

# Review Reports on Simon Rohou's PhD Thesis

11<sup>th</sup> of December 2017

1. Philippe Bonnifait (rapporteur, Professor, Heudiasyc, Compigne, France)
2. Gilles Trombettoni (rapporteur, Professor, LIRMM, Montpellier, France)
3. defence report

## RAPPORT SUR LE MÉMOIRE

De Monsieur Simon Rohou

intitulé

### RELIABLE ROBOT LOCALIZATION:

#### A CONSTRAINT PROGRAMMING APPROACH OVER DYNAMICAL SYSTEMS

En vue de l'obtention du doctorat de l'université de Bretagne Loire, délivré par l'université de Bretagne occidentale, dans la spécialité « robotique ».

Par Philippe Bonnifait, professeur à l'université de technologie de Compiègne.

## 1 Objectif et cadre général

Les robots sous-marins évoluent en général dans des environnements peu structurés où des amers naturels sont rares. De plus, les modalités de perception utilisées actuellement, comme par exemple des sonars acoustiques, ont des portées limitées et fournissent des mesures très bruitées. Dans ce contexte, la navigation inertielle aidée de mesure de vitesses Doppler demeure la modalité de localisation la plus utilisée mais elle ne permet pas de faire des missions robotiques complexes du fait de l'erreur de dérive. Or, il existe des cas où le robot peut faire des mesures extéroceptives sur des objets localisés (comme par exemple des épaves sous-marines qui peuvent avoir certains points très bien localisés et donc faire office d'amer) ou bien sur les fonds marins. L'exemple d'utilisation d'épaves (qui est traité comme exemple dans la thèse) fait apparaître une incertitude nouvelle : l'incertitude sur la date des mesures extéroceptives. Lorsque le robot fait une mission dans laquelle la trajectoire se recoupe, il peut exploiter cette information pour réduire son erreur de localisation. Ces boucles sont très utiles si elles sont bien localisées en espace et en temps.

Dans ce contexte, la thèse adresse différentes questions liées à l'estimation d'état de systèmes dynamiques dans le contexte des erreurs bornées en formalisant le problème sous un angle nouveau dans lequel le temps est une grandeur qu'il convient d'estimer en plus des grandeurs habituelles. Ceci permet de formaliser une approche de contraintes de trajectoire avec des mesures incertaines effectuées à différents instants mais aux mêmes positions quand la trajectoire se recoupe.

Monsieur Simon Rohou a réalisé sa thèse de doctorat dans le laboratoire Lab-STICC à l'ENSTA Bretagne et de façon conjointe à l'Université de Sheffield (UK) sous la direction de Luc Jaulin et Fabrice Le Bars, côté français, et Lyudmila Mihaylova et Sandor M. Veres, côté anglais.

## 2 Analyse de la thèse

Le manuscrit fait 272 pages. Il est organisé en 8 chapitres dont le premier est une introduction générale et le dernier la conclusion générale avec des perspectives. Il ne contient pas d'annexe. La thèse est écrite en anglais.

Dans cette section, les différents chapitres sont analysés et commentés.

### *Chapitre 1*

Ce chapitre fait office d'introduction générale de la thèse. L'auscultation des fonds marins (encore largement inconnus à la surface de la terre) avec des robots autonomes constitue la motivation principale de la thématique des travaux. Plusieurs robots sous-marins sont présentés et l'accent est mis sur le problème de leur localisation autonome. Quelques techniques de trilatération acoustique avec balises sont présentées. L'accent est finalement mis sur les méthodes de localisation et cartographie simultanées (SLAM en anglais) et notamment le problème de la détection de boucle qui permet de corriger la carte et la pose du robot ; c'est d'ailleurs la caractéristique essentielle qui distingue le SLAM de la localisation relative à l'estime lorsqu'on ne s'intéresse pas à la carte construite.

## Chapitre 2

M. Rohou rappelle ici des éléments d'analyse par intervalles qu'il utilisera dans sa thèse : vecteurs d'intervalles, fonctions d'inclusion, inversion ensembliste (SIVIA), contracteurs. En particulier, il illustre son discours avec l'exemple de la localisation avec mesures de distance seules et le calcul du noyau d'une fonction intervalle. Le calcul ensembliste garantit de ne perdre aucune solution. La détermination des bornes de bruit de mesure est discutée en insistant sur le fait que le calcul ensembliste ne rajoute aucun risque sur le calcul du résultat.

## Chapitre 3

Le troisième chapitre s'intéresse à la propagation de contraintes sur des ensembles de trajectoires, notamment des contraintes impliquant des équations différentielles. Un exemple introductif avec des balises émettant sur des portées limitées est utilisé pour illustrer un problème concret. Après avoir défini la notion de « tube », c'est-à-dire un ensemble de trajectoires sur intervalle de temps, le candidat caractérise son inversion conformément à un intervalle donné, donne des propriétés arithmétiques et discute de son intégration. On peut notamment appliquer les mécanismes de propagation de contraintes. Des illustrations très pédagogiques sont données pour illustrer les propos. Afin de manipuler concrètement des tubes, M. Rohou présente une technique de discrétisation spatiale avec des boîtes (appelées « tranches ») qui est gérée sous la forme d'arbre binaire en machine (une librairie de calcul a été développée par M. Rohou). Le chapitre se termine par une simulation d'un problème de navigation à l'estime pour un robot sous-marin qui montre que la bibliothèque de calcul fonctionne correctement et on observe que l'incertitude de localisation croît sans borne et selon une évolution standard.

## Chapitre 4

Ce chapitre s'intéresse à l'intégration d'équations différentielles ordinaires mais non linéaires de façon à encadrer les tubes solutions de façon garantie. Un contracteur différentiel indépendant du pas d'échantillonnage est proposé. Il suppose que la dérivée est bornée. À partir d'un exemple très pédagogique, M. Rohou illustre le principe qui consiste à éliminer les trajectoires incompatibles avec la contrainte de dérivée. Il est démontré que cette dernière ne peut pas être contrainte d'avantage. La mise en œuvre pratique repose sur des propagations avant et arrière, selon le temps. L'effet de la discrétisation temporelle est parfaitement contrôlé. La figure 4.2 illustre parfaitement le concept. Le principe est mise en œuvre d'abord en simulation, après avoir présenté le réseau de contraintes impliquées dans le problème. On observe clairement que grâce à une seule mesure bornée, la contrainte différentielle permet de réduire l'incertitude avant et après la mesure (puisque les données sont gardées en mémoire selon le principe du lissage). En cas de boucle dans le réseau de contraintes, le processus est itéré jusqu'au point fixe. M. Rohou détaille une amélioration qui permet de limiter le pessimisme de l'approche (connu sous le terme de « *wrapping effect* »). En simulation, la méthode proposée est comparée à la méthode CAPD et montre un gain de précision (dans le cas de la localisation à l'estime ou bien dans le cas où seulement une mesure est disponible au cours du trajet). Le chapitre se termine par des résultats obtenus sur des données du robot Daurade équipé d'un capteur de mesure de vitesse Doppler DVL (en plus de la centrale inertielle). On observe que quelques mesures seulement de positionnement de type *Ultra-Short BaseLine* avec balise (dont un modèle a été présenté au chapitre 1) peuvent réduire considérablement l'incertitude. La qualité des résultats est assez impressionnante.

## Chapitre 5

Ce chapitre considère des problèmes d'estimation d'état avec des mesures à bruit borné mais acquises à des temps incertains, eux aussi bornés avec des valeurs connues. Le chapitre commence par donner un exemple très pédagogique d'un robot équipé d'un sonar latéral qui scanne une épave dont un point est bien localisé. Dans ce cas, le robot ne peut que déterminer un intervalle de temps dans lequel se situe le point de référence. Afin de contracter le tube de trajectoire dans ce cas, l'idée est d'utiliser le fait que la dérivée de la trajectoire est bornée et de prendre en compte l'incertitude temporelle de la mesure.

Un contracteur en ce sens est défini et ses propriétés de contractance et de complétude sont démontrées. Une implémentation est ensuite présentée. Deux exemples en simulation sont rapportés. Le premier traite d'un robot qui navigue à la proximité de balises télémétriques et le deuxième (plus original) porte sur le recalage de l'horloge d'une balise posée sur les fonds marins. Les deux exemples sont clairement présentés et des courbes très claires sont rapportées.

### Chapitre 6

La détection et la démonstration de boucles sont deux sujets abordés dans le sixième chapitre. Ces questions sont traitées à partir de la projection 2D de la trajectoire d'un robot. En effet, il est très peu vraisemblable qu'une trajectoire 3D se recoupe alors que, dans les missions des robots sous-marins considérés, les projections 2D au sol présentent de nombreuses intersections. Compte tenu des capacités très limitées des capteurs extéroceptifs des robots sous-marins, la meilleure approche consiste à n'utiliser que des capteurs proprioceptifs. Ce genre de problème est très peu considéré dans la littérature. Le problème est d'abord formalisé et il revient à raisonner avec des *t-plans*. Plus les *t-pairs* sont éloignées de la première bissectrice, plus la trajectoire 2D se recoupe à des instants séparés dans le temps. Un algorithme de type SIVIA permet de caractériser les instants où des boucles ont été détectées. Cependant, ce n'est pas parce que des boucles ont été détectées qu'elles existent vraiment. Monsieur Rohou propose de les caractériser avec un test d'existence zéro d'une fonction incertaine. Il propose un nouveau test (basé sur un degré topologique) à cet effet et le compare au test de Newton. Il présente même un moyen de compter le nombre de boucles avec une méthode de raffinement. La méthode est mise en œuvre sur deux robots sous-marins en post-traitement. Avec un premier jeu de données, on observe que l'algorithme caractérise très bien les boucles et ce, bien mieux que le test de Newton. Avec le deuxième robot, la méthode est capable de démontrer l'existence de 114 boucles sur un total de 128.

### Chapitre 7

Ce dernier chapitre constitue le point d'orgue de la thèse et s'intitule « A reliable temporal approach for the SLAM problem ». Le problème de SLAM qui y est traité est très différent des problèmes habituels. Ici, il n'y a pas à proprement parler de carte mais le robot sous-marin cherche à exploiter une mesure bathymétrique obtenue avec un sonar tourné vers le sol et un capteur de profondeur (en fait, le problème est un peu plus complexe car il faut compenser l'effet des marées car les missions peuvent être longues). La bathymétrie apporte une nouvelle information qui est utilisée pour affiner les caractérisations de boucles. La figure 7.3b illustre un nouveau concept : les ensembles de mesures identiques dans un *t-plan*. Ceci permet de raffiner les détections de boucles précédentes selon un principe simple : si les altitudes sont différentes alors c'est que les positions 2D sont elles aussi différentes (à l'incertitude de mesure près). Un nouveau contracteur est proposé ; mieux sont estimés les intervalles des boucles, meilleure est la précision sur le tube de trajectoire ce qui revient à propager les contraintes de l'espace temporel à l'espace des trajectoires (en se servant du fait que le tube dérivée est borné). Ce concept est vraiment très original et à ma connaissance tout à fait nouveau. Il est à noter que M. Rohou a développé une version « rapide » de sa méthode en prenant la boîte englobante des solutions du *t-plan* au lieu du sous-pavage.

Le chapitre se poursuit par une mise en œuvre de la méthode sur des données réelles acquises avec le robot Daurade. Le capteur de mesure de la distance du fond marin est ici le DVL (utilisé par ailleurs pour l'odométrie Doppler). Ce n'est pas le capteur idéal car il filtre beaucoup les mesures d'autant plus que le sol est éloigné. Deux jeux de données sont traités et grâce à un système USBL hybridé une « pseudo-vérité terrain » est fournie. Les trajectoires présentent de nombreuses boucles. On peut noter que le nombre de boucles que caractérise la méthode augmente au cours des itérations du traitement, qui est d'abord fait avec la version rapide du logiciel puis la version utilisant le sous-pavage. On observe que l'incertitude de localisation ne croit plus linéairement mais qu'elle peut être divisée par 3 en fin de trajectoire ce qui est un gain très significatif malgré le fait que les fonds sous-marins où les expériences

ont été faites présentent une variation de profondeur limitée (de l'ordre de 10m) ce qui n'est pas pour aider la méthode. Il faudrait peut-être réaliser de nouveaux tests avec un capteur sonar plus précis et plus focalisé pour apprécier tout le potentiel de la méthode.

La thèse se termine par une conclusion générale et des perspectives.

### 3 Recommandation

En ce qui concerne la forme, le manuscrit est très agréable à lire avec de nombreuses figures très pédagogiques et soignées (je dirais même raffinées pour certaines dans lesquelles des dégradés de couleur fort opportuns ont été utilisés). La bibliographie est complète et pertinente ce qui montre que M. Rohou connaît parfaitement bien l'état de l'art aussi bien au niveau de la méthodologie que des technologies utilisées dans le domaine de la robotique sous-marine.

Sur le fond, la thèse est également excellente !

Le sujet de la thèse est très original au niveau du problème traité et de la méthode de résolution (contraintes de localisation provenant de mesures inter-temporelles liées aux boucles de trajectoire). En l'état actuel des développements, la méthode ne traite pas un vrai problème de SLAM car il n'y a pas de carte produite en fin de processus. Le terme SLAM est d'ailleurs pas mal galvaudé actuellement, comme par exemple par certains auteurs qui l'utilisent alors qu'ils ne s'intéressent qu'à de l'odométrie visuelle sans fermeture de boucle. Ici, c'est justement les fermetures de boucle que l'on exploite et c'est vrai que de ce point de vue, c'est un point crucial en SLAM.

L'approche ensembliste est motivée ici par le souhait d'obtenir des résultats garantis ou bien de très grande fiabilité car il y a des enjeux de sécurité très forts dans les applications considérées. Je partage pleinement cette analyse et on observe qu'au fil des années les approches à erreurs bornées commencent à fournir des résultats utilisables en robotique même à partir de données de capteurs qui sont bien difficiles à borner. D'ailleurs, M. Rohou n'a pas insisté sur ce problème dans sa thèse, mais il a été amené à l'aborder puisqu'il a confronté ses programmes à la réalité. M. Rohou maîtrise parfaitement bien tous les concepts liés à la propagation de contraintes et au calcul intervalles. Il a proposé des contracteurs tout à fait nouveaux qu'il a implémentés dans une librairie « open source » et qu'il a mis en œuvre expérimentalement. Les résultats obtenus sont très convaincants voire impressionnants.

Ainsi, la thèse apporte des contributions scientifiques réelles dont certaines ont déjà été publiées dans des revues internationales de premier plan. J'encourage M. Rohou à poursuivre cette politique de publication car il faut faire connaître ces travaux.

Le travail réalisé étant donc d'une qualité remarquable, je donne un avis très favorable à la soutenance de la thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'université de Bretagne Loire, délivré par l'université de Bretagne occidentale, dans la spécialité « robotique ».

Fait à Compiègne, le 8 décembre 2017.

Philippe Bonnifait

UMR CNRS UTC 7253  
Heudiasyc UTC  
Avenue de Landshut  
CS 60319  
60203 COMPIEGNE Cedex





**Gilles Trombettoni**

LIRMM, Université de Montpellier/CNRS

161 rue Ada, 31095 Montpellier cedex 5

Courriel : [Gilles.Trombettoni@lirmm.fr](mailto:Gilles.Trombettoni@lirmm.fr)

**Rapport sur le manuscrit de thèse présentée par Simon Rohou  
en vue de l'obtention du grade de docteur en informatique de  
l'Université de Bretagne occidentale, thèse préparée à l'ENSTA  
Bretagne (Lab-STICC, FR) et l'Université de Sheffield (UK)**

Montpellier, le 5 décembre 2017

Cette thèse propose des méthodes à intervalles, de programmation par contraintes et contracteurs, pour les systèmes dynamiques, appliquées à des problèmes de localisation de robots sous-marins simulés et réels. Le titre de la thèse est : « *Reliable robot localization : a constraint programming approach over dynamical systems* ». La thèse a été effectuée au sein de l'ENSTA Bretagne, sous la direction de Luc Jaulin, Fabrice Le Bars, Lyudmila Mihaylova et Sandor M. Veres. Le manuscrit d'environ 238 pages, hors bibliographie, comporte une introduction, 6 chapitres et une conclusion.

Une longue introduction aboutit à la description des principales contributions, après avoir détaillé le contexte applicatif de la thèse, mettant très bien en valeur les difficultés de la localisation de robots sous-marins.

La première partie de l'état de l'art décrit les intervalles (ensembles de réels) et les tubes (ensembles de fonctions/trajectoires). Au chapitre 2, les bases de l'arithmétique d'intervalles et la notion de contracteurs sont illustrées sur un problème de localisation de robot statique. Le chapitre détaille aussi l'algorithme SIVIA d'inversion ensembliste pour approximer par des ensembles de boîtes formant un pavage l'ensemble des points dont l'image par une fonction donnée produit un ensemble donné, par exemple l'ensemble des points de  $\mathbb{R}^n$  annulant une fonction de  $\mathbb{R}^n$  vers  $\mathbb{R}^m$  (noyau). Le chapitre 3 définit rigoureusement l'élégante notion de tube qui est un ensemble de trajectoires (borné par des fonctions minimum et maximum), une trajectoire étant une fonction temporelle décrite implicitement par un système dynamique. Le chapitre décrit clairement les opérations applicables à des tubes : opérations arithmétiques, intégrale, inversion de tube (c'est-à-dire caractérisation de l'ensemble des antécédents (temps) pour un intervalle donné du tube  $[x](t)$ , l'algorithme correspondant méritant d'être détaillé). La notion de contracteur est étendue aux tubes, ce qui permet d'éliminer d'un tube des trajectoires (aux bornes du tube) ne vérifiant pas une contrainte donnée. Ce chapitre synthétise les travaux des années précédentes menés par l'équipe de L. Jaulin sur le sujet, mais il faut souligner la remarquable contribution de Simon Rohou qui a développé une bibliothèque appelée **Tubex**, implémentant ces structures de données et ces opérateurs avec une grande rigueur, offrant des opérateurs garantissant de ne pas perdre de solutions, malgré les



arrondis des calculs sur les nombres flottants, et améliorant l'efficacité des calculs. Des exemples illustratifs très didactiques sont également montrés dans ce chapitre.

La deuxième partie du manuscrit détaille deux contracteurs génériques majeurs pour traiter les systèmes dynamiques. Le chapitre 4 détaille le contracteur différentiel noté  $C_{d/dt}$ . Il est proposé en fait d'explicitier la trajectoire dérivée  $v(t)$  et de décomposer l'EDO  $\dot{x}(t) = f(x(t))$  en deux contracteurs : un contracteur du tube  $[v](t)$  pour la contrainte  $v(t) = f(x(t))$  et un contracteur différentiel (ou primitive)  $C_{d/dt}$  du tube  $[v](t)$  pour la contrainte  $v(t) = \dot{x}(t)$ . L'intégration de l'EDO est alors réalisée en entretenant les deux contracteurs jusqu'à l'obtention d'un point-fixe. Il faut souligner et apprécier la simplicité des deux contracteurs, le contracteur différentiel, proche de l'opérateur de Picard, faisant abstraction de la forme analytique de la fonction  $f$  de l'EDO. Simon Rohou souligne le gain de généralité obtenu par cette décomposition et le montre expérimentalement sur divers exemples non triviaux. L'approche semble en revanche peu efficace sur le problème simple IVP (initial value problem), mais nous avons des raisons de penser que les marges de progression sont significatives et que le découplage des deux contracteurs n'est pas la cause de l'inefficacité de l'approche sur les systèmes dynamiques IVP. Si cette prédiction est vérifiée, l'approche formalisée dans le chapitre 4 sera considérée comme une contribution pionnière. L'approche est clairement expliquée et formalisée, mais ces travaux gagneraient en compréhension en les positionnant par rapport aux approches de programmation par contraintes (n'utilisant pas les tubes et utilisant une propagation sur des contraintes « atomiques » définies pour toutes les tranches temporelles) et d'intégration garantie. Le chapitre 5 décrit un autre contracteur très utile dans les systèmes dynamiques : le contracteur d'observation noté  $C_{eval}$  qui considère les instants d'observation  $t_i$  comme des variables dont l'intervalle représente l'incertitude temporelle bornée et accepte aussi une incertitude bornée sur les valeurs mesurées. Ce contracteur sophistiqué peut contracter la valeur mesurée  $[z]$ , l'intervalle temporel  $[t_i]$  de l'observation, le domaine/tube de la trajectoire observée  $x(\cdot)$ , celui de sa dérivée  $v(\cdot)$ , en prenant en compte les deux contraintes  $z = x(t_i)$  (observation) et  $\dot{x}(\cdot) = v(\cdot)$  (contrainte différentielle). La contraction procède par un appel de trois opérations contractantes qui mériteraient une description algorithmique plus détaillée, en plus de la preuve de complétude qui permet d'en déduire indirectement l'algorithme. Une implémentation rigoureuse du contracteur  $C_{eval}$  en **Tubex** est faite et l'opérateur est validé par plusieurs applications décrites en détails et donc reproductibles.

La troisième partie décrit des contributions en robotique. Le chapitre 6 décrit un contracteur de positions pour des trajectoires planes qui peuvent boucler, c'est-à-dire se retrouver à la même position à des instants différents. Ces travaux s'appuient sur les résultats de Clément Aubry qui a obtenu une thèse à l'ENSTA Bretagne sur ce sujet il y a quelques années. Le principe est de proposer des opérateurs dédiés à ce problème abordé en déclenchant un SIVIA calculant le noyau de la fonction  $p(t_1) - p(t_2)$  mesurant l'écart de positions entre deux instants (qui peuvent être



incertains et bornés par des intervalles). Un opérateur de contraction permet de contracter la boîte  $[t_1] \times [t_2]$  en éliminant des instants qui ne contiennent pas de point de bouclage. Un opérateur de Newton intervalles permet d'obtenir parfois une preuve d'existence d'un zéro de la fonction  $p(t_1) - p(t_2)$  dans la boîte. Simon Rohou propose un nouvel opérateur pour prouver l'existence d'un zéro dans la boîte (voire pour déterminer le nombre précis de zéros et donc de boucles) basé sur une notion de degré topologique qui n'est malheureusement pas défini et est très peu détaillé dans le manuscrit. Cet outil relativement récent s'avère être très prometteur et permet de prouver bien plus de boucles sur les deux missions opérées à des fins expérimentales, l'une d'entre elles étant faite dans le cadre de la thèse de Simon Rohou.

Le dernier chapitre technique détaille l'application principale de la thèse, un problème de SLAM où le robot à localiser est un sous-marin et l'environnement aquatique à cartographier possède peu de repères pour aider la localisation. Cette application est un point culminant de la thèse et en donne une validation pertinente puisque elle fait appel à tous les contracteurs décrits précédemment et obtient ses résultats en quelques minutes. Elle introduit même un dernier contracteur  $C_{inter}$  qui travaille avec une contrainte d'implication inter-temporelle de la forme  $y(t_1) = y(t_2) \Rightarrow z(t_1) = z(t_2)$  et construit des sous-pavages des intervalles d'instant.

## Contributions et avis général

J'ai eu beaucoup de plaisir à lire cette thèse très claire et aux nombreux résultats algorithmiques, logiciels et applicatifs pour le traitement des systèmes dynamiques. Grâce au travail considérable de Simon Rohou, tous les ingrédients sont présents pour envisager un solveur générique (en tout cas peu paramétrable) partant d'une description déclarative du système dynamique à traiter.

D'un point de vue algorithmique, je retiens un contracteur différentiel très générique et dont le découplage de la fonction différentielle ouvre à mon avis des perspectives prometteuses ; un contracteur d'observation très pertinent ; l'amélioration d'un contracteur de détection de boucle basé sur des techniques de preuves d'existence de zéros très efficaces et peu explorées à ce jour ; un contracteur sophistiqué de contraintes inter-temporelles.

La structure de tube et les opérateurs associés, notamment les contracteurs mentionnés ci-dessus sont implantés dans une nouvelle bibliothèque en C++ **Tubex** qui commence à être utilisée par des chercheurs.

D'un point de vue applicatif, les exemples didactiques, réalistes et les missions réelles sont nombreux, démontrant également une facilité de modélisation des problèmes de robotique mobile et offrant à la communauté un banc de systèmes dynamiques pour les comparaisons futures. De plus, les résultats expérimentaux sont bons, parfois impressionnants.

Les publications attestent également de la qualité de ce travail, avec une publication





dans une revue de rang A et deux articles soumis dans des revues de rang A\*.

En conclusion, la variété et la quantité impressionnantes des contributions démontrent les grandes qualités techniques de Simon Rohou et son engagement impressionnant pour la robotique et le raisonnement ensembliste.

C'est pourquoi je donne, sans aucune réserve, un avis très favorable à la soutenance de thèse de Simon Rohou pour l'obtention du titre de docteur en informatique de l'Université de Bretagne occidentale.

Gilles Trombettoni

A handwritten signature in blue ink, reading "Gilles Trombettoni", written in a cursive style with a long horizontal flourish at the end.

**RAPPORT DE SOUTENANCE**

*(Arrêté du 25 mai 2016 relatif aux études doctorales)*

**Les membres du jury (noms, prénoms, qualité et établissement d'appartenance) :**

*Examineurs :*

**M. ABOU-KANDIL Hisham, Professeur des Universités, ENS Cachan - CACHAN**

**M. BONNIFAIT Philippe, Professeur des Universités, UTC Compiègne - COMPIEGNE**

**M. CHABERT Gilles, Maître de Conférence, IMT Atlantique - NANTES**

**M. JAULIN Luc, Professeur des Universités, ENSTA Bretagne - BREST**

**M. LE BARS Fabrice, Enseignant-Chercheur - ENSTA Bretagne - BREST**

**Mme MIHAYLOVA Lyudmila, Maître de Conférence - University of Sheffield - SHEFFIELD (UK)**

**M. TROMBETTONI Gilles, Professeur des Universités, LIRMM - MONTPELLIER**

**M. ZERR Benoît, Enseignant-Chercheur HDR - ENSTA Bretagne - BREST**

*Personnalités invitées :*

**M. VERES Sandor M., Enseignant-Chercheur - University of Sheffield - SHEFFIELD (UK)**

**Titre de la thèse : Reliable robot localization : a constraint programming approach over dynamical systems**

**Nom et prénom du candidat : Monsieur ROHOU Simon**

**Cette thèse a été dirigée par : Luc JAULIN - Lyudmila MIHAYLOVA**

**et encadrée par : Fabrice LE BARS - Sandor M. VERES**

**Rapport de soutenance (à remplir par le président du jury):**

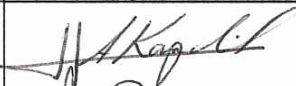



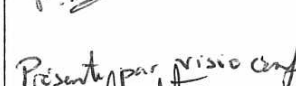


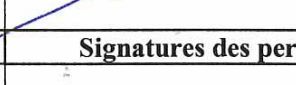
L'exposé de Monsieur Simon ROHOU s'est déroulé en langue anglaise du fait que sa thèse a été codirigée dans le cadre d'un partenariat entre l'ENSTA Bretagne et l'Université de Sheffield et de la présence par visio-conférence des encadrants anglais.

Monsieur Simon ROHOU a fait un exposé remarquable, à la fois didactique, clair, mettant en exergue ses principales contributions sans chercher l'exhaustivité ou le détail et avec un très bon esprit de synthèse. Les remarques et les commentaires du jury ont souligné la qualité, la quantité et l'originalité des résultats à la fois algorithmiques et expérimentaux s'appuyant sur une formalisation puissante et aboutie.

Les réponses apportées par le candidat aux nombreuses questions du jury ont permis d'approfondir certains points techniques et ont montré la grande maîtrise du sujet acquise par Monsieur Simon ROHOU lors de son travail de recherche. Le jury a apprécié sa vision globale des problématiques abordées.

Pour l'ensemble de ces raisons, le jury unanime décerne à Monsieur Simon ROHOU le grade de docteur de l'Université de Bretagne Occidentale dans la spécialité Robotique.

**NOM et Prénoms du Président de Jury :**

Noms des membres du jury	Signatures des membres du jury
M. ABOU-KANDIL Hisham,	
M. BONNIFAIT Philippe,	
M. CHABERT Gilles,	
M. JAULIN Luc,	
M. LE BARS Fabrice,	
Mme MIHAYLOVA Lyudmila,	Présente par vidéo conférence 
M. TROMBETTONI Gilles,	
M. ZERR Benoît,	
Noms des personnalités invitées	Signatures des personnalités invitées
M. VERES Sandor M.,	excusé

*(A compléter et à signer par l'ensemble des intervenants)*

**Arrêté du 25 mai 2016 fixant le cadre national de la formation et les modalités conduisant à la délivrance du diplôme national de doctorat**

**Article 19 : L'admission ou l'ajournement est prononcé après délibération du jury.**

Le Président signe le rapport de soutenance, qui est contresigné par l'ensemble des membres du jury présents à la soutenance.

Le rapport de soutenance est communiqué au doctorant dans le mois suivant la soutenance.

Le Directeur et les encadrants ne signent pas le procès-verbal de délibération mais signent le rapport de soutenance.