

Sujet de thèse: Optimisation par approche formelle des moyens mobiles d'intervention sur un site à risque (PATROLS)

Directeurs de thèse : Dimitri Lefebvre en co-direction avec Edouard Leclercq et François Guerin

Laboratoire d'accueil : GREAH

Etablissement : Normandie Université – Université Le Havre

Ecole doctorale: PSIME

Financement : allocation MESR

Date de début : 01/10/2021

Profil recherché : candidat.e avec un profil automatique. Une connaissance des systèmes à événements discrets et des méthodes d'optimisation sera appréciée ainsi qu'une bonne pratique de la programmation.

Les candidat.e.s sont invité.e.s à envoyer CV, lettre de motivation et résultats académiques des 2 dernières années à
dimitri.lefebvre@univ-lehavre.fr
edouard.leclercq@univ-lehavre.fr
francois.guerin@univ-lehavre.fr

Contexte et objectifs: Le projet PATROLS propose une réponse d'ordre opérationnel et méthodologique pour la maîtrise des risques industriels en milieu urbain dense en améliorant les dispositifs d'intervention mis en œuvre en cas d'incidents industriels ou technologiques. Les sites ciblés présentent des risques liés à la manipulation de substances dangereuses et instables (e.g., les site SEVESO de Normandie) et peuvent être étendus à des zones d'activité industrielle et économique à proximité de centres urbains (e.g. les installations HAROPA). L'objectif est l'optimisation de moyens mobiles automatisés de surveillance et d'intervention (e.g., drones) motivée par la nécessité de se déplacer dans des sites qui peuvent être dangereux ou difficiles d'accès. En intervention, l'utilisation de tels moyens permet de réagir rapidement en respect avec la réglementation (qui interdit l'intervention humaine après certains incidents). Les agents mobiles sont équipés de capteurs nécessaires à la collecte de différentes mesures à recueillir au cours des missions. Ils peuvent également transporter et répartir des moyens de secours. L'optimisation des missions doit être réalisée dans le respect de contraintes fonctionnelles liées à la priorité des opérations à réaliser, mais aussi opérationnelles et temporelles liées à l'autonomie des agents. Les questions, auxquelles nous souhaitons répondre, sont les suivantes :

- Combien d'agents mobiles sont nécessaires pour réaliser un ensemble de mesures données à des positions fixées ? Combien de capteurs et quels types de capteurs doivent équiper chacun de ces agents ? Comment définir les missions de chacun des agents ?
- En cas d'incident comment utiliser les agents pour obtenir rapidement des informations pertinentes sur le sinistre, les dégâts et d'éventuelles victimes ? Comment transporter et distribuer des moyens de secours ? Comment adapter et reconfigurer les missions d'intervention dans une situation qui évolue rapidement et de façon imprévisible ?

Les travaux consacrés à l'analyse des flux d'information et à l'optimisation des flux pourront être associés aux problèmes de navigation en robotique mobile terrestre et aérienne qui sont étudiés au GREAH notamment au sein du Pôle d'Ingénieur en Logistique (thèses de C.E.H Harik, 2016 : « Coopération air-sol en robotique mobile », Mark Bastourous ("Decentralized control of autonomous swarm of UAVs et Etienne Petitprez ("Controle et coordination d'une flotte de drones dans le cadre d'applications civiles") et du CIDN (Centre d'Innovation Drones Normandie) .

Ce sujet consolide les projets APPRENTIS (Formal approach and artificial intelligence for the optimization of mobile agents in industrial sites), DESIR (Drones en Essaim pour Sites Industriels à Risques) et TEMERITY (Timed event-based methods for cyber-physical system security) menés par le GREAH et soumis à des APR ANR en 2020.

Le résultat attendu est une aide à la décision en temps réel pour préparer l'intervention. Le défi est de proposer des outils logiciels pour coordonner les moyens de surveillance et d'intervention en combinant des modèles prédictifs et décisionnels. Il s'inscrit dans la perspective de plusieurs collaborations : KAIROS au Danemark sur le filtrage et l'analyse des alarmes, 7CIS sur la prises de vue aérienne par drones et on utilisation.

Etat de l'art : Parmi les méthodes de surveillance existantes, les réseaux de capteurs sont fréquemment utilisés. En particulier, les réseaux sans fil fixes ont suscité beaucoup d'intérêt au cours des dernières années. Désormais, les applications IoT considèrent ces réseaux comme une technologie clé (Bouزيد et al., 2020) pour le suivi d'objets (Adam et al., 2017) et la connectivité (Peixoto et al., 2017). Des capteurs mobiles ont progressivement été ajoutés aux réseaux statiques (Manlio et al., 2017). D'autres solutions sont basées sur des réseaux mobiles constitués de véhicules aériens automatiques (Scilimati et al., 2017; Rashid & Rehmani, 2016). L'utilisation de la robotique aérienne (Harik et al., 2015, 2016, Guerin et al., 2016, Bastourous, 2020) et l'optimisation de patrouilles a aussi fait l'objet d'étude dans des contextes variés (2017, Hoshina et al., 2016; Liu et al. 2019 ; Mahulea et al., 2020), mais seules quelques approches utilisent les techniques des systèmes d'événements discrets (SED) (Zhang et al., 2005; Barbier & Chantry 2004) et l'intelligence artificielle (IA) (Lee et al., 2009; Dezani et al., 2014, Mahulea et al., 2020).

Ces travaux ne considèrent jamais les problèmes de configuration des patrouilles et de planification des trajectoires comme deux problèmes couplés qui devraient être résolus ensemble pour construire une solution globalement optimale. Ce couplage au niveau de l'optimisation est exactement l'objectif de la thèse qui utilisera des méthodes des SED et de l'IA. Au niveau de la modélisation, le projet exploitera des contributions récentes des SED et de la théorie des graphes et leur application aux problèmes de surveillance et de diagnostic (Lefebvre, 2019 ; Gaddouri et al., 2016 ; Ammour et al., 2018 ; Gamet al., 2021). Au niveau de l'optimisation, le projet utilisera des contributions pour les problématiques d'ordonnancement et d'allocation des ressources (Lefebvre, 2018 Mejia & Lefebvre, 2019), et le contrôle pour la reconfiguration (Amari et al., 2012; Gatwaza et al., 2020).

Programme de travail : L'originalité de la méthode proposée pour résoudre ces problèmes repose sur une modélisation du problème et une méthodologie de résolution issues des systèmes à événements discrets (SED). Cette approche est motivée par la complexité exponentielle du problème qui apparaît dès lors que l'on couple les problèmes de configuration et de planification des trajectoires, ces dernières dépendant de la configuration évaluée. Les SED seront utilisés, en particulier, pour le séquençage des opérations.

Notre hypothèse de recherche est de disposer d'une spécification des missions d'intervention qui précise la localisation des différents points de mesure ou d'intervention, les opérations à effectuer en chacun de ces points ainsi que les contraintes de priorité qui existent entre les opérations. La méthodologie se concentre sur les 2 points suivants :

La **modélisation** utilisera des approches formelles issues des SED afin de modéliser l'infrastructure à surveiller, l'ensemble des mesures à prélever (ou des opérations à effectuer) et les spécifications fonctionnelles, opérationnelles et temporelles des missions. Ces outils permettent de réaliser une abstraction des contraintes de précédence qui sont superposées à une abstraction de la représentation spatiale de l'infrastructure. Ils permettent aussi de prendre en compte les caractéristiques réelles des agents mobiles.

L'aide à la décision concerne l'optimisation des flux physiques dans les missions d'intervention. Les modèles proposés seront exploités pour configurer et planifier les missions de surveillance en définissant le nombre d'agents mobiles et de capteurs qui les équipent, et la partie de la mission assurée par chaque agent. Lorsque les modèles sont de taille petite à moyenne, des algorithmes exacts peuvent être utilisés (parcours de graphes, programmation linéaire) et la solution optimale est le plus souvent obtenue. Lorsque la taille du graphe augmente, ces méthodes deviennent inopérantes et nous proposerons des solutions sous-optimales basées notamment sur l'intelligence artificielle et les techniques d'apprentissage automatique.

Notre programme de travail sera organisé en trois étapes principales après l'étape initiale qui consiste à compléter l'état de l'art.

(1) **Configurer la flotte d'agents mobiles**, en particulier le nombre d'agents et pour chaque agent, les capteurs qui l'équipent ou les ressources qu'il transporte. Les configurations admissibles doivent respecter des contraintes fonctionnelles (par exemple, des contraintes de précédence sur la prise de mesure), opérationnelles (par exemple, le nombre maximal de capteurs pouvant être embarqués par un agent).

(2) **Planifier les trajectoires** des agents en tenant compte de contraintes opérationnelles liées aux infrastructures et aux agents eux-mêmes. La planification des trajectoires devra notamment tenir compte de la nature du terrain traversé. Des contraintes limitant la durée des parcours devront être satisfaites (par exemple, l'autonomie des agents). Des contraintes temporelles liées aux mesures seront également considérées (par exemple, le délai maximal acceptable pour la prise de certaines mesures critiques).

(3) **Optimiser le coût global des missions** en couplant les aspects de configuration et ceux de planification. L'évolution rapide et parfois dramatique de la situation résultant d'un incident nécessitera de prendre en compte la possibilité de reconfigurer partiellement les missions de surveillance et d'intervention.

Références

Adam M.S. and al., Object tracking sensor networks in smart cities: Taxonomy, architecture, applications, research challenges and future directions, *Future Generation Computer Systems*, 2017.

Amari S., Demongodin I., Loiseau J.J. and Martinez C., Max-Plus Control Design for Temporal Constraints Meeting in Timed Event Graphs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57(2), pp. 462 – 467, 2012.

Ammour R., Leclercq E., Sanlaville E., Lefebvre D., Faults prognosis using partially observed stochastic Petri-nets: an incremental approach, *Discrete Event Dyn. Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 247-267, 2018.

Barbier M. & Chantry E., Autonomous mission management for unmanned aerial vehicles, *Aerospace Science and Technology* 8 pp. 359–368, 2004.

Bastourous M, Guerin F, Guinand F, Lemains E, Decentralized High Level Controller for Formation Flight Control of UAVs, *IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, Barcelona, Spain, 2020.

Bouzid S.E. and al., Wireless sensor network deployment optimisation based on coverage, connectivity and cost metrics, *International Journal of sensors Networks*, 2020.

Dezani H. et al., Genetic algorithm-based traffic lights timing optimization and routes definition using Petri net model of urban traffic flow, *IFAC Proceedings*, Volume 47, Issue 3, pp. 11326-11331, 2014.

Gaddouri R., Brenner L. and Demongodin I., Controlled Triangular Batches Petri Nets for hybrid mesoscopic modeling of traffic road networks under VSL control, *IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering*, Fort Worth, TX, pp. 427-432, 2016.

Gam M., Lefebvre D., Jabeur Telmoudi A., Nabli L., A Petri nets based approach for the optimization of surveillance patrols, *International Journal of Sensor Networks*, 2021.

Gatwaza F., Seddiki L., Amari S. and Akdag H., Fault-tolerant control of energy production devices using discrete event systems formalisms. The 4th IEEE International Conference on Control Automation and Diagnosis, Paris, France, 2020.

Guerin F, Adam J.F, Drone Detection System for Sensitive Areas, Patent from Le Havre Normandy University and DroneXTR, confidential defence accreditation, Paris, France, 2016.

Harik, C.E.H, Guerin F., Guinand F., Brethe J.F., Pelvillain H, UAV-UGV Cooperation For Objects Transportation In An Industrial Area, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Sevilla, Spain, 2015.

Harik, C.E.H, Guerin F, Guinand F., Brethe J.F, Pelvillain H., A Decentralized Interactive Architecture for Aerial and Ground Mobile Robots Cooperation, *IEEE International Conference on Control, Automation and Robotics*, Singapore, China, 2015.

Harik, C.E.H, Guerin F, Guinand F., Brethe J.F., Pelvillain H., Philippe J, Ritter J, Area Inspection Using A Swarm of UAVS: Preliminary Results, 4th AETOS International Workshop on "Research Challenges for Future RPAS/UAV Systems" - Mérignac, France, 2016

Harik, C.E.H, Guerin F, Guinand F., Brethe J.F., Pelvillain H, Parede J.Y, Fuzzy logic controller for predictive vision-based target tracking with an unmanned aerial vehicle, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 31(7): 368-381, 2017

Hoshina S., Ishiwata T. and Ueda R., Optimal patrolling methodology of mobile robot for unknown visitors, *Ad. Robotics*, 2016.

Lee C.K. et al., Autonomous Vehicle Parking Using Hybrid Artificial Intelligent Approach, *Sc. J. Intel. Robot. Syst.* 56, pp. 319–343, 2009.

Kawamura A., Soejima M., Simple strategies versus optimal schedules in multi-agent patrolling, *Theoretical Computer Science* 839, pp. 195–206, 2020.

Lefebvre D., Near-optimal scheduling for Petri net models with forbidden markings, *IEEE Trans. On Automatic Control*, 63(8): 2550-2557, 2018.

Lefebvre D., Approximated Timed Reachability Graphs for the robust control of discrete event systems, *Discrete Event Dynamic Systems: theory and applications*, 29(1), pp. 31-56, 2019.

Liu Y., Liu Z., Shi J., Wu G., Chen C., Optimization of Base Location and Patrol Routes for Unmanned Aerial Vehicles in Border Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, *Hindawi Journal of Advanced Transportation*, Article ID 9063232, 2019.

Mahulea C., Kloetzer M., Lesage J.-J., Multi-robot Path Planning with Boolean Specifications and Collision Avoidance, 15th IFAC Workshop on Discrete Event Systems, Rio de Janeiro, Brazil, 2020.

Manlio B. et al., Environmental Monitoring for Smart Cities, *IEEE Sensors Journal*, 2017.

Mejía G. & Lefebvre D., Robust scheduling of flexible manufacturing systems with unreliable operations and resources, *International Journal of Production Research*, 2019.

Peixoto J.P.J. et al., Wireless visual sensor networks for smart city applications: A relevance-based approach for multiple sinks mobility, *Future Generation Computer Systems*, 2017.

Rashid A. & Rehmani M.H. Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey, *Journal of Network and Computer Applications* 60, 192–219, 2016.

Scilimati V. et al., Industrial Internet of things at work: a case study analysis in robotic-aided environmental monitoring, *The Institution of Engineering and Technology (IET) Journals*, pp. 2043-6386, 2017.

Zhang W. et al., A new robotic assembly modeling and trajectory planning method using synchronized Petri nets, *Springer-Verlag London* 26: 420–426, 2005.