



**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

# Stratégies d'exploration à base de robots aquatiques

Eric Duviella & Luc Fabresse & al.



IMT Nord Europe  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

## CONTEXTE : Les réseaux hydrographiques

### Réseau hydrographique

- Étendu géographiquement
- Industrie
- Agriculture/élevage
- Voies navigables
- Eau potable
- Production électrique

### Sujet à

- Épisodes climatiques
- Accroissement de la population
- ...



 **ONEMA**  
Office national de l'eau  
et des milieux aquatiques

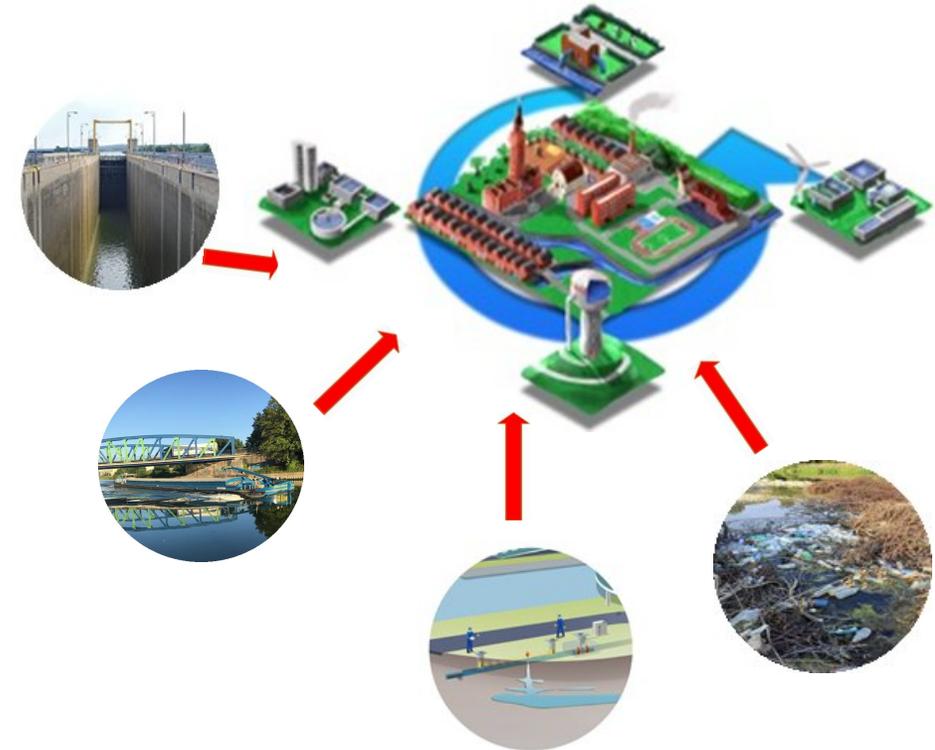
2

## Ressource quantitative

- Instrumenter et récolter des données
- Modèles, physique et/ou basé sur les données, prédictif (jumeau numérique)
- Contrôle et/ou optimisation de la ressource
- Outils d'aide à la décision

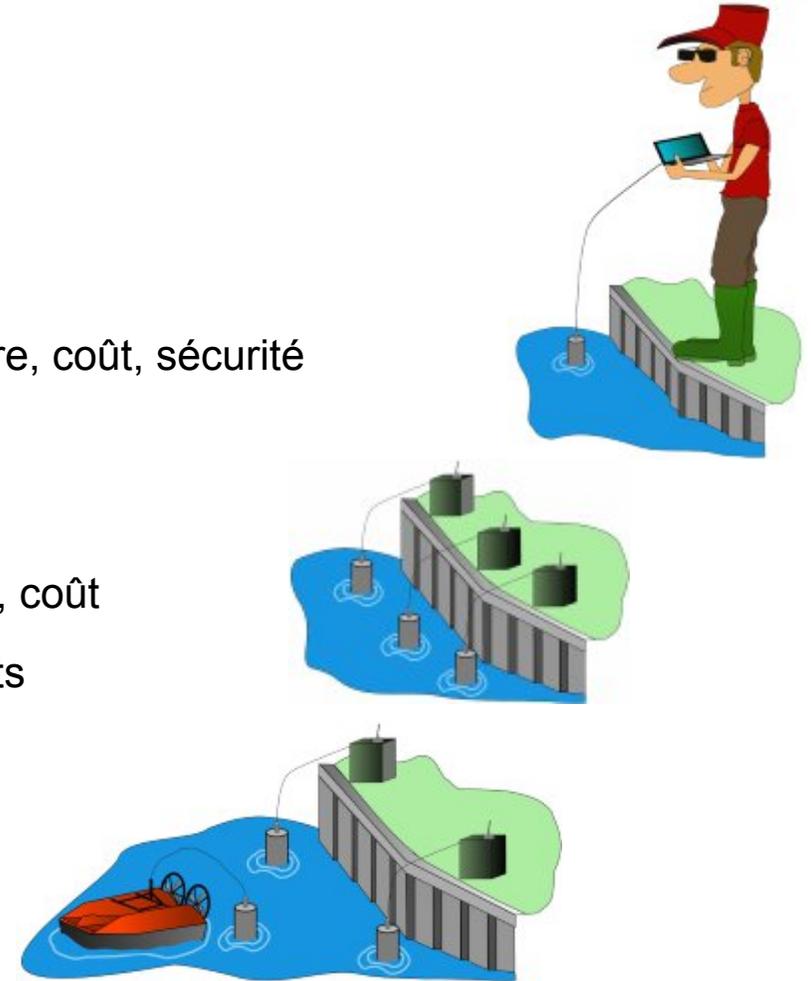
## Ressource qualitative

- Instrumenter et récolter des données
- Modèles, physique et/ou basé sur les données, prédictif (jumeau numérique)
- Suivi par des techniques d'IA et d'Automatique
- Outils d'aide à la décision



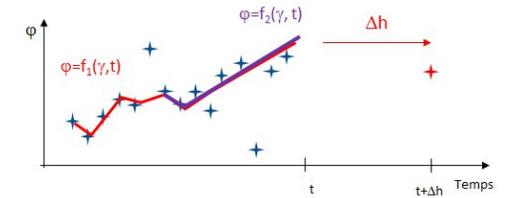
## Suivi de la ressource en eau

- Récolte manuelle de données
  - Déploiement ponctuel
  - Contraintes liées à l'accessibilité, temps, couverture, coût, sécurité
- Instrumentation par réseau de capteurs fixes
  - Couverture plus complète
  - Contraintes liées aux positions fixes, maintenance, coût
- Instrumentation par réseau de capteurs mobiles - robots
  - Drone aquatique de surface, sous-marin, ...
  - Couverture complète
  - Solutions téléopéré ou autonome



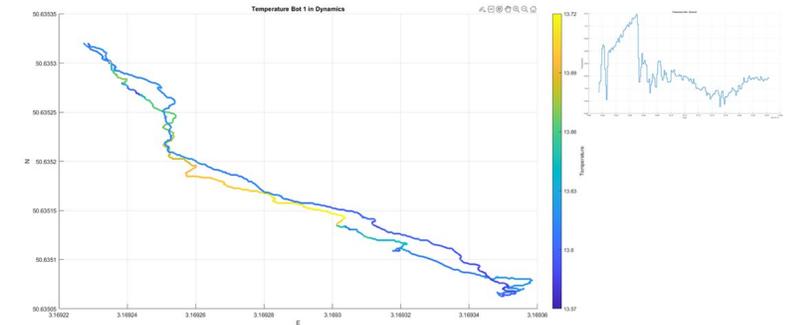
## Modélisation dynamique

- Constituer une base de données exhaustive
- Reproduire et comprendre la dynamique des paramètres mesurés
  - Modèles basés sur les données (récursifs et auto-adaptatifs)
  - Modèles prédictifs sur horizons temporels fixes



## Cartographie

- Données récoltées par un drone en renfort des capteurs fixes
- Intégration spatio-temporelle de données
- Modélisation spatio-temporelle
  - Modèles basés sur les données (récursifs et auto-adaptatifs)
  - Modèles prédictifs sur horizons temporels fixes



## Conduite de flottes de robots

- Autonomie de drone(s) pour la récolte de données
  - Définition des trajectoires avec évitement d'obstacles fixes et mobiles (bateaux)
  - Contrôle prédictif
  - Coordination multi drones
- Construction de jeux de données (Validation, Expérimentations)
- Outils de simulation (« Jumeau numérique »)
- Définition de missions
  - Rondes de surveillance
  - Détection de sources de pollution
- Détermination d'indicateurs pertinents
  - Gradient de mesure
  - Prise en compte d'autres grandeurs (débit)



**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

## Récolter de données à l'aide d'un drone de surface téléopéré

## Objectifs

- Étudier la qualité des capteurs équipant le drone
- Démontrer la détection de gradients de mesure
- Identifier les lignes de diffusion

## Campagnes de mesure (2021) – Drone BDS

- La Marque : Comparaison des capteurs Drone vs Station fixe
- La Planquette : Identification de lignes de diffusion
- Le Lac du Héron : Détection de gradients de mesure



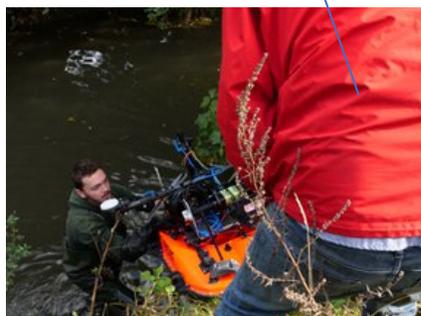
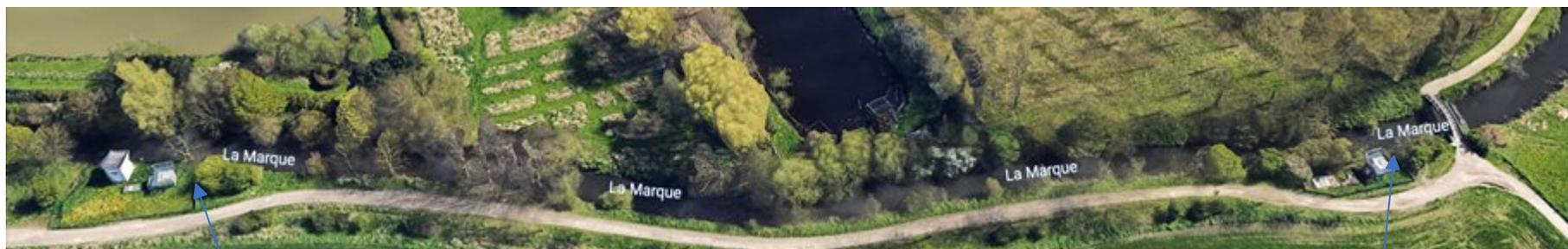
Projet  
Castr-  
Eau

**LASIRE**

**BDS**  
BATHY DRONE SOLUTIONS

## Mesures réalisées en stationnaire

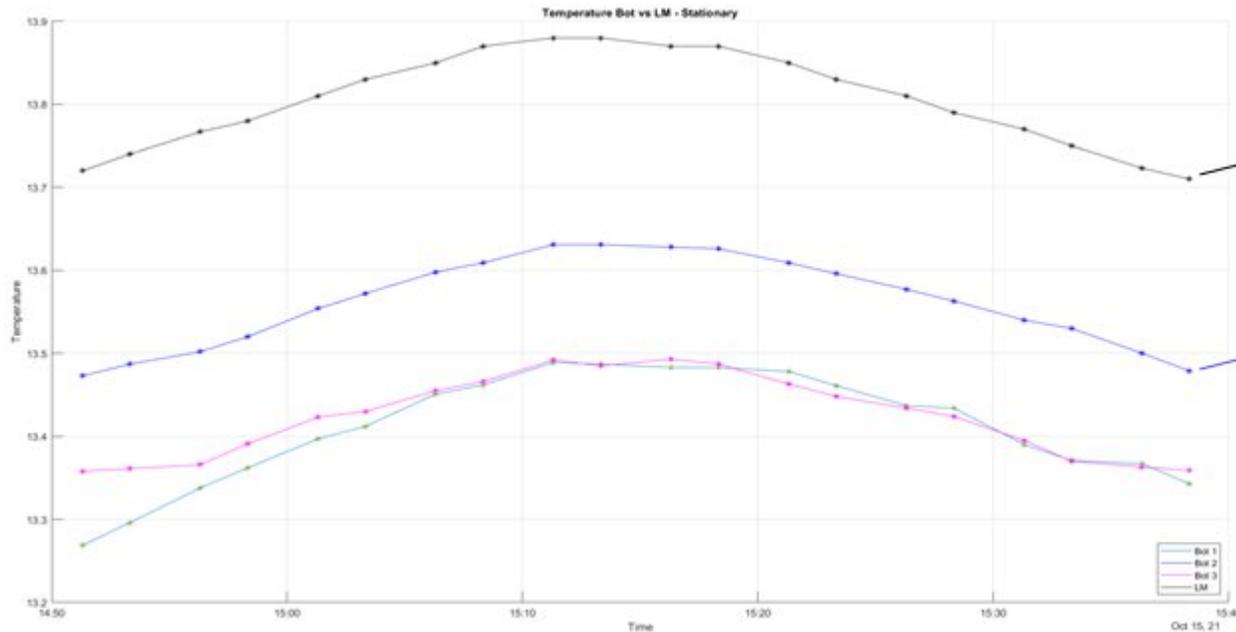
- 8 paramètres – Température, pH, Oxygène dissout, Turbidité, Redox, Conductivité, CDOM, Tryptophane
- A proximité de la pompe de la station fixe à différence de profondeurs





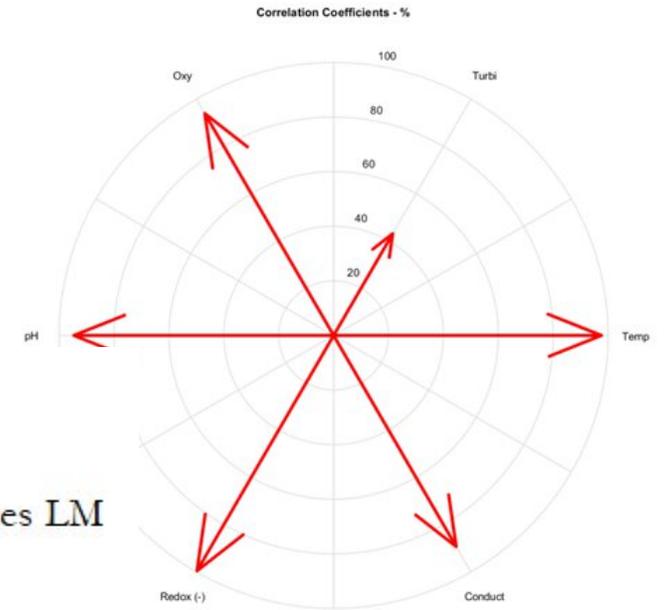
## Étude de corrélation

- Exemple de la mesure de la Température
- Validation des capteurs équipant le drone



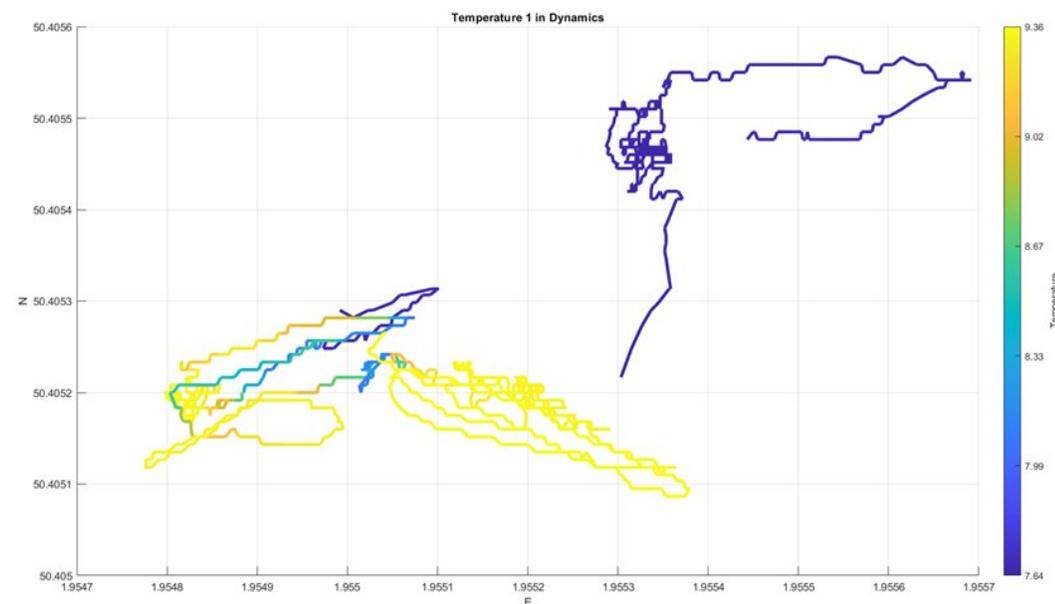
Mesures LM

Mesures T1



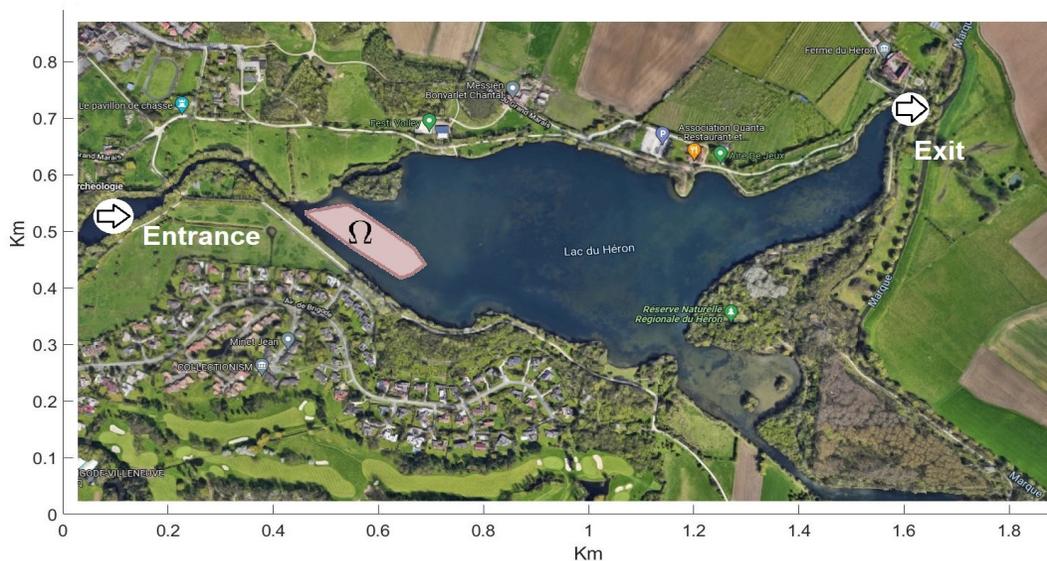
## Mesure en dynamique

- 8 paramètres – Température, pH, Oxygène dissout, Turbidité, Redox, Conductivité, CDOM, Tryptophane
- Identification de lignes de diffusion



## Mesure en dynamique

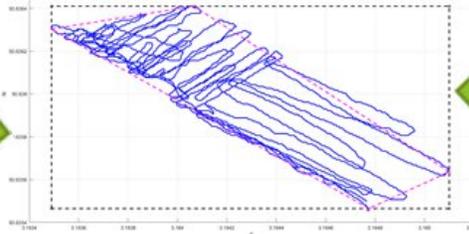
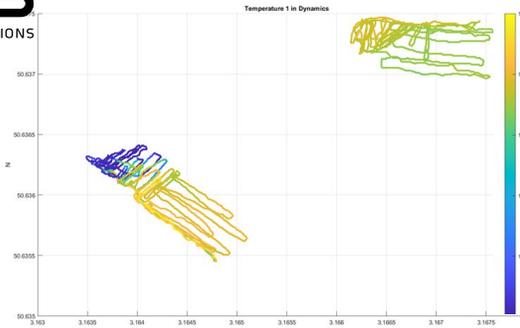
- 8 paramètres – Température, pH, Oxygène dissout, Turbidité, Redox, Conductivité, CDOM, Tryptophane
- Exploration de la zone



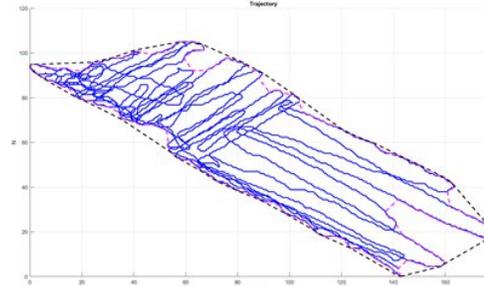


## Discretisation de zones de mesure

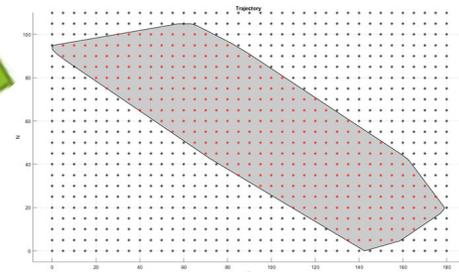
– Script Matlab



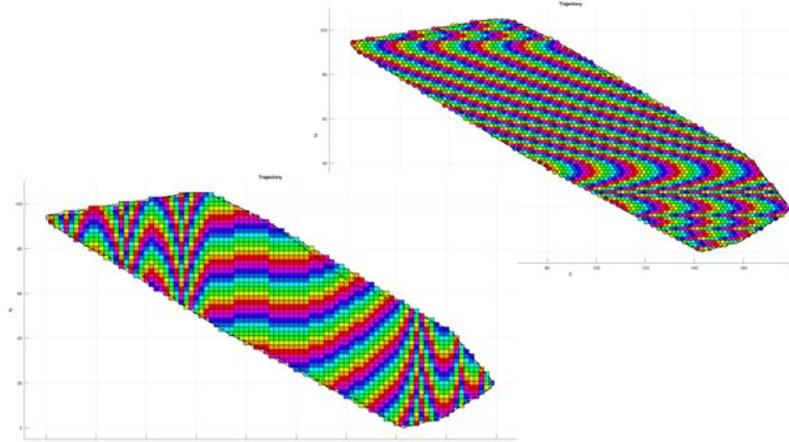
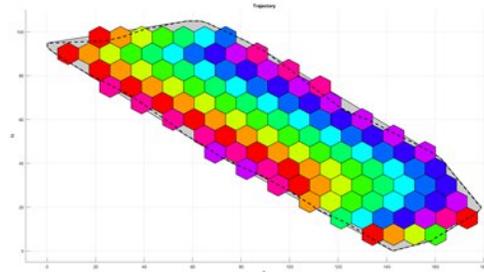
Détermination des frontières



Points de maillage

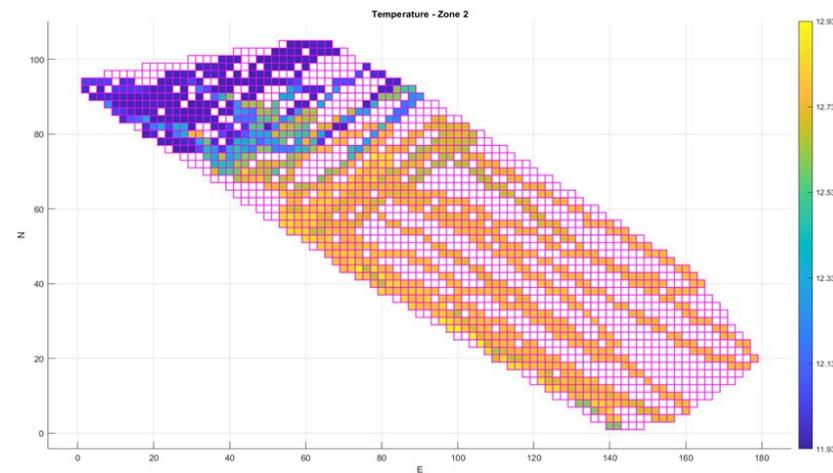
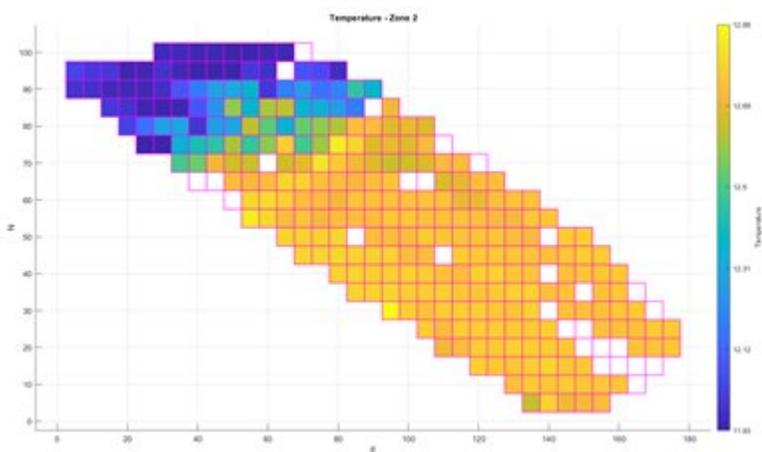


Maillage



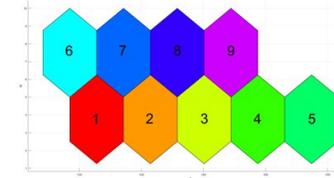
## Génération de cartes

- Moyenne des points appartenant à chaque zone
- Compromis précision/zones renseignées 5m ou 2m



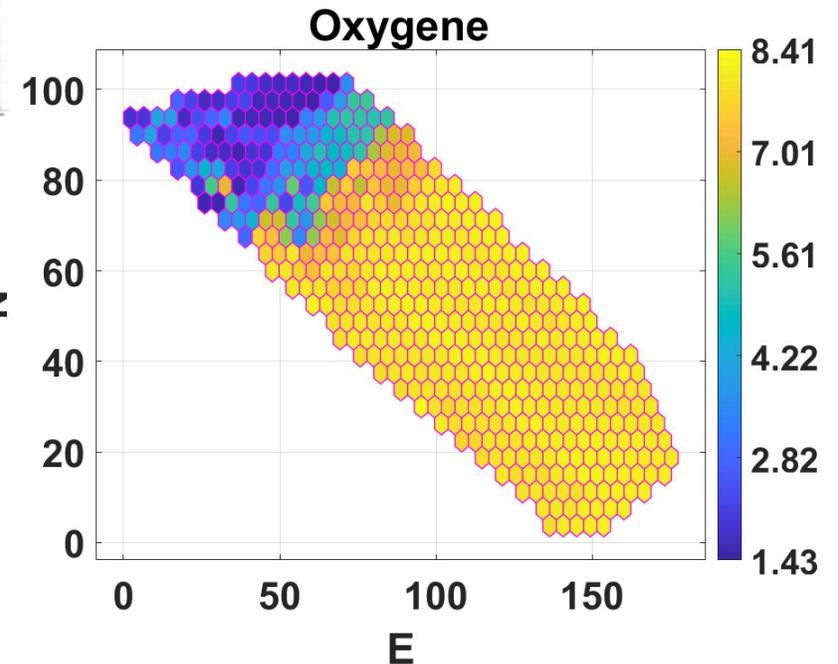
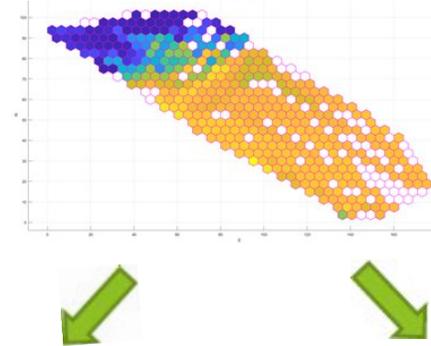
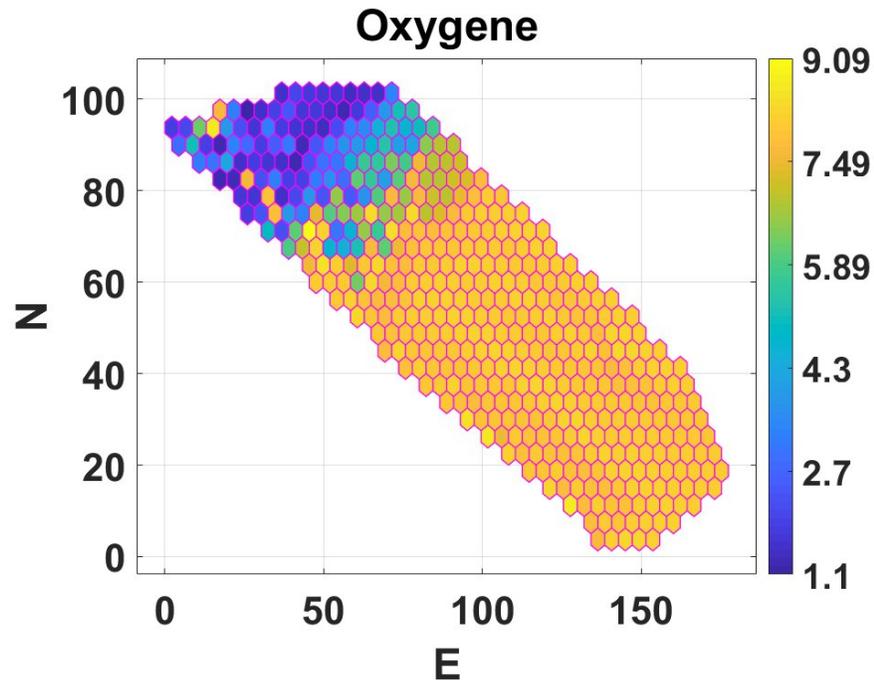
## Reconstruction des données manquantes

- Moyenne par adjacence (Matrice de voisinage)
- Approche de Kriging



Neighbour =

1	1	0	0	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	0	1	1
0	0	1	1	1	0	0	0	1
0	0	0	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1	1	1	0
0	1	1	0	0	0	1	1	1
0	0	1	1	0	0	0	1	1





IMT Nord Europe  
École Mines-Télécom

# Le lac du héron - Cartographie



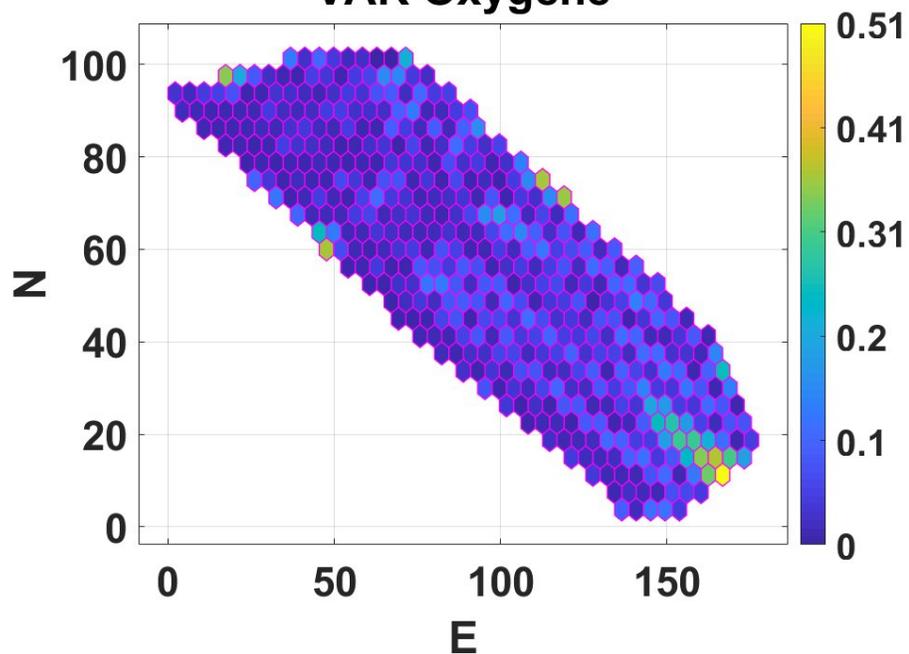
LASIRE

Analyse des cartes

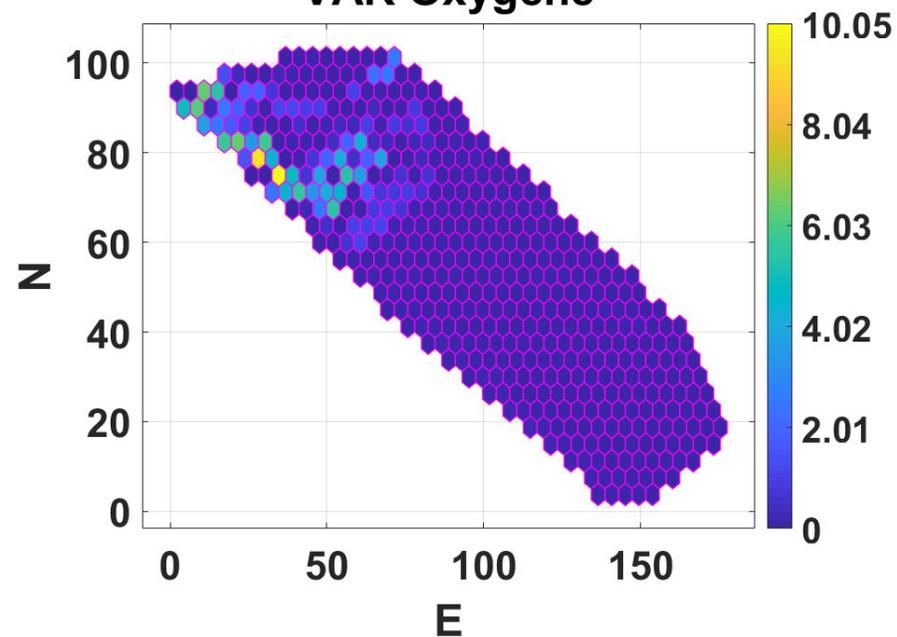
– Calcul de la variance



VAR Oxygene



VAR Oxygene



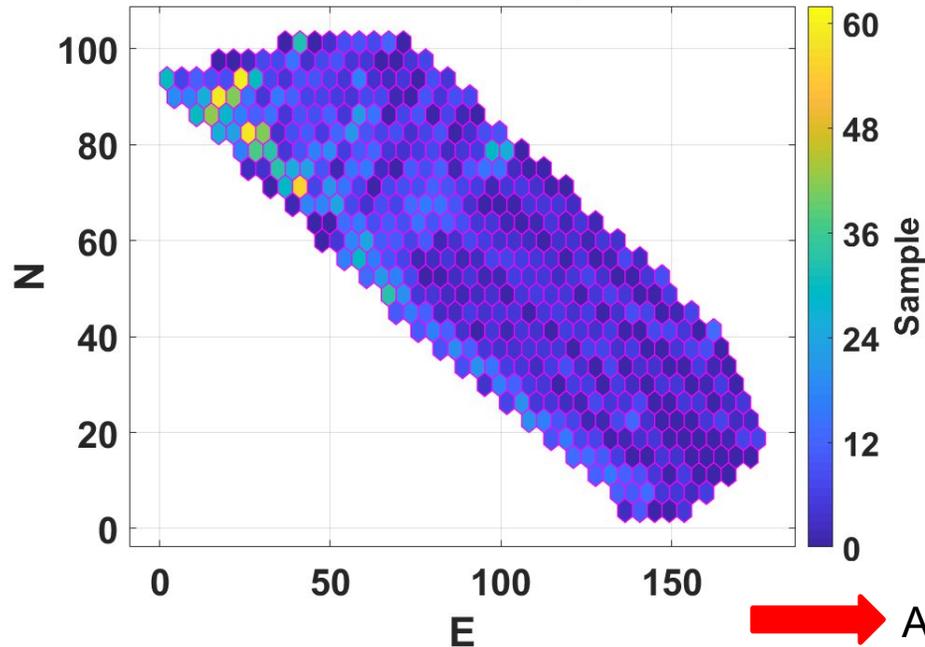


## Analyse des cartes

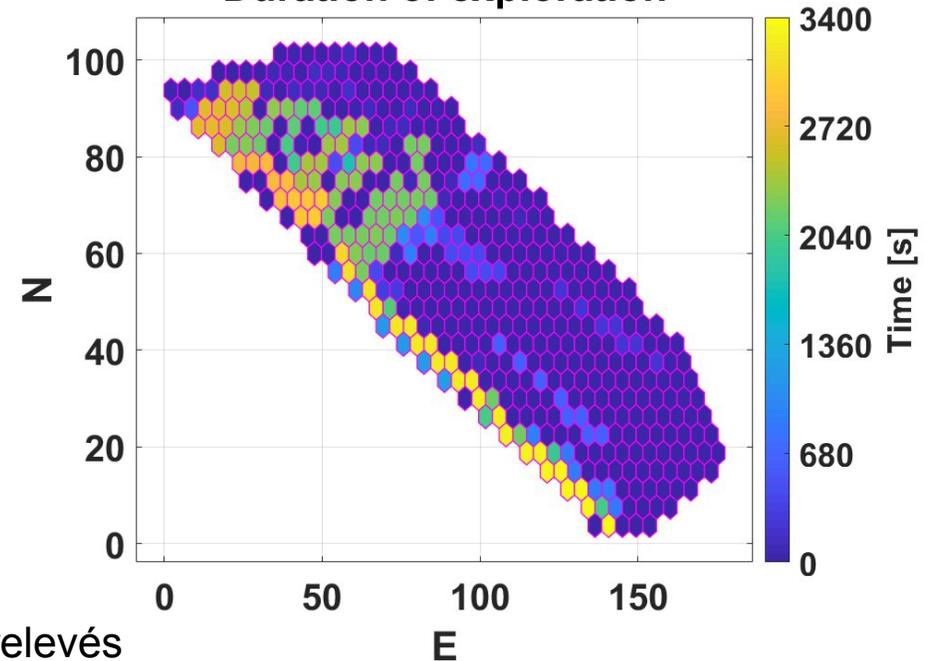
- Nombre d'échantillons
- Durée d'exploration



### Number of Samples



### Duration of exploration



 Automatisation des relevés



**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

## Contrôle d'un drone de surface

## Modèle mathématique

- Dynamique non linéaire
- Thèse Y. Hervagault

$$\begin{cases}
 \dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi), \\
 \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi), \\
 \dot{\psi} &= r, \\
 \dot{u} &= \frac{\tau_u}{m_{11}} + \frac{m_{22}}{m_{11}} vr + \frac{X_u}{m_{11}} u, \\
 \dot{v} &= -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur + \frac{Y_v}{m_{22}} v, \\
 \dot{r} &= \frac{\tau_r}{m_{33}} + \frac{m_{22}-m_{11}}{m_{33}} uv + \frac{N_r}{m_{33}} r
 \end{cases}$$



$$\begin{cases}
 x(k+1) &= f(x(k), u(k)), \\
 x(0) &= x_0,
 \end{cases}$$



- Entrées : F1 et F2

Hervagault, Y. (2019). Design and Implementation of an Effective Communication and Coordination System for Unmanned Surface Vehicles (USV). Ph.D. thesis, Université Grenoble Alpes

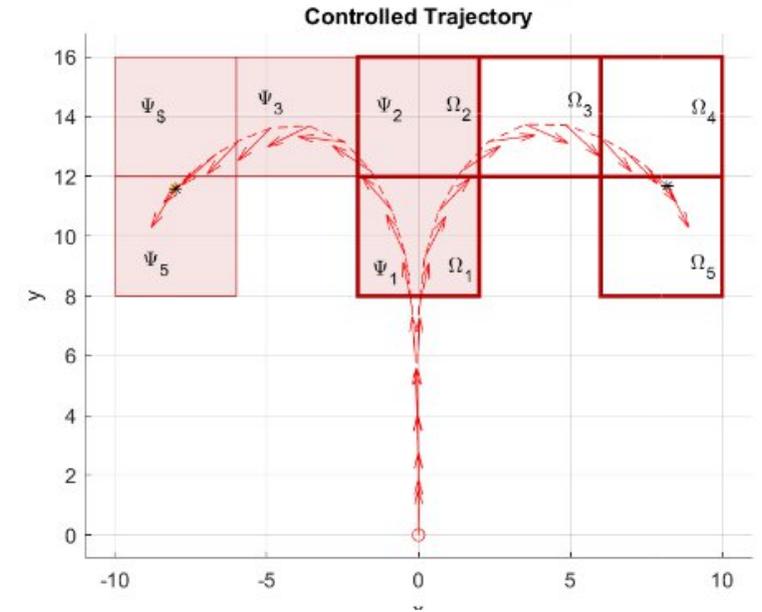
## Model Predictive Control (MPC)

- Approche ensembliste
- Amélioration
  - Robustesse
  - Flexibilité
  - Sobriété
- Critère à minimiser

$$J_N(x; \mathbf{u}) = \sum_{j=0}^{N_x-1} p l_{\Omega_x}(x_j, u_j) + \sum_{j=N_x}^{N-1} q l_{\Omega_x^+}(x_j, u_j)$$

$$\min_{\mathbf{u}} J_N(x; \mathbf{u})$$

$$\text{s.t. } \begin{aligned} x_0 &= x, \\ x_{j+1} &= f(x_j, u_j), \quad j \in I_{N-1}, \\ x_j &\in \mathbb{X}, \quad u_j \in \mathbb{U}, \quad j \in I_{N-1}, \\ x_{N_x} &\in \Omega_x, \\ x_N &\in \Omega_x^+, \end{aligned}$$

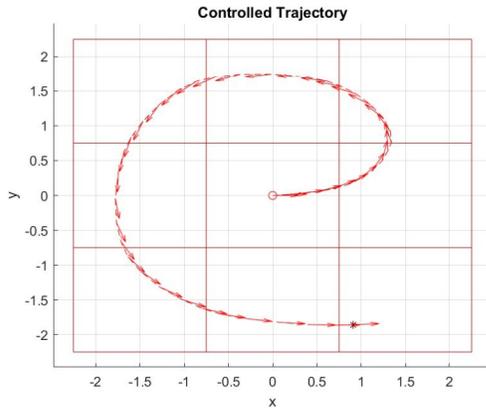


$$\text{Basé sur } V_N(x, \Omega; \mathbf{u}) = \sum_{j=0}^{N-1} \alpha d(x_j, \Omega) + \beta d(u_j, \Psi(\Omega))$$

**Simulations**

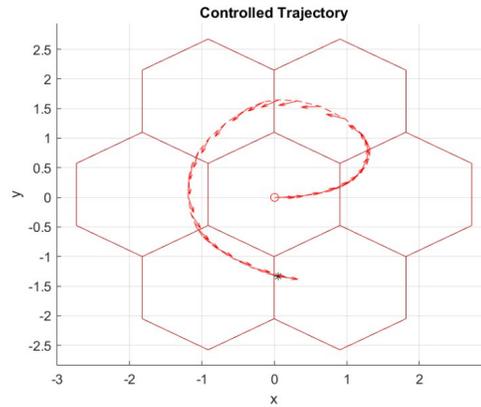
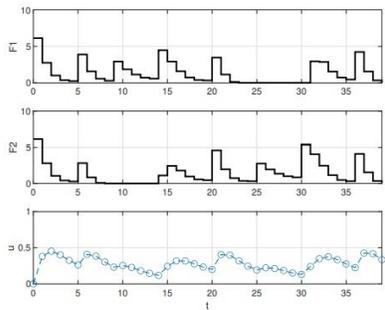
– Comparaison du coût de contrôle

$$I_F = \sum_{i=0}^{T_f} F_1(i) + F_2(i), \quad I_S = \sum_{i=0}^{T_f-1} \|F_1(i+1) - F_1(i)\|^2 + \|F_2(i+1) - F_2(i)\|^2$$



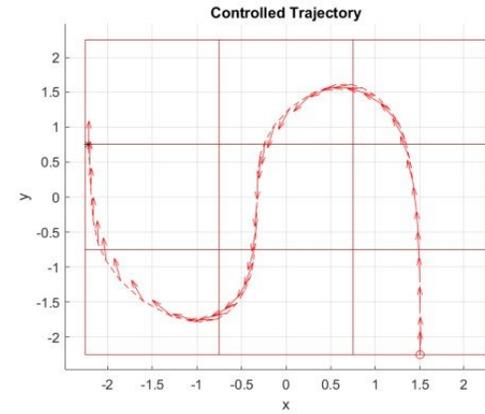
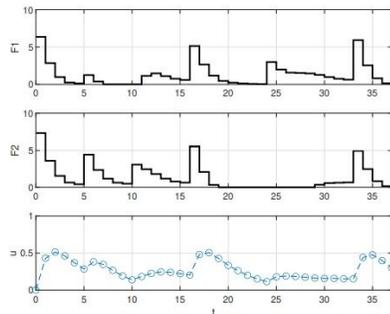
$I_F = 91,7$

$I_S = 110,8$



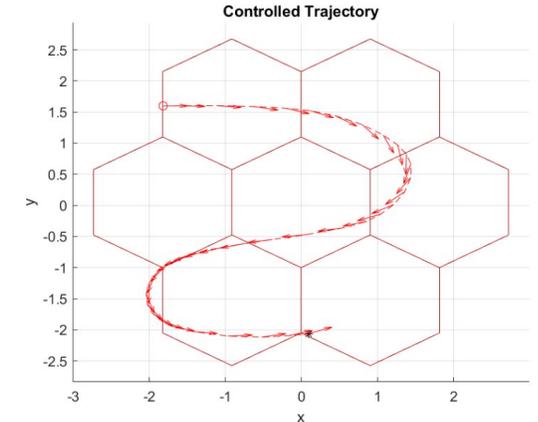
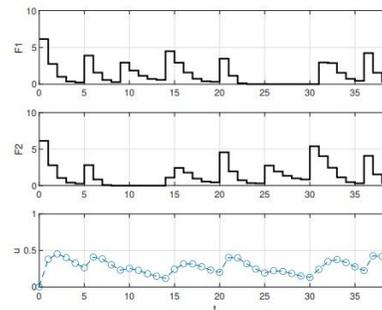
$I_F = 73,6$

$I_S = 100,4$



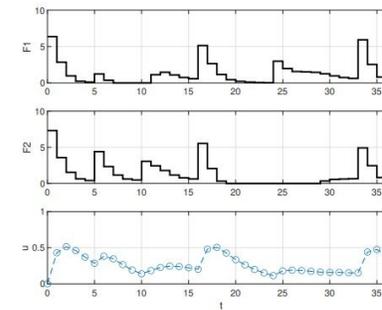
$I_F = 165$

$I_S = 163$



$I_F = 133$

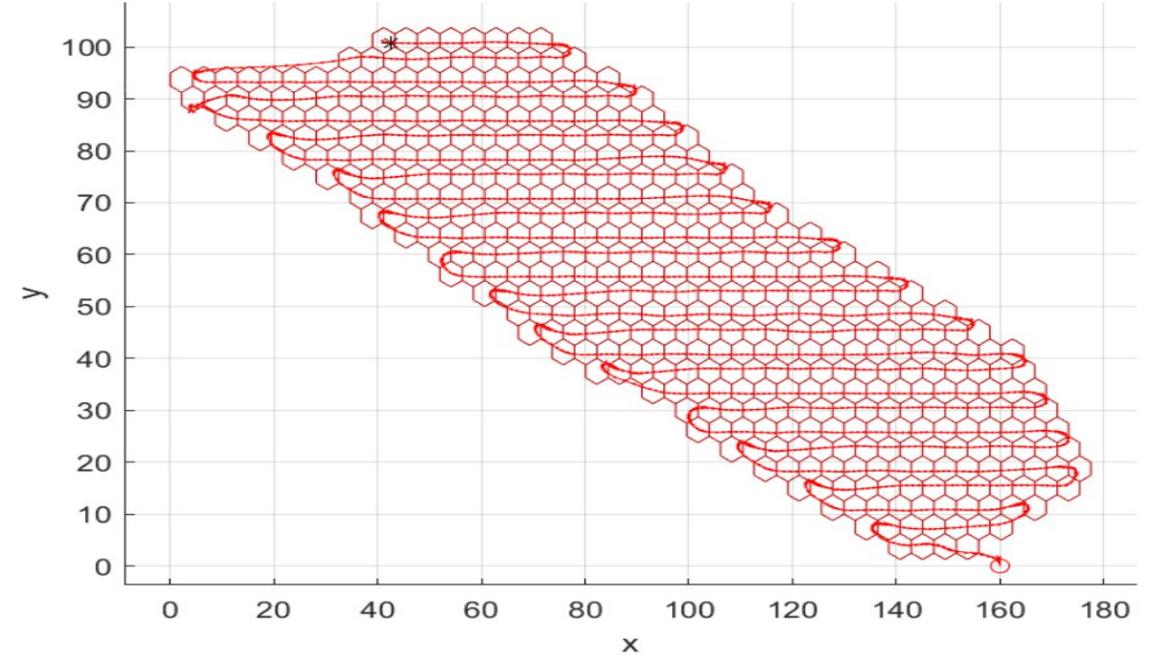
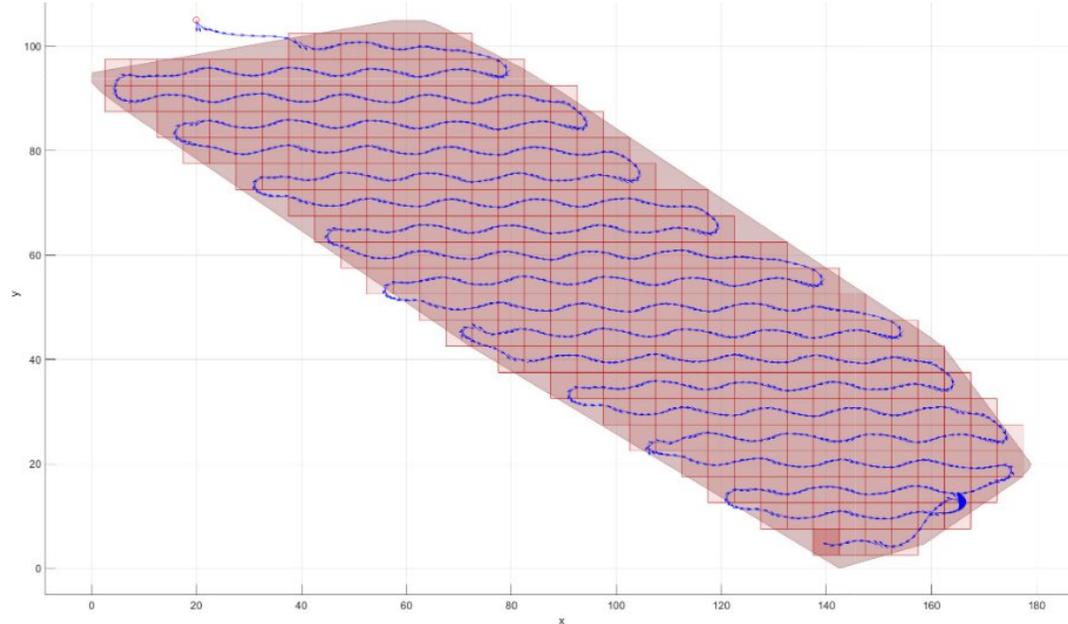
$I_S = 218$





## Simulations

- Comparaison de deux stratégies de ronde





**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

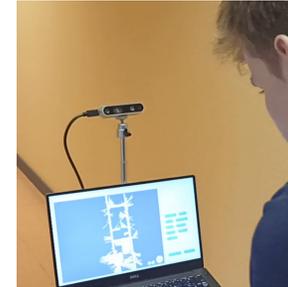
## Simulation d'un drone de surface



IMT Nord Europe  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

## Historique : Robotique de service

- Applications en intérieur
  - ~ robot d'accueil / guide
  - ~ robot-chariot en entrepôt
- Challenges
  - ~ Localisation : pas de GNSS
  - ~ Navigation : obstacles mobiles, portes, escaliers
  - ~ Interaction humain-robot
  - ~ Manipulation
  - ~ Coordination multi-robots
- Approches
  - ~ Cartes métriques, topologiques, sémantiques
  - ~ SLAM laser 2d
  - ~ Navigation réactive
  - ~ Reconnaissance visuelle d'objets, humains, ...

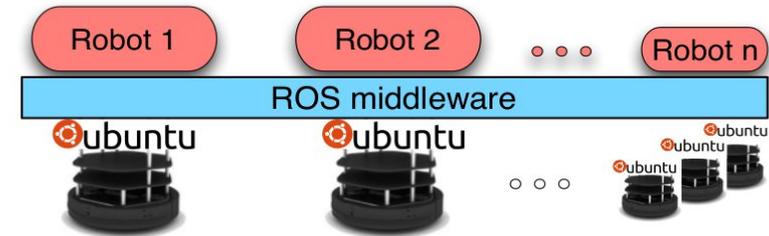
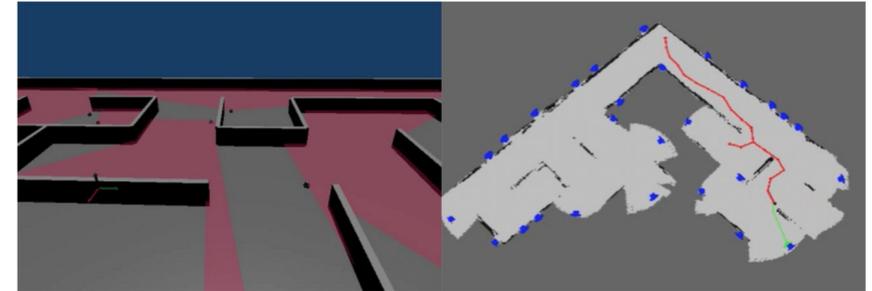
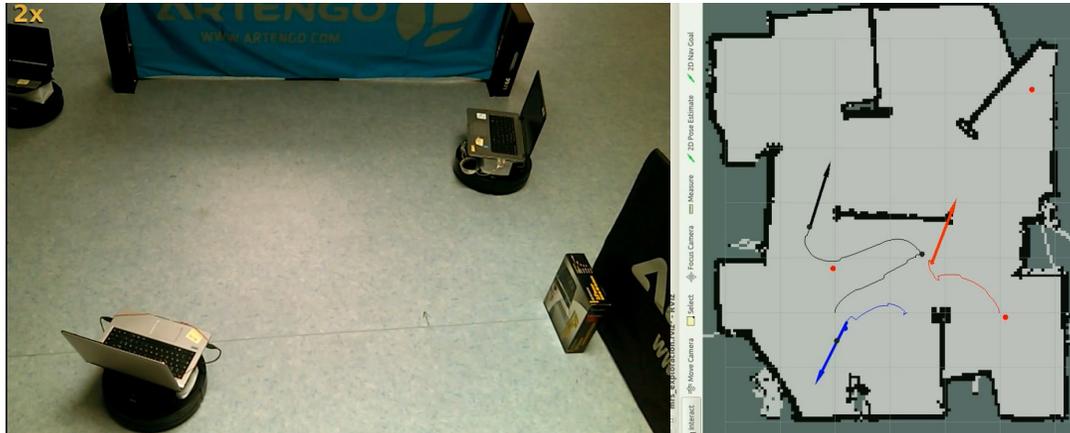




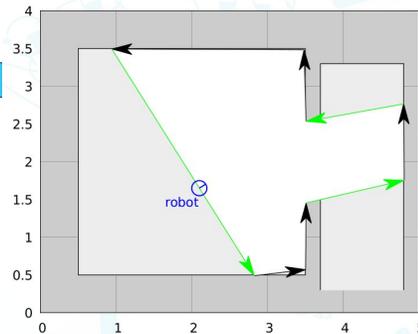
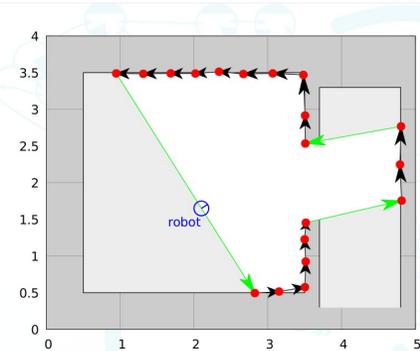
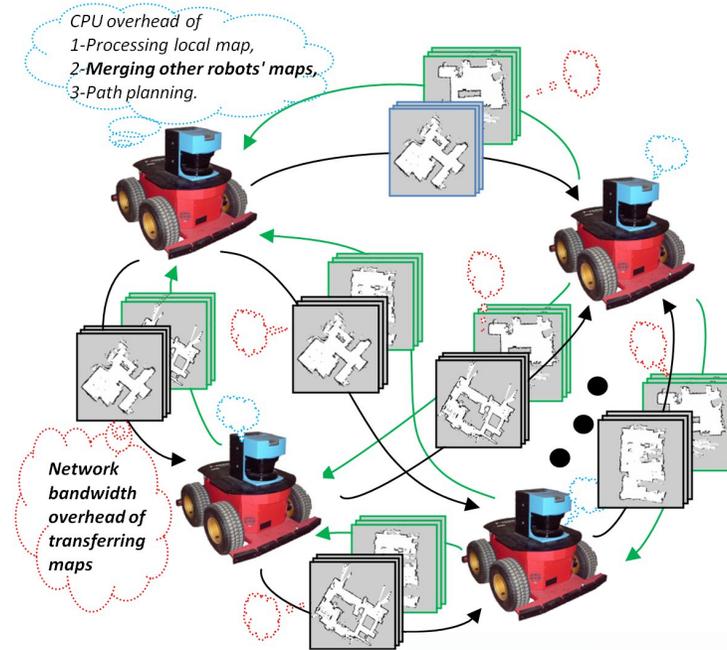
# Historique : Environnement de simulation multi-robots

- Infrastructure de benchmarking « réaliste »
  - ~ Middleware Robotique ROS
  - ~ Simulateur robotique open-source 3d (MORSE, Gazebo)
  - ~ CPU, mémoire, bande passante, ...
- Code identique en simulation et sur les robots réels

<https://www.youtube.com/watch?v=oNrvuaASwrU>



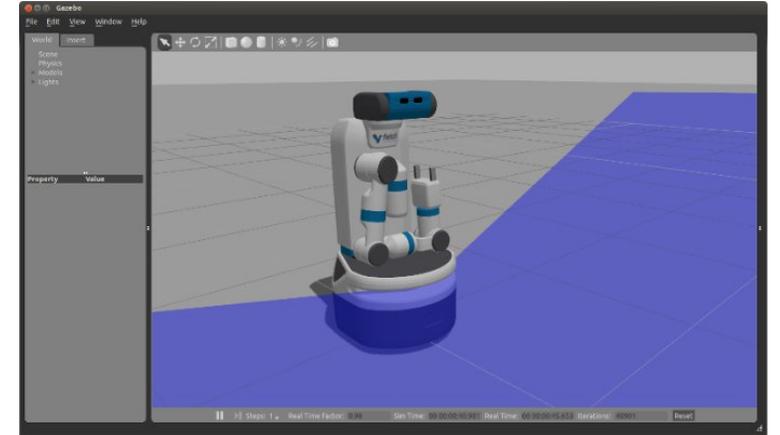
- Comparaison d'algorithmes de SLAM
- PolySLAM basé sur le format PolyMap
  - ~ Précis
  - ~ Compact
  - ~ Efficace pour la navigation (graphes)
  - ~ Coût en calculs



<http://shorturl.at/orsy0>

## Simulateur réaliste de drones aquatiques

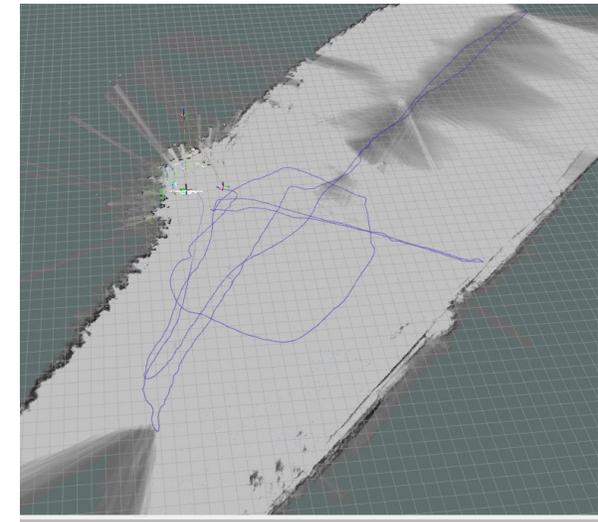
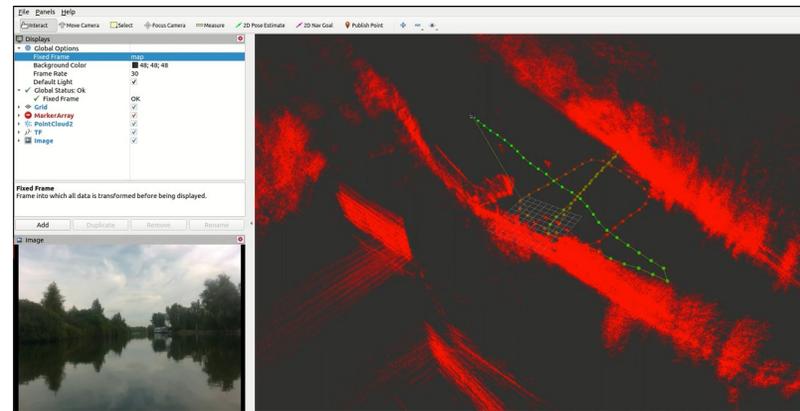
- VRX (<https://github.com/osrf/vrx>)
  - Simulateur 3d de robots marins basé sur Gazebo
  - Support : courants, vent, ...
  - Intégré au middleware ROS
  - Open-source



## Approches

- Comparaison d'algorithmes de SLAM
  - Différents capteurs (sans/avec GNSS)
  - Limites : modèles de bruit pour chaque capteur, ...
  - Performance ?
- Jeux de données « réels »
  - Difficulté : vérité terrain ? (GPS RTK)

Algorithmes	Capteurs utilisés			
	IMU	Caméra	Lidar 2D	Lidar 3D
Hector SLAM			X	
Gmapping			X	
Cartographer	X		X	X
LOAM				X
LIO-SAM	X			X
HDL	X			X
ORB SLAM2		X		
ORB SLAM3	X	X		
Kimera	X	X		





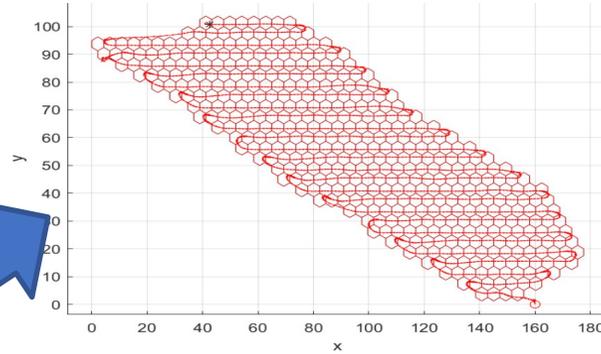
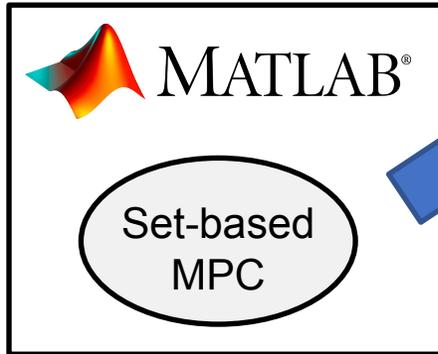
**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

## Drone de surface autonome



IMT Nord Europe  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

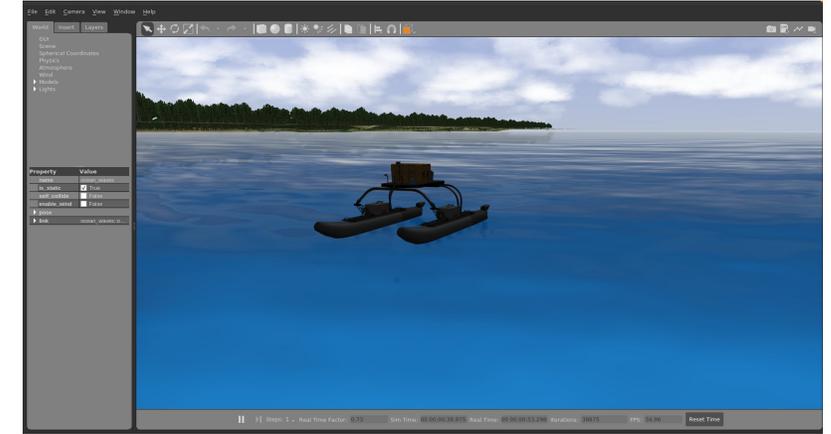
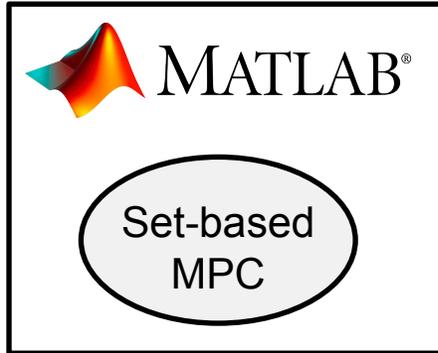
# Architecture de simulation





IMT Nord Europe  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

# Architecture de simulation

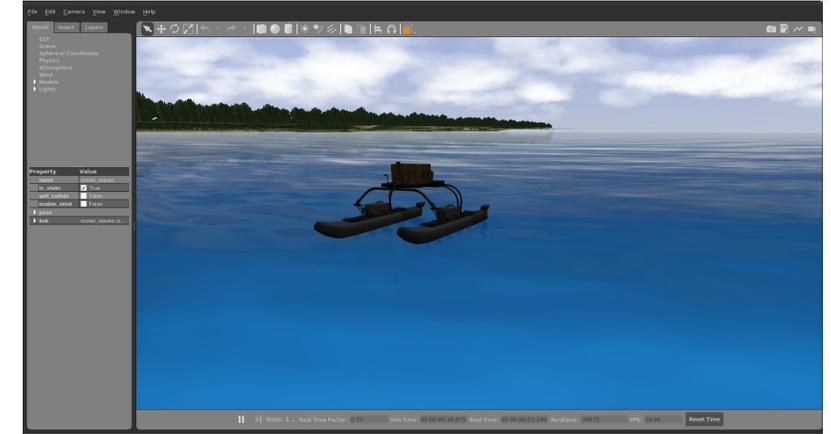
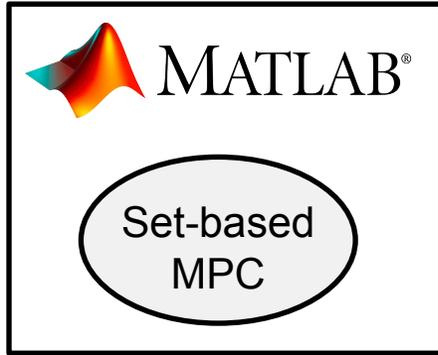


ROS

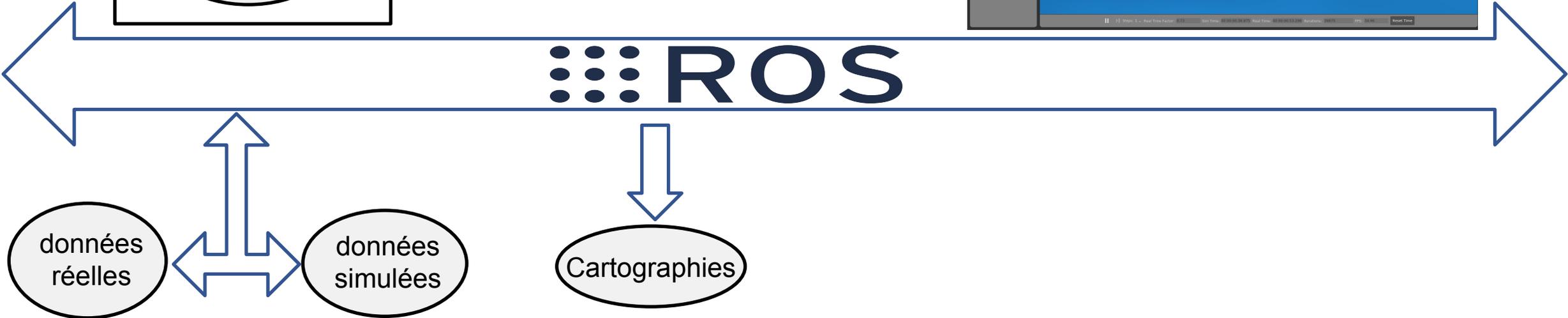


IMT Nord Europe  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

# Architecture de simulation

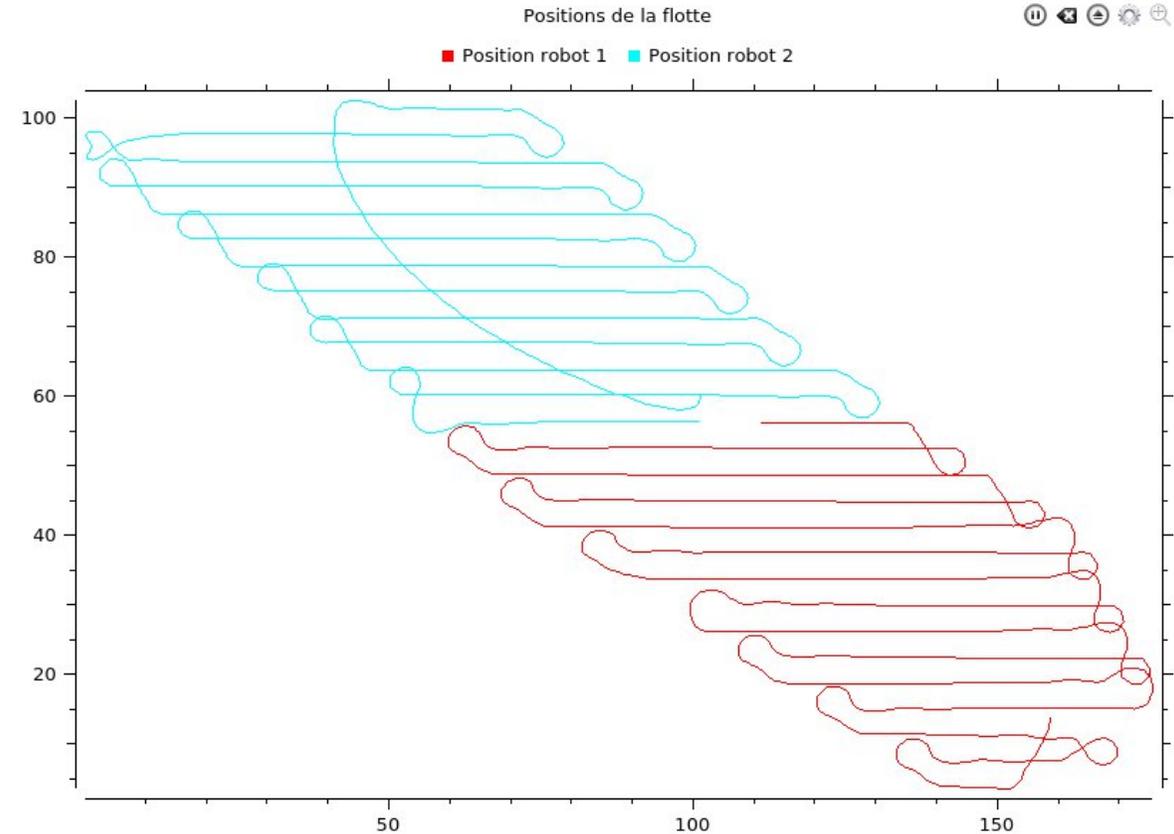


ROS



## Stratégies de contrôle et d'exploration

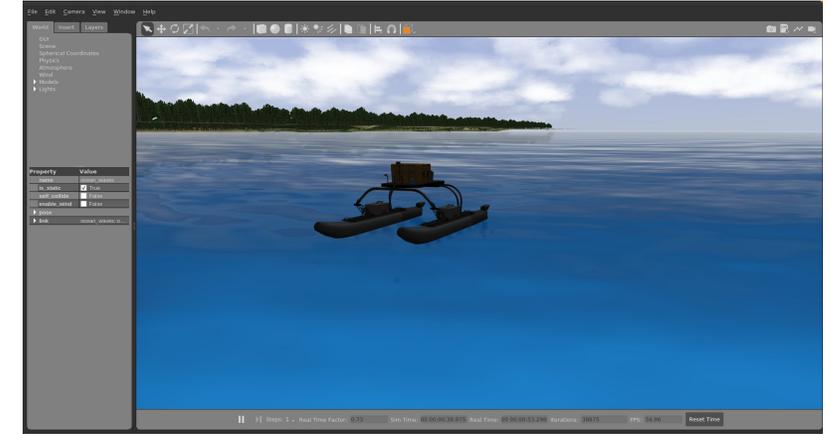
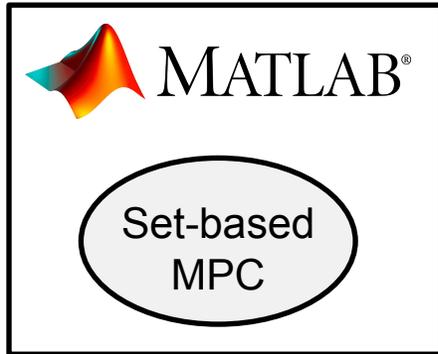
- Tests sur les approches de contrôle - Set-based MPC
- Intégration de perturbations – vents et courants
- Simulation de l'évolution des paramètres mesurés
- Définition de scénarios
  - Exploration
  - Patrouille
  - Détection de sources par remontée de gradient
  - Délimitation de zone
  - Coordination multi-drones
  - Intégration d'obstacles fixes et mobile



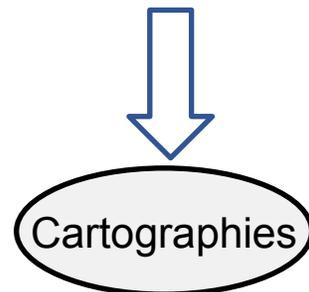
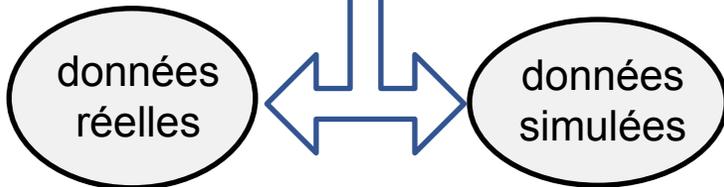


IMT Nord Europe  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

Vers l'autonomie 



 ROS





**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

## CONCLUSION

## Outils développés

- Architecture de simulation (Matlab, ROS, VRX)
- Définition et tests de nombreux scénarii
- Démarche de cartographie à partir de données réelles
- Outils à disposition
  - Localisation – GNSS, Lidar, Vision
  - Algorithmes de navigation
  - Algorithmes de coordination (SMA, MDP, ...)

## Perspectives

- Tests du MPC sur drones réels
- Cartographie multi-drones

**Vers des flottes de robots autonomes, robustes et flexibles pour l'amélioration de la collecte de données dans les réseaux hydrographiques**

Sébastien Ambellouis  
Noury Bouraqadi  
Eric Duviella  
Lucien Etienne  
Luc Fabresse  
Kokou Langueh  
Guillaume Lozenguez  
Lala Rajaoarisoa

Alejandro Anderson  
Rémi Porée  
Hugo Reubrecht

...



**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille

[www.imt-nord-europe.fr](http://www.imt-nord-europe.fr)

