



BETTER SHIPS, BLUE OCEANS

# Planification de trajets dans des mers incertaines

Gaspard Ducamp

## 1. Présentation de MARIN

- 1) Quelques chiffres
- 2) Ses outils
- 3) Ses ambitions pour 2025

## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

- 1) Présentation du projet
- 2) Prérequis et objectifs
- 3) Une approche basée sur des réseaux Bayésiens
- 4) Limitations et futurs développements

## 1. Présentation de MARIN

### 1) Quelques chiffres

- 2) Ses outils
- 3) Ses ambitions pour 2025

## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

- 1) Présentation du projet
- 2) Prérequis et objectifs
- 3) Une approche basée sur des réseaux Bayésiens
- 4) Limitations et futurs développements

## NSMB

sector initiative

## 1932

> 90 years of experience



active in 39 countries



Wageningen, Ede, Houston,  
Chesapeake



innovative & independent



industry & government



civil & defense



concept to operations



450+ colleagues



€ 60 M turnover



70% commercial, 30%  
funded



JIPs & networks

# MARIN Wageningen

Seakeeping & Manoeuvring Basin

Deep Water Basin

Shallow Water Basin

The Atmosphere

Concept Basin

Offshore Basin

Full-mission Bridge Simulators

Zero Emission Lab  
(including Cavitation Tunnel)

Seven Oceans Simulation centre  
(under construction)

High Performance Computing



## 1. Présentation de MARIN

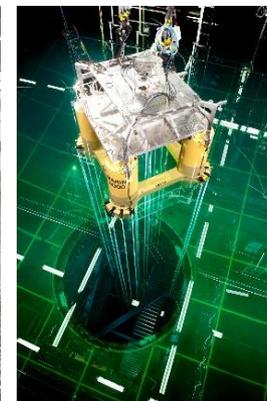
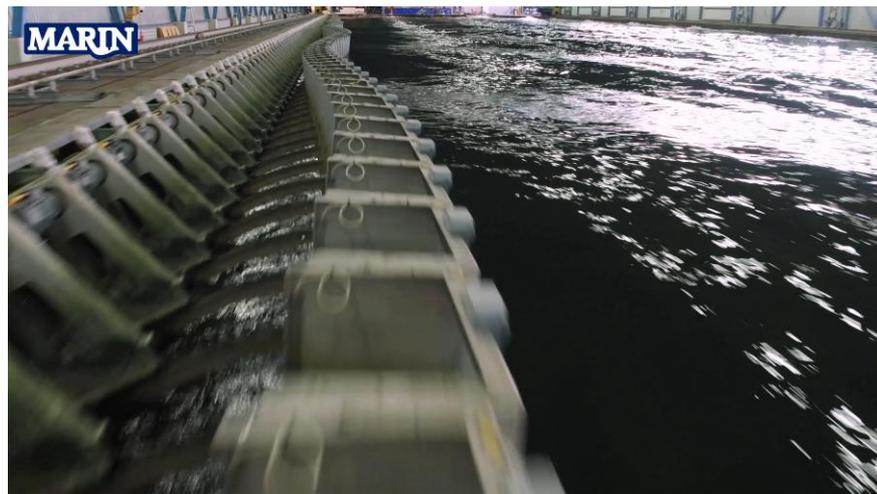
- 1) Quelques chiffres
- 2) **Ses outils**
- 3) Ses ambitions pour 2025

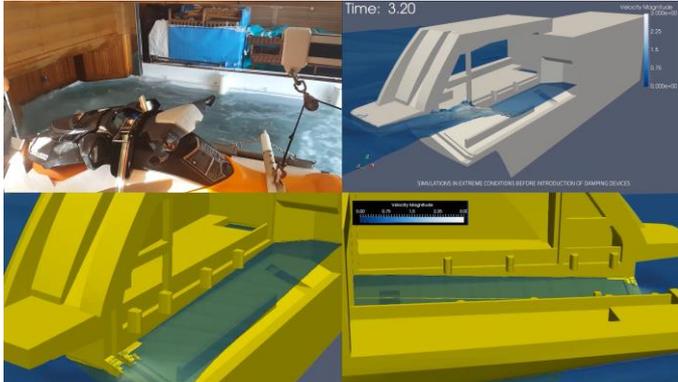
## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

- 1) Présentation du projet
- 2) Prérequis et objectifs
- 3) Une approche basée sur des réseaux Bayésiens
- 4) Limitations et futurs développements

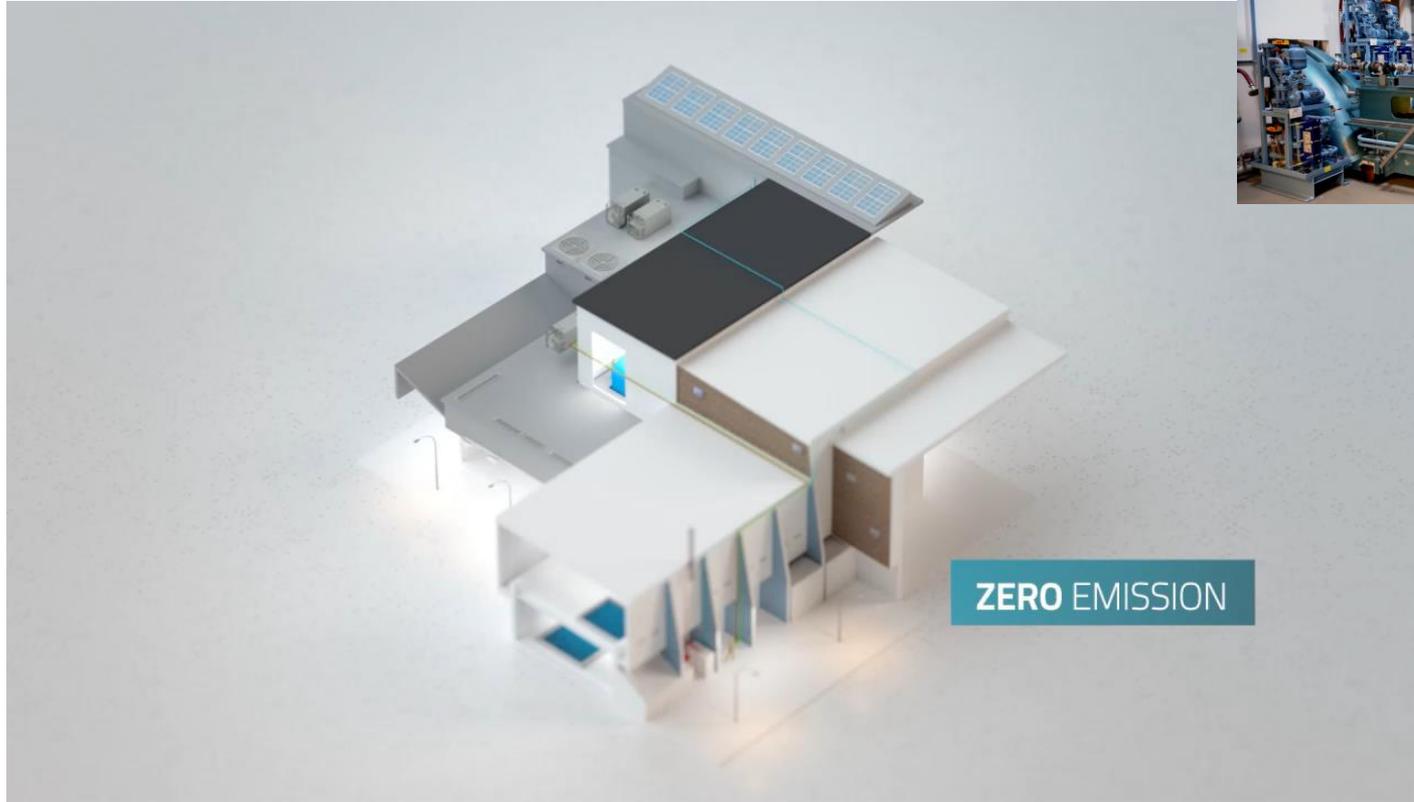
6 bassins expérimentaux offrant une variété de conditions:

- Profondeur de l'eau variable
- Générateurs de vagues
- Plage artificielles
- Dépressurisable
- Turbines



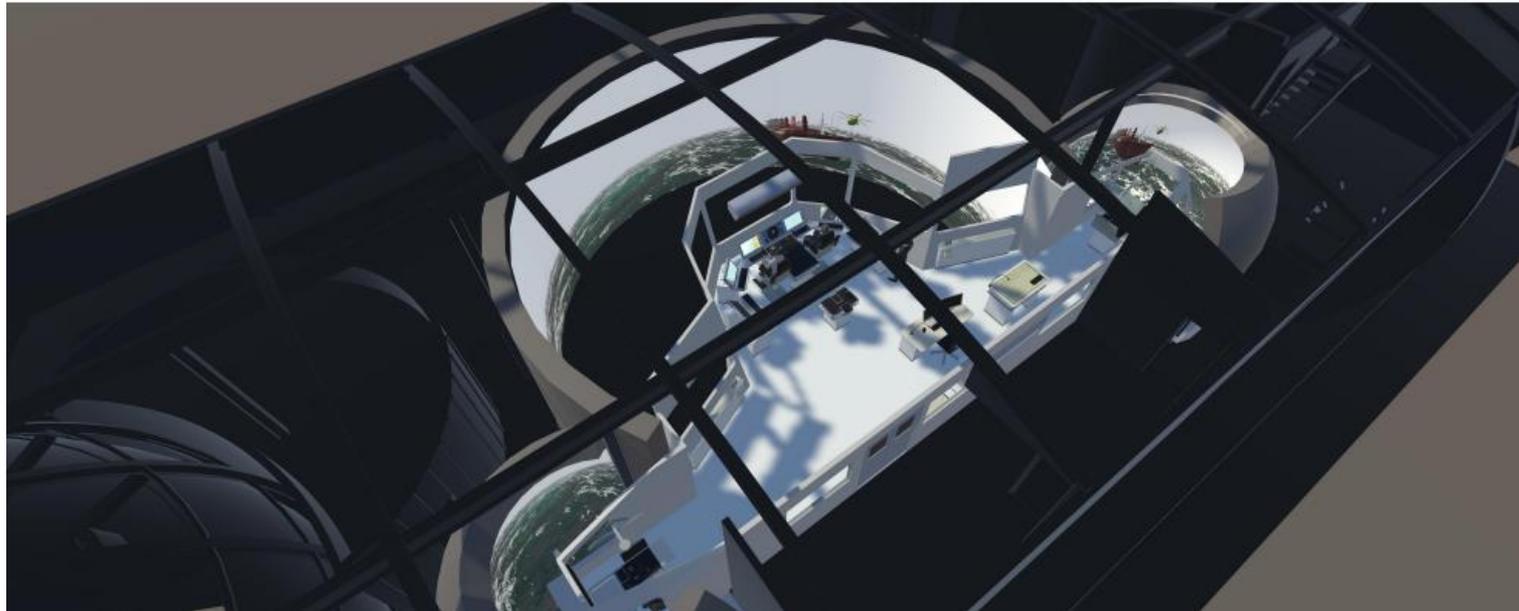
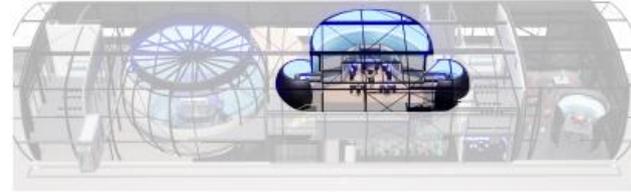


# Zero Emission Lab (ZEL)



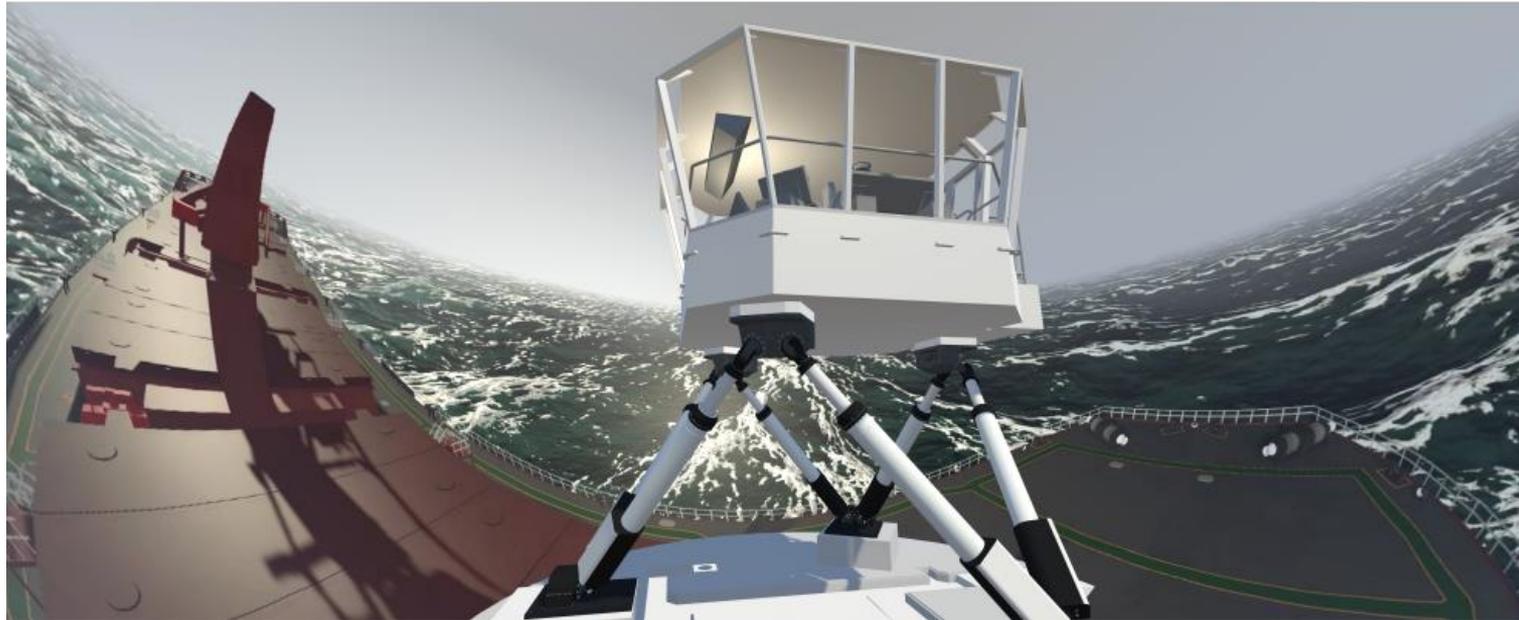
## Full Mission Bridge

A 16 m wide bridge with a forward or backward view on a cylindrical screen (240 degrees horizontally and 42 degrees vertically). Both bridge wings have 6 m diameter domes to allow forward, backward, downward and upward views during port and other complex operations.



## Large Motion Simulator

A six degrees of freedom motion-based bridge of 4 x 5 m on a hexapod with a payload of 14,000 kg and 360 degrees projection in a large spherical dome with a diameter of 16 m.



## Vessel Traffic Management / Shore Control Centre

Multi-purpose and flexible control room with projection on three walls to simulate control or command centres on board or ashore, coupled to the other simulators and the MX Lab.

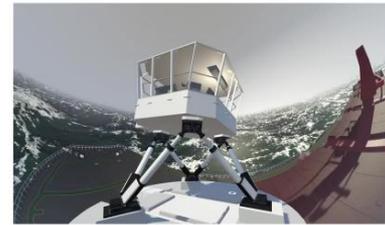




- Simulations en temps réel
- CFD



- Conception et test de modèles



- Simulations



- Analyse des performances activité

## 1. Présentation de MARIN

- 1) Quelques chiffres
- 2) Ses outils
- 3) **Ses ambitions pour 2025**

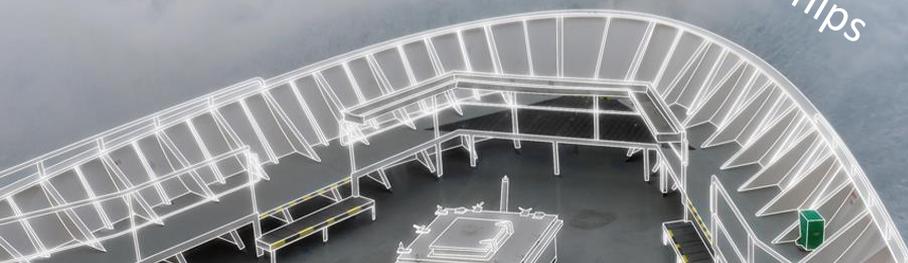
## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

- 1) Présentation du projet
- 2) Prérequis et objectifs
- 3) Une approche basée sur des réseaux Bayésiens
- 4) Limitations et futurs développements

# Beyond the horizon



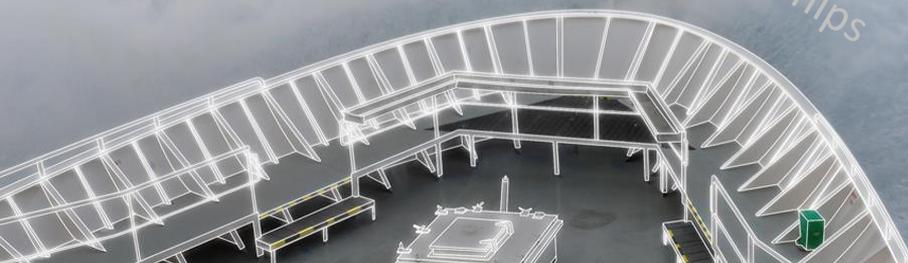
- Develop solutions for zero-emission ships
- Accelerate sustainability and climate adaptation at sea
- Aim for zero maritime accidents
- Focus solutions on operations and crew
- Apply maritime AI, with the sea as digital lab
- Stimulate (open) innovation
- Share knowledge



# Beyond the horizon



- Develop solutions for zero-emission ships
- Accelerate sustainability and climate adaptation at sea
- Aim for zero maritime accidents
- Focus solutions on operations and crew
- Apply maritime AI, with the sea as digital lab
- Stimulate (open) innovation
- Share knowledge



## 1. Présentation de MARIN

- 1) Quelques chiffres
- 2) Ses outils
- 3) Ses ambitions pour 2025

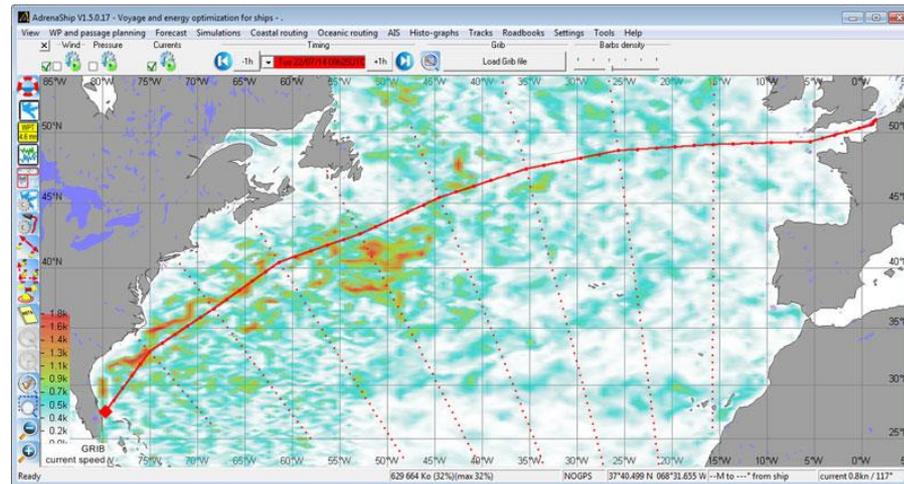
## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

- 1) **Présentation du projet**
- 2) Prérequis et objectifs
- 3) Une approche basée sur des réseaux Bayésiens
- 4) Limitations et futurs développements

Les approches actuelles permettent de trouver les itinéraires d'un point A à un point B qui minimisent:

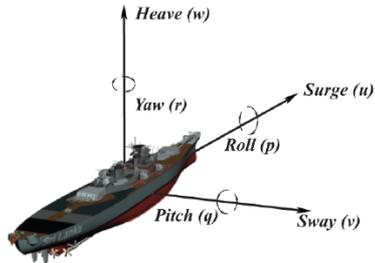
- La consommation de carburant
- La durée du trajet
- La distance parcourue
- La détectabilité du navire

Basés sur des modèles prédisant les courants rencontrés ou la couverture nuageuse.



Peut-on prendre en considération une ou plusieurs prévisions de l'état de la mer pour prédire les mouvements que le navire aura le long d'un trajet?

- Minimiser l'inconfort de l'équipage en évitant les états de mer induisant un roulis ou un tangage extrêmes.
- Permettre aux hélicoptères d'atterrir/décoller (plus) sûrement du navire



<https://www.youtube.com/watch?v=bC2XIGMI2kM>

## 1. Présentation de MARIN

- 1) Quelques chiffres
- 2) Ses outils
- 3) Ses ambitions pour 2025

## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

- 1) Présentation du projet
- 2) **Prérequis et objectifs**
- 3) Une approche basée sur des réseaux Bayésiens
- 4) Limitations et futurs développements

- ✓ De données liant mouvements d'un navire et état de la mer
- ✓ De prédictions sur l'état de la mer
- ✓ D'un algorithme de planification de trajectoires

- À partir de mesures effectuées à bord d'un navire
- À partir de données simulées ou issues de CFD



Avantages : mesures fiables

Inconvénients : incomplètes, mouvements spécifiques aux navires

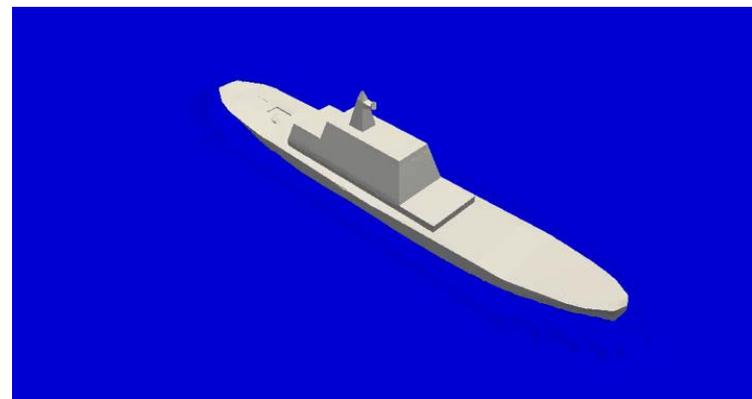
- À partir de mesures effectuées à bord d'un navire
- À partir de données simulées ou issues de CFD



Avantages : mesures fiables

Inconvénients : incomplètes, mouvements spécifiques aux navires

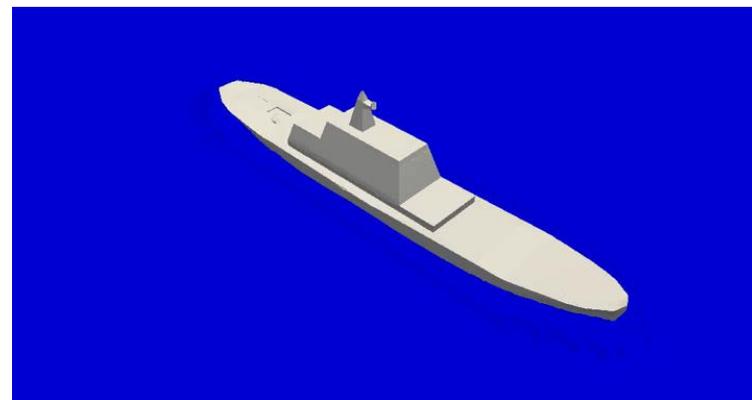
- À partir de mesures effectuées à bord d'un navire
- À partir de données simulées ou issues de CFD



Avantages : facilement itérable

Inconvénients : qualité des données et coûts de génération variables

- À partir de mesures effectuées à bord d'un navire
- À partir de données simulées ou issues de CFD



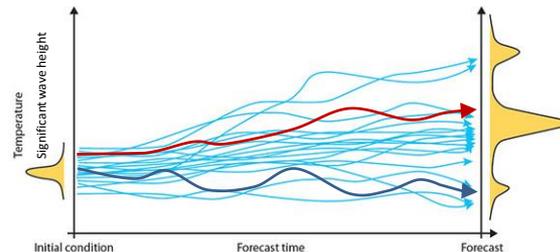
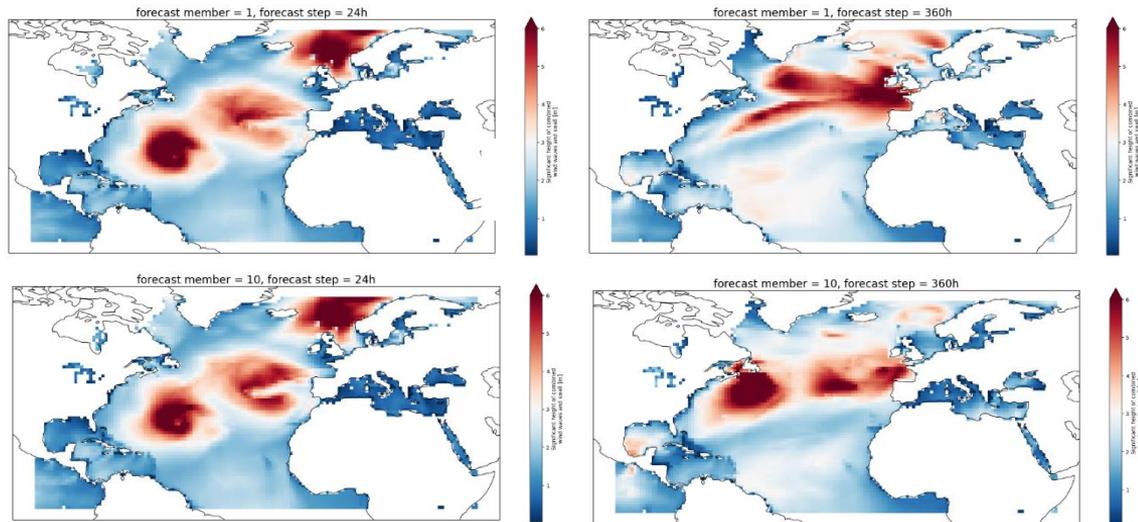
Avantages : facilement itérable

Inconvénients : qualité des données et coûts de génération variables

- ✓ De données liant mouvements d'un navire et état de la mer
- ✓ De prédictions sur l'état de la mer
- ✓ D'un algorithme de planification de trajectoires

50 prédictions issues du ECMWF  
**Ocean Wave Model[3] :**

- Perturbations d'un model initial
- 4 prédictions par jour pendant 15 jours
- Précision de 28km x 28km



- ✓ De données liant mouvements d'un navire et état de la mer
- ✓ De prédictions sur l'état de la mer
- ✓ D'un algorithme de planification de trajectoires

Variante de **A\*** qui propage l'information le long des bords de la grille (pour obtenir un temps d'exécution court) **sans contraindre les chemins aux bords de la grille** (angle quelconque).

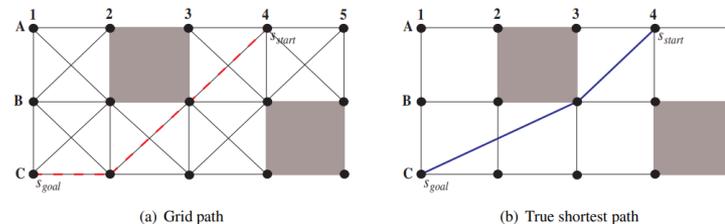
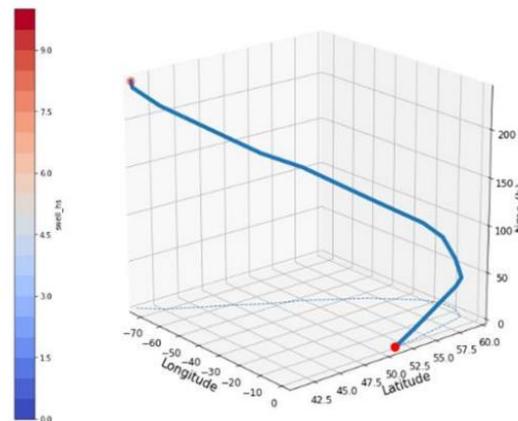
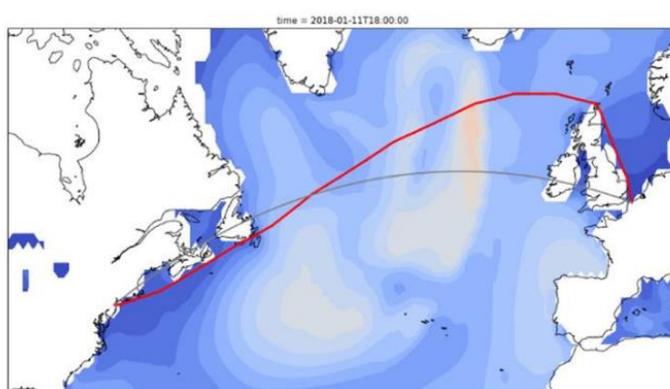


Figure 1: Grid path versus true shortest path



- En combinant Theta\* et nos données météorologiques on peut définir un espace à 3 dimensions dans lequel on va chercher une trajectoire dans le temps

1. Peut-on apprendre une représentation (discrète) impliquant les **mouvements d'un navire** et les **caractéristiques des vagues** ?

$P(\text{roll, pitch, yaw, heave, sway, surge, pp1d, swh, mwd}) \rightarrow \text{BN}$

2. Peut-on **rapidement** calculer des probabilités conditionnelles en fonction des **prédictions** dont on dispose et de la vitesse du navire ?

$P(\text{roll} \mid \text{pp1d, swh, mwd, speed})$

$P(\text{pitch} \mid \text{pp1d, swh, mwd, speed})$

...

  $\approx 10\text{K}$  nœuds seront étudiés, pour chaque nœud environ 20 voisins sont vérifiés. Tout ceci est effectué 50 fois\*. Cela représente environ 10 millions de calculs. Il serait bien que le calcul de base soit inférieur à 100s, donc environ:

**10-100 $\mu\text{s}$**  par calcul

1. Peut-on apprendre une représentation (discrète) impliquant les **mouvements d'un navire** et les **caractéristiques des vagues** ?

$$P(\text{roll, pitch, yaw, heave, sway, surge, pp1d, swh, mwd}) \rightarrow \text{BN}$$

2. Peut-on **rapidement** calculer des probabilités conditionnelles en fonction des **prédictions** dont on dispose et de la vitesse du navire ?

$$P(\text{roll} \mid \text{pp1d, swh, mwd, speed})$$

$$P(\text{pitch} \mid \text{pp1d, swh, mwd, speed})$$

...

  $\approx 10\text{K}$  nœuds seront étudiés, pour chaque nœud environ 20 voisins sont vérifiés. Tout ceci est effectué 50 fois\*. Cela représente environ 10 millions de calculs. Il serait bien que le calcul de base soit inférieur à 100s, donc environ:

**10-100 $\mu$ s** par calcul

## 1. Présentation de MARIN

- 1) Quelques chiffres
- 2) Ses outils
- 3) Ses ambitions pour 2025

## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

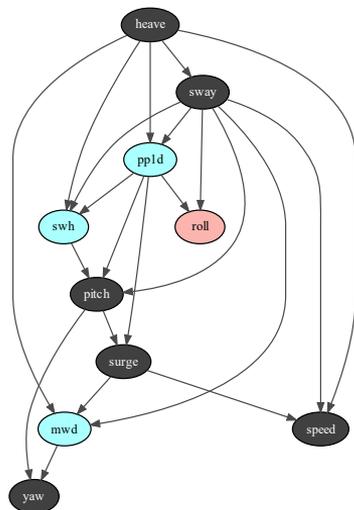
- 1) Présentation du projet
- 2) Prérequis et objectifs
- 3) **Une approche basée sur des réseaux Bayésiens**
- 4) Limitations et futurs développements

1. Utilisation de contraintes structurelles
2. Discrétisation des bases de données
3. Évaluation des performances

# 3 variations sur les contraintes structurelles

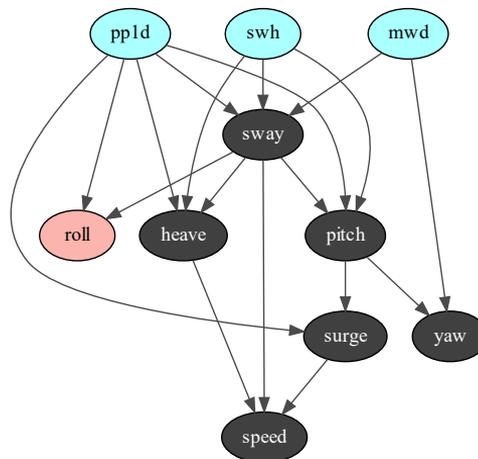
- Différentes contraintes structurelles pour prendre en compte la physique sous-jacente

Pas de contrainte



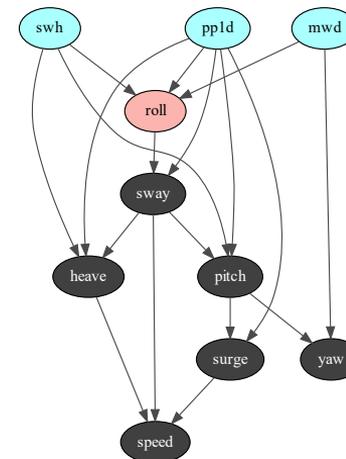
F1 score\*: 81.7

Arcs interdits



F1 score: 81.8

Arcs interdits et obligatoires

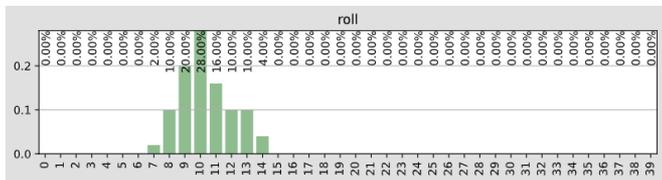
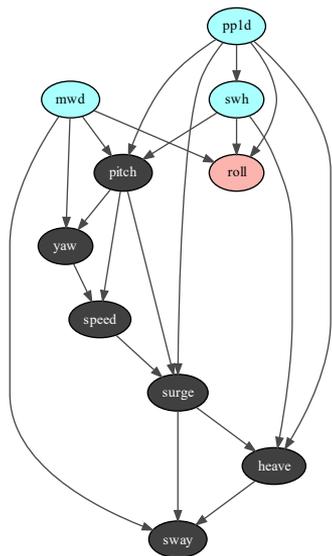


F1 score: 86.9

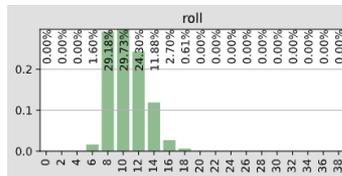
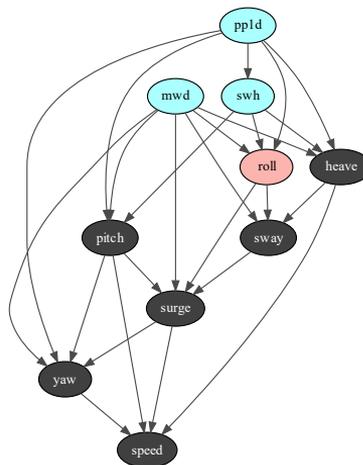
\*Classification avec  $P(\text{roll} > 10 | \text{speed}, \text{swh}, \text{mwd}, \text{pp1d}) > 50\%$  comme critère

# 3 niveaux de discrétisation

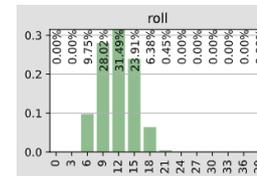
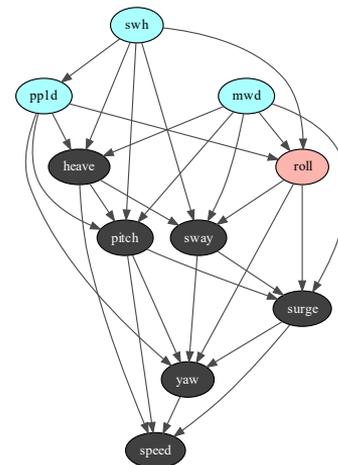
➤ Différentes discrétisations pour limiter le temps d'inférence moyen (avec évidences)



7.5ms



928µs



388µs



## 1. Présentation de MARIN

- 1) Quelques chiffres
- 2) Ses outils
- 3) Ses ambitions pour 2025

## 2. Planification de trajets dans des mers incertaines

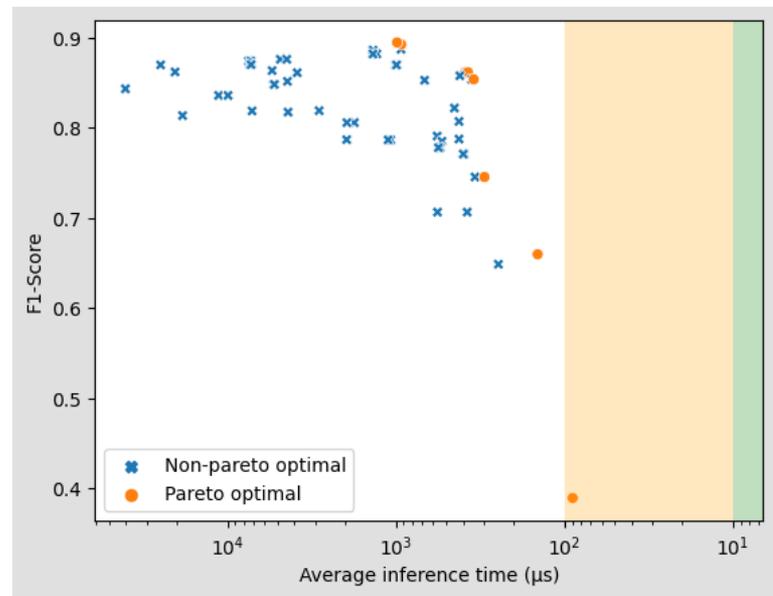
- 1) Présentation du projet
- 2) Prérequis et objectifs
- 3) Une approche basée sur des réseaux Bayésiens
- 4) **Limitations et futurs développements**

1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?

➤ **Variation des scores, contraintes, corrections, ...**

1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
  2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
  3. Réduction du temps d'inférence:
    - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
  4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
  5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
  6. Utiliser un modèle continu?
- **Comparaison avec un classifieur basé sur XGBoost**

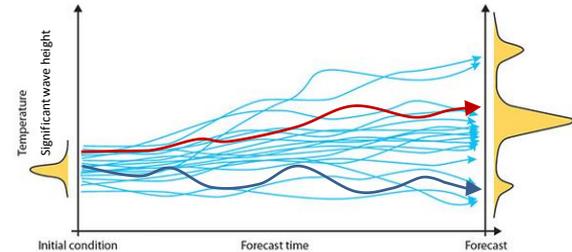
1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?



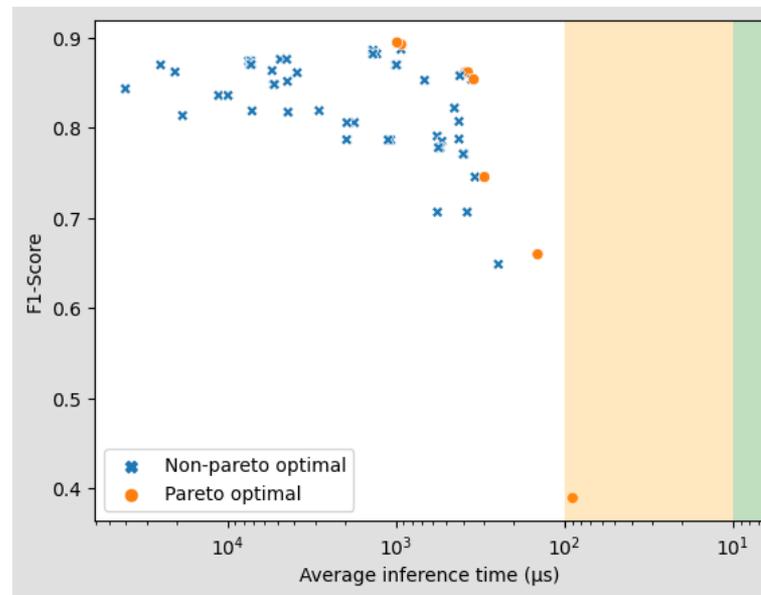
 Durée optimale (< 10μs)

 Durée acceptable (< 100μs)

1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?



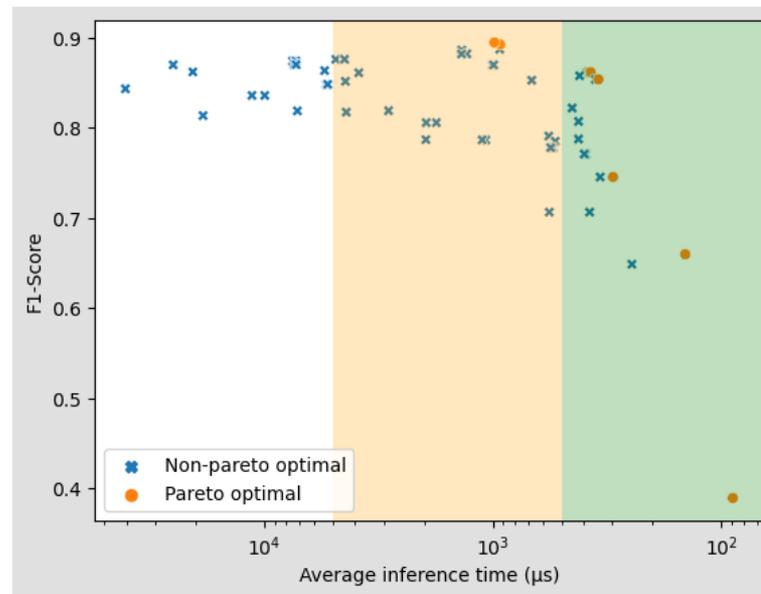
1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?



 Durée optimale (< 10μs)

 Durée acceptable (< 100μs)

1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?



 Durée optimale (< 500μs)

 Durée acceptable (< 5ms)

1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?



Applied Ocean Research  
Volume 120, March 2022, 102916



## Data-driven models for vessel motion prediction and the benefits of physics-based information

[Matthew L. Schirmann](#) ✉, [Matthew D. Collette](#)  ✉, [James W. Gose](#) ✉

[Show more](#) ▾

[+](#) Add to Mendeley [↻](#) Share [🗨](#) Cite

<https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102916> ↗

[Get rights and content](#) ↗

1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?

Proceedings of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-10)

## Lazy Theta\*: Any-Angle Path Planning and Path Length Analysis in 3D

Alex Nash\* and Sven Koenig  
Computer Science Department  
University of Southern California  
Los Angeles, CA 90089-0781, USA  
{anash,skoenig}@usc.edu

Craig Tovey  
School of Industrial and Systems Engineering  
Georgia Institute of Technology  
Atlanta, GA 30332-0205, USA  
craig.tovey@isye.gatech.edu

### Abstract

Grids with blocked and unblocked cells are often used to represent continuous 2D and 3D environments in robotics and video games. The shortest paths formed by the edges of 8-neighbor 2D grids can be up to  $\approx 8\%$  longer than the shortest paths in the continuous environment. Theta\* typically finds much shorter paths than that by propagating information along graph edges (to achieve short runtimes) without constraining paths to be formed by graph edges (to find short "any-angle" paths). We show in this paper that the shortest paths formed by the edges of 26-neighbor 3D grids can be  $\approx 13\%$  longer than the shortest paths in the continuous environment, which highlights the need for smart path planning algorithms in 3D. Theta\* can be applied to 3D grids in a straight-forward manner, but it performs a line-of-sight check for each unexpanded visible neighbor of each expanded vertex and thus it performs many more line-of-sight checks per expanded vertex on a 26-neighbor 3D grid than on an 8-neighbor 2D grid. We therefore introduce Lazy Theta\*, a variant of Theta\* which uses lazy evaluation to perform only one line-of-sight check per expanded vertex (but with slightly more expanded vertices). We show experimentally that Lazy Theta\* finds paths faster than Theta\* on 26-neighbor 3D grids, with one order of magnitude fewer line-of-sight checks and without an increase in path length.

### Introduction

We are interested in path planning for robotics and video games. Path planning consists of discretizing a continuous environment into a graph (*generate-graph* problem) and propagating information along the edges of this graph in search of a short path from a given start vertex to a given goal vertex (*find-path* problem) (Wooden 2006; Murphy 2000). Robotists and video game developers solve the *generate-graph* problem by discretizing the continuous environment into regular 2D grids composed of squares

\* Alex Nash was supported by the Northrop Grumman Corporation. This material is based upon work supported by, or in part by, NSF under contract/grant number 0413196, ARL/ARO under contract/grant number W911NF-08-1-0468 and ONR in form of a MURI under contract/grant number N00014-09-1-1031. The views and conclusions contained in this document are those of the authors and should not be interpreted as representing the official policies, either expressed or implied, of the sponsoring organizations, agencies or the U.S. government.  
Copyright © 2010, Association for the Advancement of Artificial Intelligence (www.aaai.org). All rights reserved.

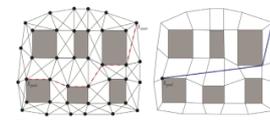


Figure 1: NavMesh: Shortest Path Formed by Graph Edges (left) vs. Truly Shortest Path (right), adapted from (Patel 2000)

(square grids), hexagons or triangles; regular 3D grids composed of cubes (cubic grids); visibility graphs; waypoint graphs; circle based waypoint graphs; space filling volumes; navigation meshes (NavMeshes, tessellations of the continuous environment into  $n$ -sided convex polygons); hierarchical data structures such as quad trees or framed quad trees; probabilistic road maps (PRMs) or rapidly exploring random trees (Björnsson et al. 2003; Choset et al. 2005; Tzouar 2004). Robotists and video game developers typically solve the *find-path* problem with  $A^*$  because  $A^*$  is simple, efficient and guaranteed to find shortest paths formed by graph edges when used with admissible heuristics.  $A^*$  and other traditional *find-path* algorithms propagate information along graph edges and constrain paths to be formed by graph edges. However, shortest paths formed by graph edges are not necessarily equivalent to the truly shortest paths (in the continuous environment). This can be seen in Figure 1 (right), where a continuous environment has been discretized into a NavMesh. Each polygon is either blocked (grey) or unblocked (white). The path found by  $A^*$  can be seen in Figure 1 (left) while the truly shortest path can be seen in Figure 1 (right). In this paper, we therefore develop sophisticated any-angle *find-path* algorithms that, like  $A^*$ , propagate information along graph edges (to achieve short runtimes) but, unlike  $A^*$ , do not constrain paths to be formed by graph edges (to find short "any-angle" paths). The shortest paths formed by the edges of square grids can be up to  $\approx 8\%$  longer than the truly shortest paths. We show in this paper that the shortest paths formed by the edges of cubic grids can be  $\approx 13\%$  longer than the truly shortest paths, which highlights the need for any-angle *find-path* algorithms in 3D. We therefore extend Theta\* (Nash et al. 2007), an existing any-angle *find-path* algorithm, from an algorithm that only applies to square grids to an algorithm that applies to

1. Continuer la recherche des meilleurs modèles
2. Trouver un meilleur moyen d'évaluer les modèles
3. Réduction du temps d'inférence:
  - Passer de 50 inférences avec 50 évidences à 1 inférence avec 1 soft évidence basée sur les 50 prédictions
4. Améliorer la qualité des données simulées[6]
5. Améliorer l'algorithme de recherche de trajet[7]
6. Utiliser un modèle continu?

- [1] **ReFRESCO** <https://www.marin.nl/en/facilities-and-tools/software/refresco>
- [2] **aNySIM** <https://www.marin.nl/en/facilities-and-tools/software/anysim>
- [3] **ECWAD** <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/2.2+Ocean+Wave+Model+-+ECWAM>
- [4] Nash, A. & Daniel, K. & Koenig, S. & Felner, A. (2007). **Theta\*: Any-angle path planning on grids**. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence.
- [5] Ducamp, G. & Gonzales, C. & Wuillemin, P.H. (2020). **aGrUM/pyAgrum : a Toolbox to Build Models and Algorithms for Probabilistic Graphical Models in Python**. International Conference on Probabilistic Graphical Models.
- [6] Schirmann, M. & Collette, M. & Gose, J. (2022). **Data-driven models for vessel motion prediction and the benefits of physics-based information**. In Applied Ocean Research, vol 120.
- [7] Nash, A. & Koenig, S. & Tovey, C. (2010). **Lazy Theta\*: Any-Angle Path Planning and Path Length Analysis in 3D**. Proceedings of the 3rd Annual Symposium on Combinatorial Search, SoCS 2010. 1.

## Hebben jullie vragen?