

Contributions en commande et estimation pour robots autonomes et systèmes aérospatiaux

Julien Marzat

Soutenance HDR, 18 octobre 2019, ONERA Palaiseau

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

Julien Marzat, 33 ans

- ❑ 2008 Ingénieur ENSEM Nancy, Master Recherche INPL Nancy.
- ❑ 2008 – 2011 Doctorat en Automatique. ONERA, L2S Supélec – Université Paris Sud XI.
- ❑ Depuis 2011 Ingénieur d'études et de recherches en automatique, ONERA DTIS, Palaiseau

Quelques indicateurs

- ❑ Encadrement 15 stages M2 ; 8 thèses (5 soutenues, 3 en cours) ; 2 post-docs.
- ❑ Production scientifique 3 chapitres. 14 revues internationales. 40 conf. Internationales. 9 autres conf.
- ❑ Enseignement ~ 90h /an. ECE Paris, CNAM.
- ❑ Reviews d'articles ~ 10 /an. Revues aérospatiales, conférences IEEE / IFAC en autom. / robotique

Responsabilités

- ❑ Co-responsable de la thématique « Robotique et Autonomie » au DTIS
- ❑ Editeur associé pour *IEEE TAES (Fault-Tolerant Systems)* et *International Journal of Micro-Air Vehicles*
- ❑ Membre du comité de programme pour *ECMR 2019*
- ❑ 1 jury de thèse en temps qu'examineur

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

- ❑ EPIC, tutelle Min. Armées
- ❑ ~ 2000 personnes
- ❑ Budget 235 M€
~ 55% financement externe

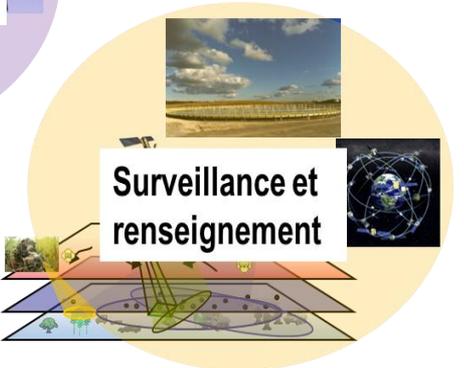
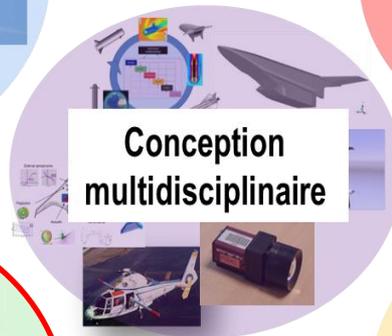
DTIS

(Traitement Information et Systèmes)

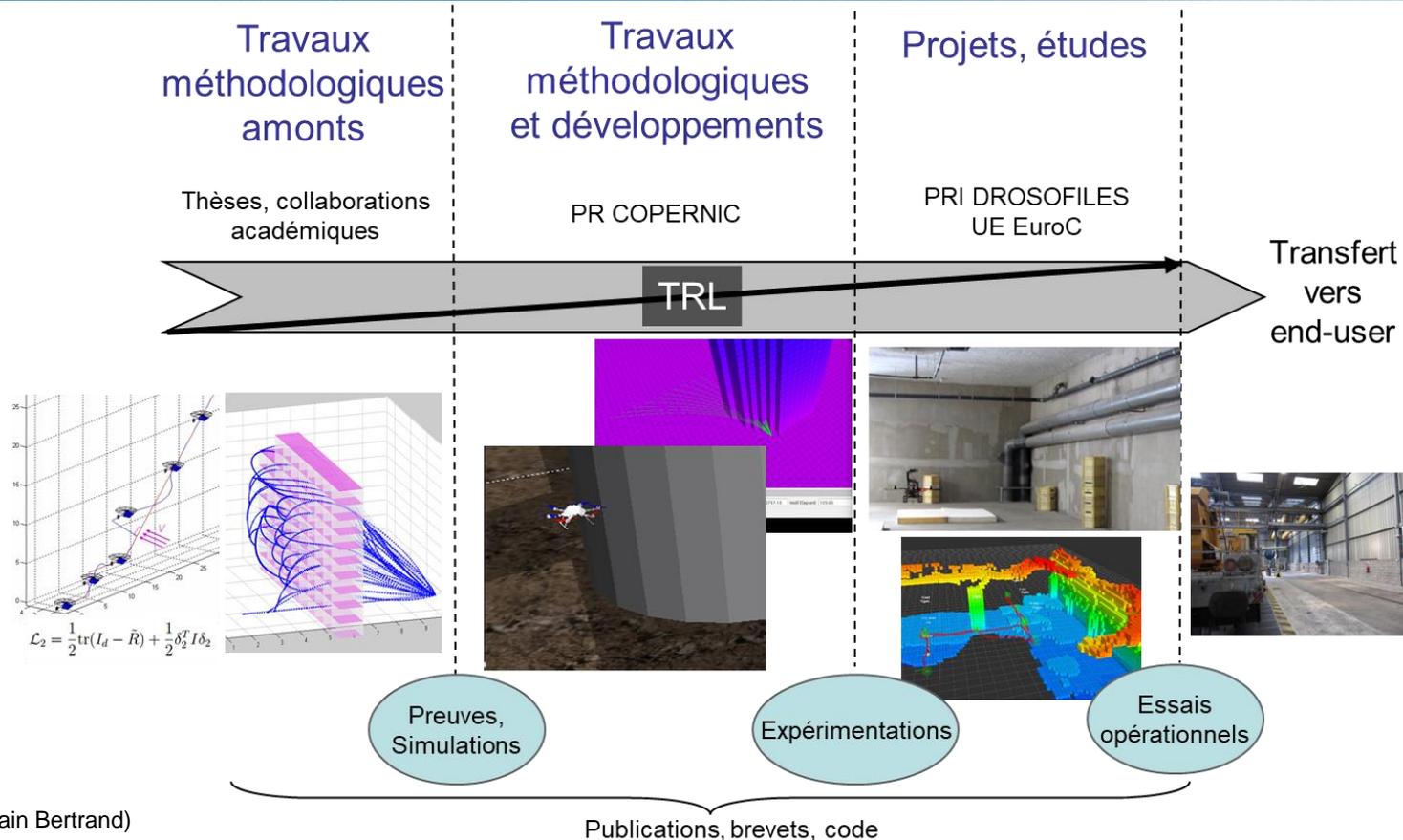
- ❑ Palaiseau, Toulouse,
Salon de Provence
- ❑ ~ 280 personnes
~ 70 doctorants
- ❑ Interaction avec tous les
départements ONERA

*Méthodes, techniques
et outils pour*

DTIS

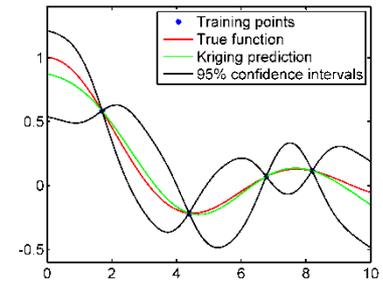
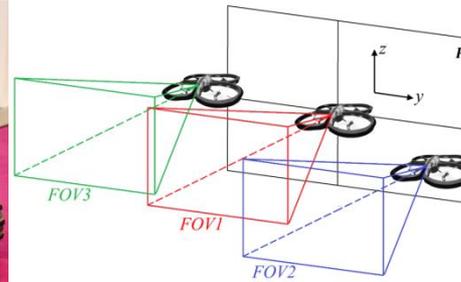


Processus de Recherche Appliquée à l'ONERA



(Merci à Sylvain Bertrand)

- ❑ **Diagnostic de défauts et pronostic à base de modèles dynamiques**
 - Diagnostic et reconfiguration pour les systèmes aérospatiaux
 - Pronostic à base de modèles et propagation d'incertitudes (probabiliste / intervalles)
- ❑ **Navigation autonome mono et multi-robots**
 - Navigation autonome basée vision en milieu encombré (mission d'inspection)
 - Commande multi-véhicules : déplacement en flotte, exploration coordonnée
- ❑ **Méthodes d'optimisation et d'estimation à base de krigeage**
 - Algorithmes d'optimisation robuste de fonctions coûteuses
 - Estimation à base de krigeage : réglage d'algorithmes, évènements rares, filtre dérivateur



Encadrements de doctorants et post-doctorants

5 thèses soutenues et 2 post-doctorats encadrés

□ Diagnostic de défauts et pronostic à base de modèles dynamiques

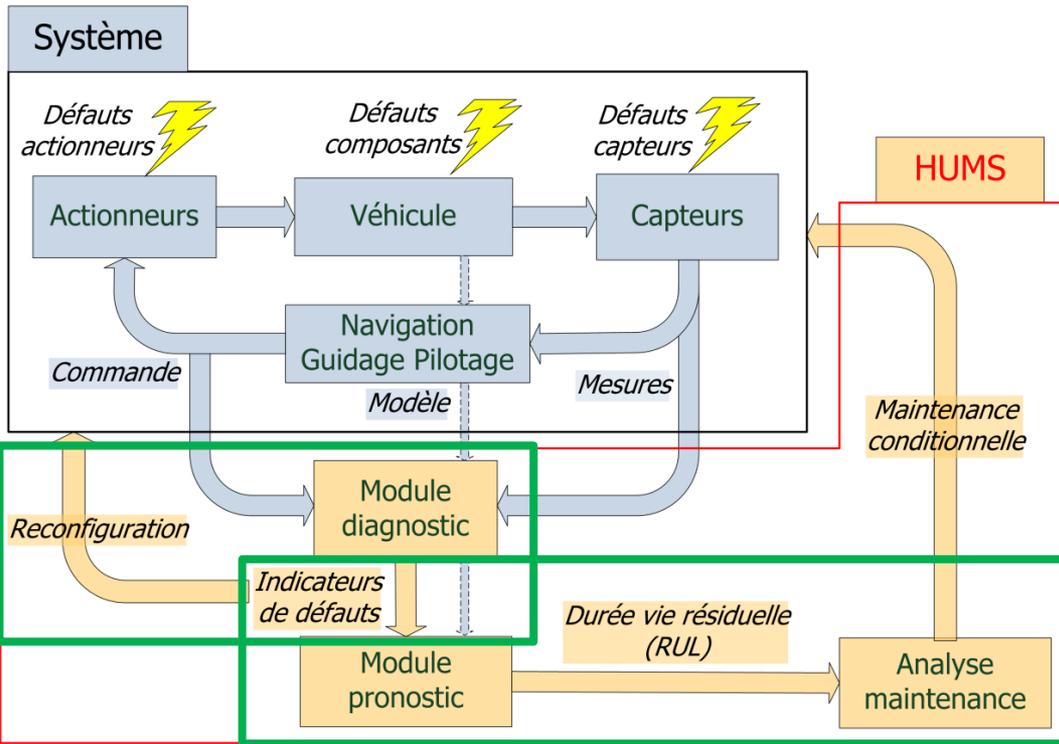
- 2013 – 2016 :** **Alessandra Iannetti (ingénieur CNES)**. Dir. : H. Piet-Lahanier (ONERA DTIS). Interaction ONERA DMPE
Diagnostic à base de modèles pour les moteurs fusée à ergols liquides
- 2016 – 2019 :** **Camille Sarotte (ONERA – CNES)**. Dir. : H. Piet-Lahanier (ONERA DTIS). Interaction ONERA DMPE
Amélioration des processus de surveillance et reconfiguration pour les moteurs fusée à ergols liquides
- 2015 – 2018 :** **Elinirina Robinson (ONERA)**. Dir. : T. Raïssi (CNAM). Interaction ONERA DMAS
Filtering and Uncertainty propagation methods for model-based prognosis

□ Navigation autonome mono et multi-robots

- 2012 – 2015 :** **Arthur Kahn (ONERA – DGA)**. Dir. : H. Piet-Lahanier (ONERA DTIS), M. Kieffer (L2S Supelec)
Commande coopérative reconfigurable pour la recherche d'extremum
- 2014 – 2017 :** **Hélène Roggeman (ONERA)**. Dir. : G. Le Besnerais (ONERA DTIS)
Couplage vision-commande pour amélioration de performance de la navigation des robots autonomes
- 2015 – 2016 :** **Duc-Kien Phung (Post-Doc ONERA)**. Avec B. Hérissé, S. Bertrand (ONERA DTIS)
GPU-based Model Predictive Control
- 2016 – 2017 :** **Ioannis Sarras (Post-Doc ONERA)**. Avec H. Piet-Lahanier, S. Bertrand (ONERA DTIS)
Distributed Localization and Guidance for fleets of autonomous vehicles

Diagnostic et Pronostic à base de modèles dynamiques

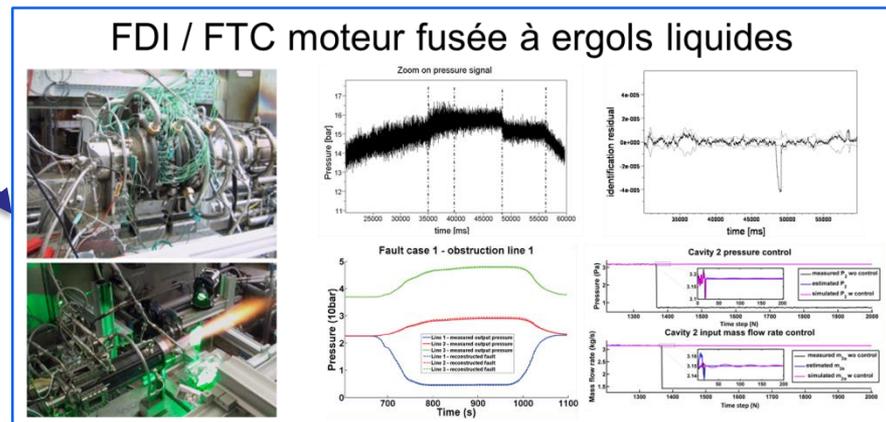
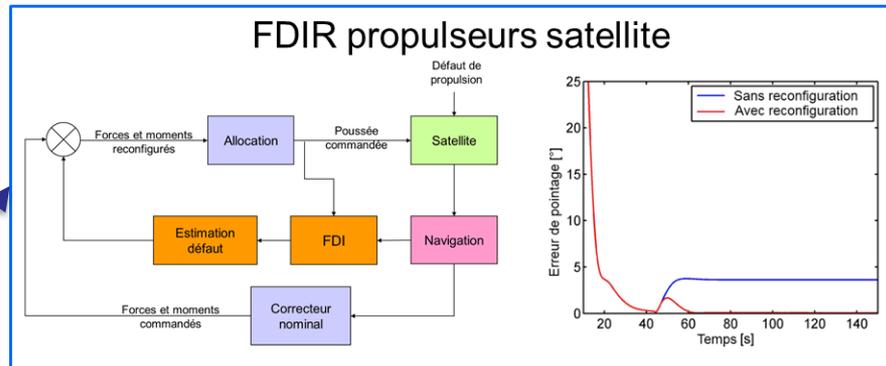
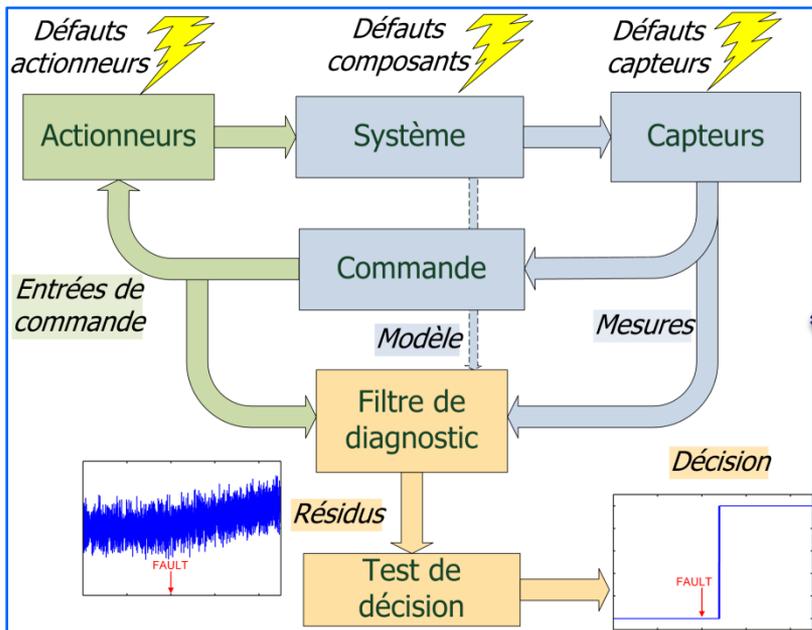
Diagnostic et Pronostic à base de modèles dynamiques



Boucle HUMS (Health and Usage Monitoring System)

- ❑ **Rétroaction rapide / en ligne**
Diagnostic de défauts
Reconfiguration / commande tolérante
- ❑ **Rétroaction lente / hors ligne**
Pronostic de défaillance
Maintenance conditionnelle

Diagnostic à base de modèles dynamiques



Diagnostic moteur fusée à ergols liquides

Thèses ONERA / CNES d'Alessandra Iannetti (2016) et Camille Sarotte (2019)



❑ Moteurs fusée à ergols liquide (Oxygène/Hydrogène, Oxygène/Méthane)

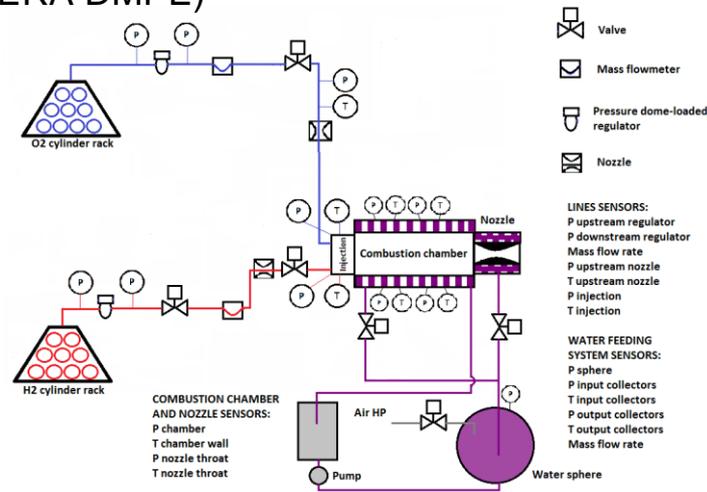
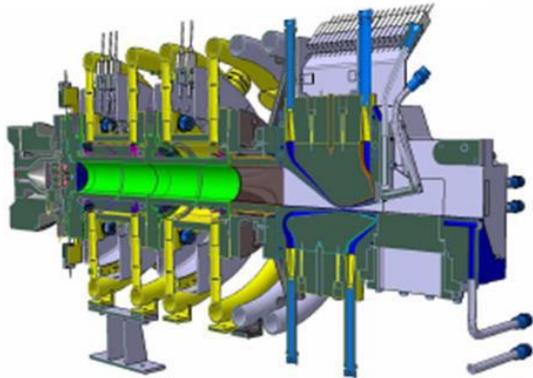
Historiquement : réglés en boucle ouverte sur 1 point de fonctionnement, supervision « redlines »

Nouveaux besoins (lanceurs réutilisables) : commande en boucle fermée, plusieurs points de fonctionnement

→ étude de méthodes à base de modèles dynamiques pour le diagnostic et la commande tolérante

❑ Banc de recherche MASCOTTE (CNES – ONERA DMPE)

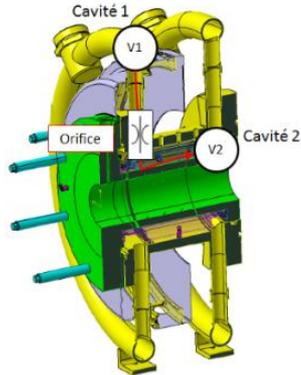
- Données d'essai disponibles
- Simulateur « fonctionnel » Carins (CNES)



Diagnostic moteur fusée à ergols liquides

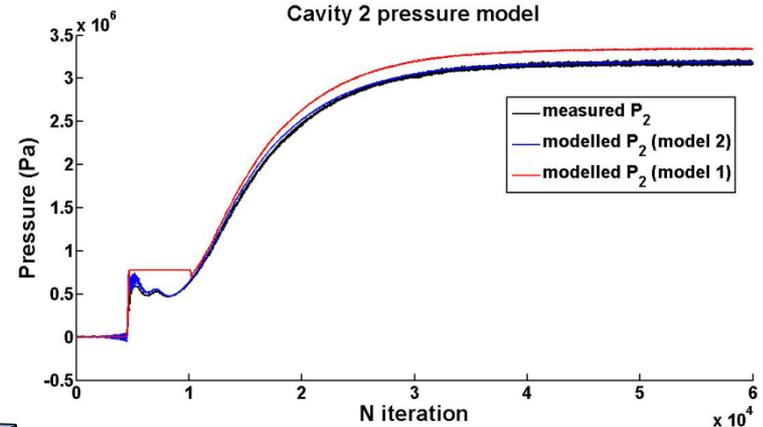
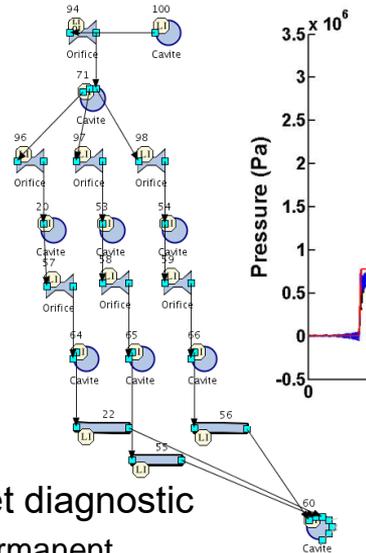
- Important effort de modélisation pour l'estimation en ligne → sous-systèmes dynamiques de faible dimension

- Circuit de refroidissement, lignes d'ergols



Exemple :

$$\begin{aligned} \dot{q}_2^e &= \theta_3 (q_2^e)^{\frac{7}{4}} - \theta_4 (P_1 - P_2) \\ \dot{P}_2 &= -\theta_1 (q_2^s - q_2^e) \\ &(\text{débits } q^e, q^s ; \text{ pressions } P_1, P_2) \end{aligned}$$



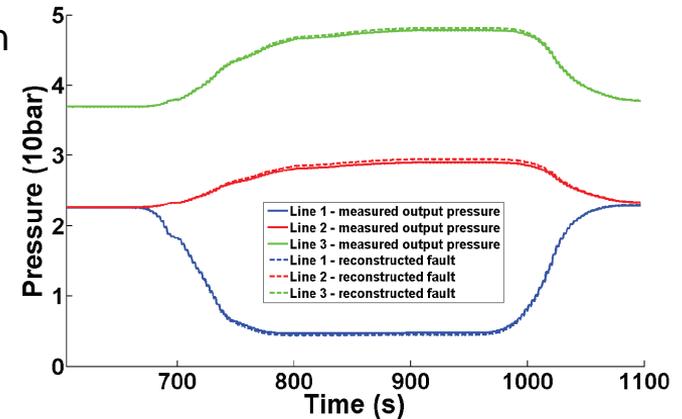
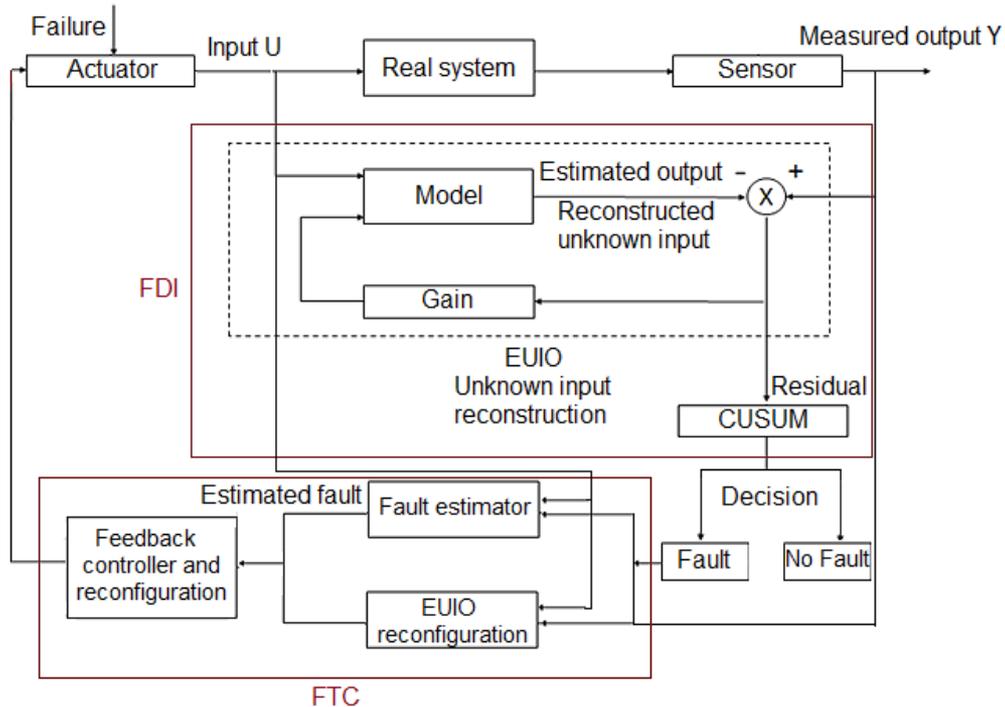
- Tests d'algorithmes « classiques » d'estimation et diagnostic

- Moindre carrés récursifs : paramètres en régime permanent
- Estimation d'état : EKF, EUIO et reconstruction d'entrée inconnue (débit), Unscented UIO
- Détection : analyse résidu par CUSUM bilatéral adaptatif
- Localisation dans lignes parallèles : espace de parité augmenté des contraintes de la mécanique des fluides

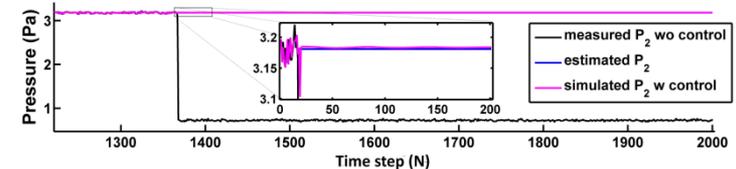
- Commande tolérante aux défauts (mineurs) d'actionneur : compensation de défaut + anti-windup

Diagnostic moteur fusée à ergols liquides

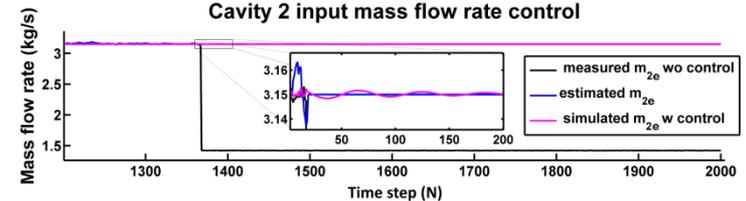
- ❑ Schéma complet FTC proposé, validé sur données et en simulation
- ❑ Première intégration sur banc MASCOTTE (en jeu)



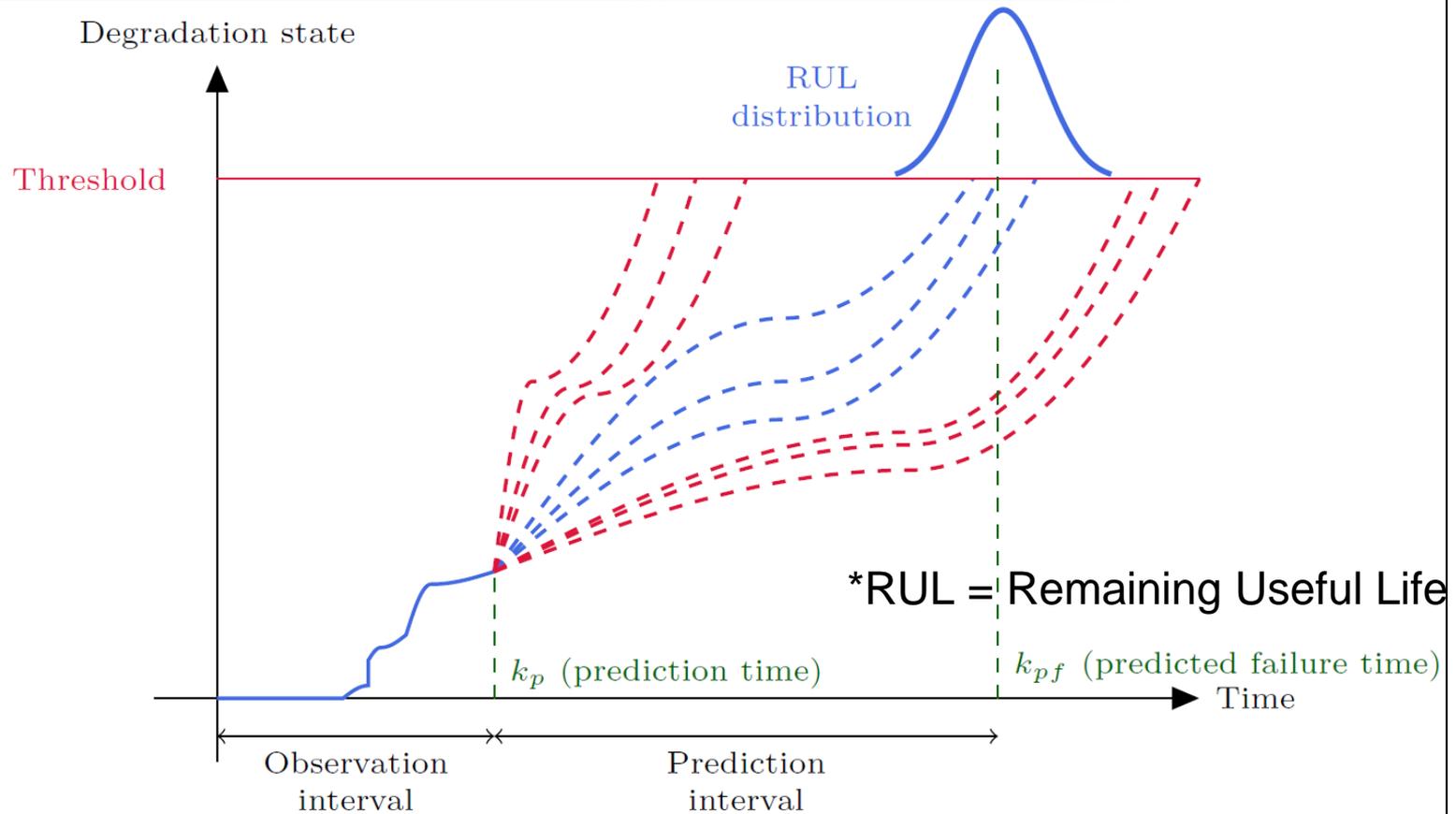
Cavity 2 pressure control



Cavity 2 input mass flow rate control

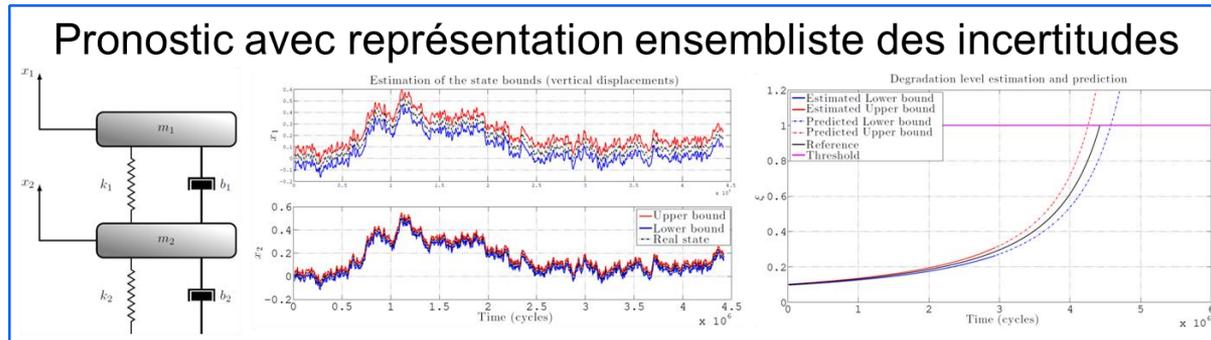
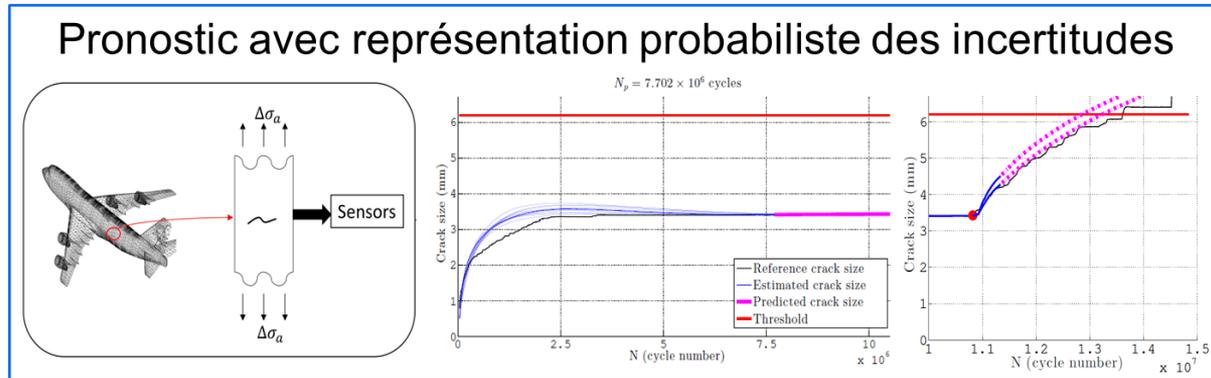


Pronostic à base de modèles dynamiques



Pronostic à base de modèles dynamiques

Thèse d'Elinirina (Irena) Robinson (2018), dirigée par Tarek Raïssi (CNAM).



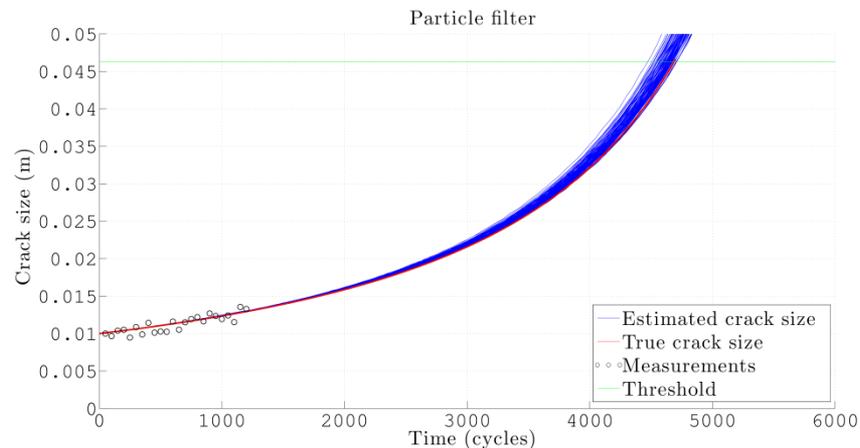
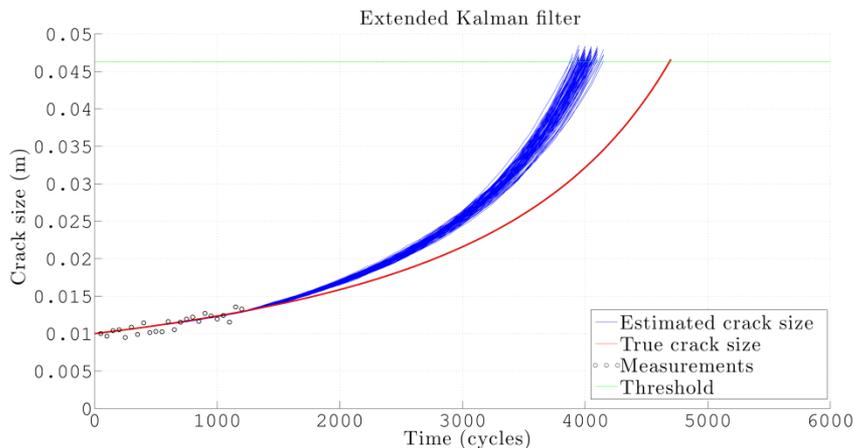
Pronostic avec modélisation probabiliste des incertitudes

Modèle de propagation de fissure (loi de Paris-Erdogan et variantes), longueur mesurée a .

$$\frac{da}{dN} = \exp(\log C) (\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m$$

- Phase d'observation : estimation des paramètres C, m (état augmenté). Charge $\Delta\sigma$ supposée connue.
- Phase de propagation : Monte-Carlo à partir de la prédiction du filtre. (Alternative : iFORM)

EKF et filtre particulaire SIR évalués en simulation.

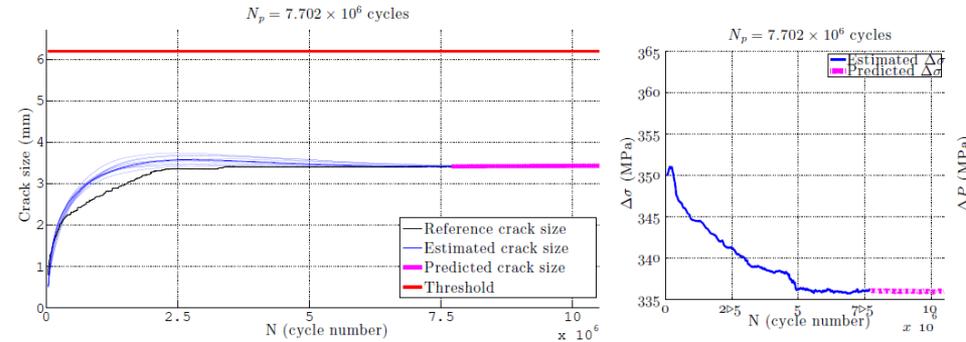


Pronostic avec modélisation probabiliste des incertitudes

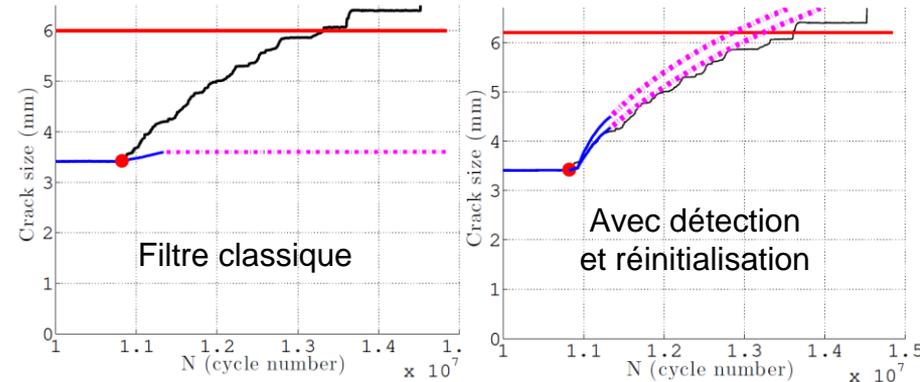
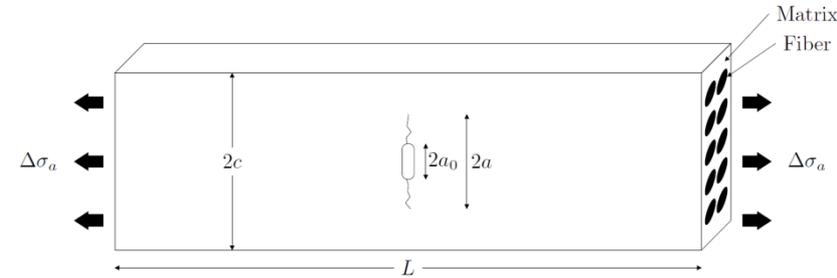
Matériaux composites : essais réels de fatigue ONERA DMAS

$$\frac{da}{dN} = C \left(F \Delta \sigma_a \sqrt{\pi a} - 2F \sqrt{\frac{a}{\pi}} \Delta P \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{a_0}{a} \right) \right) - K_{th} \right)^m$$

→ paramètres de charge estimés en ligne (état augmenté)



→ détection variation de charge (test CUSUM sur $\widehat{\Delta \sigma_a}$),
ré-initialisation du filtre particulaire



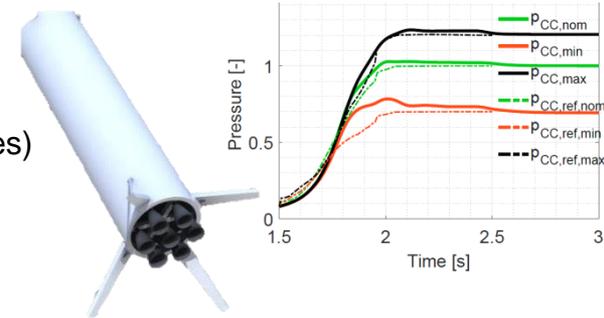
[Young Author Award IFAC Safeprocess 2018]

Diagnostic et Pronostic : Perspectives

❑ FDIR Moteurs fusée (collaboration CNES)

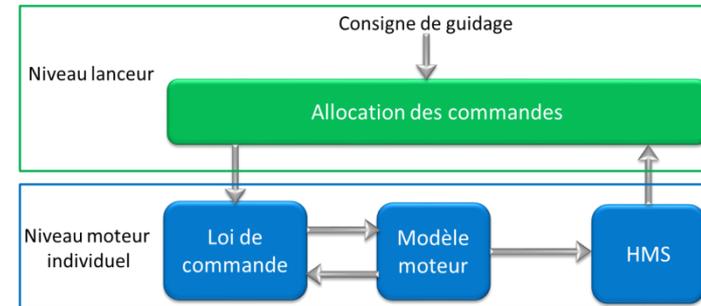
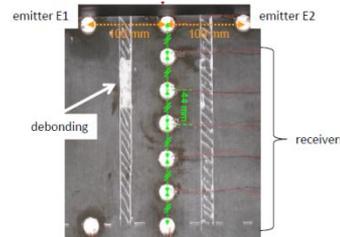
2017 – 2020 (esp) Thèse Sergio Perez Roca (CNES – ArianeGroup). Dir. : H. Piet-Lahanier (ONERA), N. Langlois (IRSEEM).
Commande en boucle fermée du transitoire pour les moteurs fusée à ergols liquides (réutilisables)

- Déploiement sur banc d'essai, régulation en boucle fermée
- Commande multi-moteurs reconfigurable / tolérante aux défauts
- HUMS / cycle de vie des systèmes aérospatiaux (notamment lanceurs réutilisables)



❑ Pronostic

- Commande « Tolérante à la dégradation » pour lanceurs / moteurs / avions.
- Estimation et propagation d'incertitudes avec approche ensembliste (intervalle, zonotope) pour modèles non-linéaires
- Pronostic pour structures équipées de réseaux de capteurs



Navigation autonome mono et multi-robots

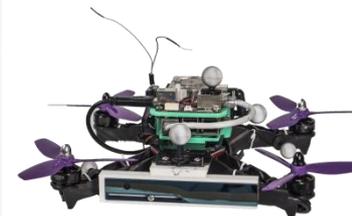
Navigation autonome de robots mobiles et aériens en environnement encombré, en absence de GNSS

□ Sujets de recherche

- Localisation et cartographie à base de stéréo-vision
- Estimation d'état, diagnostic, supervision
- Guidage mono et multi-robots
- Algorithmes embarqués sur drones et robots terrestres
- Applications : inspection, exploration, surveillance

□ Principaux projets

- Partenariat ONERA – SNCF (DROSOFILLES)
- FP7 EuRoC (European Robotics Challenges)
- EDA EuroSWARM
- Interne ONERA : PR COPERNIC (2014-2016)
PR GUIMAUVE (2017-2020)



Navigation autonome mono-robot : projets structurants

Partenariat Recherche Industrie

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

ALTA METRIS

SNCF
RÉSEAU

Chantier Indoor (2015 – 2019)

- ❑ Inspection d'infrastructures
- ❑ Navigation 3D basée vision (suivi de trajectoire)
- ❑ Evitement d'obstacle statique et mobile
- ❑ Télé-opération assistée



UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB



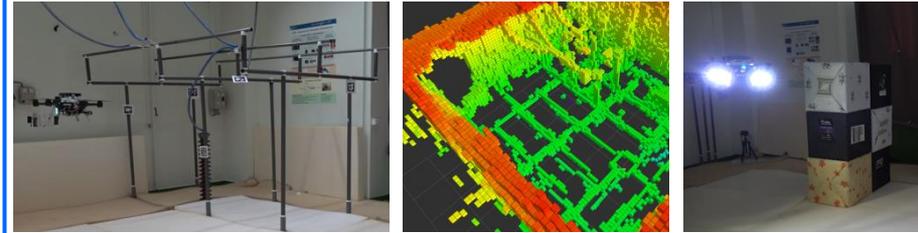
FP7 EuRoC

European
Robotics
Challenges

2015 – 2017

« Plant servicing and inspection »

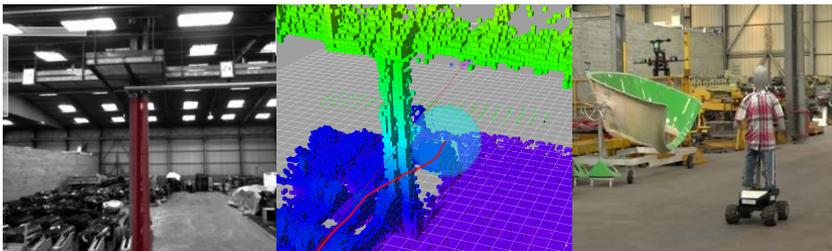
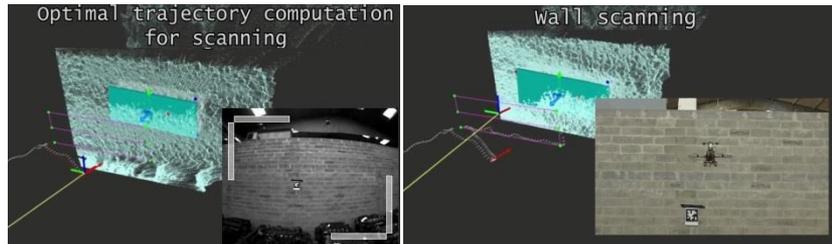
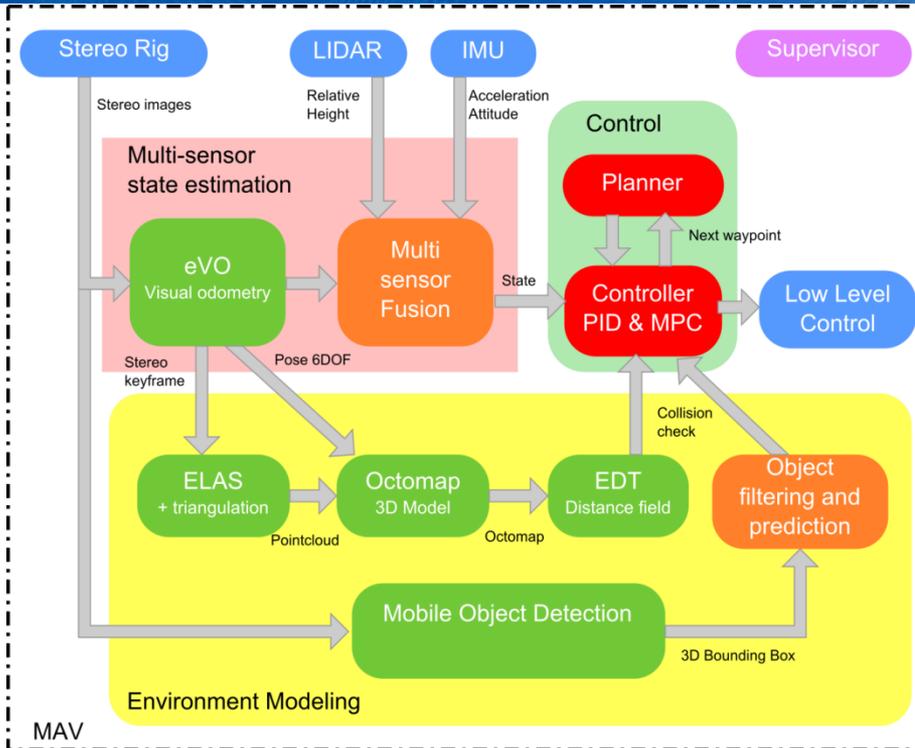
- ❑ Sélection sur données et simulation ROS/Gazebo
- ❑ Démonstration évitement objet mobile
- ❑ Exploration en milieu intérieur encombré
cas-test représentatif d'un poste électrique RTE



ONERA

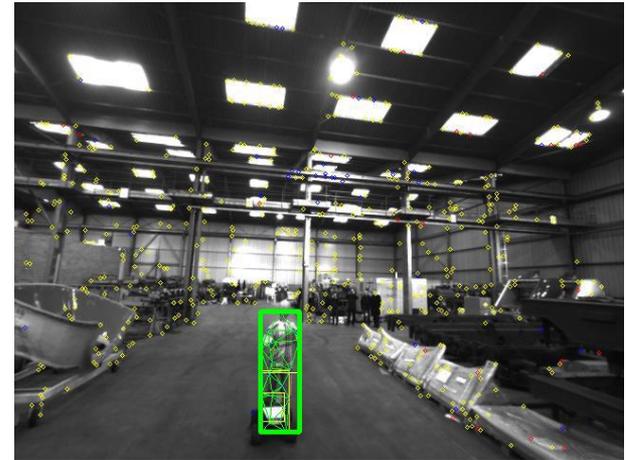
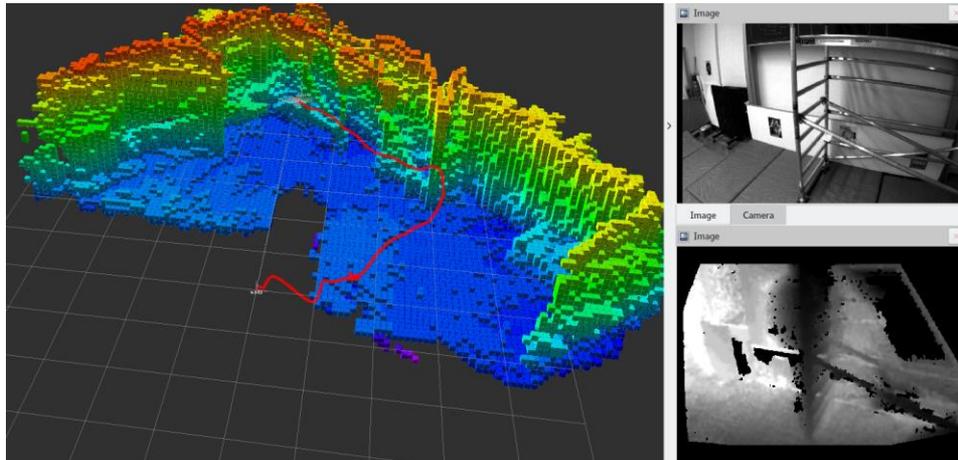
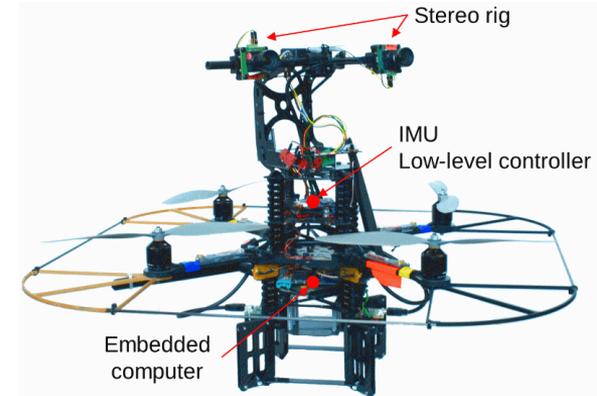
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Drone autonome pour l'inspection sûre d'environnements industriels



Localisation et cartographie à base de stéréo-vision

- Odométrie visuelle sur amers 3D : eVO (20 Hz)
- Fusion lâche (Kalman) IMU + eVO et IMU + altimètre Lidar-Lite
- Carte de disparité dense via ELAS → points 3D
- Modèle d'occupation 3D Octomap (4 Hz)
- Carte d'obstacles : Euclidean Distance Transform (2 Hz)
- Détection et localisation objet mobile : cohérence 2D-3D des amers



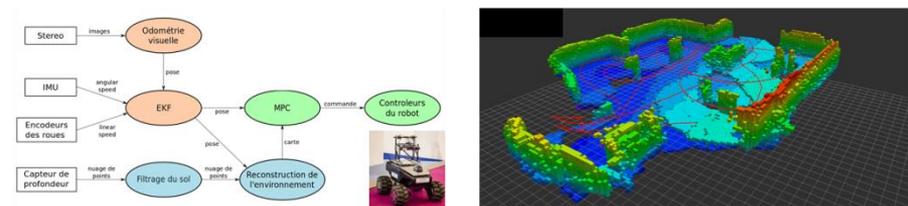
Commande prédictive

$$U_k = \{u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+H_c-1}\} \text{ t. q. } u_i \in \mathbb{U}, \quad X_k = \{x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_{k+H_p}\} \text{ t. q. } x_{i+1} = f(x_i, u_i)$$

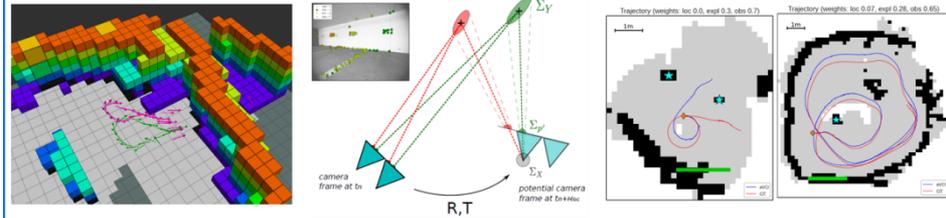
$$U_k^* = \arg \min_{U_k \in \mathbb{U}^{H_c}} J(U_k, X_k)$$

$$J(U_k, X_k) = w_{(\cdot)} J_{(\cdot)} + w_{(\cdot)} J_{(\cdot)} + \dots + w_{(\cdot)} J_{(\cdot)}$$

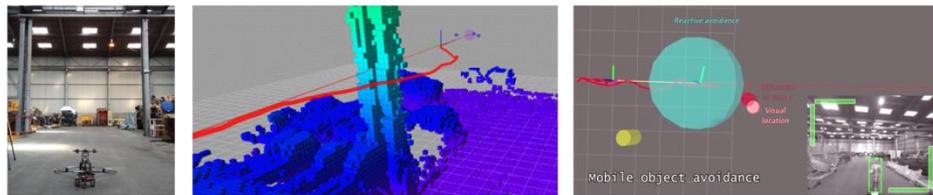
Exploration autonome basée vision par un robot mobile



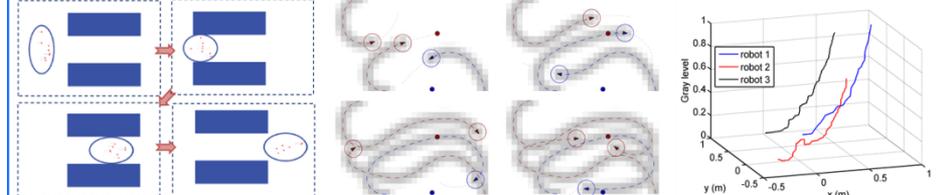
Navigation autonome tenant compte de la qualité vision



Navigation autonome d'un drone avec évitement d'obstacle statique ou mobile



Commande distribuée de flottes de robots



Commande prédictive pour suivi de trajectoire avec obstacles

Dynamique de translation $\dot{\xi} = v$, $\dot{v} = -\frac{T}{m}Re_3 + ge_3 = u$

Modèle discrétisé, trajectoire de référence $\{\xi_k^r, v_k^r\}$

Commande en deux parties : $u_k = u_k^n + \mathbf{1}_k^{\text{obs}} u_k^a$

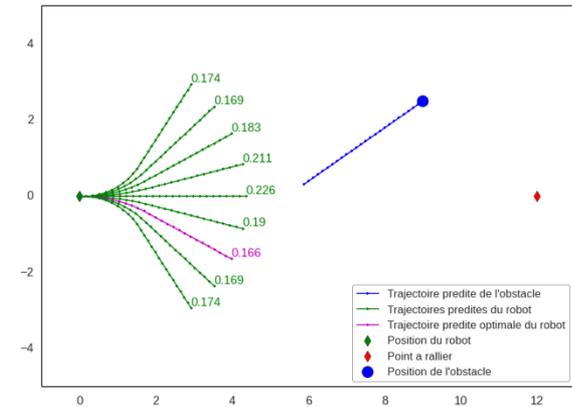
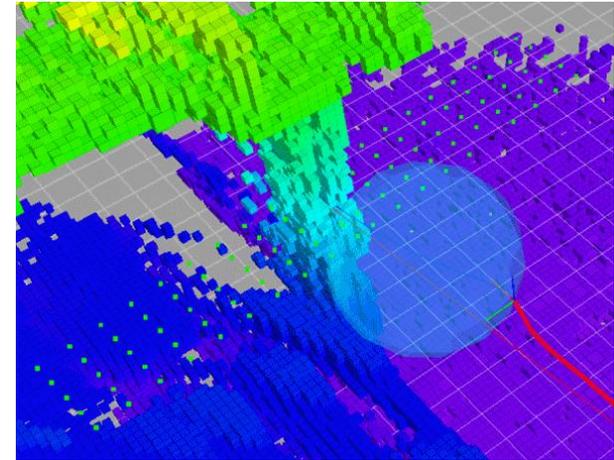
- u_k^n : MPC linéaire sans contrainte en nominal
- u_k^a : incrément d'évitement réactif (MPC non linéaire) si risque collision

Prédiction trajectoires sur horizon H_p avec horizon de commande H_c

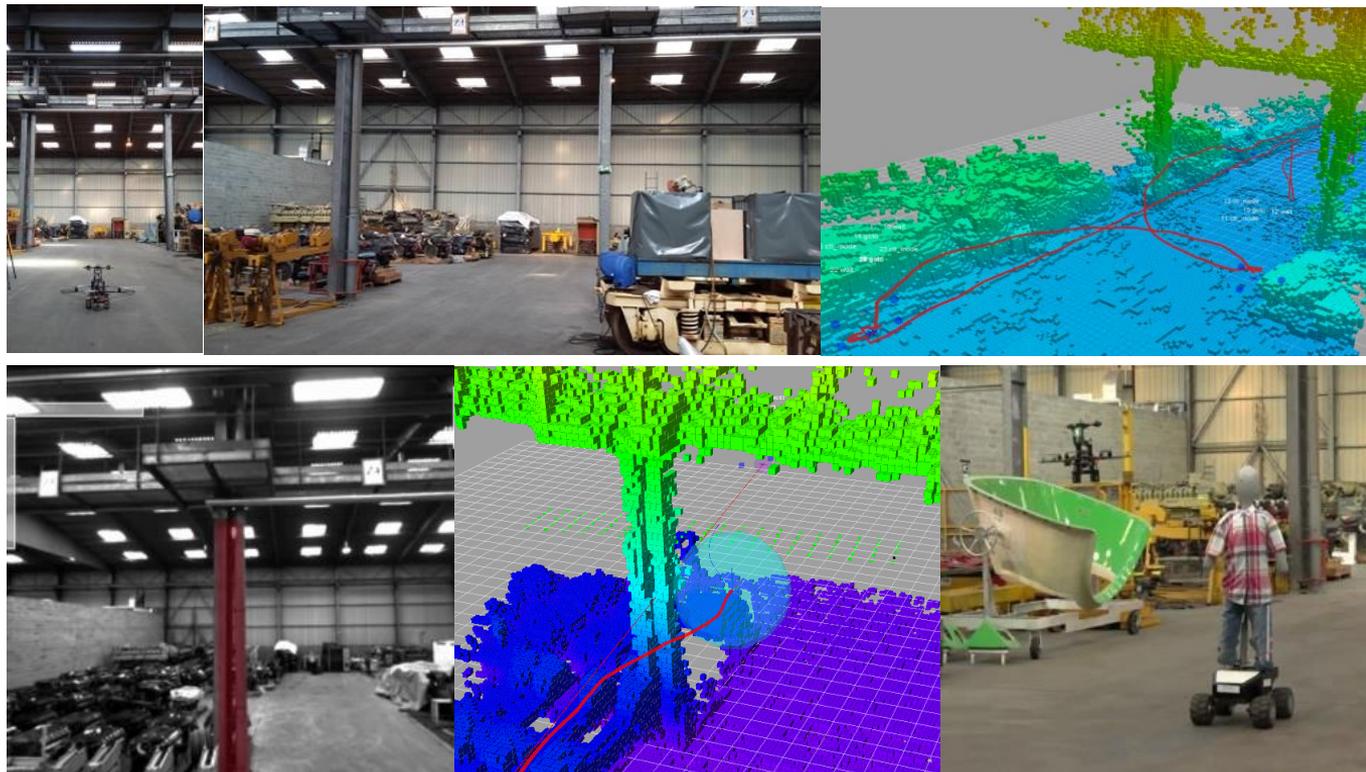
$$u_k^{a*} = \arg \min_{u_k^a} \{w_{\text{nav}}J_{\text{nav}} + w_u J_u + w_{\text{obs}}J_{\text{obs}}\}$$

avec $x_{k+i} \in \mathbb{X}_i$, $u_{k+i} = u_{k+i}^n + u_{k+i}^a \in \mathbb{U}$, $\forall i \in [k+1, k+H_p]$

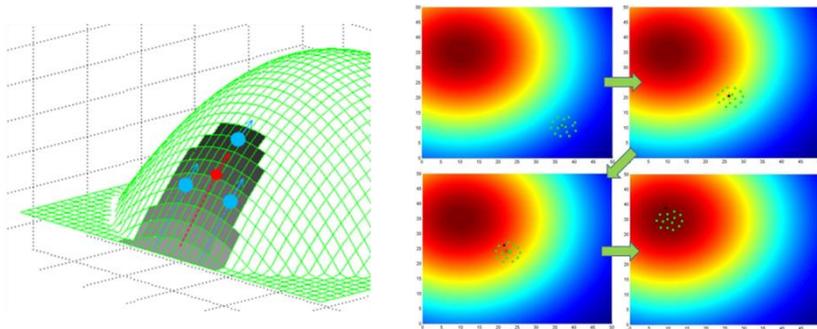
- Coût d'obstacle fonction de la distance à l'obstacle le plus proche (statique via carte de distance, dynamique modèle vitesse constante)
- Simplification : $u_{k+i}^a = u^c$, $\forall i$. Recherche sur un ensemble discret.
- Ordres de grandeur : à 20Hz, 201 commandes x 100 pas d'intégration



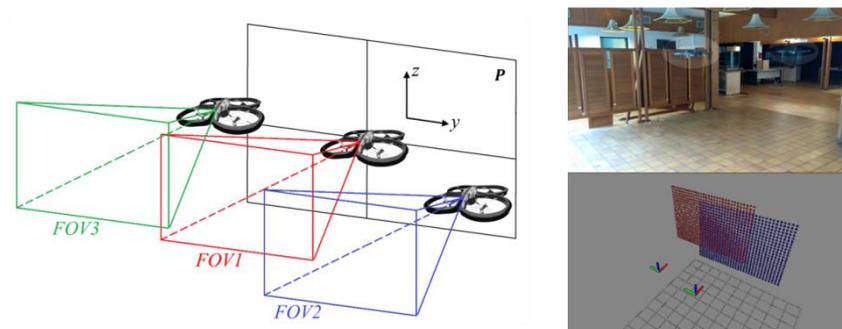
Navigation autonome en milieu encombré : résultats expérimentaux



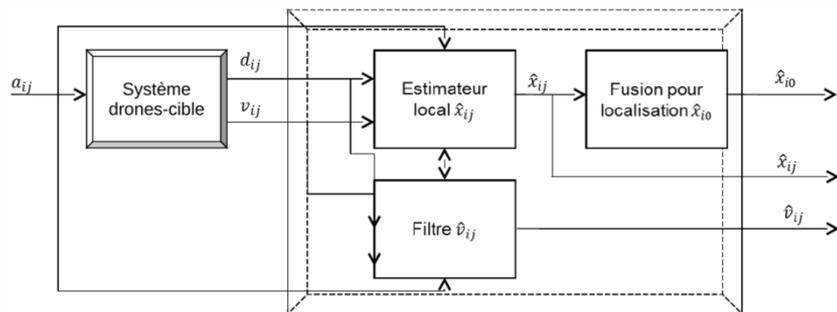
Localisation de source par une flotte (Thèse A. Kahn)



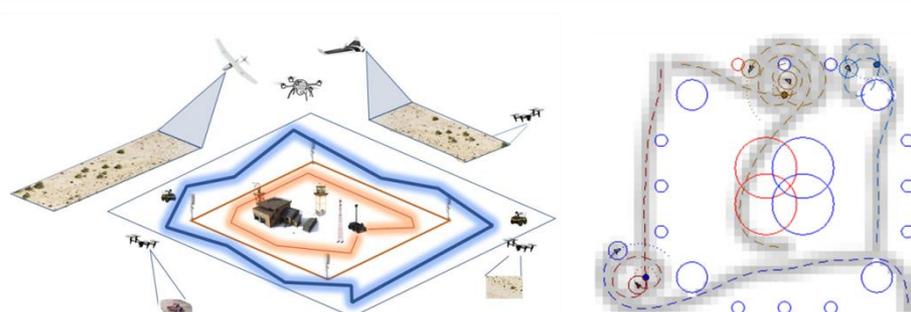
Localisation collaborative basée vision – en formation



Estimation et guidage coopératif pour suivi de cible



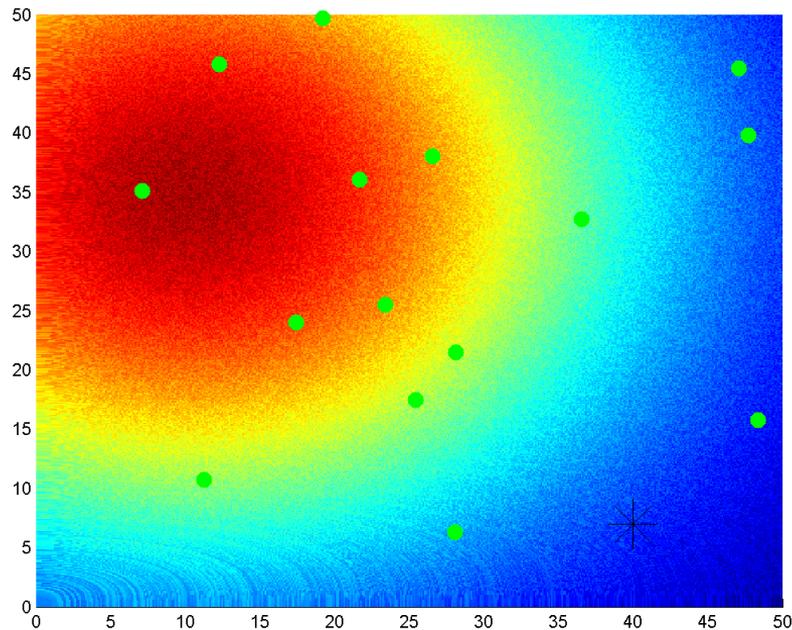
EDA EuroSWARM : capteurs statiques & robots mobiles



Localisation collaborative de source par une flotte : approche locale

Thèse d'Arthur Kahn (2015), dirigée par Hélène Piet-Lahanier (ONERA DTIS) et Michel Kieffer (L2S CentraleSupélec).

Mission:



measurement to find the maximum

Maximum d'un champ scalaire $x_M = \arg \max_{x \in D} \phi(x)$

N agents identiques $m\ddot{x}_i + c(x_i, \dot{x}_i)\dot{x}_i = u_i$, $y_i = \phi(x_i) + w_i$

Modèle polynomial local $\bar{\phi}(x) = [1 \ (x - x_0)^T][\phi(x_0) \ \nabla\phi(x_0)^T]^T$

Pour chaque agent, à partir des mesures et positions des voisins

Niveau haut (point de référence, cohérence)

Estimation du gradient par moindres carrés pondérés

Test de cohérence entre mesures, avec seuil adaptatif

Position et
vitesse point
de référence

Mesure champ et
position véhicule

Niveau bas (véhicule)

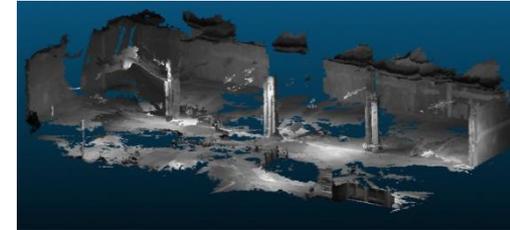
Suivi mouvement point de référence, répulsion inter-véhicules

Reconfiguration si capteur détecté défaillant

Navigation autonome mono/multi-robots – Perspectives

Flottes de robots

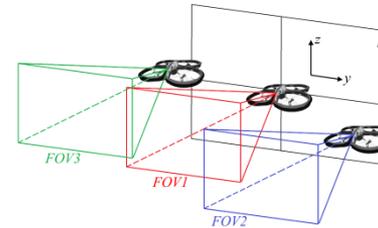
- Déploiement réel (drones & robots mobiles)
- Plus de drones, plus hétérogène !
→ Challenge du passage à l'échelle des approches guidage/estimation distribuées



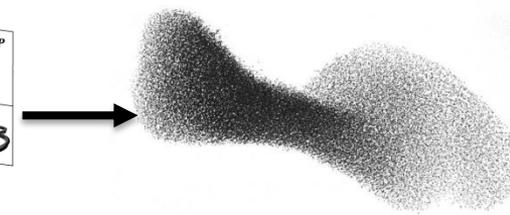
- Limites MPC : horizon court, phase d'optimisation

2018- : Thèse Guillaume Hardouin (ONERA – Région HdF)
Scanners Robotisés pour la numérisation automatique du patrimoine
→ Planification distribuée de trajectoires de reconstruction surfacique

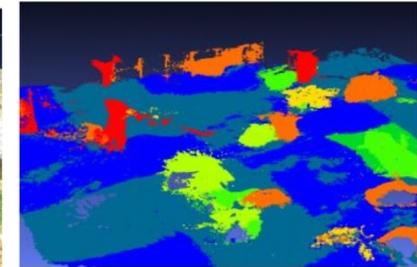
2018- : Thèse Esteban Restrepo (ONERA – Paris-Saclay)
Coordination multi-objectifs de systèmes multi-drones en environnement dynamique → Fonctions de Lyapunov barrières



Ground truth



Semantic Segmentation



Guidage et (Deep) Machine Learning

- Guidage à partir d'informations sémantiques
- Apprentissage par renforcement
Guidage uniquement ? Vision → commande ?

Méthodes d'optimisation et d'estimation à base de krigeage

Optimisation à base de krigeage

$f(x)$ connue uniquement en $[x_1, \dots, x_n]$, $x \in \mathbb{X}$

Modélisation comme $F(x) = p(x)^T b + Z(x)$

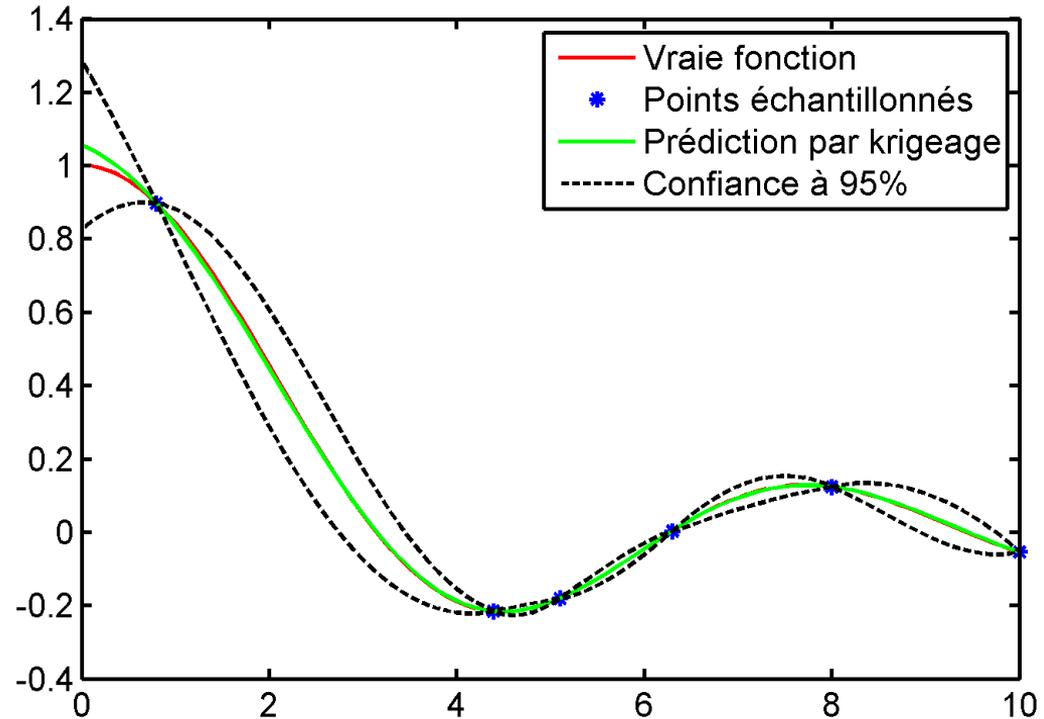
- ❑ $p(x)^T b$ modèle de régression « classique »
- ❑ $Z(x)$ processus gaussien de moyenne nulle et covariance $\text{cov}(Z(x), Z(x+h)) = \sigma^2 R(h)$

Permet d'estimer :

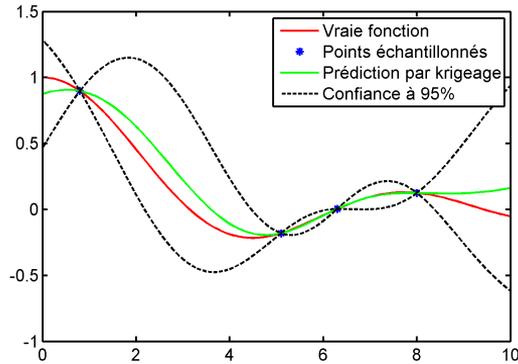
- ❑ Moyenne $\hat{f}(x)$ et variance de l'erreur $\hat{\sigma}^2(x)$

Optimisation de fonctions coûteuses

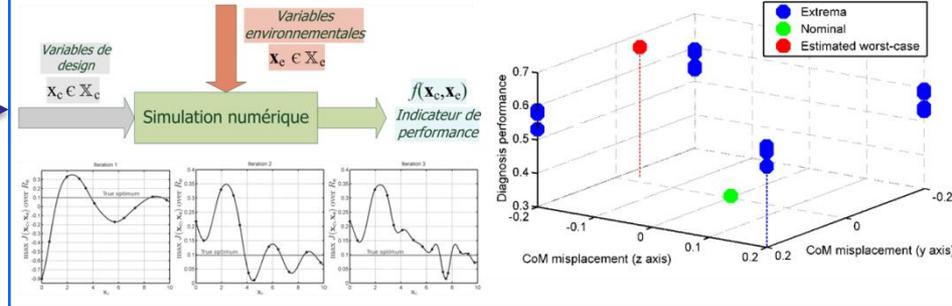
- ❑ Détermination itérative de nouveaux candidats à échantillonner
- ❑ Compromis exploitation / exploration



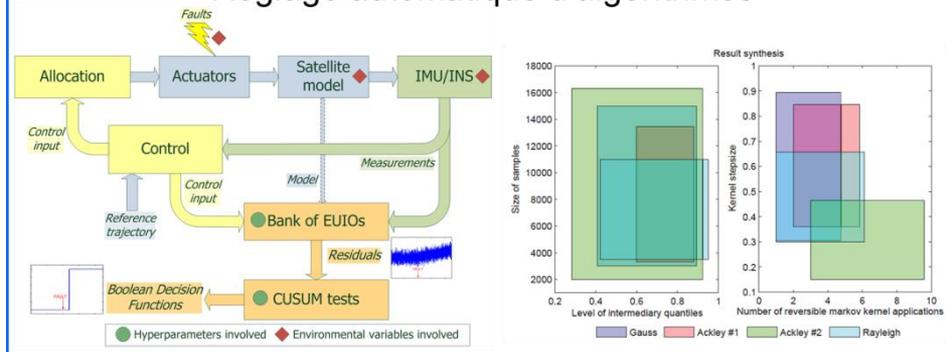
Optimisation à base de krigeage



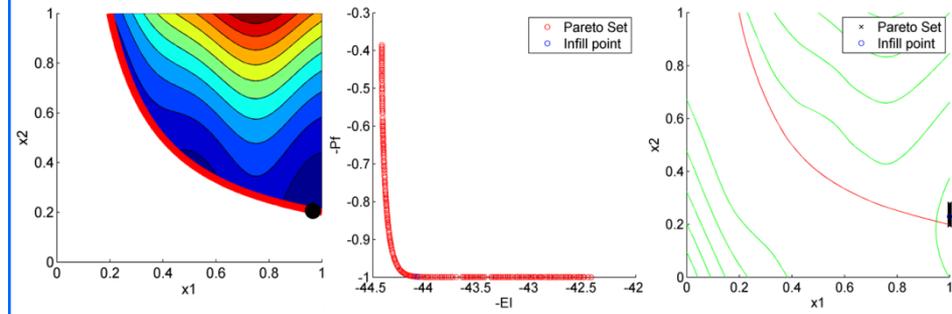
Optimisation minimax de fonctions coûteuses



Réglage automatique d'algorithmes



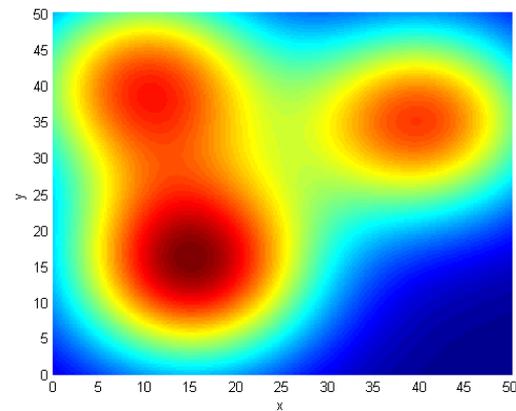
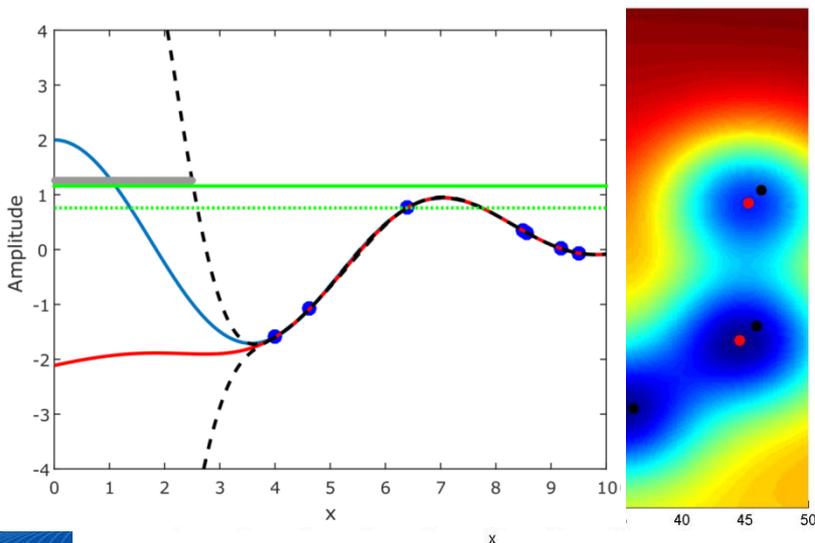
Optimisation sous contraintes de fonctions coûteuses



Localisation de source par une flotte (le retour) : approche globale

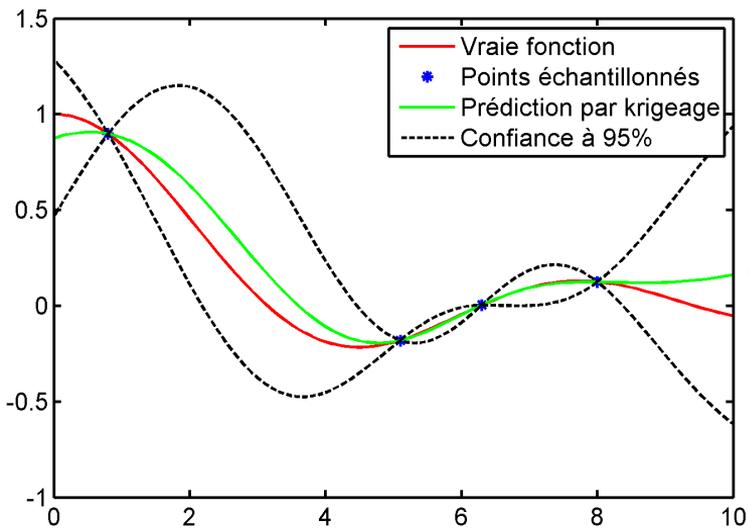
- Chaque véhicule construit un modèle de krigeage du champ
- Critère de recherche de la prochaine destination
 - Vise à améliorer l'estimée du maximum (zones d'intérêt)
 - Tient compte de la dynamique des agents et de leurs positions relatives

$$x_i^d = \|x_i - x\|^2 + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a \|x_j - x\|^2 \text{ s.t. } \hat{\phi}(x) + b \hat{\sigma}_i(x) > f_{\max}^i$$

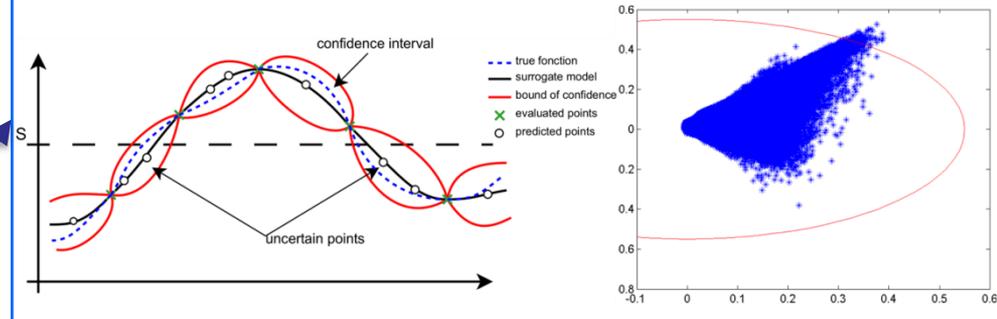


Thèse d'Arthur Kahn (2015)

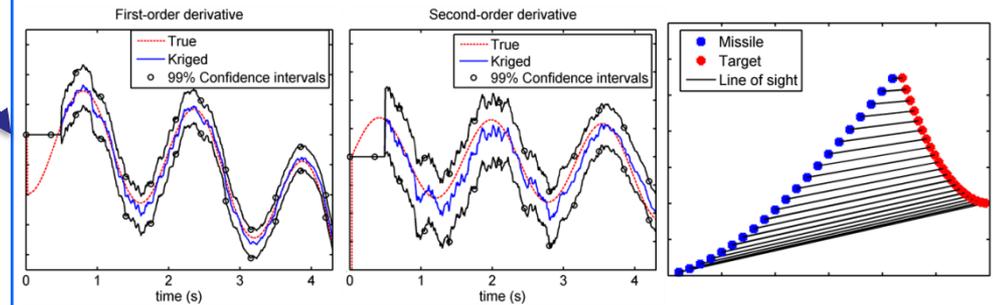
Estimation à base de krigeage



Estimation de probabilité d'évènement rare



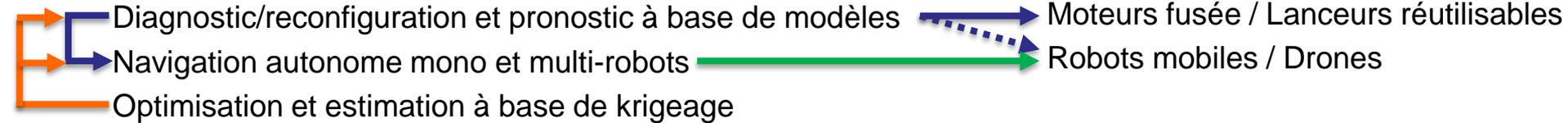
Filtre estimateur de dérivées



Conclusion générale

Thématiques de recherche

Applications



Principales perspectives

- ❑ Systèmes spatiaux : commande robuste moteur fusée, gestion sûre d'une baie multi-moteurs
- ❑ Pronostic : structures instrumentées, commande tolérante à la dégradation
- ❑ Robots et drones : flottes à grande échelle, planification distribuée, guidage IA-augmenté

Collaborations

Industrielles / Institutionnelles : CNES, ArianeGroup, SNCF, RTE, DGA, DGAC, UE

Académiques : L2S CentraleSupélec, ISIR, CNAM, IRSEEM, MIS, ECE Paris

Interne ONERA : DTIS (Systèmes), DMPE (Energétique), DMAS (Structures)

Merci à tous ceux qui ont contribué à ces travaux

Chercheurs ONERA	Chercheurs hors ONERA	Doctorants & Post-doctorants	Stagiaires
Mathieu Balesdent Anthelme Bernard-Brunel Sylvain Bertrand Philippe Bidaud Frédéric Damongeot Florian Dietrich Alexandre Eudes Bruno Hérissey Guy Le Besnerais Nicolas Merlinge Julien Moras Jérôme Morio Gérard Ordonneau Hélène Piet-Lahanier Aurélien Plyer Jean-Michel Roche Martial Sanfourche Ioannis Sarras Lucien Vingert ...	Antoine Abauzit Joseph Defretin, Probayes Yohan Rochefort, Sagem Michel Kieffer, L2S CentraleSupélec Eric Walter, CNRS – Supélec – Univ. Paris Sud Antonio Loria, L2S CentraleSupélec Pascal Morin, ISIR Sorbonne Université Tiago Gonçalves, Thales R&T Tarek Raïssi, CNAM Nicolas Langlois, IRSEEM François Farago, CNES Marco Galeotta, CNES Serge Le Gonidec, ArianeGroup Fabio Morbidi, MIS Amiens El Mustapha Mouaddib, MIS Amiens Yann Dumortier, Safran Christophe Baujault, ECE Paris Frédéric Ravaut, ECE Paris François Saïdi, ECE Paris ...	Arthur Kahn, Parrot Drones Alessandra Iannetti, ITER Hélène Roggeman, EasyMile Maxime Derome, Renault Duc-Kien Phung Elinirina Irena Robinson, NASA Camille Sarotte Sergio Perez Roca Esteban Restrepo-Ochoa Guillaume Hardouin	Noé Bolin Guillaume Broussin Denis de Oliveira Cédric Durantin Tomasz Gorecki Sofiane Kraiem Raphaël Ladousse Sami Naamane Gaëtan Pelletier Nathan Piasco Mathieu Touchard