neuf nœuds, b) le voilier en tête possède un peu plus d'une longueur d'avance (~11m), c) les deux bateaux sont déphasés (bords opposés).

Les deux barreaux sont identiques, ils barrent par rapport au vent apparent au VMG max ( $\beta_{aw}=30^\circ$ ,  $V_b=5,2\text{knts}$ ). Le virement de bord simulé est optimisé à l'aide d'une relance pendant 13s ; la perte au virement dans ces conditions est de 6m environ mais il n'y a pas d'optimisation du virement avec les déplacements des équipiers. Nous allons distinguer 3 cas.

#### Cas n°1a

Ici le voilier en tête choisit de couvrir son adversaire. Il effectue deux virements supplémentaires. L'adversaire est couvert et ne réagit pas, il continue de barrer au VMG à  $30^\circ$  du vent apparent. Du fait de l'interaction aérodynamique il est contraint d'abattre et se retrouve alors dans une zone très défavorable. Il perd beaucoup de terrain.

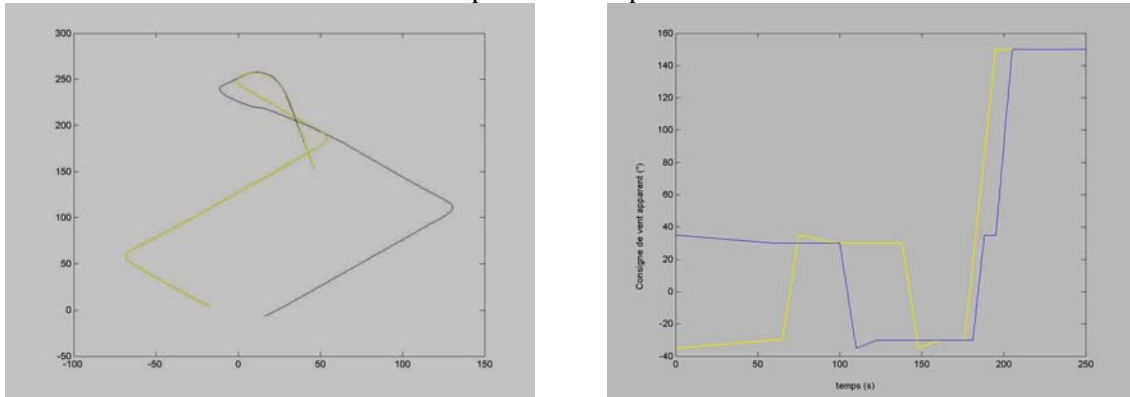


Figure 15 : trajectoires et consignes pour le cas n°1a

#### Cas n°1b

La figure 15 montre un cas analogue, mais cette fois-ci l'adversaire adopte une tactique différente. Lorsqu'il est couvert, il cesse momentanément de barrer au VMG en lofant à  $25^\circ$  du vent apparent. Localement il n'est pas au point de fonctionnement optimal mais il évite ainsi la zone de dévente la plus pénalisante

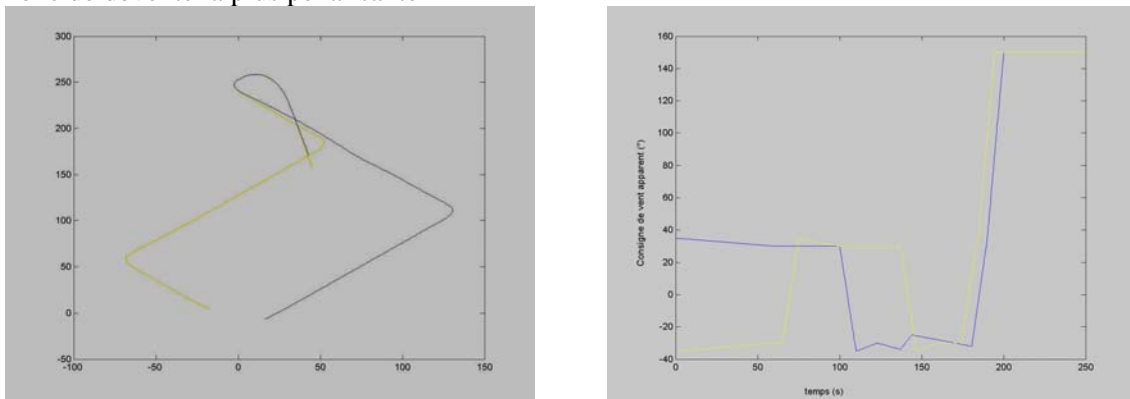


Figure 16 : trajectoires et consignes pour le cas n°1b

## Cas n°2

Ici le voilier en tête préfère économiser deux virements (soit un gain d'environ 12m) en ne couvrant pas son adversaire. Il choisit de rejoindre la lay-line directement.

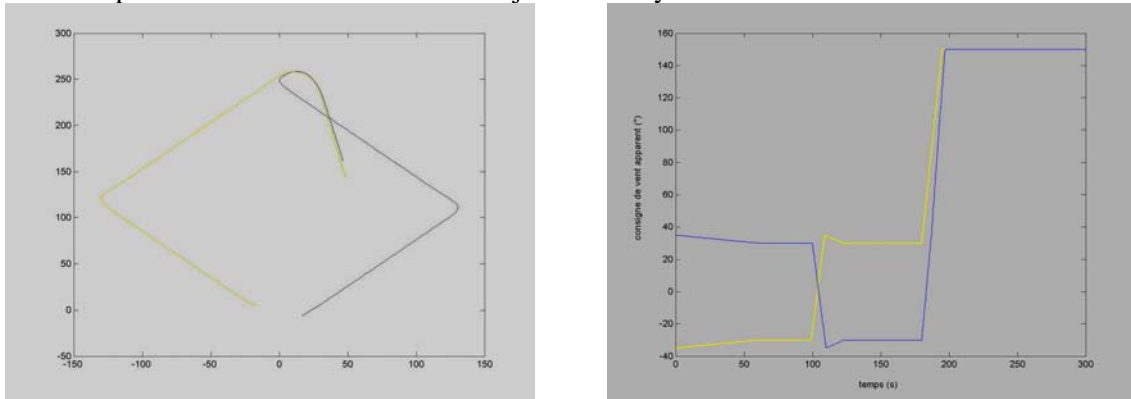


Figure 17 : trajectoires et consignes pour le cas n°2

## Résultats

La solution n°1a donne l'écart le plus important mais a peu de chance de se produire dans la réalité. Il est peu probable que le voilier couvert ne réagisse pas d'une manière ou d'une autre. En terme d'avance, la solution 2 semble la meilleure pour le voilier de tête qui termine la manœuvre avec environ 17m d'avance. L'avantage est creusé notamment à l'envoi de spi. Le voiler bâbord ressort de la manœuvre avec plus de vitesse que le second voilier qui a dû viré.

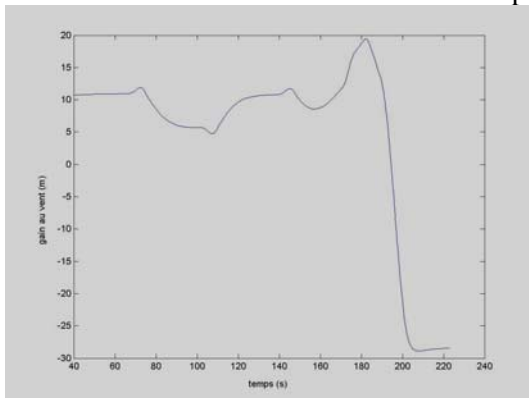


Figure 18 : gain au vent cas n°1a

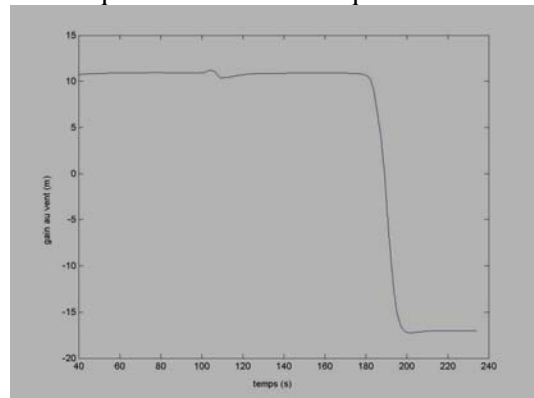


Figure 19 : gain au vent cas n°2

La solution 1b cependant présente l'avantage de limiter les risques, notamment en cas de vent oscillant. D'autant qu'une partie de la perte due aux deux virements supplémentaires est rattrapée par la gêne provoquée chez l'autre voilier. La probabilité de passer la bouée en tête est sans doute plus élevée mais l'avance sera statistiquement plus faible. La notion de risque est encore discutable car l'avantage plus faible est d'autant plus délicat à conserver au portant.

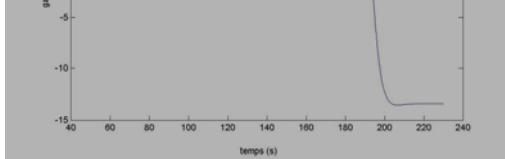


Figure 20 : gain au vent cas n°1b

## Conclusion et perspectives

Les résultats des comparaisons entre mesures et simulations sont encourageants pour les validations globales. Afin d'améliorer encore cette comparaison, il faudra utiliser des paramètres dans le modèle aérodynamique permettant de tenir compte de la qualité du réglage adopté par l'équipage à chaque instant.

Le matériel de mesure est opérationnel pour la mesure du vent. Les efforts doivent être concentrés sur les procédures d'étalonnage des capteurs et sur la recherche d'une meilleure interpolation du vent sur le plan d'eau.

Le matériel de mesure embarqué demande encore à être amélioré et fiabilisé pour pouvoir être mis en œuvre rapidement.

La principale conclusion est cependant que l'identification à partir d'essais de manœuvrabilité des différents modèles utilisés dans le simulateur est encore prématurée. Il y a trop d'incertitudes sur la mesure de l'environnement et il faudra probablement refaire des essais de manœuvrabilité dans des conditions de vent nul et sans vagues en essayant d'évaluer le courant plus précisément.

Propulser le bateau par un moteur pendant les manœuvres pourrait aussi être envisagé à condition de bien modéliser cette propulsion.

La mesure des efforts sur le safran permettrait d'améliorer le modèle de calcul des efforts sur cet appendice et faciliterait l'identification du modèle de manœuvrabilité en introduisant directement les efforts de commande mesurés dans la simulation.

Il serait également indispensable de connaître le plus exactement possible les caractéristiques réelles des bateaux testés, leur poids, la position du centre de gravité et les inerties par exemple. Une procédure de calcul et une procédure expérimentale sont actuellement à l'étude pour améliorer ce point.

Un modèle de déplacement de l'équipage est à réaliser pour améliorer l'étude des virements de bord et des manœuvres. La vidéo sera d'un grand secours dans ce domaine.

Enfin les logiciels de CFD seront bientôt exploités pour fournir des coefficients de manœuvrabilité et des expériences en bassin des carènes utilisant l'excitateur à six degrés de liberté du LMF dit « Hexapode » permettront d'avancer dans ce domaine.

## Références

- [1] Claughton A., "Developments in the IMS VPP Formulations". Presented at The Fourteenth Chesapeake sailing yacht symposium, Annapolis, Maryland, January 30, 1999, pp. 1-20.
  - [2] Herlédant Olivier, Calmet Isabelle. "Simulations numériques du vent sur le plan d'eau de Quiberon en vue d'une exploitation des résultats par les régatiers". 1<sup>er</sup> Colloque Sport et Recherche en Pays de la Loire. 23-24 mars 2005.
  - [3] Iachkine Paul et al. « Une chaîne de mesure permettant de caractériser la performance en voile ». 1<sup>er</sup> Colloque Sport et Recherche en Pays de la Loire. 23-24 mars 2005.
  - [4] Myers Hugo A., IBM Federal System Division, Gaithersburg, Maryland. "Theory of sailing applied to ocean racing yachts", Marine Technology, Vol. 12 number 3, p.223-242, 07/1975.
  - [5] Nivelleau V. et F., "Sillage aérodynamique du voilier Cartographie générale du sillage Etude locale (girouette) interaction de deux voiliers". St Cyr l'Ecole, Août-Septembre 1994.
  - [6] Richter H.J et al. Computational fluid dynamics for downwind sails. In: The 16<sup>th</sup> Chesapeake Sailing Yacht Symposium. Annapolis, Maryland; 2003. p 19-27.
  - [7] Roncin K, Kobus J.M. Dynamic simulation of two sailing boats in match-racing. In: Sports Engineering. 2005 (à paraître).
- Roncin K. Simulation dynamique de la navigation de deux voiliers en interaction. Thèse de Doctorat. Laboratoire de Mécanique des Fluides, ECN, juillet, n° ED : 0367-47. 2002.