



## PROPOSITION DE CHANTIER 2016

Nom du chantier : **Systèmes Complexes Bio-inspirés (SYSCOB)**

**Nom et laboratoire d'appartenance de l'animateur du chantier :** Centre de Recherches sur la Cognition Animale, CNRS UMR 5169

**Animateur du chantier:** Guy Theraulaz (DR CNRS)

### Liste des laboratoires participants

**Centre de Recherches sur la Cognition Animale (CRCA), UMR 5169 :** Mathieu Moreau (IE CNRS), Guy Theraulaz (DR CNRS)

**Cognition, Langues, Langage, Ergonomie (CLEE), UMR 5263 :** Pascal Gaillard (EC), Céline Lemercier (EC)

**Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) :** Daniel Delahaye (EC), Céline Parzani (EC), Stéphane Puechmorel (EC)

**Institut de Mathématiques de Toulouse (IMT), UMR 5219 :** Bertrand Jouve (DR CNRS)

**Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT), UMR 5505 :** Frédéric Amblard (EC), Sylvain Hugues Cassé (EC), Sylvie Chambon (EC), Cussat-Blanc (EC), Jérôme Ermont (EC), Mamoun Filali (CR CNRS), Simone Gasparini (EC), Pierre Glize (IE CNRS), Elsy Kaddoum (EC), Hervé Luga (EC), Philippe Queindec (EC), Christine Rochange (EC), Stéphane Sanchez (EC), Jean-Luc Scharbarg (EC)

**Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE) :** Janette Cardoso (EC), Caroline Chanel (IR), Jean-Baptiste Chaudron (IC), François Defaÿ (IC), Alain Haït (EC), Emmanuel Lochin (EC), Jérôme Hugues (EC), Pierre Siron (EC)

**Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS), UPR 8001 :** Michel Devy (DR CNRS) ; Jérémie Guiochet (EC), Ariane Herbulot (EC), Michaël Lauer (EC), Matthieu Roy (CR CNRS)

**Laboratoire de Physique Théorique (LPT) :** Bertrand Georgeot (DR CNRS), Clément Sire (DR CNRS)

**Maison des Sciences de l'Homme et de la Société de Toulouse (MSHST) :** Bertrand Jouve (DR CNRS)

**Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) :** Eric Noulard (IR), Claire Pagetti (IR)

**Services R&D :** Airbus Group Leadership University (Rémi Dumas), Airbus Defence and Space (Jean-Paul Blanquart), Continental R&D (David Daurenjou)

### Liste des autres laboratoires collaborant avec le chantier :

Equipe de Denis Bartolo au laboratoire de Physique de l'ENS Lyon (<http://denis114.wordpress.com>). Cette équipe de physiciens travaille sur les mécanismes d'interactions au niveau individuel qui sont impliqués dans les mouvements collectifs cohérents de systèmes constitués de particules colloïdales motorisées. Elle sera impliquée dans l'axe "*Contrôle d'un essaim intelligent de drones*".

Equipe de Tamas Vicsek, à l'Institute of Physics, Eötvös University Budapest, à Budapest, Hongrie (<https://hal.elte.hu/~vicsek/contact/>). Cette équipe de physiciens développe également des travaux portant sur des flottes de drones et des mécanismes de coordination des déplacements. Elle sera impliquée dans l'axe "*Contrôle d'un essaim intelligent de drones*".

Equipe Complex Network du LIP6 à Paris 6 (<http://www.complexnetworks.fr/>). Cette équipe de mathématiciens et d'informaticiens travaille sur la modélisation de réseaux complexes, essentiellement de l'internet. Elle sera impliquée dans l'axe "*Optimisation d'un trafic de véhicules*".

**Durée du chantier : 2 ans**

## Description des objectifs et des actions proposés pour le chantier

On assiste depuis quelques années à l'évolution des systèmes véhiculaires, tant terrestres qu'aériens, visant à en augmenter les capacités d'interaction avec l'environnement (capteurs, caméras, etc.) pour, à terme, les doter d'une autonomie décisionnelle. Dans un futur relativement proche, l'une des applications phares consistera coupler plusieurs systèmes unitaires pour en faire un système collaboratif, capable d'utiliser les capacités sensorielles et les actionneurs d'une flotte de véhicules communicants et de s'adapter collectivement aux changements survenant dans l'environnement. Les exemples de telles applications incluent :

- Dans l'industrie aéronautique, le vol en formation d'avions réduira la quantité de carburant employé,
- Dans l'industrie automobile, l'application de platooning permettra d'implémenter des « trains de voitures » réduisant les risques d'accident et la consommation énergétique,
- Le vol en formation de drones suiveurs permettra de suivre une cible donnée malgré les obstacles, ou de couvrir une zone donnée par la coopération d'une flotte de drones.

L'objectif général du chantier SYSCOB est de structurer un ensemble de réflexions et de recherches préliminaires afin de développer une approche fiable et bio-inspirée dans le domaine de la conception et du contrôle de systèmes véhiculaires terrestres ou aéronautiques. Ce chantier s'appuie sur une dynamique pluridisciplinaire enclenchée depuis un an dans le cadre de la mise en place de l'Institut des Systèmes Complexes de Toulouse (<http://www.isc-t.fr>) ainsi que sur la réflexion amorcée depuis 4 ans au sein du chantier TORRENTS. Deux principaux axes de travail sont proposés : contrôle d'un essaim de drones, prise de décision et optimisation d'un trafic de véhicules.

### *Systemes complexes*

La compréhension des dynamiques complexes résultant des interactions entre les unités d'un essaim de drone ou d'une flotte de véhicules nécessite une approche combinant étroitement expérience et modélisation et s'appuyant sur les outils et méthodes des sciences de la complexité. Un système complexe est constitué de nombreuses entités dont les interactions produisent un comportement global qui ne peut être facilement expliqué à partir des seules propriétés individuelles des constituants. Les systèmes complexes présentent des dynamiques multi-échelles et des phénomènes de cascades induisant de brusques changements qualitatifs que nous avons du mal à analyser, à comprendre et à prédire. Ces dynamiques complexes résultent souvent de boucles de rétroactions non linéaires, plus ou moins explicites, entre les unités du système ou encore d'influences stochastiques de l'environnement. Les sciences de la complexité s'attachent à développer des outils et des méthodes permettant l'étude de ces systèmes : description, modélisation, prédiction et enfin contrôle.

### *Approches bio-inspirées*

Penser les systèmes artificiels et les organisations de demain, ou simplement optimiser les procédures de contrôle des systèmes existants, se heurte à leur complexité : réseaux de transports, nouveaux médias de communication, espaces multi-connectés, .... Certaines caractéristiques de ces systèmes - souvent ouverts, soumis à des contraintes de ressources, à l'absence de contrôle centralisé et à une connaissance partielle des individus sur le système – sont aussi présentes dans de nombreux systèmes complexes biologiques pour lesquels les stratégies mises en place par les agents sont basées sur des architectures et des dynamiques particulières. Que l'on pense au corps humain, aux sociétés d'insectes, aux bancs de poissons, la capacité d'adaptation de ces systèmes aux variations environnementales, leur résilience aux pannes, leurs dynamiques collaboratives et leur temps de réponse très courts ont commencé à inspirer de nouveaux modèles pour les systèmes artificiels [1-6], dépassant les approches traditionnelles. Les actes du 7<sup>ème</sup> congrès mondial « *Nature and Biologically Inspired Computing* » révèle la variété des domaines d'application et l'énorme potentiel de ces approches [7], avec finalement assez peu d'équipes françaises présentes.

La combinaison des deux types d'approches pour concevoir des algorithmes de contrôle distribué d'essaims ou de flotte de véhicules autonomes est encore assez peu développée dans le domaine de la robotique collective bio-inspirées. Les principales équipes travaillant sur ces questions sont le LIS à l'EPFL Lausanne, l'US Navy's (programme LOCUST) et l'Institut de Physique à l'Université Eötvös de Budapest. Les axes de recherches développés dans le chantier SYSCOB se distinguent de ces projets par le transfert et l'adaptation de nouveaux modèles construits directement à partir de l'analyse de systèmes vivants (mécanismes de coordination des déplacements au sein de bancs de poissons et de régulation du trafic chez les fourmis), une démarche développée préalablement avec succès pour résoudre des problèmes d'optimisation [1-3].

*La plus-value / enjeu de la méthodologie mise en avant dans le chantier pour les verrous identifiés, en particulier sur les trois champs d'applications proposés*

Les équipes du site toulousain possèdent chacune dans leurs domaines respectifs des compétences reconnues au niveau international. Des chercheurs de quinze d'entre elles au moins travaillent dans le champ des systèmes complexes (<http://isc-t.fr/competences>). Trois de ces unités de recherche (CRCA, IRIT, LAAS) présentent des projets qui relèvent d'approches bio-inspirées. Avec le chantier SYSCOB, nous proposons la mise en place d'un dispositif de réflexions et d'actions dans le domaine des systèmes complexes bio-inspirés au contrôle de dispositifs critiques, visant la certification et dont la fiabilité doit être attestée. Nous souhaitons également au moyen de ce chantier développer ou renforcer les partenariats entre ces équipes et ouvrir à de nouvelles collaborations interdisciplinaires dans l'objectif de donner au groupe une visibilité nationale et internationale. Ce dispositif agrègera aussi des acteurs du monde économique (PME, ETI, Grands Groupes) présents sur le site et qui, pour certains d'entre eux, ont déjà manifesté leur intérêt pour ces approches. Nous proposons de structurer la réflexion et le travail autour de deux principaux axes : le contrôle d'un essaim intelligent de drones, et l'optimisation d'un trafic de véhicules.

### **Contrôle d'un essaim intelligent de drones** (unités pilotes : CRCA, IRIT, ISAE, LAAS, LPT, MSHST, ONERA).

Le déploiement et l'utilisation de flottes ou essaims de drones autonomes capables de se déplacer en groupe, de coopérer et de s'auto-organiser pour réaliser des tâches d'exploration, de surveillance ou de transport en environnement complexe constitue un des enjeux majeurs en robotique collective. Dans ce contexte, cet axe se focalisera sur l'étude d'un comportement essentiel pour ces essaims : leur capacité à naviguer collectivement et à s'adapter aux contraintes dynamiques de leur environnement. La navigation collective d'un grand nombre de drones reste un verrou lorsque l'on considère les techniques traditionnelles de planification de trajectoires. En effet, le calcul de trajectoires évitant toute collision nécessite un temps de calcul qui croît de manière exponentielle avec le nombre de drones. Par ailleurs, pour calculer ces trajectoires, les drones doivent connaître en temps réel la position et éventuellement la trajectoire des autres membres de la flotte. Ceci requiert un nombre très important de communications au sein de la flotte. De la même manière, l'allocation dynamique différenciée de tâches aux différents éléments de l'essaim afin d'optimiser la réalisation d'une mission générale pour l'essaim répond à des contraintes similaires. Pour répondre à ce problème, nous proposons d'explorer des modes de contrôle décentralisés et bio-inspirés (reposant sur la logique des mécanismes impliqués dans la coordination des déplacements de bancs de poissons), adaptatifs (exploitant les capacités d'auto-organisation du système) et ne nécessitant que des perceptions et des communications locales entre les entités. Dans ce cas, le déplacement de chaque drone reposera sur un comportement réactif ne nécessitant que peu de puissance de calcul. Les récents travaux conduits au CRCA et au LPT sur les déplacements collectifs de bancs de poissons ont permis de modéliser les comportements et les interactions à l'échelle individuelle, de caractériser les paramètres contrôlant les différentes formes de déplacements collectifs et d'identifier des zones de l'espace des paramètres dans lesquels le banc dans son ensemble devient très sensible à des perturbations d'origines interne ou externe [8-10]. Les travaux menés dans l'équipe SMAC de l'IRIT dans le domaine des systèmes multi-agents coopératifs à fonctionnalité émergente (<https://www.irit.fr/-Equipe-SMAC->) et dans l'équipe RIS du LAAS en systèmes multi-robots (<http://homepages.laas.fr/afranchi/robotics/?q=taxonomy/term/19>) suggèrent également des méthodes d'implémentation efficaces de ces comportements. Des travaux actuellement menés à l'ISAE traitent des lois de commandes et de guidage décentralisées pour le vol en formation d'une flotte de drones [11] ainsi que sur la décision décentralisée pour les agents d'une équipe en charge de la surveillance d'une zone [12]. D'autre part, la simulation distribuée permet d'intégrer des modules provenant de différentes disciplines (commande, contrôle, dynamique du vol, propulsion, réseau de communication, etc.) et de traiter les questions d'interopérabilité entre différents outils de simulation (HLA, Ptolemy, Simulink, ...), de temps réel (pour l'intégration de composants réels), de passage à l'échelle [13]. Enfin des travaux réalisés sur la constitution de réseaux de communication opportunistes [14] sont tout à fait pertinents avec les applications potentielles d'un essaim intelligent de drones. Plusieurs plateformes (volière de drones, simulation) permettent d'envisager des expérimentations. La communication entre drones voisins d'un essaim peut prendre différentes formes suivant les capacités perceptives dont ils sont dotés (audition, vision, olfaction). Les différents programmes menés en SHS (MSHST, CLLE) sur la reconstruction et la perception d'ambiances seront sollicités. L'implémentation de formes bio-inspirées d'interactions dans un essaim de drones permettra le développement de nouvelles formes de navigation et d'adaptation collective.

### **Optimisation d'un trafic de véhicules** (unités pilotes : CLEE, CRCA, ENAC, IMT, IRIT, LAAS, MSHST, ONERA)

Le système de gestion du trafic aérien vise à permettre la réalisation de l'ensemble des vols prévus en minimisant les coûts, et donc en particulier les délais et allongements de route, tout en assurant un niveau de sécurité élevé. L'augmentation prévisible du volume de trafic dans les années à venir impose un changement de paradigme dans les méthodes de planification et de contrôle. La tâche de séparation en particulier sera déléguée en grande partie aux aéronefs, le contrôle centralisé ayant un rôle de supervision et de gestion de situations dégradées. Dans ce nouveau contexte, les actions effectuées seront essentiellement locales, mais le grand nombre d'interactions

présentes va induire un comportement collectif qu'il convient de prévoir et si possible d'orienter afin d'assurer un équilibre système optimal. Des algorithmes utilisant une approche multi-agents ont d'ores et déjà été appliqués dans le cadre d'une thèse ENAC en cours au problème de la résolution automatique des conflits (rapprochements en dessous des normes de séparation). D'autres travaux sur l'émergence d'un optimum global à partir de règles locales seront lancés prochainement. Les disponibilités de flux sur les routes aériennes ou de places dans les aéroports agissent comme des contraintes de ressources dynamiques sur le système dont on peut envisager le traitement par une approche bio-inspirée. Quels sont les réseaux les mieux tolérants aux fautes, les mieux capables à absorber des accidents ou des attaques, ou à subir de fortes contraintes topologiques dues par exemple à la diffusion d'épidémies, sont autant de questions qui pourront être explorées [15]. Plusieurs exemples d'approches bio-inspirées pour l'optimisation de coût dans le trafic aérien ou la résolution de problèmes de congestions sont proposés dans [16].

#### Références :

- [1] Bonabeau, E., Dorigo, M. & Theraulaz, G. 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press
- [2] Bonabeau, E. & Theraulaz, G. 2000. Swarm Smarts. *Scientific American*, 282: 72-79
- [3] Bonabeau, E., Dorigo, M. & Theraulaz, G. 2000. Inspiration for optimization from social insect behaviour. *Nature*, 406: 39-42
- [4] Fernandez-Marquez, J.L. 2012. *Bio-inspired Mechanisms for Self-organising Systems*. CSIC Press, Barcelona ([http://www.cui.unige.ch/~fernajos/jose\\_fernandez\\_files/monografia49.pdf](http://www.cui.unige.ch/~fernajos/jose_fernandez_files/monografia49.pdf))
- [5] Dressler, F. & Akan, O.B. 2010. A survey on bio-inspired Networking. *Computer Networks*, 54: 881-900.
- [6] Wang, H., Lu, X., Zhang, X., Wang, Q. & Deng, Y. 2014. A Bio-Inspired Method for the Constrained Shortest Path Problem. *The Scientific World Journal*. 2014:271280.
- [7] Pillay, N., Engelbrecht, A.P., Abraham, A., du Plessis, M.C., Snásel, V. & Muda, A.K. (Eds.). 2016. Advances in Nature and Biologically Inspired Computing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 419. Springer International Publishing, Switzerland.
- [8] Gautrais, J., Ginelli, F., Fournier, R., Blanco, S., Soria, M., Chaté, H. & Theraulaz, G. 2012. Deciphering interactions in moving animal groups. *Plos Computational Biology*, 8: e1002678.
- [9] Calovi, D.S., Lopez, U., Ngo, S., Sire, C., Chaté, H. & Theraulaz, G. 2014. Swarming, Schooling, Milling: Phase diagram of a data-driven fish school model. *New Journal of Physics*, 16: 015026
- [10] Calovi, D.S., Lopez, U., Schuhmacher, P., Sire, C., Chaté, H. & Theraulaz, G. 2015. Collective response to perturbations in a data-driven fish school model. *Journal of the Royal Society Interface*, 12: 20141362.
- [11] Bolting, J., Fergani, S., Biannic, J-M., Defay, F. & Stolle, M. Discrete Sliding Mode control of small UAS in tight formation flight under information constraints. *Submitted to the 20th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, (ACA 2016)*
- [12] Ulbadino de Souza, P.E., Carvalho Chanel, C.P & Givigi, S. 2016. A Game Theoretical Formulation of a Decentralized Cooperative Multi-Agent Surveillance Mission. *Distributed and Multi-Agent Planning (DMAP)ICAPS Workshop, London, UK June 12-17, 2016*.
- [13] Chaudron, J.-B., Saussié, D., Siron, P. & Adelantado, M. 2014. Real-time distributed simulations in an HLA framework: Application to aircraft simulation. *Simulation*, 90: 627-643.
- [14] Ramiro, V., Lochin, E., Sénac, P. & Rakotoarivelo, T. 2014. Temporal random walk as a lightweight communication infrastructure for opportunistic networks, *IEEE 15th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Sydney, NSW. doi:10.1109/WoWMoM.2014.6918919
- [15] Barrat A., Barthélemy M., Vespignani A. 2011. *Dynamical Processes on Complex Networks* (4th ed.). Cambridge, UK : Cambridge University Press.
- [16] Snasel V., Abraham A., Krömer P., Pant M., Muda A.K. (Eds.). 2016. Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 424. Springer International Publishing, Switzerland.

#### Actions proposées pour le chantier SYSCOB

Le projet interdisciplinaire sera mené sur deux ans et organisé autour d'actions largement ouvertes aux acteurs économiques comme cela est déjà à l'œuvre dans l'Institut des Systèmes Complexes de Toulouse. Ainsi le projet sera lancé par l'organisation d'une journée partenariale co-organisée avec MADEELI, l'agence régionale pour l'innovation. Cette journée présentera l'ambition du projet et les différents axes de travail. Elle sera suivie sur la première année par des mini-cours qui s'adresseront à un public pluridisciplinaire de chercheurs et aux représentants des services R&D des entreprises qui auront manifesté leur intérêt.

L'équipe de pilotage du projet est le bureau de l'Institut des Systèmes Complexes de Toulouse, constitué de 7 personnes réparties sur l'ensemble des établissements toulousains et d'un représentant de MADEELI. Il pourra être élargi à quelques personnes de la sphère entrepreneuriale. Chaque axe travaillera par ailleurs autour d'une

équipe projet en utilisant les instruments classiques (workshop, séminaires) et la possibilité de financement des chercheurs du site pour de courts séjours en France ou à l'étranger.

Le chantier organisera une conférence annuelle à Toulouse à la fin de l'année civile, sur la période 2016-2018 (soit un total de 3 pour une durée de 2 ans). Chacune de ces rencontres, d'une durée de deux journées, abordera une thématique transverse d'intérêt du chantier. A ce jour, trois thèmes sont identifiés : 1) intégration sûre d'outils de perception/analyse d'image, 2) décision distribuée et intelligence collective, 3) perception répartie, pertinence des informations spatio-temporelles, transferts d'informations et réactions aux perturbations dans des systèmes complexes. Ces workshops seront si possible couplés à une conférence connexe (Imav 2017 (International micro air vehicles) sera organisée à Toulouse en 2017) et seront construits autour de présentations longues de chercheurs ou d'industriels marquants.

Un colloque de restitution du travail sera organisé à la fin des deux ans et présentera les pistes de travail futur. Par ailleurs, nous inviterons deux à quatre chercheurs seniors chaque année, soit comme professeur invité, soit pour une intervention à la conférence. Les chercheurs identifiés à ce jour incluent :

- Pr. Dario Floreano, Laboratory of Intelligent Systems, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse (<http://lis.epfl.ch/>)
- Dr. Petros Koumoutsakos, Computational Science and Engineering Laboratory, ETH, Zürich, Suisse (<http://www.cse-lab.ethz.ch/>)
- Dr. Christian F. Tschudin, Computer Networks Group, University of Basel, Basel, Switzerland (<http://cn.cs.unibas.ch/people/cft/>)
- L'équipe de Vijay Kumar (Univ. Pennsylvanie, US) développe des systèmes pour les flottes de robots autonomes, tant aériens que terrestres.
- Agence Spatiale Européenne (ESA) : Gianfranco Visentin, Dr. Ing., Head, Automation and Robotics Section, dirige l'équipe de recherche sur les robots et l'automatisation à l'ESA Paris <https://www.b2match.eu/h2020-space-infoday/participants/2422>
- Dr. Ernesto Estrada, Institute of Complex Systems, University of Strathclyde, Glasgow, UK (<http://www.estradalab.org/>)
- Michael D. Wagner, membre du Robotics Institute à Carnegie Mellon University (Pittsburgh, US), affilié au National Robotics Engineering Center (NREC). Il développe des robots autonomes pour des missions scientifiques et contribue à la sûreté dans les systèmes autonomes.
- Masafumi Yamashita (Kyushiu University, Japan) développe des algorithmes pour le vol en formation de drones et le regroupement de robots mobiles.