

Sylvie Putot
LIX - UMR 7161
1 rue Honoré d'Estienne d'Orves
Bâtiment Alan Turing, campus de l'École Polytechnique
91120 Palaiseau
Courriel : putot@lix.polytechnique.fr

**Rapport sur le mémoire présenté par Auguste Bourgois
"Safe and collaborative autonomous underwater docking"**

préparé au Lab-STICC, Brest, sous la supervision du professeur Luc Jaulin, en vue d'une soutenance de thèse de doctorat de l'ENSTA Bretagne, ED Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, spécialité Robotique.

Le travail présenté par Auguste Bourgois a pour objectif de proposer des méthodes ensemblistes pour prouver la faisabilité de retour autonome de sous-marins à une base connue, en dépit d'une localisation potentiellement imprécise.

Le **chapitre 1** introduit de façon accessible et illustrée les problématiques liées à l'utilisation croissante de robots mobiles pour des tâches de maintenance sous-marine, que l'on souhaite automatiser au maximum. Ces robots sous-marins doivent être capables après leur mission d'inspection de rejoindre et s'amarrer à une base, tâche qui constitue le contexte applicatif de la thèse. La difficulté réside dans la faible précision des données de localisation du robot sous l'eau. En l'absence de données du type de celles données au-dessus de l'eau par le système GPS, le robot se base essentiellement sur l'intégration de données proprioceptives, typiquement données par une centrale inertielle. La localisation est ainsi sujette à dérive, notamment en cas d'effets extérieurs connus de façon très imprécise comme les courants. Généralement, le robot recale autant que possible sa localisation en détectant grâce aux capteurs (caméras, sonars) des obstacles dont on connaît la localisation, mais sa localisation peut rester très imprécise. Garantir que le sous-marin sera capable dans tous les cas de rejoindre sa base de façon entièrement autonome demande des méthodes spécifiques, permettant de valider le contrôle, même en cas de localisation imprécise. Auguste conclut cette introduction par un état de l'art ciblé sur les deux classes d'approches dans la lignée desquelles se placent ses contributions pour résoudre ce problème - l'analyse d'atteignabilité et l'analyse de stabilité de systèmes dynamiques continus et hybrides - le robot contrôlé étant modélisé comme un système hybride.

Le **chapitre 2** introduit les outils et concepts mathématiques qui sont utilisés dans les chapitres suivants. Le chapitre commence par une introduction aux systèmes dynamiques, à temps continu ou discret, et aux systèmes hybrides. Des exemples simples illustrent la présentation. Une attention particulière est accordée à la définition et au calcul comme solution de l'équation variationnelle, de la Jacobienne du flot solution ou matrice de sensibilité, qui seront utilisés par la suite. Ensuite sont introduits les outils permettant de raisonner en présence d'incertitudes, notamment l'arithmétique d'intervalles et différentes fonctions d'inclusion permettant de garantir la sortie pour un ensemble d'entrée, en particulier la

forme centrée qui sera utilisée de manière récurrente. Puis est détaillé l'algorithme de Lohner d'intégration garantie pour les systèmes dynamiques incertains, basé sur une expansion de Taylor-Lagrange de la solution. La construction de l'algorithme est justifiée, toutes les étapes en sont soigneusement et pédagogiquement décrites et abondamment illustrées. Ces explications sont systématiquement accompagnées par le code permettant leur appel dans la bibliothèque "Computed Assisted Proof in Dynamics" CAPD, qui donne les briques permettant soit d'implémenter son propre algorithme, soit de tester directement les algorithmes pré-implémentés. Ce travail a été réalisé de façon à populariser cette méthode précise et efficace d'intégration en direction de lecteurs roboticiens parfois non familiers de ces techniques. Finalement, le chapitre se conclut par une introduction au problème de satisfaction de contraintes et à l'utilisation de contracteurs associés pour raffiner le domaine de solutions. J'ai trouvé ce chapitre d'état de l'art remarquablement clair et informatif.

Le dense **chapitre 3** constitue le coeur des contributions de la thèse. Il s'attaque au problème de prouver la faisabilité d'une mission d'amarrage du sous-marin à sa base. Pour cela, Auguste formalise ce problème comme un problème de stabilité sur un système dynamique ou hybride incertain. Il propose ensuite la notion de "contracteur de stabilité" permettant de prouver la stabilité asymptotique et même exponentielle dans le voisinage d'un point d'équilibre. Dans le cas d'un équilibre exponentiellement stable, il propose un contracteur de stabilité basé sur la forme centrée associée aux itérées successives du système. Il applique cette approche dans un premier temps à la stabilité des systèmes à temps discret, et l'illustre sur plusieurs applications robotiques classiques. Dans un deuxième temps, il montre comment cette technique peut être utilisée pour prouver également la stabilité de systèmes à temps continu, en passant par leur discrétisation, dans le cas de systèmes dont le second membre est continument différentiable et où la trajectoire entre deux instants du système discret est garantie de ne pas trop diverger. Enfin, il conclut ce paragraphe en montrant que l'approche peut être étendue pour raisonner sur la stabilité de trajectoires formant un cycle, avec comme application l'évolution d'un robot navigant dans un lac, modélisé sous la forme d'un système hybride dont les modes correspondent à des changements de cap lors du franchissement de frontières virtuelles. L'approche consiste à raisonner sur le système discret constitué par l'application de Poincaré associée aux frontières correspondant aux changements de cap. Le chapitre se conclut sur une courte discussion de la caractérisation de bassins d'attraction des points d'équilibre, en couplant l'approche proposée dans la thèse avec des stratégies de pavage du domaine.

Le **chapitre 4** expose une autre contribution de la thèse, qui concerne l'analyse d'atteignabilité de systèmes dynamiques à temps continu. Il propose et expérimente un nouveau contracteur pour des tubes englobant l'ensemble d'états atteignables par le système, basé sur l'algorithme de Lohner. La supériorité de ce contracteur sur le contracteur existant de Picard pour les tubes est discutée et ne fait pas de doute. Avec davantage de temps disponible, il aurait été intéressant de comparer cette approche à d'autres approches et outils existant pour l'analyse d'atteignabilité de systèmes continus ou hybrides.

Enfin, le **chapitre 5** récapitule de façon synthétique les contributions de la thèse et présente des pistes de travaux futurs.

Le manuscrit proposé par Auguste Bourgois est très bien écrit et agréable à lire. Le chapitre introduisant les outils mathématiques, bien que ne présentant pas de nouveaux résultats,

constitue une contribution très utile, en proposant une introduction très claire, à la fois concise et complète, aux méthodes intervalles pour l'intégration de systèmes dynamiques. Tout au long du manuscrit, les concepts clés et contributions sont introduits de façon rigoureuse et systématiquement illustrés par des schémas et exemples instructifs et convaincants. En partant du problème spécifique du retour à la base de robots sous-marins, Auguste a su proposer des contributions dont l'intérêt dépasse très largement l'application d'origine : notamment, les algorithmes proposés pour la preuve de stabilité de systèmes à temps discret, continu, puis de systèmes hybrides, proposent des solutions très convaincantes à un problème ardu. Il montre également que, bien utilisées, les formes centrées sont un outil à la fois simple et puissant pour valider des systèmes incertains dont les incertitudes ne sont pas trop larges. Une implémentation et un travail d'expérimentation ont de plus permis de valider les contributions théoriques et algorithmiques, reconnues également par 2 publications (plus une soumission en cours).

En conclusion, au vu de l'importance des contributions et de la qualité du travail, je recommande sans réserve la soutenance de la thèse de Auguste Bourgois.

A Palaiseau, le 31 décembre 2020



Sylvie Putot
Professeur,
Ecole Polytechnique