

Rapport sur le projet
Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Robotiques
Complexes
financé par la DGA/MRIS
1/10/2015-30/03/2016

Éric Goubault et Benjamin Martin (École polytechnique)
Alexandre Chapoutot (ENSTA ParisTech)
Luc Jaulin, Fabrice Le Bars, Benoît Zerr, Thomas Le Mézo (ENSTA Bretagne)

25 mars 2016

Table des matières

1	Contexte général du projet	3
1.1	Tâche 0	3
1.2	Tâche 1	3
1.3	Tâche 2	3
1.4	Moyens demandés et principales dépenses effectuées	3
1.4.1	LIX	3
1.4.2	ENSTA ParisTech	4
1.4.3	ENSTA Bretagne	4
2	Travaux réalisés	5
2.1	LIX	5
2.1.1	Invariants algébriques et méthodes topologiques, pour le “station keeping”	5
2.1.2	Travail effectué et poursuite des travaux	6
2.2	ENSTA ParisTech	7
2.2.1	Génération de trajectoires	7
2.2.2	Noyau de viabilité	7
2.2.3	Plateforme d’expérimentation	8
2.2.4	Concours robotique	8
2.3	ENSTA Bretagne	8
2.3.1	Ensembles invariants	8
2.3.2	Sécuriser une zone par un groupe de robots	8
A	Agenda des deux premières rencontres et transparents présentés	10
A.1	Mercredi 25 novembre 2015	10
A.2	Jeudi 26 novembre 2016	11
A.3	Jeudi 24 mars 2016	11

1 Contexte général du projet

L'objectif de ce projet est de définir de nouvelles méthodes permettant de prouver formellement des propriétés fonctionnelles des systèmes robotiques (en particulier celles liées à l'interaction contrôle/planification de trajectoires).

Le projet a une durée de 3 ans et démarre au 1^{er} octobre 2015, avec les trois tâches suivantes, décrites brièvement dans les sections 1.1, 1.2 et 1.3.

1.1 Tâche 0

Le but de cette tâche est d'initier la collaboration au sein du consortium, sur un simple problème "école" de contrôle de robots. Un cadre formel sera mis au point sur ce problème "école" et l'état de l'art sur l'application des méthodes formelles en robotique (pour la validation) sera décrit.

Les exemples initialement mentionnés sont : le contrôle d'un groupe de robots sous-marins (concours SAUC-E, euRathlon, WRSC etc.), l'interaction entre un véhicule autonome et d'autres véhicules et/ou piétons, le problème de "Station Keeping", etc.

À l'origine du projet, avaient été également mentionnés les outils de preuve possibles, en particulier Keymaera (CMU) et SpaceEx (Verimag).

1.2 Tâche 1

Dans cette tâche on prendra en compte la planification et son interaction avec le contrôle (toujours en présence d'incertitudes), dans la preuve formelle.

Dans un premier temps, on pourra utiliser le simulateur de planification de véhicule autonome de l'ENSTA ParisTech pour déterminer les propriétés d'intérêt sur des exemples simples, par exemple tirés du projet de véhicules valets (venant d'une étude avec Renault). On pensera en particulier à définir des contraintes pour les algorithmes que l'on souhaite vérifier (marges diverses).

1.3 Tâche 2

Cette tâche vise à aller vers les systèmes de contrôle distribués, et à les valider. Cette tâche est plus prospective, mais elle doit permettre de dégager la problématique et des pistes pour le futur.

1.4 Moyens demandés et principales dépenses effectuées

1.4.1 LIX

Nous avons demandé initialement, à l'Ecole polytechnique, un ingénieur de recherche LIX (3 ans, possibilité de thèse) sur le sujet de l'interprétation abstraite pour la validation de systèmes de contrôle/planification)

Nous avons également demandé un postdoc sur au plus 3 ans pour examiner les cas pratiques en lien avec l'ENSTA ParisTech et l'ENSTA Bretagne.

Enfin, nous avons demandé un postdoctorant en co-encadrement avec l'ENSTA ParisTech sur le sujet de la modélisation de phénomènes physiques avec retards et incertitudes bornées.

Nous avons également évoqué des invitations de chercheurs français et étrangers.

Pour l'instant, nous avons mené à bien l'embauche d'un postdoctorant, Benjamin Martin, du 1er janvier 2016 jusqu'à la fin du projet.

Nous prévoyons deux autres embauches à partir de septembre 2016, en lien avec l'ENSTA ParisTech (sans doute en priorité sur les systèmes avec retards et incertitudes bornées, pour la tâche 2).

Nous avons aussi utilisé le financement de ce projet pour inviter Goran Frehse (Verimag, développeur principal de l'outil SpaceEx <http://spaceex.imag.fr>) et inscrire Benjamin Martin au cours "LMI for optimization and control" à l'ECCI (Supélec), cf. <http://eeciinstitute.web-events.net/m05/>, ainsi qu'inviter Didier Henrion (LAAS, cf. <http://homepages.laas.fr/henrion/>), l'un des deux responsables de ce cours, avec qui nous envisageons une collaboration dans le cadre de ce projet.

1.4.2 ENSTA ParisTech

Pour avril 2016, il a été prévu le recrutement d'un postdoctorant afin de poursuivre le développement de l'algorithme de calcul du noyau de viabilité pour les systèmes de dimension supérieure à deux.

Le recrutement d'un ingénieur de recherche a également été prévu pour septembre 2016 afin d'assurer le développement des démonstrations et des simulateurs de planification de trajectoire.

Des dépenses ont également été engagées pour acheter du matériel informatique et électronique afin de développer des plateformes robotiques d'expérimentation.

Plusieurs stages de niveau M1 ont été financés, cf. 2.2.3. Un sujet de stage a pour objectif de développer une plateforme robotique. Un second sujet de stage concerne le problème de localisation par réseau de capteurs sans fil. Un autre sujet de stage concerne l'analyse de faisabilité d'une inscription des étudiants de l'ENSTA ParisTech dans le concours de robotique européen euRathlon dont la participation dépend de la construction d'une base robotique terrestre avec bras manipulateur.

1.4.3 ENSTA Bretagne

Initialement, nous avons demandé un doctorant travaillant sur les groupes de robots sous-marins et un postdoctorant faisant le lien entre l'analyse par intervalles et interprétation abstraite). Nous avons aussi demandé du matériel pour construction de robots.

Après réduction de budget, le choix a été fait de conserver le financement du doctorant (qui est Thomas Le Mézo) et du matériel pour fabrication de robots uniquement. Pour le lien entre l'interprétation abstraite et le calcul ensembliste, un collègue MCF de Brest (Damien Massé), membre du Lab-STICC, s'implique dans cette tâche.

Nous avons acheté du matériel pour les démonstrations de robots, principalement des robots terrestres et du matériel pour la fabrication de robots sous-marins. Pour la fabrication des robots, nous impliquons le plus possible les étudiants du club robotique, à la fois pour limiter le besoin en ingénieur, mais aussi à but de formation.

2 Travaux réalisés

2.1 LIX

Pour l’instant, nous avons démarré la tâche 0 au LIX avec Benjamin Martin. Nous nous sommes concentré sur le problème du “station keeping” présenté par Luc Jaulin dans [?] et avons essayé les méthodes suivantes :

- preuve sous Keymaera [?] (avec l’aide d’un invariant trouvé par ailleurs)
- détermination d’un invariant pour le système contrôlé par méthode algébrique (cf. [?] et [?])
- détermination d’une zone contenant un invariant non trivial pour le système contrôlé par des méthodes topologiques [?]
- détermination d’une zone contenant un invariant non trivial pour le système non-contrôlé (modélisé par une inclusion différentielle), et viabilité [?].

2.1.1 Invariants algébriques et méthodes topologiques, pour le “station keeping”

Nous sommes parti d’un problème en apparence simple mais qui pose de nombreuses difficultés : le “station keeping” d’un robot planaire autonome. L’instance considérée a été proposée par Luc Jaulin [?]. Le système différentiel correspondant, en coordonnées polaires du robot sur le plan, s’écrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} \dot{\varphi} &= \frac{\sin \varphi}{d} + u \\ \dot{d} &= -\cos \varphi \\ \dot{\alpha} &= -\frac{\sin \varphi}{d} \end{cases} \quad (1)$$

où (d, α) correspond aux coordonnées polaires du robot (distance et angle), φ son cap (son orientation par rapport à l’origine du repère) et u sa commande sur son cap. Ici, le robot est autonome, la commande ne dépendant que de l’état (position et cap) du robot. Notons que l’équation pour α peut être ignorée. La loi de commande proposée est la suivante :

$$u = \begin{cases} 1 & \text{if } \cos \varphi \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\sin \varphi & \text{otherwise} \end{cases} . \quad (2)$$

L’idée étant d’amener le robot vers l’origine si son cap est approximativement dirigé vers elle, sinon le robot tourne sur la gauche. On notera que $u \in [-1, 1]$.

Le problème du “station keeping” consiste à prouver que pour toute position initiale du robot, sa loi de commande l’amène dans une région autour de l’origine du repère (correspondant à une balise) et y reste indéfiniment. D’un point de vue mathématique, cela revient à montrer la V -stabilité du robot pour une fonction V donnée amenant à la définition de cette région. Étant donné une fonction différentiable V dans l’espace d’états, un système différentiel comme (1) est V -stable si $V \geq 0 \implies \dot{V} < 0$. En conséquence, un système V -stable implique que pour toutes conditions initiales, le robot atteint la région définie par $V < 0$ en temps fini, et que si il est dans cette région, il y reste indéfiniment.

Déterminer une telle fonction V , de sorte que $V < 0$ corresponde à une région autour de la balise, n’est pas aisé. L’approche dans [?] considère à la place une décomposition en polytopes de l’espace d’état et la qualification des dynamiques entre ces différents polytopes. Il peut déterminer ainsi un ensemble de polytopes que le robot est obligé d’atteindre et d’y rester.

Calculs d’invariant algébriques. Nous avons essayé d’appliquer des méthodes algébriques, comme [?, ?], afin de trouver de telles fonctions vérifiant, au moins en partie, la V -stabilité. Pour ce faire, les fonctions transcendantales du système sont remplacées par de nouvelles variables afin d’exprimer le système par des polynômes. Ainsi, en prenant $h = \sin \varphi, g = \cos \varphi$ et $e = 1/d$, on obtient le système équivalent suivant :

$$\begin{cases} \dot{h} &= (he + u)g \\ \dot{g} &= -(he + u)h \\ \dot{e} &= ge^2 \end{cases} . \quad (3)$$

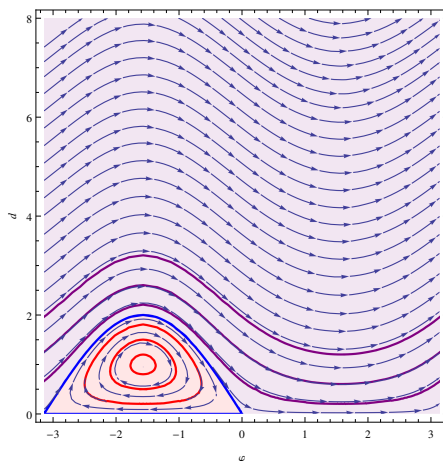


FIGURE 1 – Invariance dans le cas d’une commande $u = 1$. La partie rouge correspond à $u+2eh < 0$, bleue à $u+2eh = 0$ et violette à $u+2eh > 0$; ainsi que des exemples de trajectoires correspondantes.

On notera que la loi de commande précédente s’exprime parfaitement avec ces nouvelles variables.

Dans le cas où la commande u est constante, par exemple $u = 1$, par le calcul des polynômes de Darboux on arrive à montrer que la fonction rationnelle $\frac{u+2eh}{e^2}$ est constante [?] le long de toutes les trajectoires à partir de n’importe quel état initial du robot. En particulier, puisque e^4 est strictement positif, le signe de $u + 2eh$ est conservé. Par conséquence, en considérant une condition initiale e_0, h_0 pour e et h , la trajectoire du robot satisfait l’invariant :

$$-e_0^2(u + 2eh) + e^2(u + 2e_0h_0) = 0 \quad (4)$$

La Figure 1 montre différentes régions selon le signe de $u + 2eh$, ainsi que plusieurs trajectoires correspondant à (4). On remarque en particulier que la région $\mathcal{V} := \left\{ (\phi, \lceil) : \lceil + \in \frac{\sin(\phi)}{\lceil} < \lceil \right\}$ (en rouge sur la figure) correspond au cas où le robot tourne autour de la balise.

On montre ainsi une propriété de stabilité nécessaire, mais pas suffisante puisque qu’ici, en raison de la loi commande constante, il n’est pas possible d’atteindre cette région en partant de toute les conditions initiales possibles. Une idée à explorer serait de re-définir la loi de commande en fonction de cette région invariante afin de s’assurer de la V -stabilité.

Approches topologiques. Nous avons également commencé à explorer l’utilisation de méthodes topologiques comme [?]. L’idée est ici de construire un ensemble en partant d’un patron (e.g., un polytope) qui satisfait la propriété de Wazewski. Cette propriété assure en particulier l’existence d’un invariant non vide dans cet ensemble.

La recherche d’un tel invariant n’est en revanche pas évidente car nous n’avons pas de méthodes automatiques pour les générer. Des premières recherches en partant d’un patron d’ellipsoïdes, ce sont avérées infructueuses. Toutefois, si on regarde le problème associé d’inclusion différentielle, ici en considérant la commande u comme variant aléatoirement entre $[-1, 1]$, on remarque des patrons prometteurs sous forme de polytopes. Si on peut démontrer qu’ils satisfont la propriété de Wazewski, on sera en mesure de confirmer l’existence d’un invariant dans le cas d’une commande variant entre $[-1, 1]$. Cette propriété n’est en revanche pas directement liée à la V -stabilité, mais montre néanmoins qu’il y a une possible commande stable.

La prochaine réunion du projet du 24/03 aura en partie pour but de discuter de ces approches topologiques et des possibles liens avec la méthode de [?].

2.1.2 Travail effectué et poursuite des travaux

Nous échangeons sur tous ces sujets lors de réunions plénières (la première, les 25 et 26 novembre 2015, la deuxième, le 24 mars 2016, voir l’annexe A), des visites de chacun, au fil de l’eau, et un site `git` où nous mettons tous les documents du projet.

Nous avons également bénéficié d’invitations, partiellement financés par le projet MRIS de Khalil Ghorbal INRIA Rennes, de Goran Frehse, Verimag, de Sriram Sankaranarayanan (Boulder, coauteur sur [?]), Marian Mrozek (Cracovie, coauteur de [?], ainsi qu’invité au workshop iCode <http://www.cmap.polytechnique.fr/~sdv2016/>) et de Didier Henrion (LAAS).

Lors de la première réunion, nous avons conclu qu’une collaboration immédiate était possible entre les trois partenaires du projet sur le calcul ou une caractérisation du noyau de viabilité, cf. par exemple [?] et en utilisant également des idées venant du calcul de sous-approximation cf. [?]). Nous nous concentrerons dorénavant sur la génération automatique de blocs isolants (méthode topologique) par relaxation de problèmes BMI (Bilinear Matrix Inequality). Pour ce faire, Benjamin Martin a suivi l’école “LMI for optimization and control” à l’EECI (Supélec), cf. <http://eeciinstitute.web-events.net/m05/>.

Ce sera également l’occasion de comparer la résolution de problèmes type $F(x) = 0 \rightarrow G(x)R0$ où R est soit $<$ soit \leq par méthodes SoS (Putinar ou Stengle, cf. livre de Lasserre, ou ce qui est utilisé au LIX, par exemple dans [?]) avec la résolution par méthodes intervalles (cf. exposé d’Alexandre Chapoutot).

On note également qu’une collaboration est possible entre le LIX et l’ENSTA ParisTech sur la détermination de certificats de barrière, cf. exposé d’Alexandre Chapoutot (et méthode [?, ?]). En effet, dans les travaux du LIX [?] des fonctions candidates à être des certificats de barrières sont synthétisées automatiquement mais il reste à les valider. La méthode de validation actuelle se fonde sur des méthodes d’optimisation polynomiale qui ont des limites pour passer aux grandes dimensions. À l’opposer, les travaux de l’ENSTA ParisTech [?] suppose une fonction candidate à être un certificat de barrière donnée et la valide par des méthodes issues de l’analyse par intervalle qui permettent, en général, de considérer des problèmes de plus grandes dimensions. Nous avons ainsi une approche complémentaire du même problème dont la combinaison permettrait de définir une méthode systématique. L’application au problème de “Station keeping” sera la première étape expérimentale.

Nous démarrerons la tâche 1 avec la vérification de contrôle en présence de planification et d’incertitudes (cas de référence de David Filiat) à partir de l’été 2016. Nous caractériserons en particulier les écarts dus au contrôle, pour les trajectoires planifiées dans le cas du “valet parking” (cf. exposé de David Filiat, voir Section A). Nous le ferons dans un premier temps sur une des trajectoires planifiées (http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/coulter_r_craig_1992_1.pdf), dans la base avec les millions de cas, et sans doute peut-être plus tard en faisant une analyse non pas cas par cas, mais pour toutes les trajectoires planifiées (voir à ce propos l’algorithme de commande utilisé sur la voiture http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/paper_vstab_rc.pdf).

2.2 ENSTA ParisTech

2.2.1 Génération de trajectoires

Dans le cadre de notre développement de véhicule autonome avec Renault, qui va servir de base à certaines études de ce projet, nous avons entamé une phase de simplification et de restructuration de notre approche de planification de trajectoires. Notre objectif est de mieux séparer les problèmes et de simplifier la mise au point, en pratique, sur le véhicule. À l’issue de cette remise à plat, prévue pour le mois de septembre, nous aurons une solution de planification mieux découplée du contrôle qui sera une base, *a priori*, mieux adaptée aux travaux prévus dans ce projet. Nous commençons actuellement le recrutement d’un ingénieur (recrutement prévu en septembre 2016) qui sera en charge de développer et maintenir un simulateur intégrant cette méthode de planification pour la suite des travaux du projet.

2.2.2 Noyau de viabilité

Nous poursuivons le développement de l’algorithme du noyau de viabilité pour les systèmes dynamiques à temps continu pour des dimensions supérieures à deux. Le premier objectif est de rendre indépendant de la dimension l’algorithme précédemment développé conjointement avec l’ENSTA

Bretagne (Projet DGA MRIS 2014-2015). Le recrutement tardif d'un postdoctorant (début prévu mi-avril 2016) implique un retard de six mois dans le développement de cette tâche.

2.2.3 Plateforme d'expérimentation

La validation des méthodes de vérification sur des problèmes concrets nécessite le développement de plateformes d'expérimentation. Cependant, une contrainte d'utilisation de ces plateformes est de maintenir une complexité basse pour la mise en place d'expérimentation et la maintenance.

Dans ce contexte, lors d'un projet de troisième année du cursus ingénieur de l'ENSTA ParisTech, un tel développement a été entrepris. Cette plateforme s'inspire grandement sur une démonstration faite par le Professeur Kumar lors de la conférence HSCC 2014¹. L'objectif de cette plateforme est de simplifier les problèmes de positionnement grâce à une caméra et de permettre, au besoin, la mise en place d'algorithmes de contrôle centralisés ou distribués. Cette plateforme permet d'étudier toutes les fonctions intéressantes du projet : localisation, planification, correction.

De plus, un stage a également été lancé concernant le problème de la localisation par réseau de capteurs sans fil. L'objectif du stage est d'évaluer la faisabilité de localiser des robots à l'aide des éléments de communication sans fil suivant le protocole Wifi. Cette démarche nous permet de mesurer la difficulté et le type d'incertitudes associés à l'étape de localisation.

Ces approches pratiques du projet permettent aux partenaires "informaticiens" de gagner en compétences dans les problématiques liées à la robotique mobile afin de mieux cerner les verrous à lever dans le cadre de la définition de méthodes de vérification formelle. À terme, cela nous permettra de mieux cerner le type de propriétés que nous voulons prouver et donc de mieux définir le langage de contrats.

2.2.4 Concours robotique

En marge du projet DGA, une réflexion a été engagée pour monter une équipe d'étudiants de l'ENSTA ParisTech afin de participer au concours européen euRathlon². La prochaine session du concours est prévue en septembre 2017. Le défi de cette participation est la montée en compétence de l'ENSTA ParisTech dans la conception de bases robotiques mobiles (terrestre, aérienne ou marine). Une collaboration avec l'ENSTA Bretagne dans ce cadre est également à l'étude pour bénéficier de leur retour d'expérience dans la construction de bases robotiques et favoriser les échanges entre les étudiants des différentes écoles.

2.3 ENSTA Bretagne

2.3.1 Ensembles invariants

Avec Thomas Le Mézo, nous avons commencé à nous intéresser au calcul des ensembles invariants pour des systèmes dynamiques à temps continu. Nous avons obtenus assez rapidement des résultats en combinant des algorithmes utilisant de l'interprétation abstraite, de la théorie des graphes et du calcul par intervalles. Un article intitulé "An interval approach to compute invariant sets" avec pour auteurs T. Le Mézo, L. Jaulin and B. Zerr a été soumis à la revue IEEE TAC. Ces résultats sont présentés à la notre journée de rencontre le 24/03 à Paris. A titre d'illustration, le plus grand ensemble invariant du système de Van der Pol :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= (1 - x_1^2) \cdot x_2 - x_1 \end{cases} \quad (5)$$

inclus dans le pavé $\mathbb{X}_0 = [-4, 4] \times [-4, 4]$. est donné par la figure 2

2.3.2 Sécuriser une zone par un groupe de robots

Afin de démontrer la possibilité de travailler avec des groupes de robots de façon garantie, nous nous sommes intéressés à sécuriser une zone contre toute intrusion. Il nous fallait prendre en compte l'incertitude de positionnement des robots ainsi que l'incertitude sur les capteurs. Nous nous avons

1. <http://cesg.tamu.edu/faculty/p-r-kumar/convergence/>

2. <http://www.eurathlon.eu>

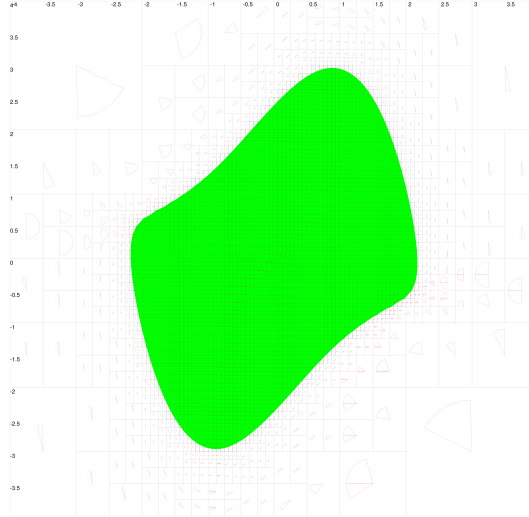


FIGURE 2 – Le plus grand ensemble invariant compact est dans l'ensemble en vert

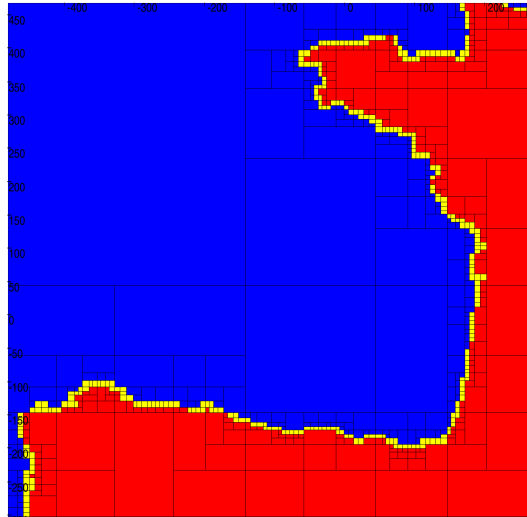


FIGURE 3 – Pavage associé à la France

fixés un scénario influencé de l'actualité, où un sous-marin russe est entré dans le golfe de Gascogne en janvier 2016. Nous avons considéré n robots $\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_n$ à des positions $\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n$ qui bougent dans un espace tridimensionnel. Nous avons aussi considéré que les robots étaient capables de détecter l'intrus si ce dernier est à une distance inférieure à une distance de détection. Nous avons montré que le calcul de la zone sécurisée peut se calculer de façon dynamique grâce à un observateur d'état ensembliste donné par

$$\mathbb{X}(t) = \mathbb{G} \cap dt \cdot \mathbb{F}(\mathbb{X}(t - dt)) \cap \bigcap_i g_{\mathbf{a}_i(t)}^{-1}([d_i(t), \infty]),$$

où \mathbb{X} est l'ensemble des états possibles pour l'intrus potentiel, \mathbb{G} est la zone à surveiller et $\mathbb{X}(0) = \mathbb{G}$. La zone sécurisée est alors

$$\mathbb{S}(t) = \overline{proj_{world}(\mathbb{X}(t))}.$$

A titre d'illustration, nous nous sommes intéressés à la sécurisation du golfe de Gascogne et pour cela, nous avons dû rendre compatibles les modèles de cartes existantes avec les méthodes par contracteurs comme cela se trouve illustré par la figure 3 La figure 4 représente le début de la phase de balayage par des robots. Un travail a été fait avec les étudiants du profil robotique de l'école. Une vidéo illustrant ce travail est disponible sur <https://youtu.be/rNcDW6npLFE>

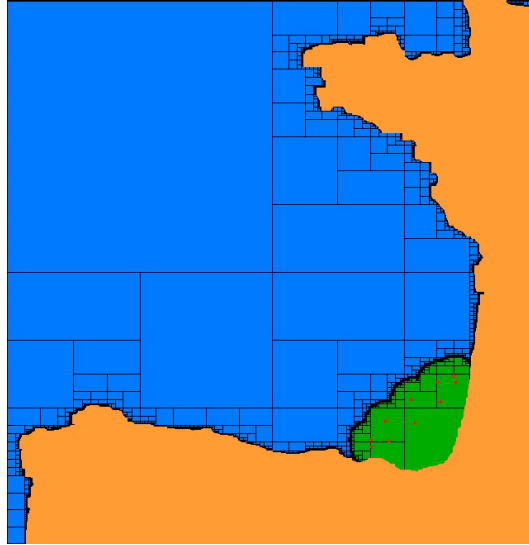


FIGURE 4 – Zone sécurisée en cours de construction

A Agenda des deux premières rencontres et transparents présentés

A.1 Mercredi 25 novembre 2015

- 8h30-9h00 Accueil café
- 9h00-9h30 **Éric Goubault**
Présentation du projet
<http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/Kickoff2015.pdf>
- 9h30-10h15 **Luc Jaulin**
Computing the inner and outer approximations of the viability kernel
http://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/swim13_slides_jaulin.pdf et http://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/slides_smart_monnet_2015.pdf. Le solveur Viabibex dont il est question se trouve à : <http://www.ensta-bretagne.fr/monnet/Viabibex/>
- 10h15-10h45 Pause discussions
- 10h45-11h30 **Damien Masse** (invité extérieur)
Précision des contracteurs sur des domaines abstraits
http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/Masse_SMART15.pdf
- 11h30-11h45 Discussion
- 11h45-12h30 **David Filliat**
Planification de trajectoire pour les véhicules autonomes
http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/2015_11_25_Planif_ENSTAPT.pdf
- 12h30-13h45 Repas au club Magnan
- 13h45-14h30 **Alexandre Chapoutot**
Utilisation des outils de l'analyse intervalle pour le calcul de certificats de barrière pour les systèmes dynamiques
http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/slides_Alexandre.pdf
- 14h30-15h00 Discussion
- 15h00-15h45 **Benoît Desrochers**
Guaranteed Path Planning
<http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/>

- Pres_PathPlanning.pdf
- 15h45-16h15 Pause discussions
- 16h15-17h **Eric Goubault**
Inner and Outer reachability analysis
http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/MRIS/slides_MRIS2015.pdf
- 17h-18h Discussions, conclusion

A.2 Jeudi 26 novembre 2016

Le matin a eu lieu une démonstration de l'ENSTA Bretagne (ainsi que ENSTA ParisTech/École Polytechnique) d'un bateau autonome et de viabilité sur le lac de l'École Polytechnique durant le forum innovation DGA. Les vidéos sont disponibles à <https://youtu.be/eeH8IPCA71g> et <https://youtu.be/mPGUnsDX9aU>.

A.3 Jeudi 24 mars 2016

- 9h-9h30 Accueil café viennoiseries
- 9h30-10h **Eric Goubault**
État du projet
- 10h-11h **Eric Goubault**
Méthodes algébriques et topologiques pour la détermination d'invariants de systèmes différentiels et commutés (tâche 0)
- 11h-11h30 Pause discussions
- 11h30-12h30 **Benjamin Martin**
Station keeping (tâche 0) (et discussion)
- 12h30-14h00 Repas au club Magnan
- 14h-15h **Alexandre Chapoutot**
Stabilisation des systèmes non-linéaires commutés par simulation ensembliste
- 15h-16h **Luc Jaulin**
Secure the Bay of Biscay with Robots using interval methods
- 16h-16h30 Pause discussions
- 16h30-17h30 **Thomas Le Mézo**
An interval approach to compute limit cycles
- 17h30-18h30 Discussions, conclusion

Références