

# Navigation et contrôle multi-robots pour l'inspection acoustique de structures métalliques [R&D]

Projet de fin d'étude de :  
**Brandon Alves**

Supervisé par :  
**Cédric Pradalier (GT Europe, CNRS), Olivier Simonin (INSA Lyon, CITI)**

INSA Lyon, Laboratoire CITI, équipe CHROMA (INSA & INRIA)

23 juin 2023

# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

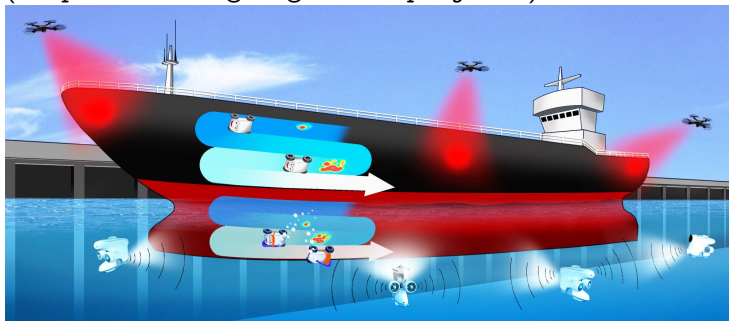
# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

# Introduction

## Contexte

- CITI, équipe CHROMA,
- GT Europe, thèse de master,
- Projet européen BugWright2  
(<https://www.bugwright2.eu/project/>).



# Introduction

## Définition du problème

- Inspection de structures métalliques
- Tomographie de la zone à inspecter
- Localiser des points de corrosion
- Ondes acoustiques (UGW)

## Problématique

Définir des stratégies de navigation multi-robots pour optimiser l'acquisition de données permettant de réaliser la tomographie des structures métalliques.

# Introduction

## Aperçu des contributions

- Développement de stratégies de navigation multi-robots pour l'inspection acoustique de structures métalliques.
- Optimisation de l'acquisition de données pour la réalisation de la tomographie.
- Résolution des problèmes de coordination et de synchronisation entre les robots.
- Implémentation des méthodes de navigation dans un environnement de simulation.

# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

# Étude bibliographique et état de l'art



Othmane-Latif Ouabi, Ayoub Ridani, Pascal Pomarede, Neil Zeghidour, Nico F. Declercq, Matthieu Geist, and Cédric Pradalier.

Combined grid and feature-based mapping of metal structures with ultrasonic guided waves.

In *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5056–5062, 2022.



Peter Huthwaite and Francesco Simonetti.

High-resolution guided wave tomography.

*Wave Motion*, 50(5) :979–993, 2013.



Georges Chahine, Pete Schroeffer, Othmane-Latif Ouabi, and Cédric Pradalier.

A magnetic crawler system for autonomous long-range inspection and maintenance on large structures.

*Sensors*, 22(9), 2022.



Marcelo Couto, Cid Souza, and Pedro De Rezende.

Strategies for optimal placement of surveillance cameras in art galleries.

*GraphiCon 2008 - International Conference on Computer Graphics and Vision, Proceedings*, 01 2008.



Ayoub Ridani, Othmane-Latif Ouabi, Nico F. Declercq, and Cédric Pradalier.

On-plate autonomous exploration for an inspection robot using ultrasonic guided waves.

In *2021 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, pages 1–6, 2021.



Muhammad Asif Arain, Erik Schaffernicht, Victor Hernandez Bennetts, and Achim J. Lilienthal.

The right direction to smell : Efficient sensor planning strategies for robot assisted gas tomography.

In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4275–4281, 2016.



Muhammad Asif Arain, Marcello Cirillo, Victor Hernandez Bennetts, Erik Schaffernicht, Marco Trincavelli, and Achim J. Lilienthal.

Efficient measurement planning for remote gas sensing with mobile robots.

In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3428–3434, 2015.



# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

# Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

# Propositions scientifiques et techniques

## Définitions préliminaires

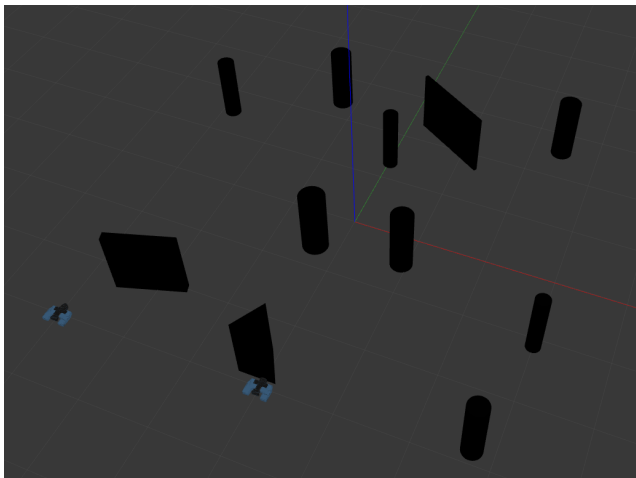
### Hypothèses

- Environnement :
  - espace 2D, borné et de taille connue,
  - obstacles localisés,
  - zones de corrosion non localisées.
- Robots :
  - robots à 2 roues,
  - pose  $(x, y, \theta)$  connue,
  - coût de rotation  $cr$  et coût de translation  $ct$  connus.
  - Nombre de robots  $\geq 2$ .
- Perception :
  - Robot est émetteur ou récepteur,
  - Émission et réception omnidirectionnelle d'ondes ultrasoniques ( $UGW$ ),
  - Si puissance de signal altérée, alors détection,
  - Détection parfaite et en temps réel,
  - Distance maximale d'émission et de réception  $d_{max}$ .

# Propositions scientifiques et techniques

## Définitions préliminaires

### Modélisation de l'environnement et des robots



### Structure de données

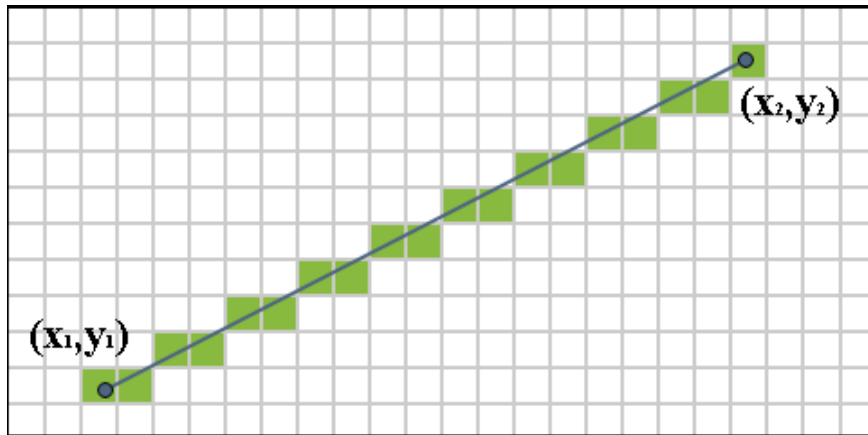
- Grille d'occupation :
  - inconnu,
  - vide,
  - occupé.

# Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

# Propositions scientifiques et techniques

Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie

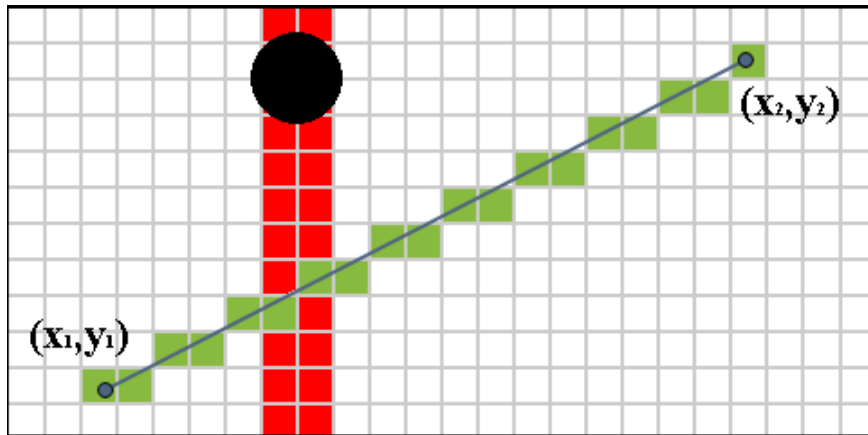






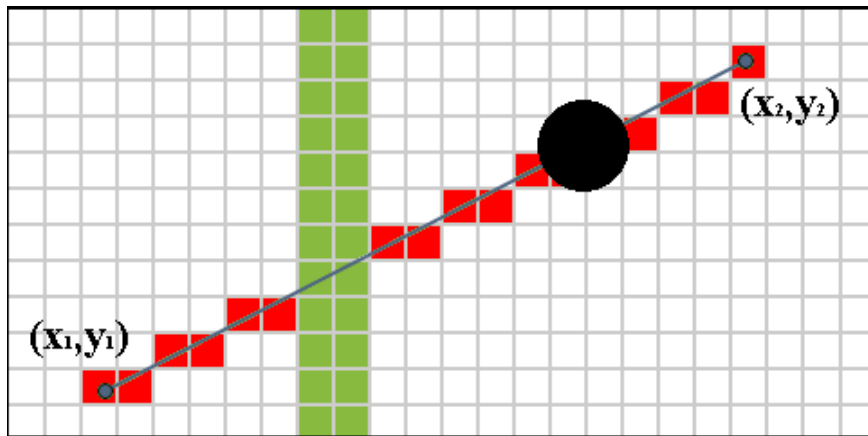
# Propositions scientifiques et techniques

Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie



# Propositions scientifiques et techniques

Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie



# Contents

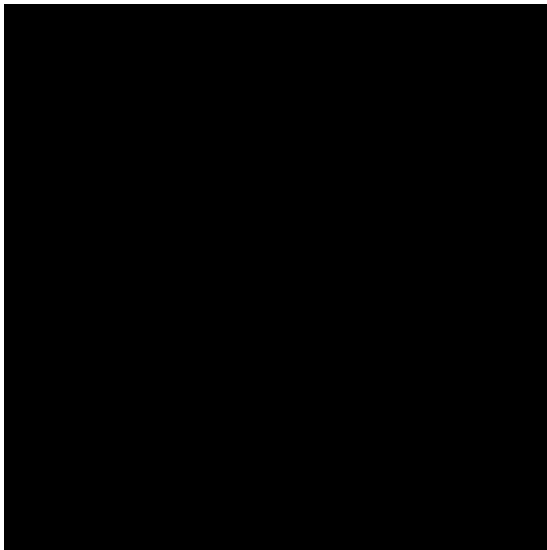
- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - **Stratégie de navigation *peinture au rouleau***
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

### Description

- Nombre de robots  $n \geq 2$ , séparés par une distance  $d < d_{max}$ ,
- Chaque robot se déplace en ligne droite,
- Les robots suivent une trajectoire parallèle,
- Les robots se déplacent de manière **simultanée**,
- Les robots se synchronisent régulièrement.

# Propositions scientifiques et techniques

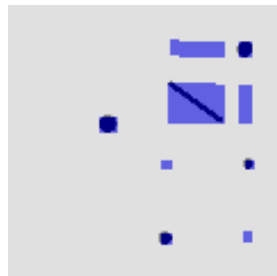
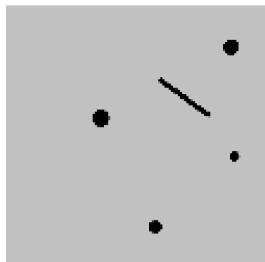
Stratégie de navigation *peinture au rouleau*



# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

## Cartographie résultante



score = 0.29

temps = 4 m 20 s

# Propositions scientifiques et techniques

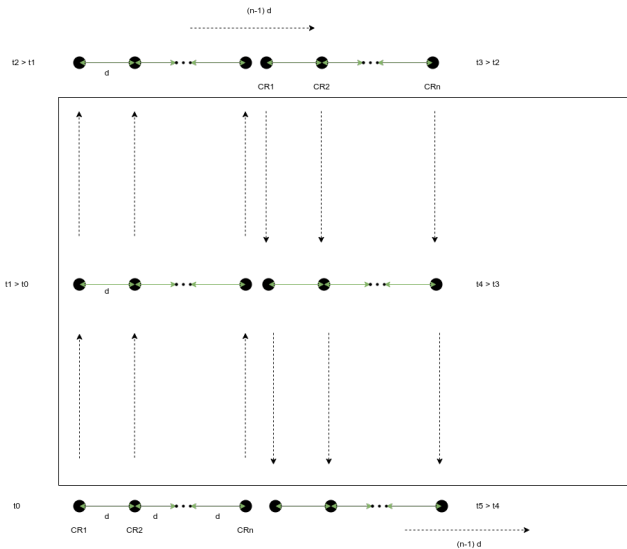
Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

## Implémentation

- Langage de programmation *Python, C++*,
- Bibliothèques *ROS, OpenCV*,
- Outil de simulation *Gazebo*,
- Outil de visualisation *Rviz*,
- Framework *ROS Task Manager*,
- Plugin UWB de l'équipe CHROMA.

# Propositions scientifiques et techniques

## Stratégie de navigation *peinture au rouleau*





# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

## Avantages

- Rapide.

## Inconvénients

- Approximation des enveloppes peu précises,
- Zones fantômes.

# Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - **Stratégie de navigation *ski nordique***
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

### Description

- Nombre de robots  $n \geq 2$ , séparés par une distance  $d < d_{max}$ ,
- Chaque robot se déplace en ligne droite,
- Les robots suivent une trajectoire parallèle,
- Les robots se déplacent de manière **alternée**,
- Les robots se synchronisent régulièrement.

# Propositions scientifiques et techniques

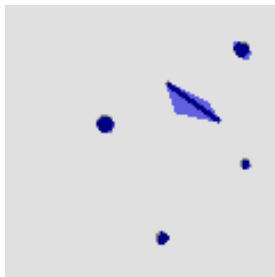
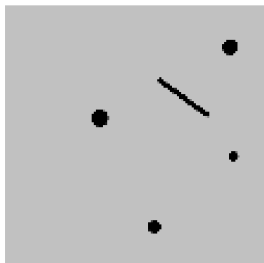
Stratégie de navigation *ski nordique*



# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*

## Cartographie résultante

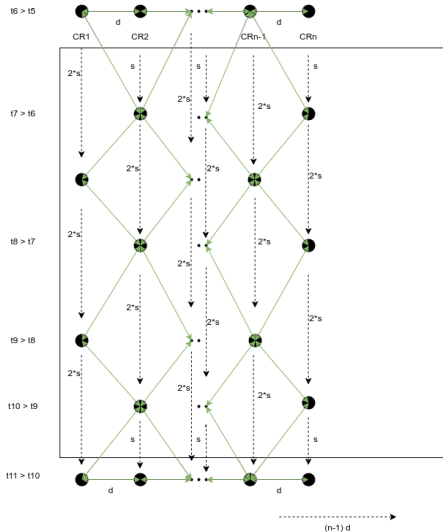
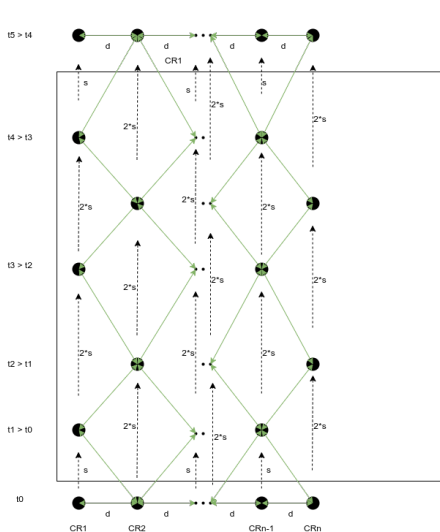


score = 0.63

temps = 16 m 31 s

# Propositions scientifiques et techniques

## Stratégie de navigation *ski nordique*



# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *ski nordique*

## Avantages (comparés à *peinture au rouleau*)

- Approximation des enveloppes plus précises,

## Inconvénients comparés à *peinture au rouleau*

- Plus lent,
- Zones fantômes.

# Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives



# Propositions scientifiques et techniques

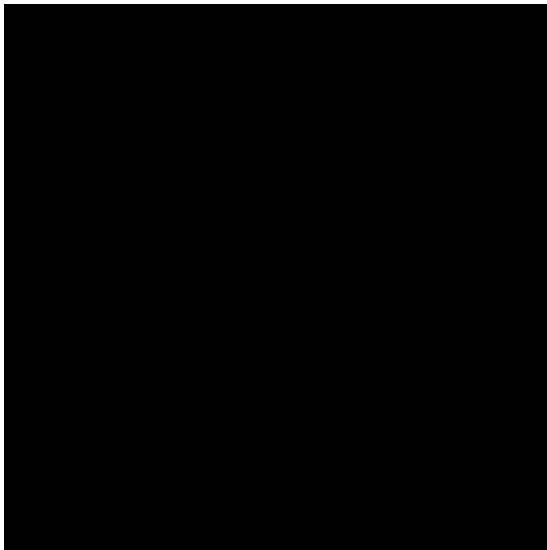
Stratégie de navigation *investigation polygonale*

## Description

- Utilise la cartographie résultante d'une des deux stratégies précédentes,
- $k \geq 1$  équipes de  $n \geq 2$  robots,
- Les robots d'une même équipe se placent sur des sommets consécutifs d'un polygone convexe  $P$  à  $p$  sommets,
- Les robots se déplacent, les uns après les autres, en suivant le chemin défini par le périmètre du polygone  $P$ .
- L'algorithme se termine lorsque les sommets initialement occupés par les robots sont à nouveau occupés.

# Propositions scientifiques et techniques

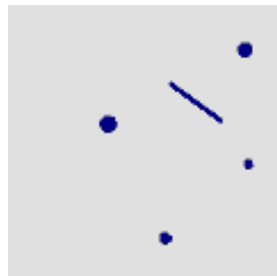
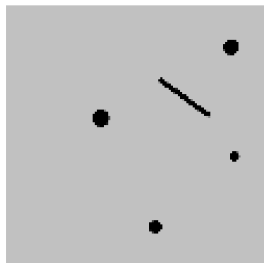
Stratégie de navigation *investigation polygonale*



# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

## Cartographie résultante

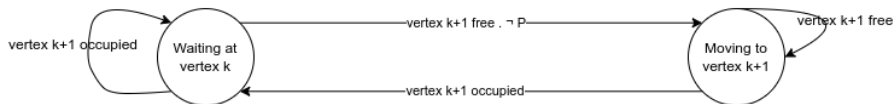


score = 0.86

temps = 9 m 31 s (13 m 51 s)

# Propositions scientifiques et techniques

## Stratégie de navigation *investigation polygonale*



$P$  = True if one robot is already moving, in other words, if  $\exists k \mid k-1 \text{ free \& } k \text{ occupied \& } k+1 \text{ free}$

$P$  = False otherwise

# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

- ① Extraction des zones de corrosion,
- ② Détermination de l'ordre d'investigation des zones de corrosion.

## Extraction des zones de corrosion

- Conversion de la grille d'occupation en graphe,
- Algorithme d'extraction de composantes fortement connexes,

## Détermination de l'ordre d'investigation des zones de corrosion

- Algorithme TSP ( $k = 1$ )
- Algorithme mTSP ( $k > 1$ )

## Implémentation

- Bibliothèque *OpenCV* pour l'extraction des zones de corrosion,
- Bibliothèque *Gurobi* pour le TSP,
- MDMTSPV\_GA - Multiple Depot Multiple Traveling Salesmen Problem solved by Genetic Algorithm, Elad Kivelevitch, pour le mTSP.

# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *investigation polygonale*

## Avantages

- Approximation des enveloppes précise (proportionnellement au nombre de sommet du polygone)
- Permet de rapidement éliminer les zones fantômes.

## Inconvénients

- Lent (proportionnellement au nombre de sommets du polygone, inversement proportionnel au nombre de robots, proportionnellement au nombre de zones de corrosion),

# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives



# Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

Kappa de Cohen :

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

avec :

- $p_o$  : précision observée,
- $p_e$  : précision aléatoire,
- $\kappa$  : mesure une classification binaire, en la comparant à une classification aléatoire.

$\kappa$	Interprétation
$< 0$	Désaccord
0.00 – 0.20	Accord très faible
0.21 – 0.40	Accord faible
0.41 – 0.60	Accord modéré
0.61 – 0.80	Accord fort
0.81 – 1.00	Accord presque parfait

# Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - **Expérimentations**
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

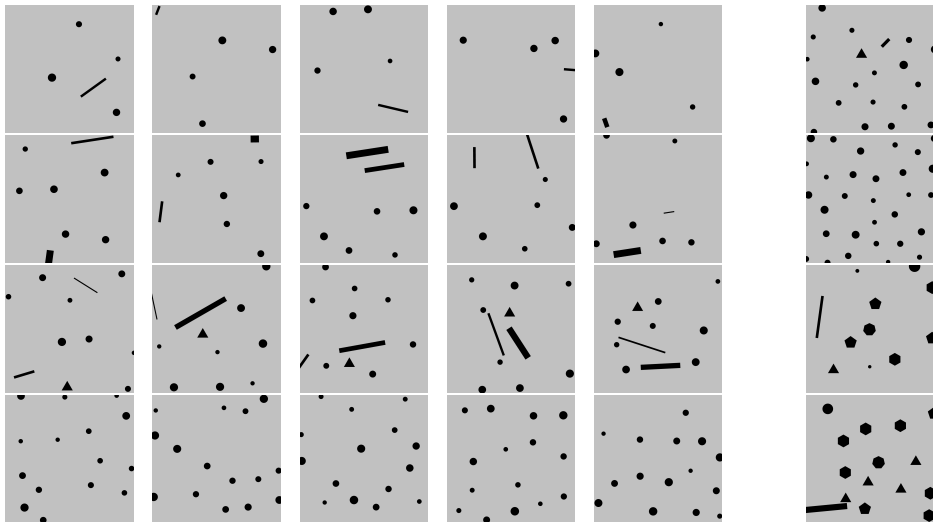
# Expérimentations, validations et évaluations

## Expérimentations

Stratégie	Paramètre	Valeurs
<i>peinture au rouleau</i>	$n$	2
	$d$	1, 2, 3, 6 (mètres)
<i>ski nordique</i>	$n$	2
	$d$	1, 2, 3, 6 (mètres)
	$s$	1, 2, 3, 6 (mètres)
<i>investigation polygonale</i>	stratégie initiale	<i>peinture au rouleau</i>
	$d$	1, 2, 3, 6 (mètres)
	$n$	2, 4
	$k$	1, 2
	$p$	4, 6

# Expérimentations, validations et évaluations

## Expérimentations

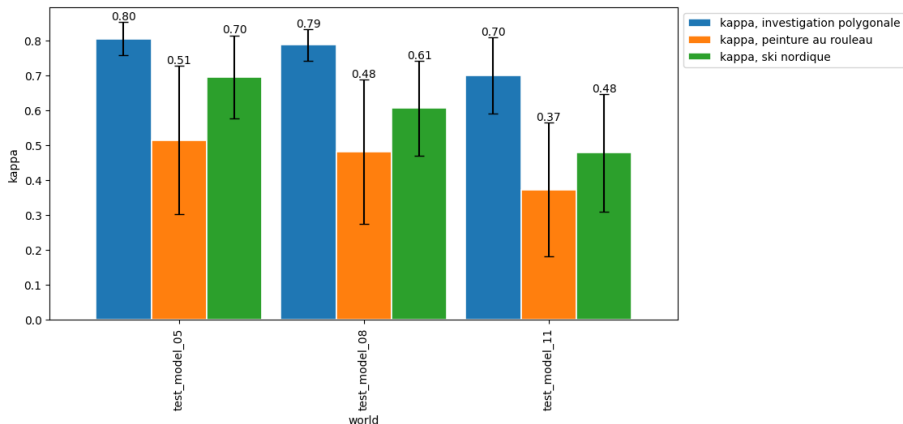


# Contents

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

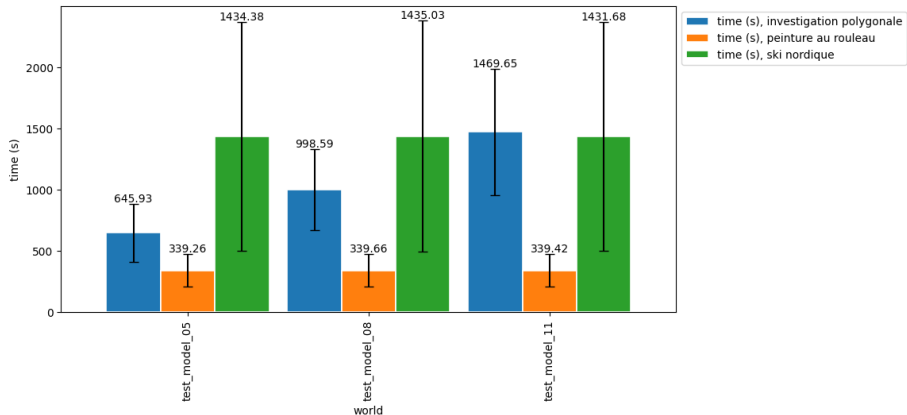
# Expérimentations, validations et évaluations

## Comparaison et analyse des résultats



# Expérimentations, validations et évaluations

## Comparaison et analyse des résultats





# Expérimentations, validations et évaluations

## Comparaison et analyse des résultats

	Gain en performance <i>investigation polygonale</i>	
comparé à	$\kappa$ de Cohen	Temps d'exécution
<i>peinture au rouleau</i>	+68.39%	+305.80%
<i>ski nordique</i>	+27.92%	-3.92%

# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

- Domaine de la recherche,
- Recherches bibliographiques,
- Robotique,
- Nouveaux outils techniques,
- Rédaction du rapport PFE.

# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 Étude bibliographique et état de l'art
- 3 Propositions scientifiques et techniques
  - Définitions préliminaires
  - Mise à jour de la grille d'occupation pour la cartographie
  - Stratégie de navigation *peinture au rouleau*
  - Stratégie de navigation *ski nordique*
  - Stratégie de navigation *investigation polygonale*
- 4 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 5 Bilan personnel
- 6 Conclusion et perspectives

# Conclusion et perspectives

## Conclusion

- Développement et évaluation de 3 stratégies de navigation pour la tomographie,
- État de l'art pauvre dans ce domaine
- Mise en place d'un environnement de simulation
- Mise en place d'un protocole d'évaluation avec métriques d'évaluation et scénarios de test
- Collecte de données et analyses statistiques

# Conclusion et perspectives

## Perspectives

- Gestion des collisions
- Simulation avec  $k > 1$  équipes et  $n > 2$  robots
- Déploiement sur des systèmes réels