

**Rapport sur le mémoire de thèse de doctorat de Monsieur Thibaut Nico  
intitulé  
“Etude et développement de solutions de relocalisation d'objets sous-marins par  
des véhicules sous-marins hétérogènes”.**

en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'ENSTA Bretagne.

Rapporteur : Vincent Hugel  
Professeur des Universités, section CNU 60  
Laboratoire de Conception de Systèmes Mécaniques et Robotiques  
Université de Toulon.

Monsieur Thibaut NICO a effectué sa thèse à l'UMR Lab-STICC sous la direction de Luc Jaulin et Benoît Zerr, professeurs à l'ENSTA Bretagne. Les travaux réalisés dans ce cadre consistent à développer des solutions de relocalisation d'amers sous-marins par des véhicules instrumentés sonar afin de permettre une revisite sous la forme de planification de trajectoires vers des cibles identifiées en tenant compte des incertitudes liées aux mesures capteurs embarqués, aux déplacements, et aux repères associés aux zones de relocalisation. Le document est rédigé en anglais, sur 335 pages, et intègre 348 référence bibliographiques. Il comporte une introduction, cinq chapitres, et une conclusion, sans annexe. Le style est clair, et le contenu est riche et dense. Il repose sur un formalisme mathématique rigoureux de la théorie des ensembles et des intervalles, avec des exemples illustrés, ce qui confère au manuscrit un certain caractère didactique.

L'introduction présente les défis liés aux missions sous-marines, en matière de défense, d'exploration scientifique, d'exploitation commerciale, les robots de type ROV (véhicule téléopéré), AUV (véhicule autonome), et un état de l'art des techniques de localisation/navigation. L'auteur y précise le contexte particulier et difficile de la guerre de mines (MCM : Mine Counter Measure) où il s'agit de développer pour un AUV une stratégie de revisite d'une cible prédéfinie afin de la neutraliser si elle est identifiée en tant qu'objet potentiellement dangereux de type MILCO : Mine Line Contact.

Le premier chapitre décrit les principes physiques de l'imagerie sonar, et détaille plus particulièrement les capteurs sonar latéraux et les capteurs sonar frontaux, qui sont utilisés dans le cadre de cette thèse. Les travaux présentés dans la suite partent de l'hypothèse que les amers détectés par le système de perception sonar ont été filtrés et géolocalisés, et qu'ils sont également détectables par le véhicule chargé d'effectuer une revisite du site.

Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art des techniques de planification de mouvements, sans incertitude et avec incertitudes. Dans le contexte de revisite d'une cible à partir d'un capteur sonar frontal, l'auteur propose dans ce chapitre deux planificateurs classiques, l'un basé sur une partition de l'environnement sous forme de grille, en rajoutant à l'état  $(x,y)$  du robot une variable d'état représentant l'incertitude de positionnement, et l'autre qualifié de planificateur d'itinéraire probabiliste où les incertitudes sur l'état  $(x,y,\theta)$  sont modélisées par des ellipsoïdes à base de filtre de Kalman. Ces exemples sont intéressants dans la mesure où ils montrent la nécessité de disposer de

repères suffisamment proches afin de guider le véhicule vers la cible. Or ce n'est pas le cas en environnement aquatique où les amers sont très souvent clairsemés. Cette étude permet de positionner le travail de thèse, à savoir la définition d'une stratégie de génération de trajectoires entre et vers des groupes d'amers. Afin de garantir le caractère opérationnel de la méthode, l'auteur justifie son choix d'une approche ensembliste plutôt que d'une approche probabiliste. Ce choix est cohérent et permet de s'appuyer sur la théorie des intervalles dont les fondamentaux et les opérations associées sont rappelés dans le chapitre suivant, à savoir les contracteurs, séparateurs, paveurs, appliqués aux images, ainsi que les séparateurs polaires et les projections de séparateurs. Ce chapitre, quoique rédigé avec soin et très rigoureux, aurait pu être placé en annexe.

Le chapitre quatre est consacré à la détermination de zones 2D de relocalisation pour chaque amer (*registration maps*) utile à la mission de revisite du véhicule. Ces surfaces garantissent au robot, une fois à l'intérieur, la possibilité de détecter une portion de repère dans l'environnement. M. Nico a remarquablement étendu le concept de *registration map* en utilisant une base mathématique de théorie des ensembles qui prend en compte le champ de vue limité du capteur et les incertitudes sur les mesures. Les zones de relocalisation sont calculées à partir de compositions de mouvements de translation et de rotation et permettent d'obtenir une approximation minimale et maximale de l'ensemble des surfaces solution par inversion par rapport aux surfaces délimitant les repères. Il a par ailleurs introduit la notion de point de vue, sachant qu'un amer n'est pas forcément visible ou détectable dans toutes les directions. De plus, il a pris en compte de manière très pertinente et rigoureuse les surfaces indécises appelées pénombres, qui limitent la surface minimale et la surface maximale, afin de limiter les temps de calcul liés à ces surfaces.

Dans le chapitre 6, l'auteur s'attaque au problème de l'accessibilité entre les zones de relocalisation et de la zone cible. La navigation entre les zones de relocalisation est basée sur deux modèles de déplacement, le premier, linéaire (déplacements holonomes), et le deuxième basé sur les chemins de Dubins (déplacements non holonomes), avec incertitudes sur les paramètres de vitesse et de cap. La détermination des zones d'accessibilité à une zone de relocalisation donnée est effectuée à l'aide des techniques de rétroprojection sur les ensembles, directionnelle et omnidirectionnelle. Le problème est réduit à la recherche de caps dans la mesure où le robot est capable de s'orienter dans la direction désirée. La recherche amont depuis une zone cible d'un chemin est conduite à l'aide de techniques de graphes. Dans le cas de zones de relocalisation indistinguables, une stratégie basée sur une recapture des amers intermédiaires par rotation sur place est proposée, pour exploiter l'angle de vue des amers. Une stratégie d'exploration en spirale peut également être déclenchée en dernier ressort. Ce chapitre représente la deuxième contribution majeure de la thèse. L'auteur a étendu les travaux de navigation basée sur points de repère aux zones de relocalisation de forme quelconque, en tenant compte des limitations dues à la portée des capteurs. Il a mis en œuvre en simulation des stratégies de planification incluant des redétections d'amers et des techniques d'exploration/recherche par graphes, dans le souci de garantir un parcours quasi optimal vers une cible donnée, tout en limitant le nombre de paramètres. Ces travaux peuvent être exploités dans le cadre de missions sous-marines, qui représentent souvent des cas les plus défavorables en matière de disponibilité d'amers. Il serait intéressant d'estimer les temps de calcul liés aux algorithmes de planification proposés en fonction d'une population d'amers de référence détectables au mètre carré afin de caractériser le caractère opérationnel et plus au moins temps réel d'une mission de revisite de cible.

Dans le dernier chapitre, Monsieur Nico récapitule ses contributions et décrit un certain nombre de perspectives telles que l'extension à trois dimensions des cartes de relocalisation en incluant l'orientation, la prise en compte de courants, l'utilisation de priorités sur les amers, l'introduction de techniques de replanification ou de SLAM afin de rafraîchir les cartes, ou encore l'intégration de stratégies de parcours basées sur le suivi et le changement d'isobathes. Les idées présentées dans ce chapitre montrent le recul de l'auteur, et sa vision pertinente des extensions possibles de son travail.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse apportent une contribution significative au domaine de la planification de mouvements 2D en robotique prenant en compte les incertitudes sur les mesures extéroceptives, le positionnement et le déplacement, grâce à la théorie des intervalles denses. Les développements théoriques de thèse ont été menés de manière rigoureuse, et les travaux réalisés ont donné lieu à deux articles de conférence internationale et à des présentations orales lors de colloques nationaux. Par ailleurs, plusieurs articles complémentaires sont en préparation.

En conclusion, j'émet un avis très favorable à la soutenance de doctorat de M. Thibaut NICO pour l'obtention du grade de Docteur de l'ENSTA Bretagne.

Fait à La Garde le 24 mai 2019

Vincent HUGEL.

