

# 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)

21 juin 2023

# Table des matières

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Table des matières

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

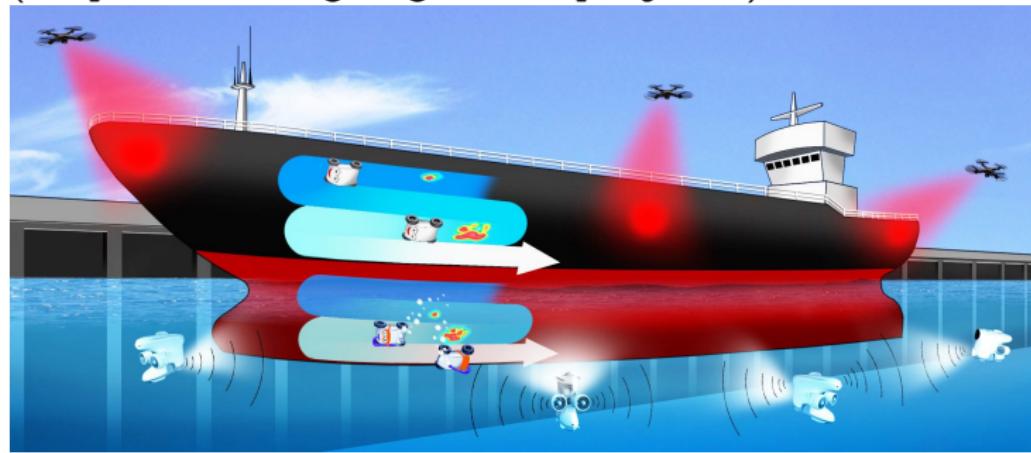
## 6 Bilan personnel

## 7 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 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

Un peu léger

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

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

2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)  
2016

# Table des matières

1 Introduction

2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

6 Bilan personnel

7 Conclusion et perspectives

# Contents

1 Introduction

2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

6 Bilan personnel

7 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

### Structure de données

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

# Contents

1 Introduction

2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation

- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation

- Expérimentations

- Comparaison et analyse des résultats

6 Bilan personnel

7 Conclusion et perspectives

# Propositions scientifiques et techniques

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

**Data:**  $P_1 \in \mathbb{R}^2$ ,  $P_2 \in \mathbb{R}^2$ ,  $pw \in \mathbb{R}$ ,  $threshold \in \mathbb{R}$ ,  $G : I \times w \rightarrow \{\text{UNKNOWN}, \text{EMPTY}, \text{OCCUPIED}\}$ ,  $I \in \mathbb{N}$ ,  $w \in \mathbb{N}$

with  $P_1$  and  $P_2$  the two points to connect,  $pw$  the power of the UGW,  $threshold$  the threshold above which the power of the UGW is considered undistributed and  $G$  the grid to update.

**Result:** The updated grid.

```
1  $p_0 \leftarrow \text{from\_position\_to\_grid\_coordinate}(P_1)$ 
2  $p_1 \leftarrow \text{from\_position\_to\_grid\_coordinate}(P_2)$ 
3 if  $\text{is\_out\_of\_grid}(p_0)$  or  $\text{is\_out\_of\_grid}(p_1)$  then
4   | return
5 end
6  $dx \leftarrow p_1.x - p_0.x$ 
7  $dy \leftarrow p_1.y - p_0.y$ 
8  $sx \leftarrow \text{sign}(dx)$ 
9  $sy \leftarrow \text{sign}(dy)$ 
10  $err = dx - dy$ 
11 while  $p_0 \neq p_1$  do
12   | if  $pwd \leq threshold$  and  $G(p_0) = \text{UNKNOWN}$  then
13     |   |  $G(p_0) \leftarrow \text{OCCUPIED}$ 
14   | end
15   | else if  $pwd > threshold$  then
16     |   |  $G(p_0) \leftarrow \text{EMPTY}$ 
17   | end
18   |  $e2 \leftarrow 2 \times err$ 
19   | if  $e2 > -dy$  then
20     |   |  $err \leftarrow err - dy$ 
21     |   |  $p_0.x \leftarrow p_0.x + sx$ 
22   | end
23   | if  $e2 < dx$  then
24     |   |  $err \leftarrow err + dx$ 
25     |   |  $p_0.y \leftarrow p_0.y + sy$ 
26   | end
27 end
```

Un schéma serait plus adapté

# Contents

1 Introduction

2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

6 Bilan personnel

7 Conclusion et perspectives

# Propositions scientifiques et techniques

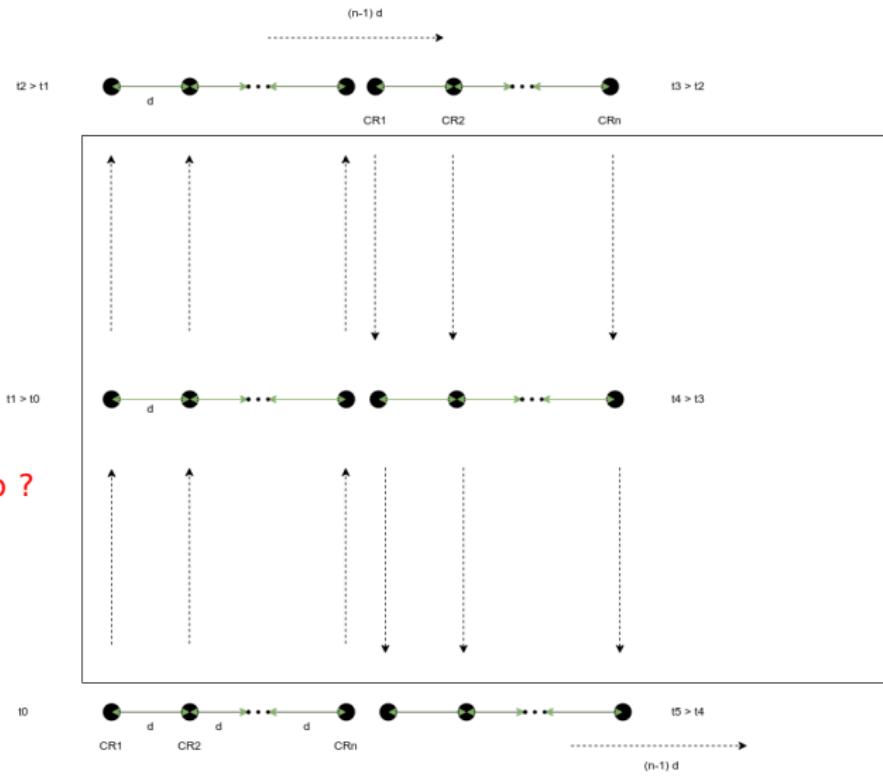
Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

## 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*



Vidéo ?

# Propositions scientifiques et techniques

Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

## Avantages

- Rapide.

## Inconvénients

- Approximation des enveloppes peu précises,
- Zones fantômes.

A définir, démontrer

# Contents

1 Introduction

2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

6 Bilan personnel

7 Conclusion et perspectives

# Propositions scientifiques et techniques

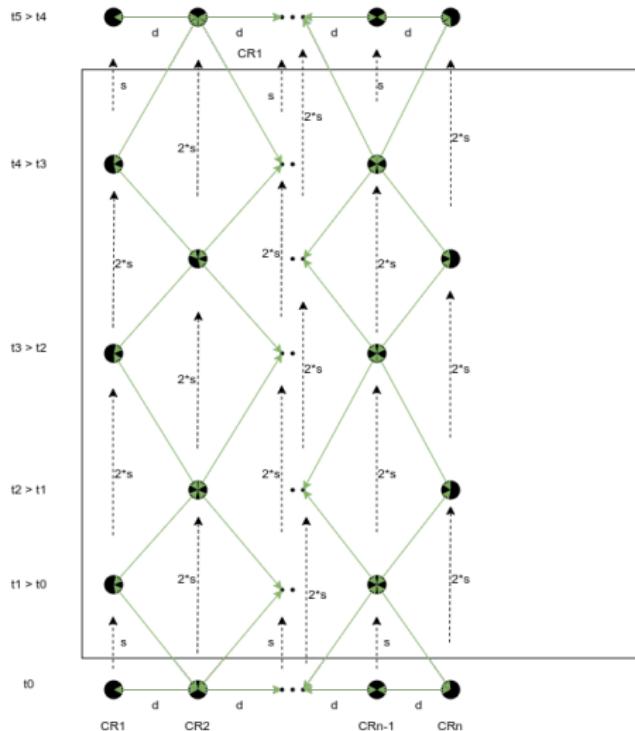
## Stratégie de navigation *ski nordique*

### 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

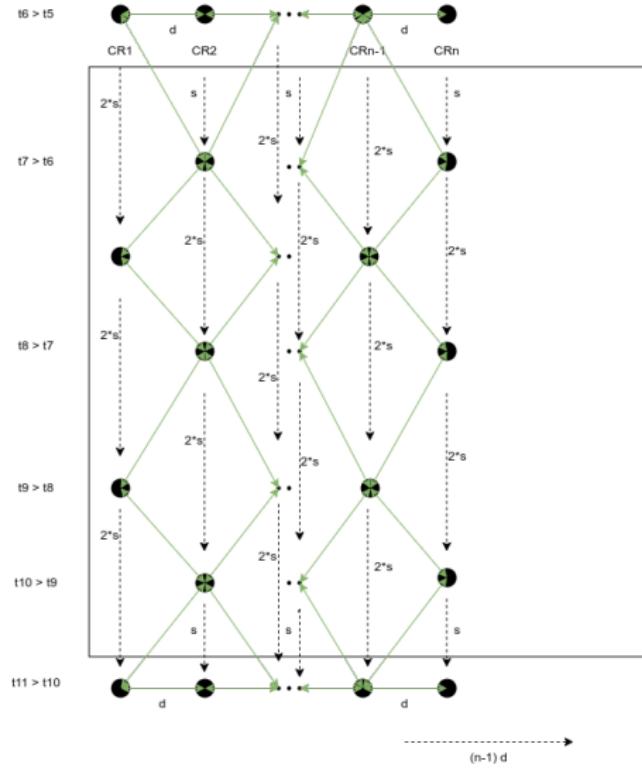
## Stratégie de navigation *ski nordique*



# Propositions scientifiques et techniques

## Stratégie de navigation *ski nordique*

Vidéo,  
animation ?



# 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 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

6 Bilan personnel

7 Conclusion et perspectives

# Propositions scientifiques et techniques

## Stratégie de navigation *investigation polygonale*

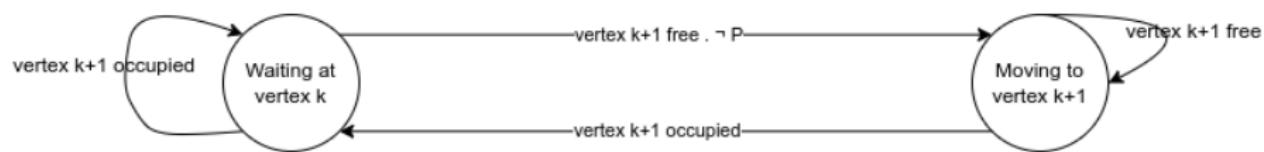
Explicitre que cela vient APRES la definition de zone candidate par une des autres methodes

### Description

- $k \geq 1$  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*



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

$P$  = False otherwise

A associer à une animation.

# 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 SCC,  
SCC non défini. Sectionner des Cables Continus ?

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

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

# 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 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Contents

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Implémentations des algorithmes

## Environnement de simulation

- Langage de programmation *Python, C++*,
- Bibliothèques *ROS, OpenCV, Gurobi*,
- Outil de simulation *Gazebo*,
- Outil de visualisation *Rviz*,
- Framework *ROS Task Manager*.

Ceci devrait arriver beaucoup plus tôt pour pouvoir illustrer les différentes méthodes.

# Contents

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- **Implémentations des algorithmes de navigation**

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Implémentations des algorithmes de navigation

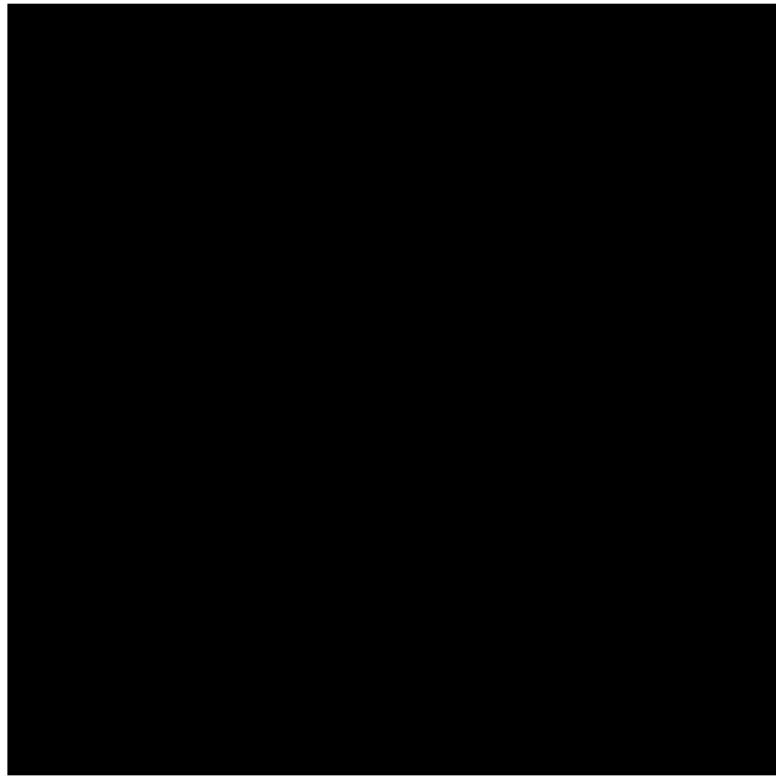
Stratégie de navigation *peinture au rouleau*

Une vidéo je suppose.  
Elle doit venir avant, quand tu définis l'algo



# Implémentations des algorithmes de navigation

## Stratégie de navigation *ski nordique*



# Implémentations des algorithmes de navigation

## Stratégie de navigation *investigation polygonale*

ibidem



# Table des matières

- 1 Introduction
- 2 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 Implémentations des algorithmes
  - Environnement de simulation
  - Implémentations des algorithmes de navigation
- 5 Expérimentations, validations et évaluations
  - Métrique d'évaluation
  - Expérimentations
  - Comparaison et analyse des résultats
- 6 Bilan personnel
- 7 Conclusion et perspectives

# Contents

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Expérimentations, validations et évaluations

## Métrique d'évaluation

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 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- **Expérimentations**
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Expérimentations, validations et évaluations

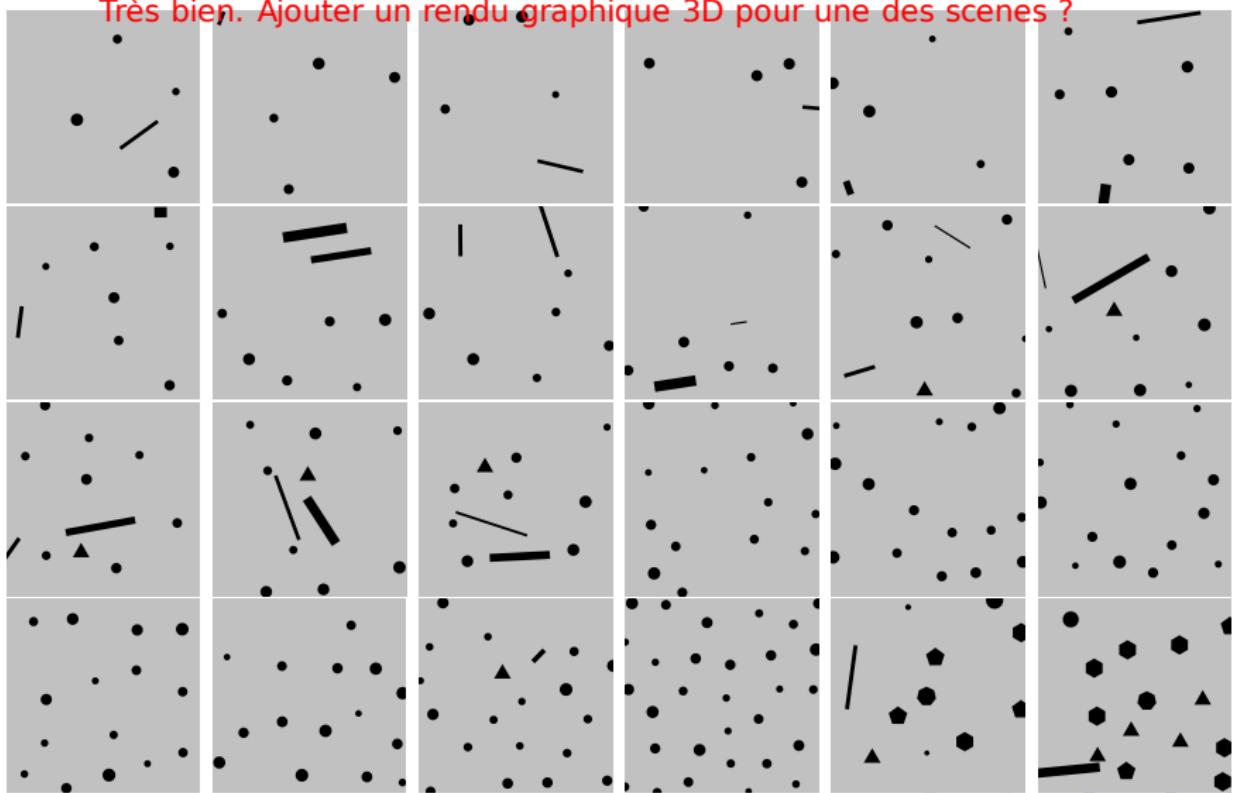
## Expérimentations

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

Très bien. Ajouter un rendu graphique 3D pour une des scènes ?



# Contents

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

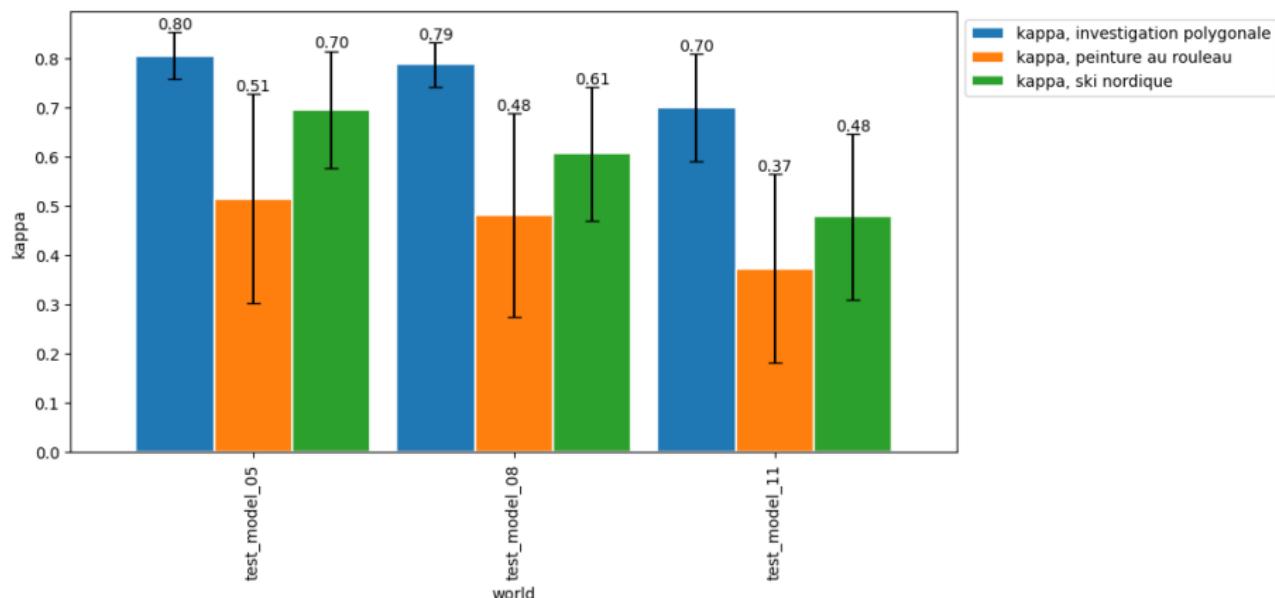
- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

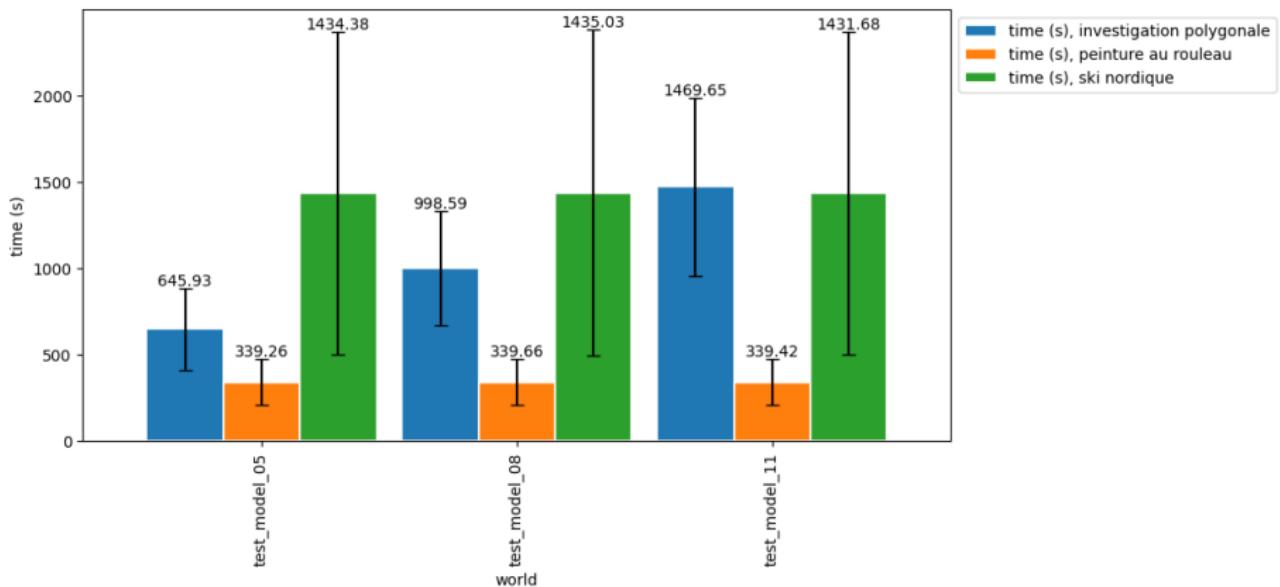
# Expérimentations, validations et évaluations

## Comparaison et analyse des résultats



# Expérimentations, validations et évaluations

## Comparaison et analyse des résultats



# Table des matières

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Bilan personnel

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

# Table des matières

## 1 Introduction

## 2 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 Implémentations des algorithmes

- Environnement de simulation
- Implémentations des algorithmes de navigation

## 5 Expérimentations, validations et évaluations

- Métrique d'évaluation
- Expérimentations
- Comparaison et analyse des résultats

## 6 Bilan personnel

## 7 Conclusion et perspectives

# Conclusion et perspectives

## Conclusion

Ce n'est pas une conclusion, c'est un résultat.

	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%

# Conclusion et perspectives

## Perspectives

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