

ONERA

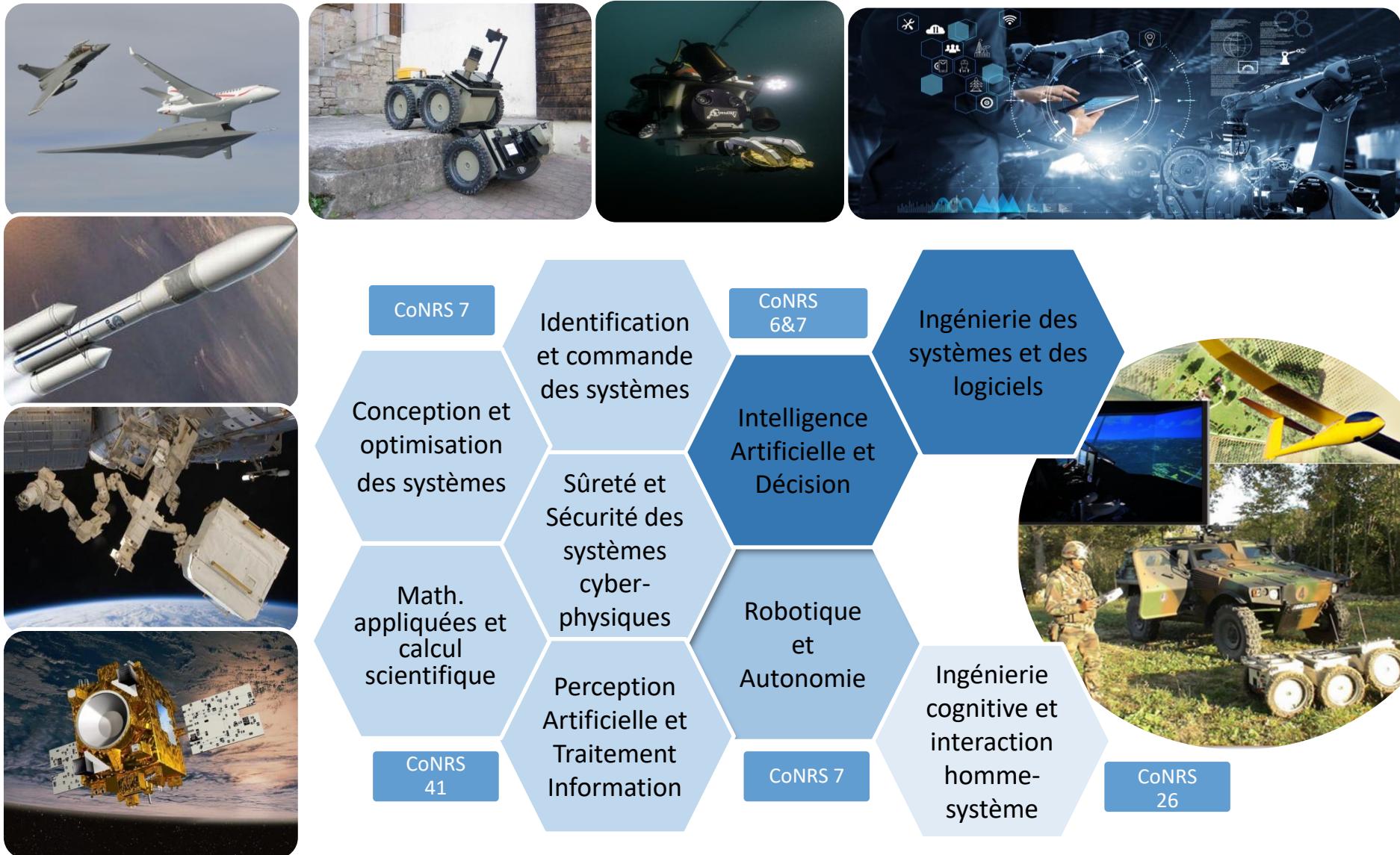
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Présentation Robotique & N.A.

Juin 2021

www.onera.fr

Thématiques Scientifiques



Périmètres des domaines scientifiques

Identification et commande des systèmes

Identification de systèmes dynamiques : Méthodes temporelles et fréquentielles), FDIR. Identification boîtes grise/noire. Synthèse d'estimateurs et d'observateurs,

Modélisation et approximation de modèles : Réduction de modèles, modèles polytopiques, LFT, etc.

Synthèse de lois de commande et de guidage : Commande robuste, optimale, adaptative, non-linéaire, prédictive, hybride, par apprentissage, référencée capteur, distribuée, etc.

Validation de lois de commande : Analyse robuste, non-linéaire caractérisation de stabilité, domaine atteignable, optimisation, etc.

Perception Artificielle et Traitement Informations

Traitement de signal et fusion de données : Filtrage, lissage, pistage, SLAM, problèmes inverses, fusion numérique multi-capteurs et réseaux de capteurs.

Traitement d'images et Vision par ordinateur : Amélioration d'image, recalage d'image, estimation de mouvement, imagerie volumique, vision 3D, SLAM visuel, perception embarquée, détection et pistage vidéo. détection de changements, interprétation d'images, reconnaissance d'objets et d'événements, vision active.

Autonomie et Systèmes Multi-Agents

Architectures des systèmes autonomes : Architectures de programmation et de simulation. Aide à la spécification et la validation

Fonctions sensori-motrices : Commande, localisation, navigation autonome et commande référencée capteur(s).

Systèmes multi-véhicules et réseaux dynamiques de capteurs.

Décision et planification pour missions robotiques

Sûreté et Sécurité des systèmes cyber-physiques

Sûreté de fonctionnement : Analyse des risques opérationnels, humains et techniques ; évaluation de sécurité, fiabilité, disponibilité, maintenabilité),

Détection, localisation et diagnostic de défaillances; Reconfiguration et tolérance aux défauts, FDIR.

Supervision, pronostic, maintenance : Supervision de processus discret/continus, méthodes de prédiction et d'analyse de sécurité, capteurs virtuels, maintenance prédictive

Périmètres des domaines scientifiques

Conception et optimisation des systèmes

Multidisciplinary Design Analysis and Optimization (MDAO), architectures et environnements logiciels de conception, Gestion des incertitudes (identification, caractérisation, modélisation, optimisation robuste, fiabilité), modélisation et optimisation multi-fidélité,

Evaluation de performances pour la certification. Modèles de substitution pour la conception et l'optimisation, Evaluation des systèmes (performances, stabilité et contrôle, opérations)

Ingénierie des systèmes et des logiciels

Programmation et logiciel : Génie logiciel, méthodes formelles, informatique fondamentale, logique, ingénierie dirigée par les modèles

Architecture de simulations : Simulation distribuée, HLA, DDS, architecture orientée services, data centric

Systèmes informatiques embarqués : Temps réel, architecture, réseaux, DDS, adéquation algorithme architecture, analyse de sûreté de fonctionnement, contrôle d'exécution

Intelligence Artificielle et Décision

Approches basées modèles : Représentation des connaissances, formalisation des raisonnements, fusion de représentation symboliques, systèmes multi-agents, éthique des robots et des systèmes artificiels, planification, algorithmique et combinatoire, systèmes à événements discrets, recherche opérationnelle.

Approches basées données : Apprentissage automatique, fouille de données, gestion, analyse et visualisation de données massives et hétérogènes (« big data »), interprétation et indexation de données multimodales

Ingénierie cognitive et interaction homme-système

Neuro-ergonomie : Modèles des systèmes sensori-moteurs, intégration sensorielle, analyse des signaux physiologiques, modèles comportementaux, quantification des performances, etc.

Interfaces et Interactions : Modèles d'interaction multi-modale, télé-opération et réalité virtuelle, vérification et sûreté des interfaces, aide à la décision, etc.

Math. appliquées et calcul scientifique

Analyse numérique des EDP, problème inverse des EDP,

Calcul haute performance, adaptation de maillage, couplage de modèles numériques, modélisation mathématique,

Propagation des incertitudes, probabilité d'événements rares, modèle particulaire Optimisation, modèle de substitution, analyse de sensibilité

Domaines d'Application



Systèmes Aéronautiques Aéronefs / Opérations

Autonomie, télé-pilotage, systèmes embarqués, sûreté-sécurité, téléopération, ATM/UTM, maintenance, etc.
DGAC, CORAC, EREA, Indus Aéro, drones



Systèmes Spatiaux

OOS, OSAM, systèmes embarqués, autonomie, SHM, robotique spatiale et planétaire, planification, etc.

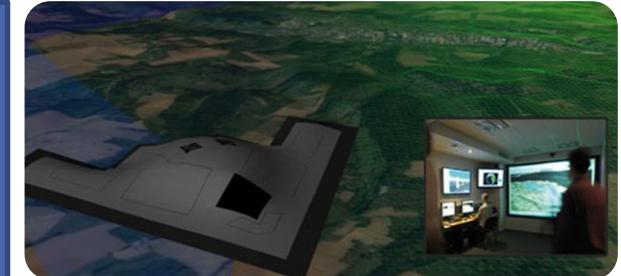
CNES, ESA, ESRE, Indus. Espace



Systèmes de Défense

Conception engins, développement de leur autonomie, planification-supervision des missions, évaluation opérationnelle

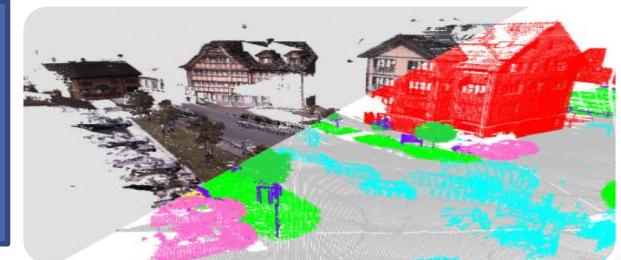
DGA, AID, MINARM, ETAS, AED, Indus. Défense, GICAT, GICAN,



Systèmes de Surveillance

Coordination systèmes, planification de mission, modélisation de l'environnement, analyse de scènes,

DGA, AID, CED, CNES, Indus. Défense, Startup « New Space »



Domaines spécifiques

1. Navigation autonome et autonomie décisionnelle des AUV, AGV, ROV, ASO
 - Kits de navigation
 - Architecture des systèmes autonomes
 - Intégration de mesures physiques
2. Travail en Orbite Spatiale (On Orbit Servicing – On Orbit Manufacturing and Assembly)
3. Interactions homme-système
4. Robotique & CND

Deployment scenario for interventions



Multi-robot deployment (Activity planning and supervision)

MOVIE



Multi-robot systems and their integration in the information system



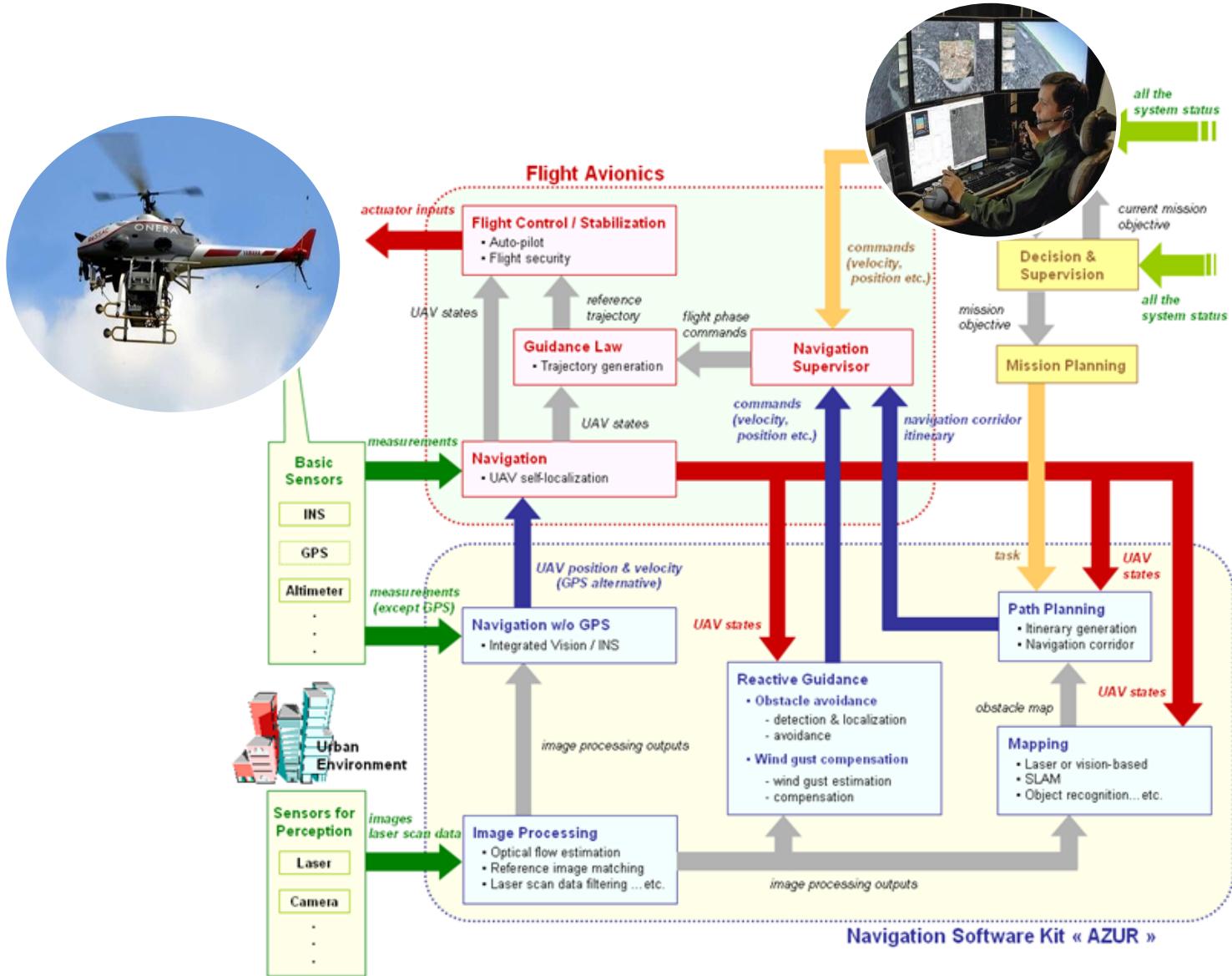
Autonomous robotics systems

Control architectures for autonomous navigation

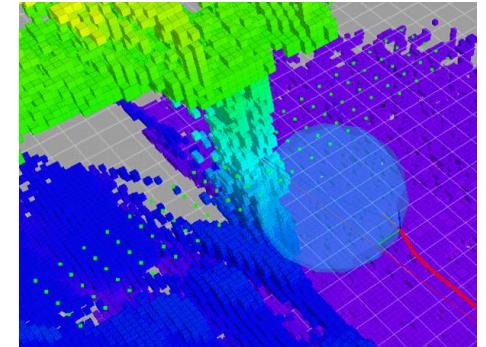
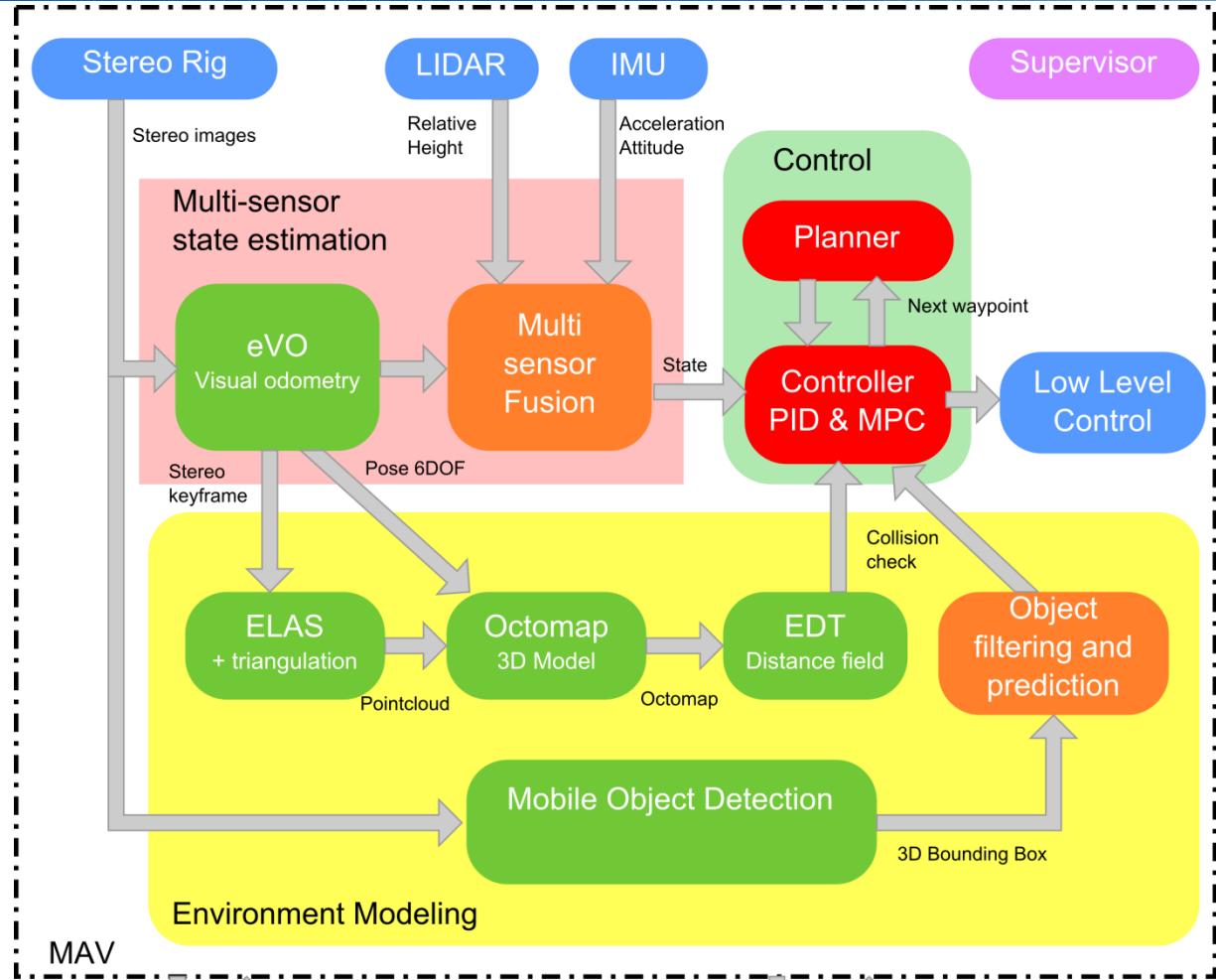
Interactive behaviors wrt environments

Multi-sensor and embedded information processing

Planning and adaptation of robot mission



Indoor/Outdoor Navigation System overview



Multi-robot systems and their integration in the information system



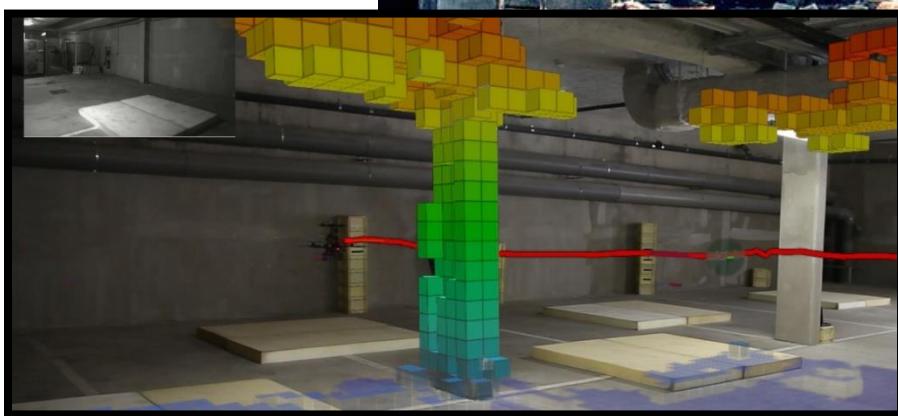
Autonomous robotics systems

Control architectures for autonomous navigation

Interactive behaviors wrt environments

Multi-sensor and embedded information processing

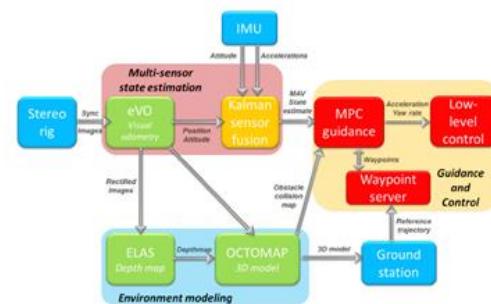
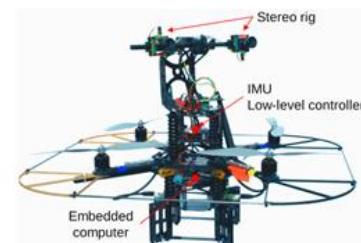
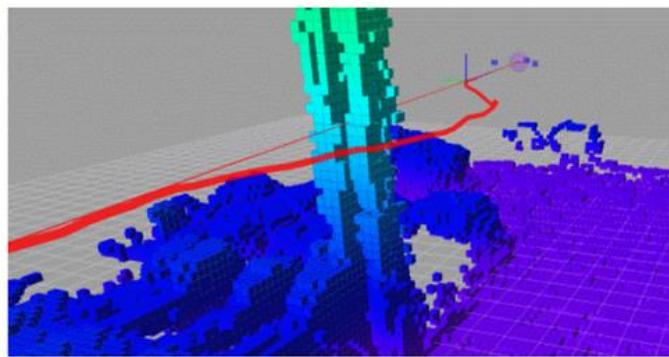
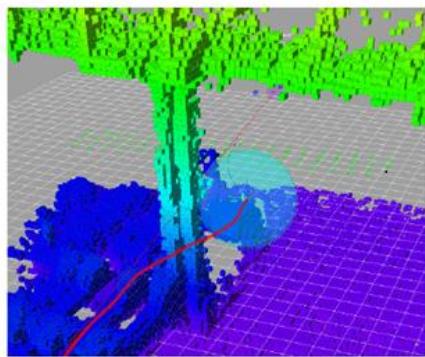
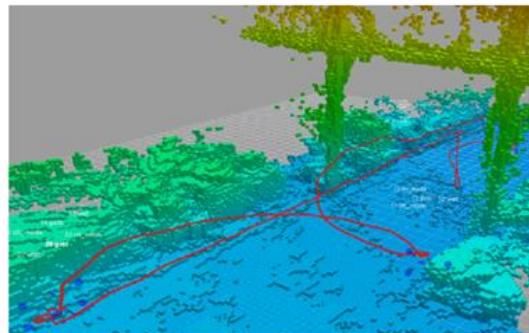
Planning and adaptation of robot mission



Indoor/Outdoor Navigation System overview

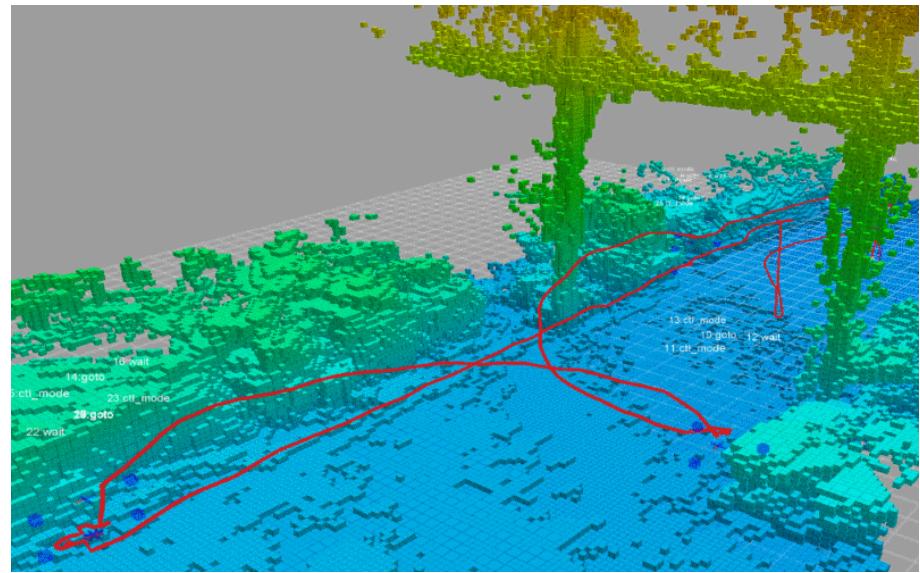
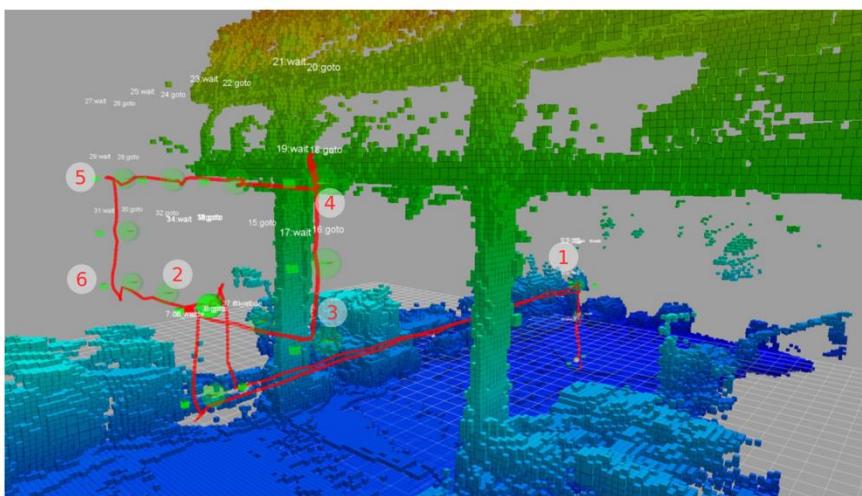
SLAM@ONERA

3D dense reconstruction 3D dense (stereo/eFOLKI + Kinect)
Volumetric modeling (octomap)



Example 1: Long-distance (100+ m) and height inspection

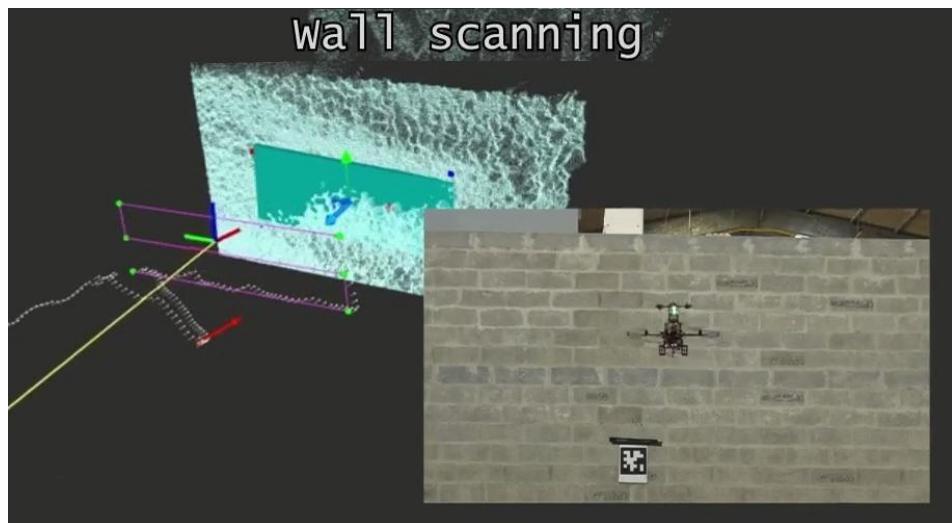
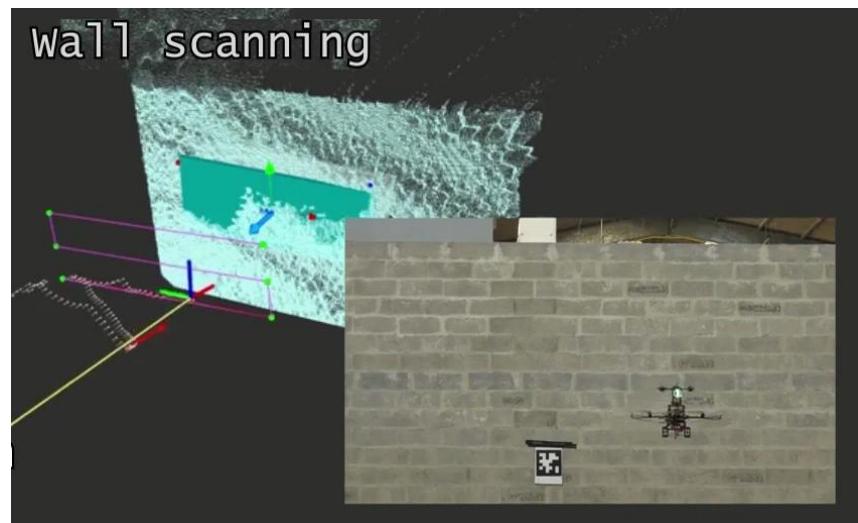
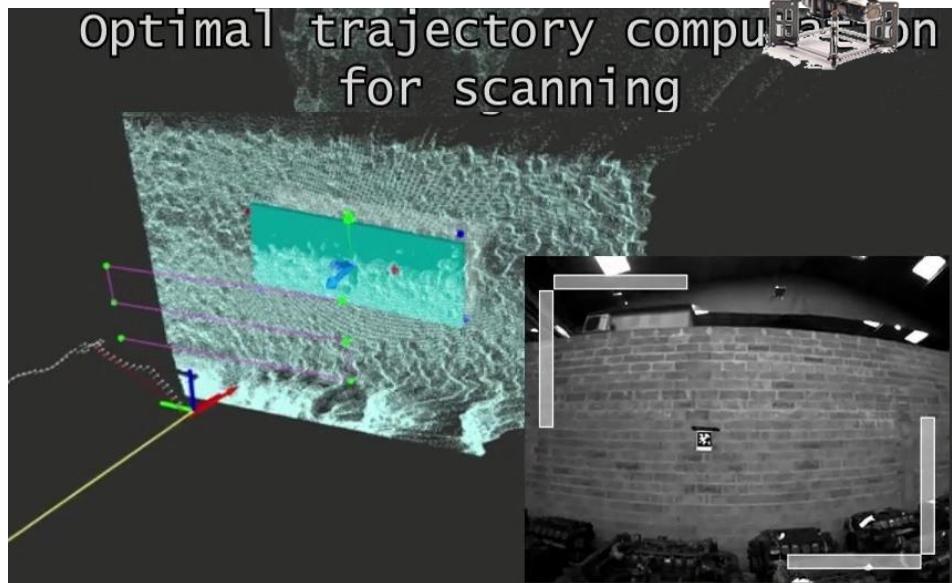
- ❑ Visual odometry (stereovision)
- ❑ Embedded mapping
- ❑ MPC trajectory tracking
- ❑ Supervision functions for safety





Example 2: Wall inspection

- Tag detection (initial guess)
- Wall mapping with stereovision
- Automatic trajectory definition
 - Surface coverage
 - Constant observation distance
- MPC trajectory tracking



Autonomous exploration by UGV

Mission

- Autonomous exploration of an unknown area by a mobile robot with obstacle avoidance

Context

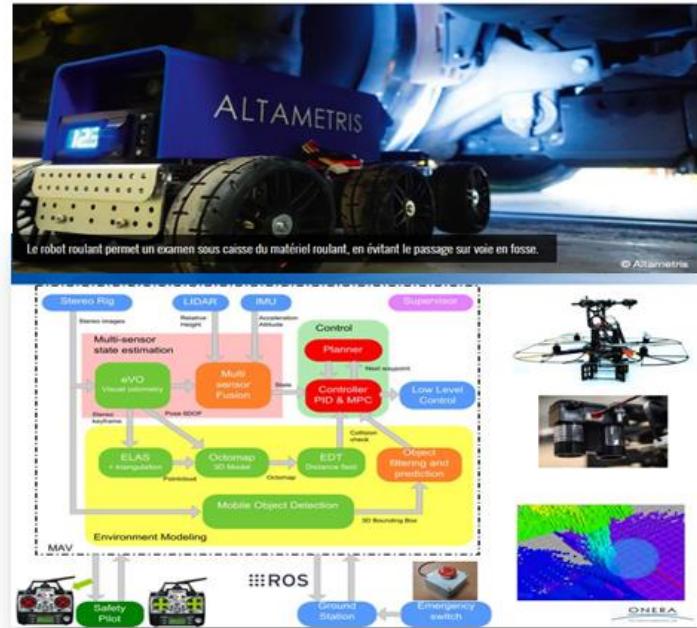
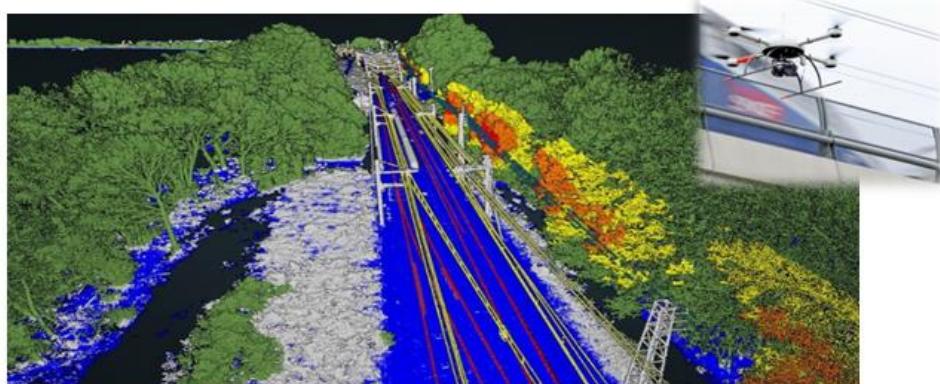
- GPS-denied environments (indoor, urban canyon)
 - ⇒ Combine proprioceptive measurements (angular and linear speeds) with image measurements for self-localization
- Unknown environment
 - ⇒ Vehicle must be able to produce its own embedded map
- Model Predictive Control (MPC)
 - ⇒ Dynamical model taken into account to predict trajectories
 - ⇒ Multi-modal performance and constraints (speed regulation, obstacle avoidance)



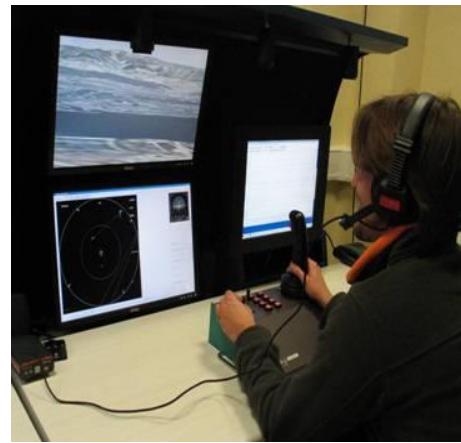
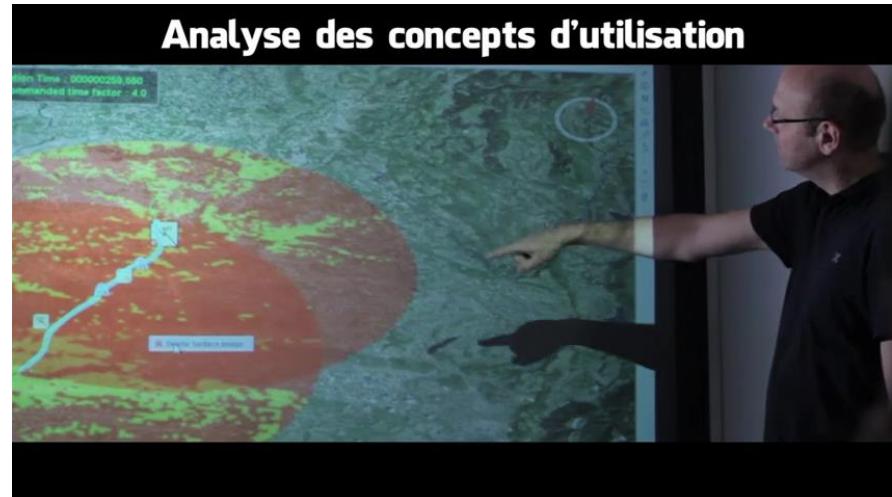
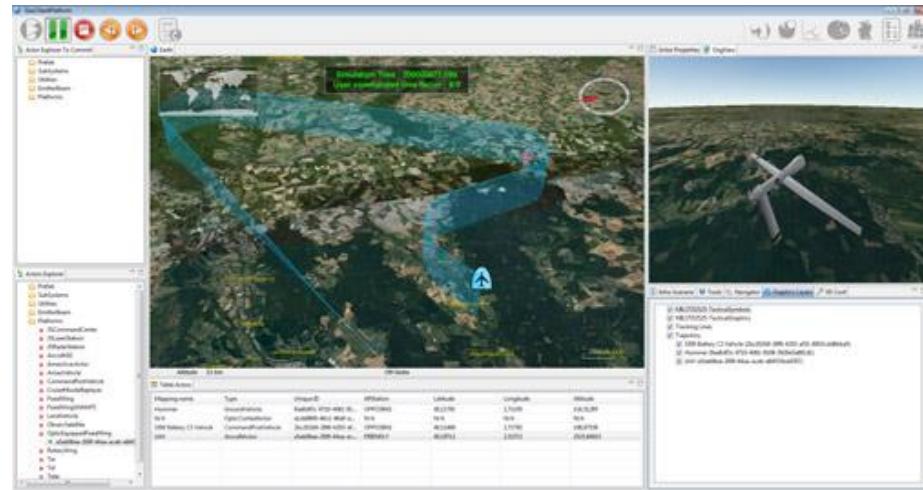
Autonomous exploration by UAV-UGV

Maintenance des infrastructures et des systèmes

Digitalisation : création de jumeaux numériques pour la cartographie, le suivi de l'état, la simulation d'interventions et de travaux, l'analyse des risques, la modélisation de projets de construction, etc.



Poursuite des travaux réalisés dans le cadre du PRI ONERA-SNCF et de plusieurs thèses (dont certaines en cours) sur les systèmes de capture de données par drones et robots, les logiciels de cartographie et de segmentation, de relevé topographique et d'analyse de risques de changements, etc.





Développements technologiques

Objectifs

Réaliser les **développements technologiques** nécessaires au traitement des aléas considérés.

Démarche de travail : distinction de plusieurs technologies en fonction de leur niveau d'intervention dans une mission.

- **Intégration** des imageurs laser sur une plateforme drone (laser scanner, PF3D)
Liens avec les projets LIMA, TERRISCOPE, FUMSECK, ALICIA, INACHUS...
Adaptation en temps réel des données (registration des nuages de points)

Nouvelles générations
d'imageurs laser 3D



De la cartographie à l'évitement d'obstacles

Combinaison avec données caméras pour cartographie 3D précise de l'environnement

Détection d'obstacles après reconfiguration du capteur ⇒ **Capteur polyvalent**

Complémentarité de l'imagerie laser pour la navigation et l'évitement d'obstacles



Démonstrations en vol / sol
Cas de la voilure tournante



BOREAL + VUX
+ IR camera
+ VIS camera

3 solutions disponibles à l'ONERA
suite aux travaux DROPTER

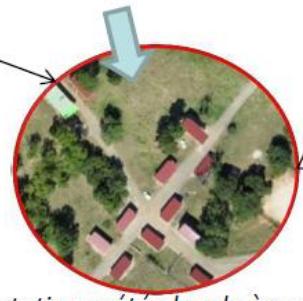
Modèle de l'environnement

Travaux basés sur calculs CFD (Lattice Boltzmann) de l'aérologie du site de Caylus

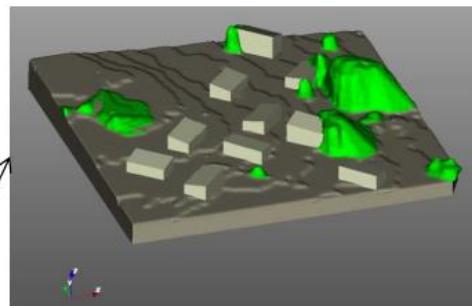
- cas nominal +2 orientations par rapport au vent dominant :
 $(0, +/- 15^\circ)$ à 3 m/s
- vitesse 6m/s à 0°



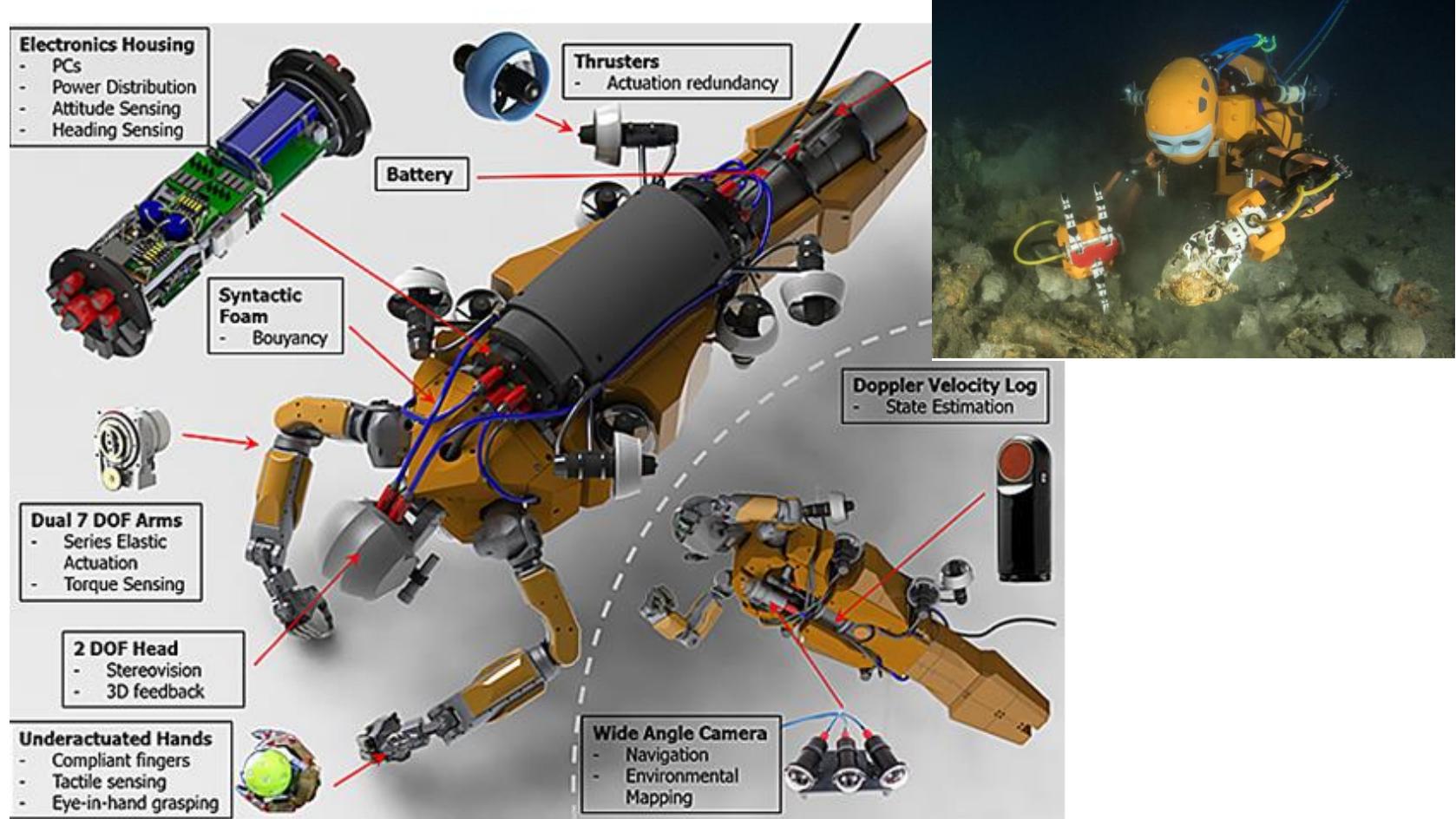
Hypothèses pour la CFD (*)
Vent dominant N/N-O
Vitesse = 3 m/s = 11 km/h



(*) à partir de données internet : station météo locale à proximité



Autonomous exploration by UGV



Environnement développement Architectures

ONERA

MAUVE



<https://mauve.gitlab.io>

1 : Langage et Outils de Modélisation Formelle

- Langage de description des capacités et ressources de systèmes robotiques
- Bibliothèque pour manipuler les modèles décrits dans ce langage
- Outils de génération de code à partir de ces modèles compatible avec ROS2

2 : Exécution et analyse temps-réel

- Bibliothèque d'exécution temps-réel (MAUVE) intégrée dans l'API ROS2
- Outils d'analyse des contraintes temps-réel du code ROS2 embarqué
- Bibliothèque de production de traces d'exécution temps réel en vue d'analyse

3: Gestion des déploiements d'architectures multirobots

- Application de gestion des configurations de déploiement
- Application de gestion de base de données de compétences (modèle de skill)
- API d'interface entre la couche fonctionnelle et le modèle de Skill
- API pour l'analyse et la gestion des communications (topologie, QoS, DDS)

Environnement développement Architectures

ONERA

MAUVE



<https://mauve.gitlab.io>

4 : Simulation de missions multirobots

- Environnement de simulation multirobot basée sur les outils open-sources Gazebo, Ignition et ROS2
- Base de modèles des robots et des environnements expérimentaux du DTIS
- Outil de configuration : simulation temps-réel /accélérée, sur-simulation, co-simulation, simulation distribuée

5 : Introspection, IHM et enregistrement de données

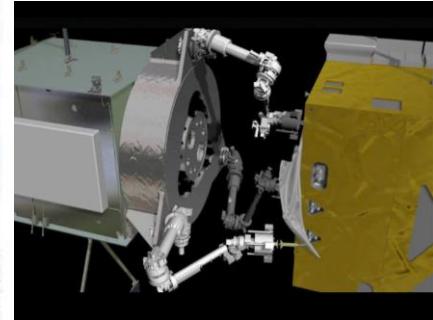
- Librairie d'introspection en C++ et Python des capacités fonctionnelles et décisionnelles de l'architecture
- Interfaces graphiques dédiées au suivi de missions multirobots (fonction C2)
- Application de gestion des enregistrements multirobots synchronisés (Gaby 2.0)

6 : Analyse formelle

- Langage de description de propriétés formelles et temporelles
- Outil d'analyse des propriétés formelles (utilisant des solveurs de type NuSMV)
- Outil d'analyse et de vérification des formules logiques sur des traces

OOS & OSAM

- **Maintenance / Durabilité :**
 - Réparations en orbite / Extension de mission (refuelling).
- **Active Debris Removal (ADR):**
 - Réduction du risque de collision
- **Déploiement autonome de structures :**
 - Assemblage robotisé in-situ



Credit ESA

- **Opérations complexes non télé-opérable :**
=> Amélioration de l'autonomie des plateformes¹
- **Perception** : environnement, cible
- **Stabilité des plateformes** : attitude des satellites
- **Contrôle des interfaces** : interactions



Credit SpaceApplications services

1. Flores-Abad, A., Ma, O., Pham, K., & Ulrich, S. (2014). A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Progress in Aerospace Sciences*, 68, 1-26.

Moyens expérimentaux pour les opérations en micro-gravité

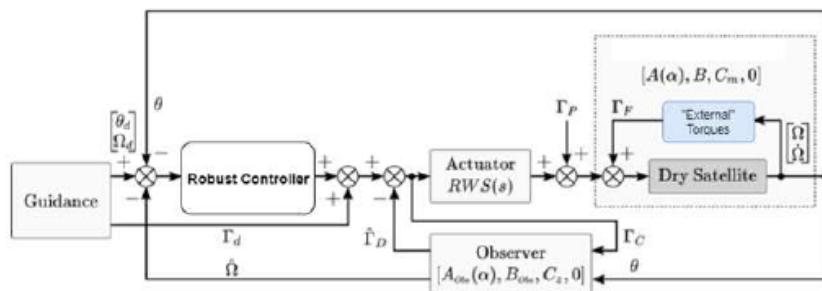
Gestions des saturations et robustesse aux perturbations

Objectif:

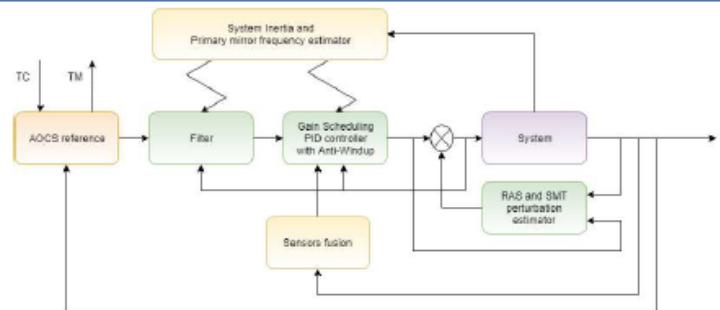
Loi de contrôle robuste garantissant la stabilité de la plateforme en présence de perturbations extérieures

Synthèses de contrôleur étudiées (activité commune PIC-COSOR Lot 1)

- Gestion des saturations :
 - Saturations variables des entrées couplée à un observateur par intervalle [1]
- Contrôle robuste aux perturbations par une approche alliant formalisme LPV et synthèse H_{∞} :
 - Synthèse multi-modèle H_{∞} favorisant la réjection de perturbation
 - Estimation en ligne des perturbations [2]



COSOR controller robust to sloshing [2]



PULSAR controller robust to flexibility and robotic arm

[1] Burlion, L., Biannic, J. M., & Ahmed-Ali, T. (2019). Attitude tracking control of a flexible spacecraft under angular velocity constraints. *International Journal of Control*, 92(7), 1524-1540.

[2] Biannic, J. M., Bourdelle, A., Evain, H., Moreno, S., & Burlion, L. (2019). On robust LPV-based observation of fuel slosh dynamics for attitude control design. *IFAC-PapersOnLine*, 52(28), 170-175.

Commande non-linéaire :

Contrôle coordonné bras et base mobile

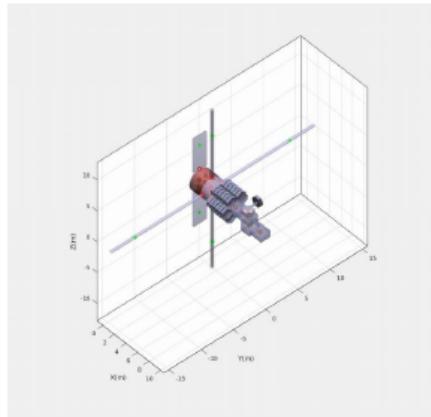
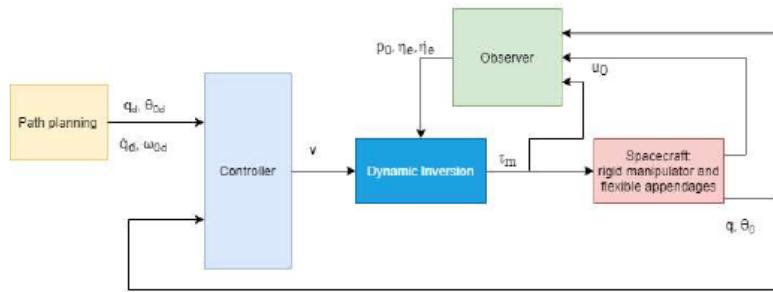
Objectif:

Contrôleur conjoint des actionneurs du bras et du satellite afin de limiter la sollicitation des actionneurs

Approche considérée (Thèse S.Kraiem) [1]

- Réjection des perturbations du bras sur la base par inversion dynamique
- Compensation des flexibilités par un observateur et synthèse robuste H_{∞}

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{0m} & \mathbf{H}_{0\eta} \\ \mathbf{H}_{0m}^T & \mathbf{H}_m & 0 \\ \mathbf{H}_{0\eta}^T & 0 & \mathbf{H}_\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_0 & \mathbf{C}_{0m} & \mathbf{C}_{0\eta} \\ \mathbf{C}_{0m}^T & \mathbf{C}_m & 0 \\ \mathbf{C}_{0\eta}^T & 0 & \mathbf{C}_\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_0 \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{K}_\eta \end{bmatrix} \eta = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{ext} \\ \boldsymbol{\tau}_m \\ 0 \end{bmatrix}$$



Interactions homme-système

HSI research domain : Methods and tools for interacting, individually or collectively, with information and autonomous systems.

Interactions : Sensory-motor, Multi-modal (including verbal and non-verbal), Cognitive, Multi-agent, etc.

Cognitive Engineering : Methods and tools for engineers for the analysis of cognition (ie functions of perception, action, memorization, learning, behaviors, etc.) and the designing of human system interfaces.

Application domains :

- Cockpits of the future & Ground stations of drone systems
- Air traffic control systems (ATM)
- Situation-keeping systems (surveillance)
- Command and Control Systems
- Visualization and analysis of data from simulations
- Robotics and Intelligent Systems

Interactions homme-système

Advanced pilot-assistance systems



Flight simulator for helicopters

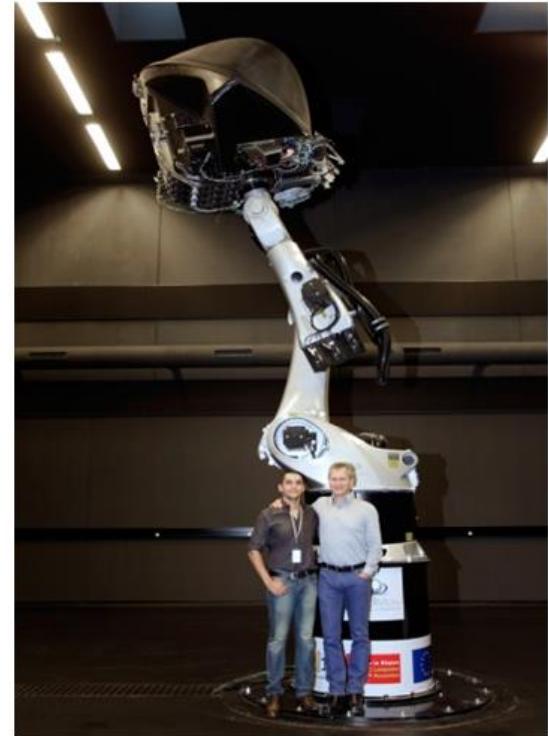


Interactions homme-système

Examples of work (Monitoring)

Spatial disorientation (measurements)

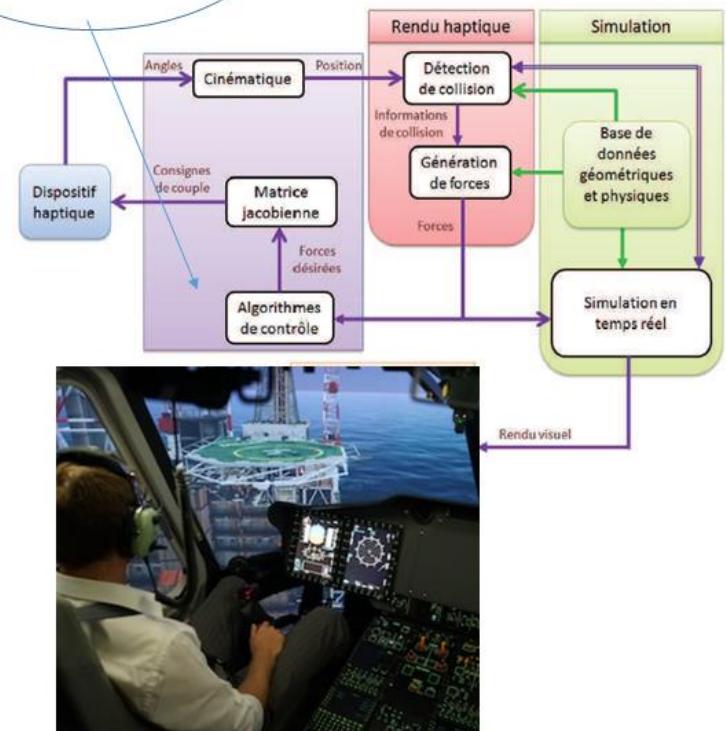
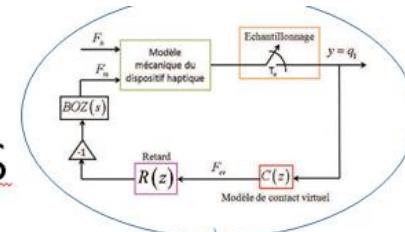
- Studies of mechanisms of compensation of the phenomena of disorientation by visual aids (synthetic) and haptics. Visual and physical stimulation
- Analysis of the pilot's reactions by posture capture, head orientation, oculomotor activity, etc.



Interactions homme-système

Example of works Pilot assistance systems

- Force feedback on haptic interface (stability of the coupling - effect of the delays)
- Virtual guidance by Real Time Simulation iircraft-environment behavior
- Hybrid vision/force based-control deck landing

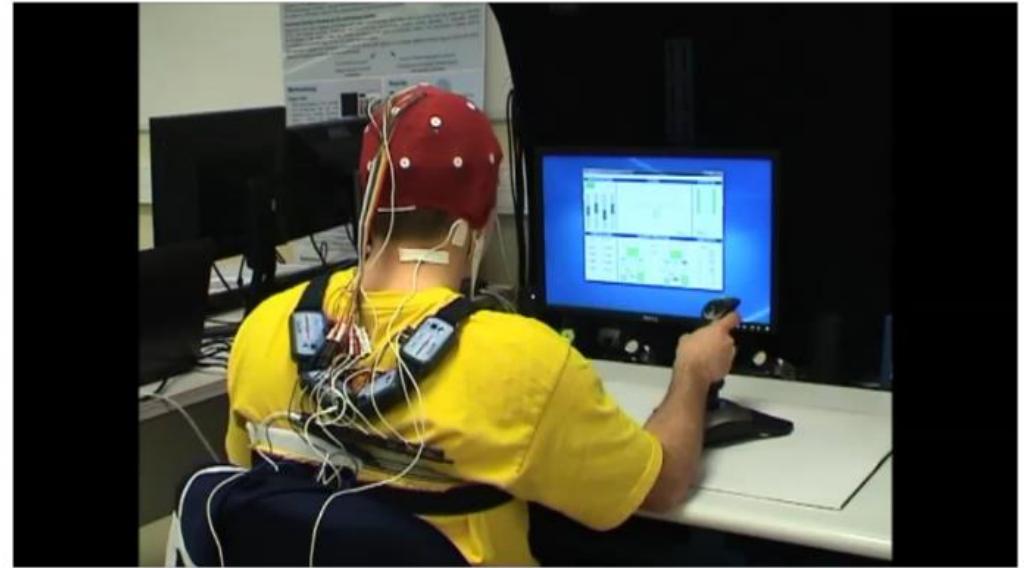


Interactions homme-système

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Examples of work (Monitoring)

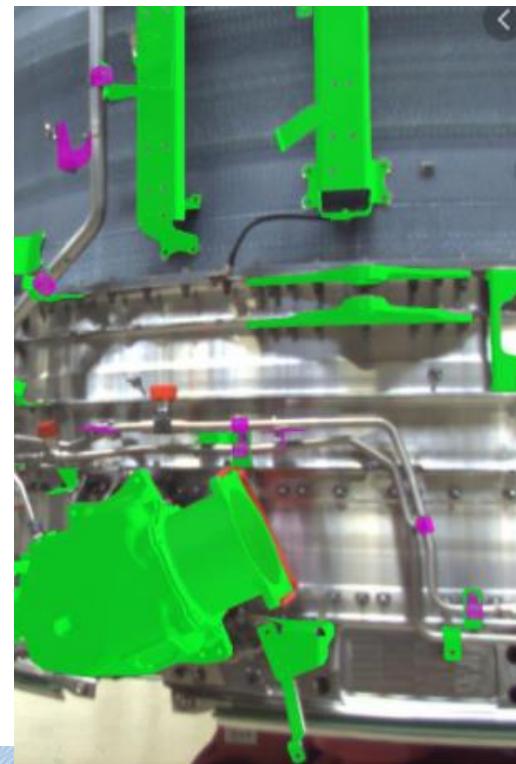
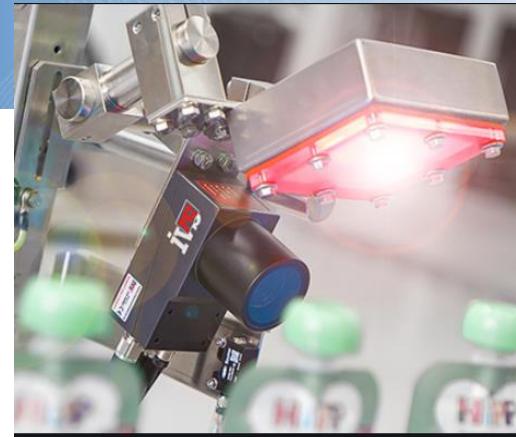
Cognitive state: identification models



ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Inspection and control by machine vision

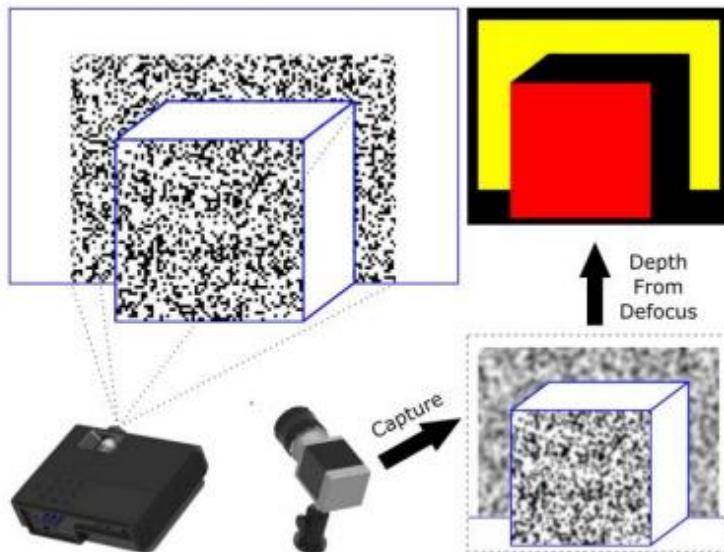
- ✓ The main objective is to **bring by means of artificial vision an assistance to the operators** and even more a partial automation **in tasks of inspection and control** of systems on which one operate interventions (assembly operations for example) or for the control and diagnosis of the state of a system.
- ✓ For that, we exploit **systems of 3D vision** or photogrammetric to extract geometrical and texture information **associated with sources of illumination as well as more specific vision sensors to carry out control of aspect, non destructive control, detection of defects, dimensional control, etc**
- ✓ The implementation of inspection, control, diagnostic and even prognostic functions requires a lot of **processing resources** for the reconstruction and recognition of shapes, the recognition of parts to be controlled or the state of an assembly, the detection and qualification of defects despite variations in materials and contrasts, their location, etc., as well as to help operators in the conduct of operations.



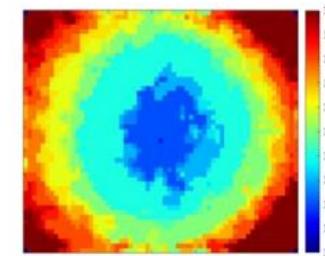
Exemple of advanced inspection methods

Active 3D imagers by DFD :

- ✓ Compact 3D imager for confined space inspections
- ✓ 3D camera with structured illumination for surface inspection
- ✓ DFD algorithm integrating the projected texture (scene covariance learning)



Pièce étalon en impression 3D

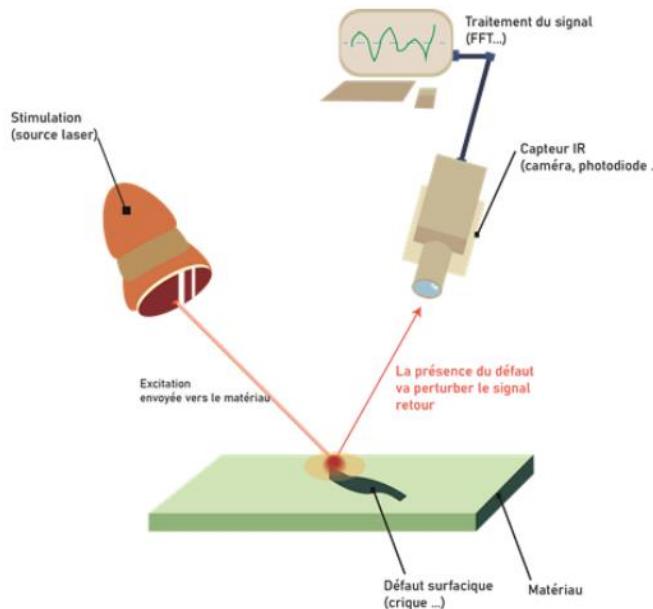


Carte de profondeur estimée

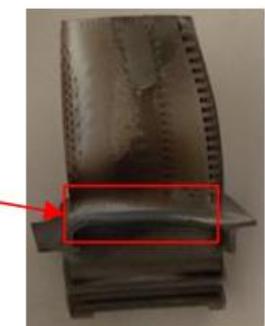
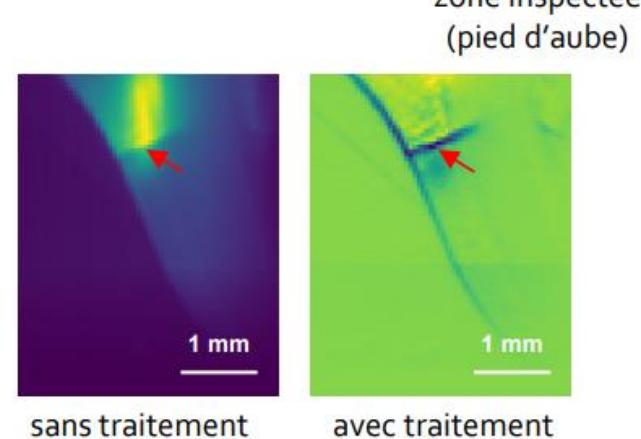
Exemple of advanced methods

Thermal imaging of surface defects

- Based on the principles of Flying Spot imaging
- Millimeter cracks, sub-millimeter opening
- Inspection of areas with complex geometry



craques dans des aubes de turbine

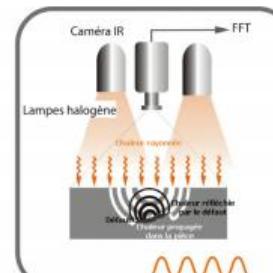


aube M88-2
fournie par AIA
(échelle 1)

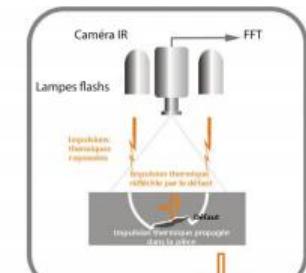
Exemple of advanced methods

Multi-physic methods :

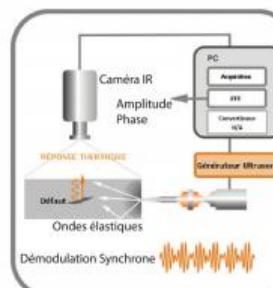
- Visible / IR endoscope
 - ✓ differentiation between surface heterogeneities (scratches) and real cracks in a metallic blade
 - ✓ projection of the thermal field on a 3D mesh of the part to be inspected, obtained in the visible range
- Active infrared thermography



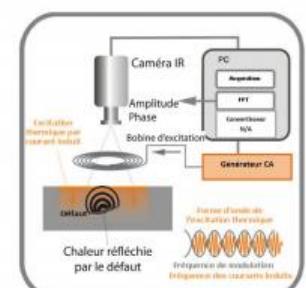
(a) Dispositif à excitation par lampes halogènes



(b) Dispositif à excitation par lampes-éclairs



(c) Dispositif à excitation par ultrasons

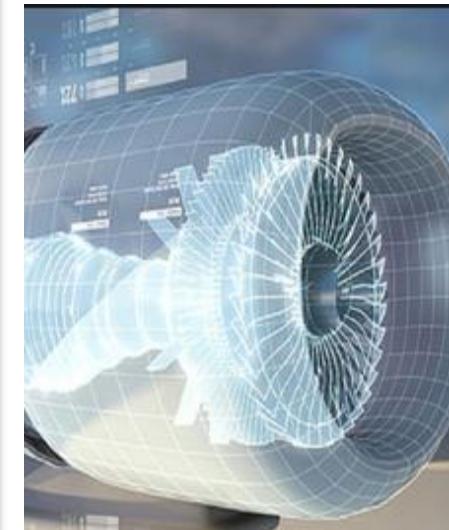
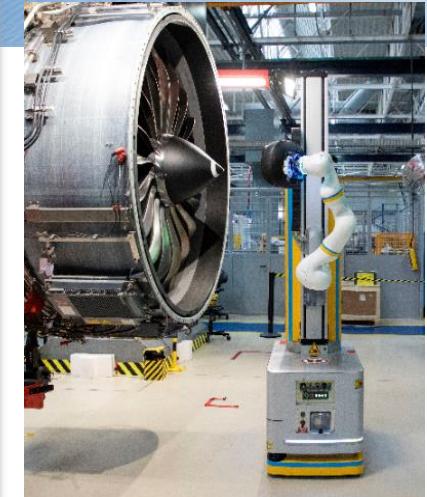


(d) Dispositif à excitation par induction

<https://w3.onera.fr/cadence/content/le-projet>

Added-value brought by Robotics and AI

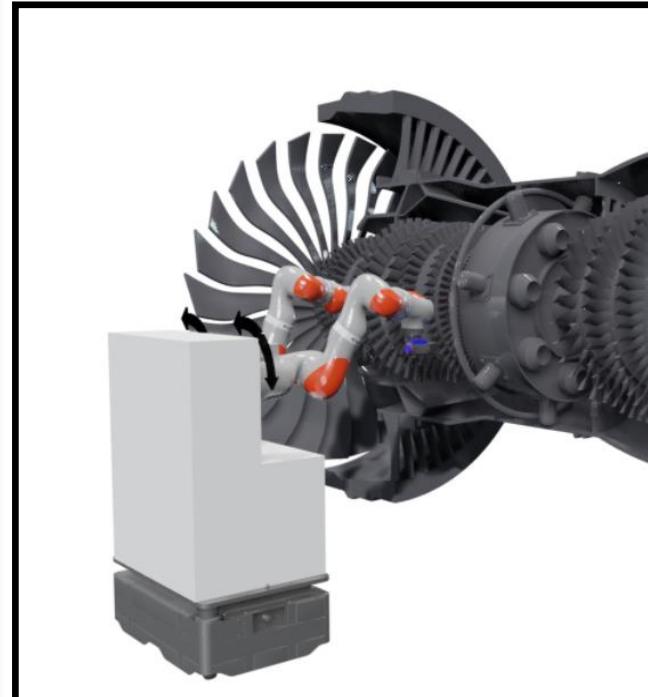
- Robotics allows **generate and control trajectories of measurement systems** for inspection tasks even in constraint environments.
- It allows to **implement these functions *in situ*** (on their site of operation), the mobility of sensors and sources by robotic arms with mobile robotic base facilitating the accessibility and the treatment of large objects.
- AI techniques are in this context quite important. They can be used for the **interactions between the operator and the system**, for the **planning of inspection movements** and operations, as well as for the numerous needs of **data processing** and information coming from the measurement means.
- Data, once collected and integrated on a **digital twin** of the treated object can be used through various software techniques **to monitor the state of the system, inspection traceability and the prediction of its behavior**.



An original research platform

The aim of this research platform is to go beyond the state of the art of current inspection systems by integrating :

- A robotic system for the ***in situ* deployment of inspection operations in an interactive way** with respect to the inspection operation,
- A **large number of sensors and sources** for the control and detection of defects exploiting active vision and multi-physic systems **associated with AI-based NDT software**
- A tool for the constitution and exploitation **of digital twins** of the controlled systems for monitoring and diagnosis



Dual mobile interactive arms for control and diagnosis of industrial parts and systems

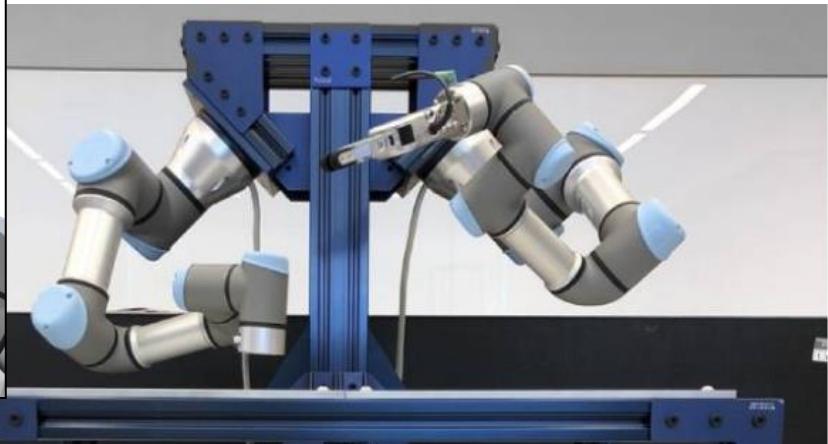
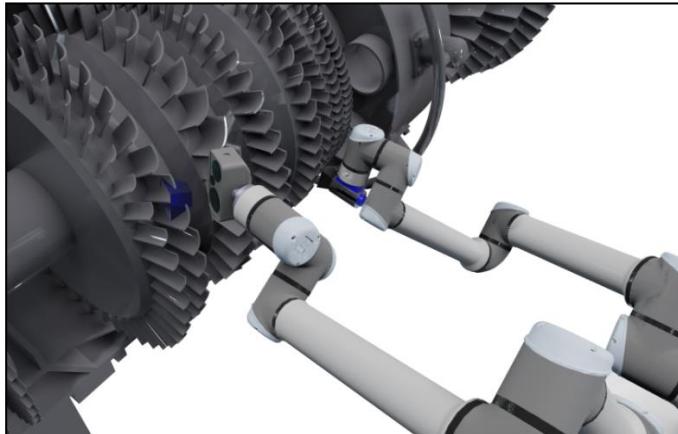
Technical objectives: 3D reconstruction of the system observed by an embedded 3D lidar. Detection, recognition, analysis of defects, degradations, anomalies on objects and systems with constraints of access and dimensions justifying the use of robotized systems to move sensors for observation along complex trajectories.

Integration of the collected information on a digital twin of the observed system for analysis of nocivity of defects and prognosis.

Experimental device envisaged: 2 co-botic arms of UR type installed on a mobile base for large autonomous motions. LIDAR scan for 3D reconstruction, visible and IR 2D camera, laser sources integrated in endoscopes.

Robot controller for the coordination of the arms and the mobile base. Interactive programming . Data processing and 3D visualization. Models of the cell integrated in a digital twin for the simulation of the system for the diagnosis

Applications: Inspection and control of equipments, large parts from aeronautical and automotive production, etc.



Robotic system with 2 arms
Universal Robot (or LWR Kuka)

Embedded on a mobile base equipped
with autonomous navigation system by
visual SLAM based on a 3D Lidar, laser
scan and odometry.

Trajectory planning with obstacle
avoidance capabilities

The whole system is developed in the
open-source environment ROS2 and
Mauve (ONERA)

