

Pilote automatique pour voilier radiocommandé : asservissement du cap et régulation d'allure.

Le pilote automatique est un outil indispensable aux navigateurs lors de traversées en solitaire. Il joue également un rôle central dans développement de voiliers autonomes dédiés à la surveillance maritime. Pratiquant la voile et le modélisme, embarquer un tel système sur un voilier radiocommandé représente un défi technique motivant.

L'étude repose sur des boucles de rétroaction assurant l'asservissement du cap et de l'allure du voilier. Des mesures cycliques permettent de corriger en continu les écarts dus au vent et aux perturbations. La navigation résulte ainsi d'interactions dynamiques entre plusieurs boucles de contrôle imbriquées.

Le candidat atteste avoir travaillé en monôme.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *INFORMATIQUE (Technologies informatiques)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Pilote automatique</i>	<i>Autopilot</i>
<i>Régulateur d'allure</i>	<i>Wind-steering system</i>
<i>Asservissement</i>	<i>Feedback control</i>
<i>Capteurs embarqués</i>	<i>Embedded sensors</i>
<i>Voilier robotisé</i>	<i>Robotic sailboat</i>

Bibliographie commentée

Les voiliers autonomes connaissent un fort essor et trouvent des applications scientifiques et civiles telles que l'océanographie ou la surveillance maritime. À titre d'exemple, le Danemark expérimente en mer Baltique une flotte de voiliers robotisés *Voyager* développés par l'entreprise américaine Saildrone [1] afin d'étendre ses capacités de surveillance. Le développement de ces plateformes pose de nombreux défis technologiques : robustesse face aux conditions environnementales, très longue autonomie, fiabilité des communications et, plus

fondamentalement, capacité à naviguer de manière autonome. C'est sur ce dernier aspect, la navigation, que se concentre le présent TIPE.

Pour naviguer à la voile, il faut être apte à maintenir une trajectoire donnée malgré des perturbations permanentes. Cette trajectoire peut être définie soit par un cap, exprimé par rapport au nord, soit par une allure, correspondant à l'angle entre l'axe longitudinal du bateau et la direction du vent apparent. Dans les deux cas, la correction des écarts repose sur des boucles de rétroaction agissant sur le gouvernail.

L'ouvrage *Self-Steering under Sail* [2] constitue une entrée naturelle dans le sujet en proposant un panorama des dispositifs d'autopilotage utilisés en navigation réelle. Il distingue les pilotes automatiques à cap constant des régulateurs d'allure, dont la consigne est un angle bateau-vent. Cette référence permet ainsi de clarifier le rôle respectif des capteurs (compas, girouette) et de l'actionneur de gouvernail, mais reste essentiellement descriptive.

Afin de dépasser cette approche empirique, il est nécessaire d'introduire un cadre théorique permettant de formaliser la dynamique du système. L'ouvrage *Marine Control Systems* de Thor I. Fossen [3] fournit ce cadre en présentant les bases du guidage, de la navigation et du contrôle des véhicules marins. Il insiste sur l'utilité de modèles dynamiques adaptés à l'objectif de commande, et sur la nécessité d'explicitier les hypothèses retenues. Cette démarche conduit naturellement à l'étude de modèles simples dédiés à la tenue de cap.

Dans cette perspective, l'article fondateur *On the Steering Qualities of Ships* de K. Nomoto et al. [4] propose un modèle dynamique simple reliant la déflexion du gouvernail au taux de lacet du navire. Le modèle de Nomoto d'ordre 1 repose sur l'hypothèse d'une vitesse quasi constante et de variations angulaires modérées, ce qui le rend particulièrement adapté à l'étude de systèmes de pilotage. Dans le cas d'un voilier radiocommandé, lorsque la constante de temps du bateau est grande devant celle de la boucle de commande, cette dynamique peut être assimilée à un intégrateur pur. Cette modélisation permet d'envisager des lois de commande simples.

Un voilier se distingue toutefois d'un bateau à moteur par l'influence directe du vent, qui introduit des perturbations dépendant de l'allure et du réglage de la voile. Ces spécificités sont étudiées dans l'article de Luc Jaulin *Modélisation et commande d'un bateau à voile* [5], qui met en évidence les couplages entre forces aérodynamiques et hydrodynamiques. Il distingue clairement la commande de trajectoire par le gouvernail de la gestion de la voilure. Dans le cadre de ce TIPE, seule la première est mise en œuvre : l'allure est régulée automatiquement par action sur le safran, tandis que la voile est réglée manuellement.

L'ouvrage collectif *Les voiliers robotisés* de Yves Brière, Fabrice Le Bars et al. [6], professeurs respectivement à l'ISAE-SUPAERO et à l'ENSTA, propose une synthèse des travaux récents en voile autonome. Il décrit les architectures de commande et les capteurs essentiels, en particulier pour la mesure du vent. Des échanges avec Yves Brière et Fabrice Le Bars ont permis de confronter ces apports théoriques aux contraintes expérimentales propres aux voiliers de petite taille.

Les projets présentés sur le site *Robotic Sailing* [7] et dans le cadre du *Microtransat Challenge* [8] illustrent enfin des applications concrètes de ces principes à des voiliers autonomes soumis à des perturbations importantes. Ils soulignent l'intérêt de lois de commande simples et robustes, adaptées à des systèmes sous-actionnés.

Enfin, la datasheet du servo de gouvernail utilisé [9] permet de caractériser précisément l'actionneur du safran.

Problématique retenue

Dans quelle mesure un modèle dynamique simplifié permet-il de décrire correctement l'action du safran sur un voilier radiocommandé ?

Comment exploiter simultanément les mesures de plusieurs capteurs pour définir pose et allure du voilier de manière fiable ?

Ces choix permettent-ils de réguler efficacement le cap et l'allure ?

Objectifs du TIPE du candidat

On se donnera les objectifs suivants :

1. Choisir un modèle dynamique pertinent pour décrire l'influence du safran sur la trajectoire du voilier radiocommandé.
2. Modifier une maquette de voilier radiocommandé existante pour y intégrer une girouette (à concevoir, modéliser et imprimer en 3D), un microcontrôleur et des capteurs embarqués.
3. Être capable d'extraire de plusieurs capteurs (GPS, IMU, girouette) les informations pertinentes à la commande.
4. Implémenter un contrôle du safran intégrant un mode manuel de sûreté.
5. Sur un lac, valider expérimentalement une régulation du cap et une régulation de l'allure du voilier.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] SAILDRONE INC. : Saildrone Voyager : <https://www.saildrone.com/platform/voyager>

[2] PETER CHRISTIAN FÖRTHMANN : Self-Steering under Sail : Autopilots and Wind-Steering Systems : *Adlard Coles Nautical* (1998), ISBN-13: 9780713648928

- [3] THOR I. FOSSEN : Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicules : *Marine Cybernetics* (2002), ISBN-10 : 8292356002
- [4] KENSAKU NOMOTO AND KENSHI TAGUCHI AND KEINOSUKE HONDA AND SUSUMU HIRANO : On the Steering Qualities of Ships : *International Shipbuilding Progress* (IOS Press) (1957) - Vol. 4, Issue 35, 354-370, DOI : 10.3233/ISP-1957-43504
- [5] LUC JAULIN : Modélisation et commande d'un bateau à voile : *Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA)*, (2004), Douz, Tunisie
- [6] FRÉDÉRIC PLUMET AND YVES BRIÈRE AND FABRICE LE BARS : Les voiliers robotisés : *Techniques de l'ingénieur - Conception, modélisation et commande en robotique*, Vol. s7815, (2018)
- [7] WORLD ROBOTIC SAILING CHAMPIONSHIP AND INTERNATIONAL ROBOTIC SAILING CONFERENCE : Régate de voiliers autonomes et conférence scientifique sur la navigation robotisée : <https://www.roboticsailing.org>
- [8] MICROTRANSAT CHALLENGE : Course transatlantique de voiliers autonomes : <https://www.microtransat.org>
- [9] SHENZHEN FEETECH RC MODEL CO. : Product specification - FB5118M : https://www.feetechrc.com/74v-17-kg-digital-steering-gear_51007.html