

---

# Planification pour la Surveillance des Ouvrages d'Art'

---

José-Alfredo Guerrero-Mata  
Yasmina Bestaoui

Laboratoire IBISC  
Université d'Evry  
24 Mai 2012.

A topographic map showing contour lines with numerical values (560, 565, 570, 575, 580, 585, 590, 595, 600, 605, 610). A path is drawn across the map, starting from the left and moving towards the right, with arrows indicating the direction of travel. The path follows the contours, suggesting a route of minimal elevation change or a specific optimization path.

# Plan

- Introduction
- Modèle Discret de l'Ouvrage d'Art (Maillage).
- Trajectoire en Temps Minimal (2D & 3D)
- Planification des Routes
  - Problème de Voyageur de Commerce (TSP)
  - Problème de Routage de Véhicule (VRP)
  - Variante du Problème de Routage de Véhicule (CVRP)
- Résultats de Simulation
- Conclusions et Perspectives

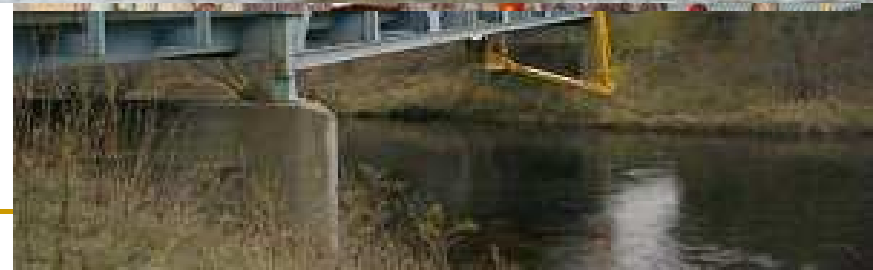
# Inspection d'Ouvrages d'Art

- **Pont Queen Isabella Causeway**
  - South Padre Island, Tx. 2001
  - 8 Morts, 13 Survivants.
- **Pont sur I-35W**
  - Minneapolis, Mn. 2007
  - 13 Morts, 145 Blessés
- **Pont Hintze Ribeiro.**
  - Castelo de Paiva, Portugal. 2001.
  - 59 Morts.
- **Pont Valigonda Railway.**
  - India.
  - 114 Morts.
- **Pont Sgt. Aubrey Cosens VC Memorial.**
  - Latchford, Ontario. 2005.
  - Pas de Morts.



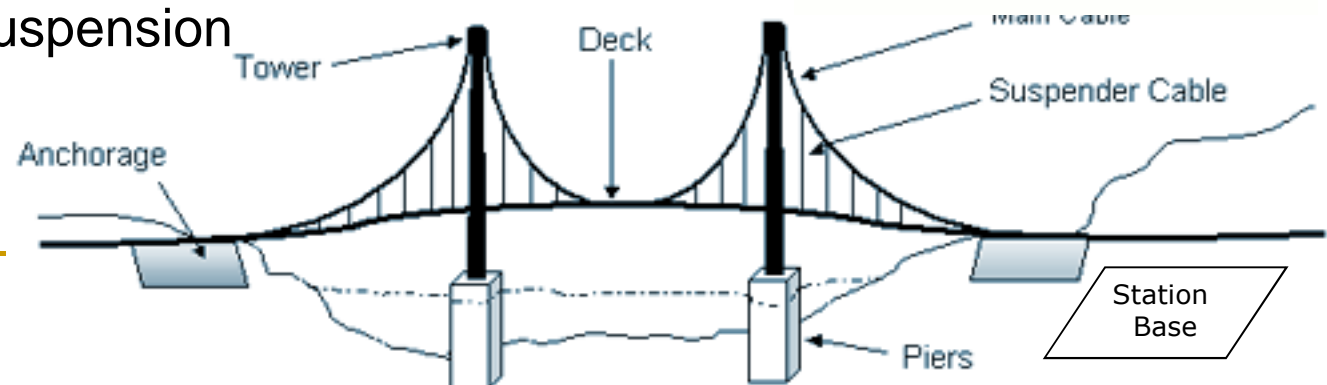
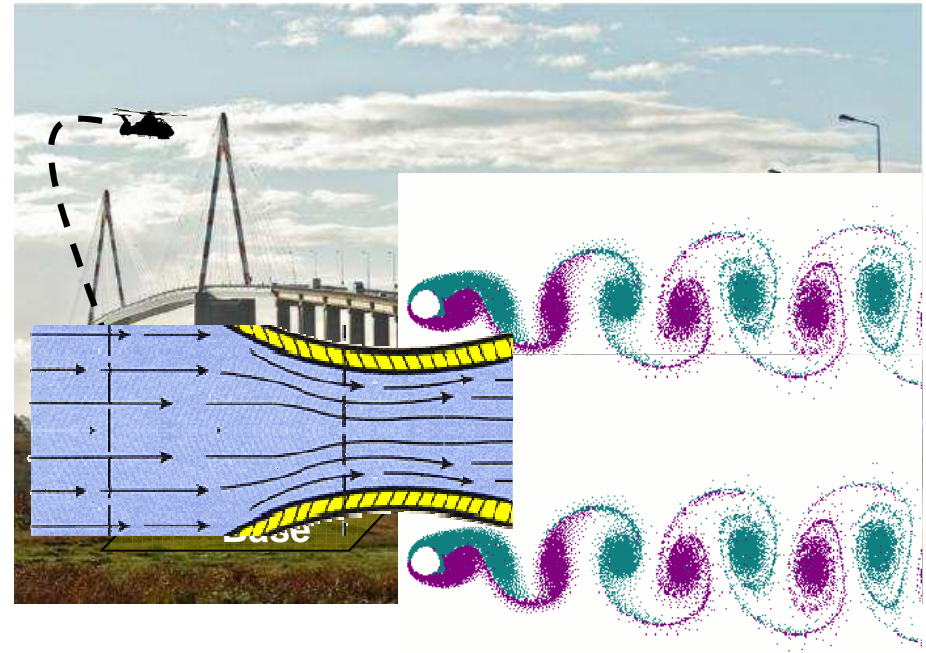
# Inspection des Ouvrages d'Art

- Inspection visuelle
- Equipements d'accès
  - Camions nacelles
  - Monte-personne
  - Sellettes
  - Grimpeurs
  - Bateaux ou chalands
  - Gréements
  - Autres



# Scenario INSPOADRO

- Génération des trajectoires optimales (Temps minimal)
- Conditions météorologiques
  - Cisaillement du vent par friction
  - Accélérations (Effet Venturi, rafales de vent)
  - Tourbillons de Karman
- Évitement d'obstacles ou collisions
  - Pilier
  - Câbles de suspension
  - Tablier



A topographic map showing contour lines with numerical values (550, 565, 570, 585, 590, 595, 600, 610, 620). Wind vectors are represented by arrows of varying lengths and directions. A path is shown as a series of grey circles connected by a line, starting from the top left and moving towards the right, following the contours and wind directions.

# Definition du problème

- Soit une region de vents avec direction et vitesse connu, un modèle discrete d'une ouvrage d'art et un drone dirigeable avec temps maximale de vol  $C$ .
  1. Trouver les trajectoires en temps minimal pour chaque point d'interet et des points d'interet qui appartient à son voisinage.
  2. Trouver le ensemble des routes en temps minimal en respectat la contrainte de temps maximale de vol.

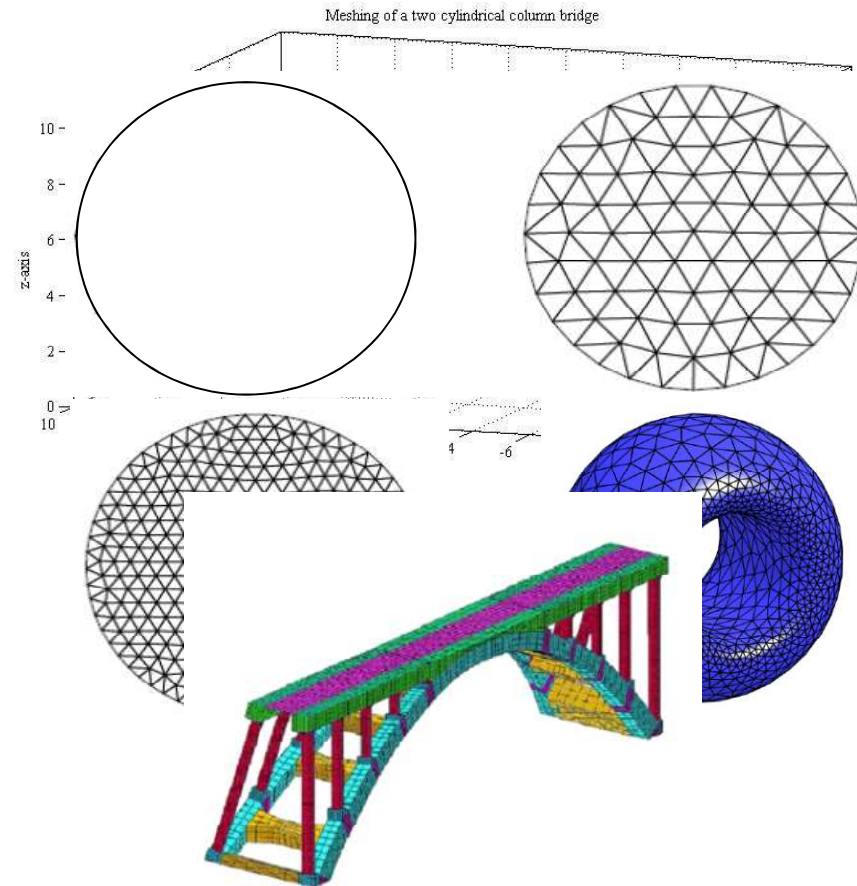
# Modèle Discret de l'Ouvrage d'Art (Maillage)

## ■ Structurées

- ❑ Interpolation algébrique
- ❑ E.D.P.
- ❑ Multiblock

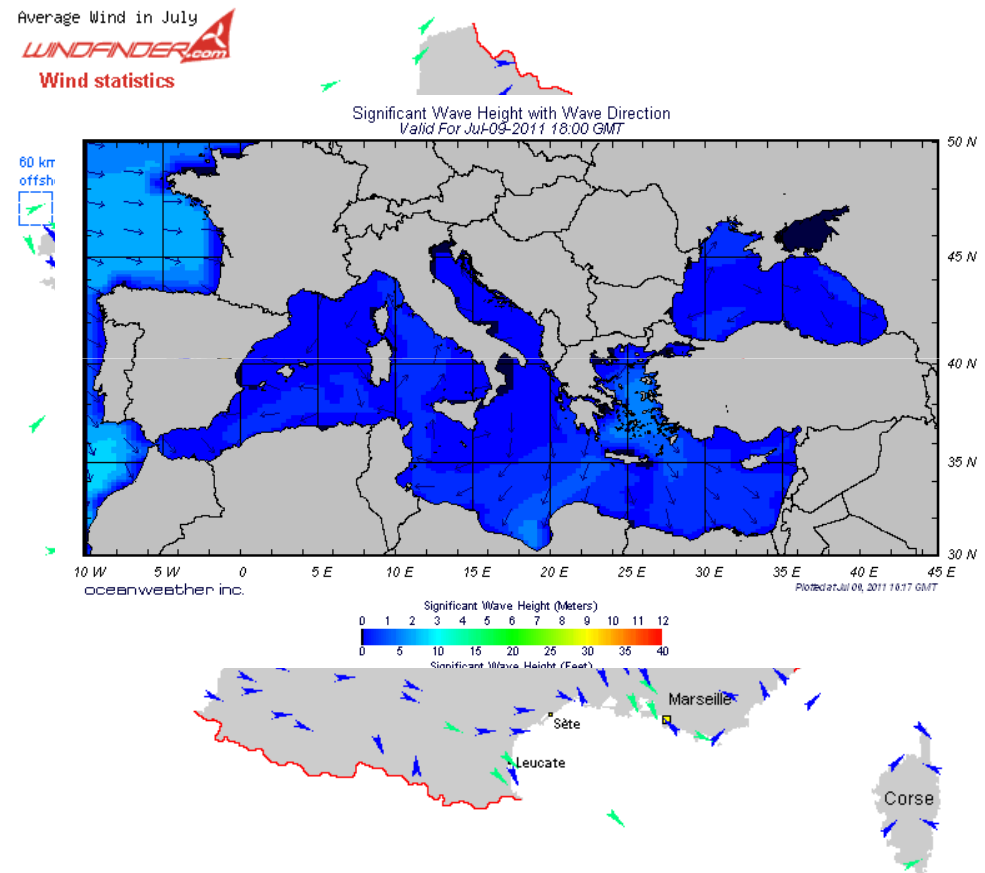
## ■ Non structurées

- ❑ Décomposition spatiale
- ❑ Advancing-front
- ❑ Delaunay



# Navigation en Temps Minimal

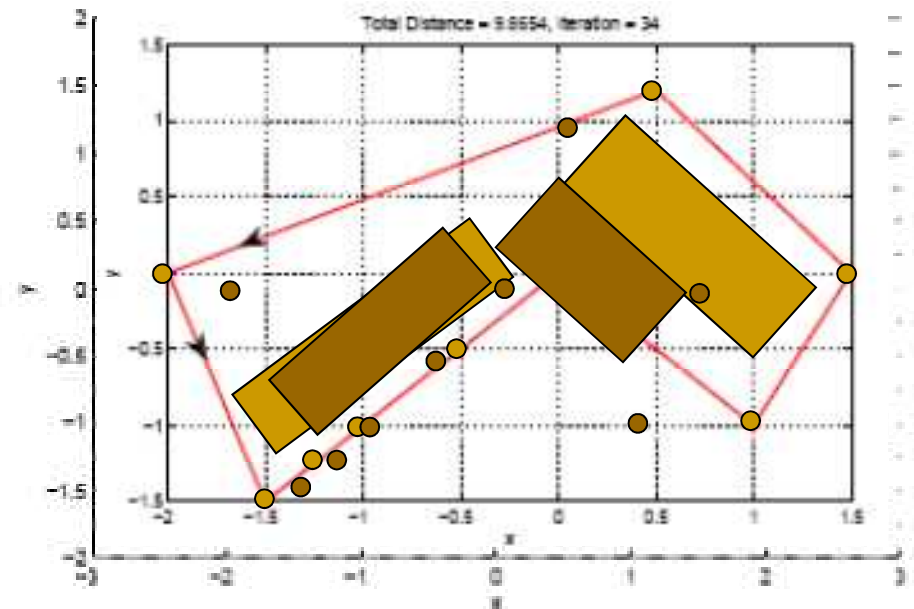
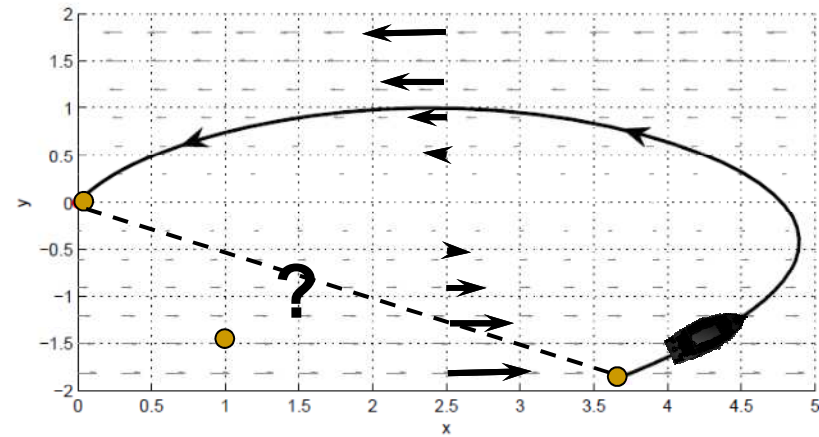
- E. Zermelo pose le problème de navigation pour les dirigeables Zeppelin.
- Pour un véhicule qui se déplace à vitesse constante dans une région de vents légers et connus. Quelle est la trajectoire la plus courte en temps pour aller de A (Nantes) à B (Lyon) ?
- Même approche pour des bateaux en considérant les courants marins.





# Problème de Navigation (Zermelo)

- ✓ Trajectoire en temps optimal entre deux points de passage.
- ✓ Itératif pour plusieurs points de passage.
- ✗ Ne considère pas l'évitement d'obstacles.
- ✗ Ne considère pas le temps maximal du vol (limitations d'énergie).



A contour plot showing several nested, roughly elliptical contour lines. A trajectory is shown as a series of small grey circles connected by a thin line, starting from the left and moving towards the right, crossing several contour lines. Small arrows on the trajectory indicate the direction of movement. The contour lines are labeled with values such as 560, 565, 570, 575, 580, 585, 590, 595, 600, 605, and 610.

# Trajectoire en Temps Minimal (2D)

- Génération des trajectoires en temps minimal

$$\min \int_0^T dt,$$

- Sous contraintes: 
$$\begin{aligned}\dot{x} &= u_1(t) + W_x, \\ \dot{y} &= u_2(t) + W_y,\end{aligned}$$
- Hamiltonian:  $H = 1 + \lambda_1 (u_1(t) + W_x) + \lambda_2 (u_2(t) + W_y),$
- Solution:

$$\frac{d\chi}{dt} = -\cos^2 \chi \frac{\partial W_x}{\partial y} + \sin \chi \cos \chi \left( \frac{\partial W_x}{\partial x} - \frac{\partial W_y}{\partial y} \right) + \sin^2 \chi \frac{\partial W_y}{\partial x}.$$

# Trajectoire en Temps Minimal Vent Lineaire (2D)

- Soit le système

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \cos \chi + W_x(x, y), \\ \dot{y} &= V \sin \chi + W_y(x, y),\end{aligned}\quad W_x(x, y) = \mp V_w y$$

- Trajectoire en temps minimal

$$\begin{aligned}\dot{\chi} &= \pm V_w \cos^2(\chi), \\ T &= \frac{1}{V_w} (\tan \chi_f - \tan \chi), \\ y &= \frac{V}{V_w} \left( \frac{1}{\sin \chi} - \frac{1}{\sin \chi_f} \right), \\ x &= \frac{V}{2V_w} \left( \operatorname{asinh}(\tan \chi_f) - \operatorname{asinh}(\tan \chi) + \tan \chi \left( \frac{1}{\sin \chi} - \frac{1}{\sin \chi_f} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\cos \chi_f} (\tan \chi_f - \tan \chi) \right).\end{aligned}$$

# Trajectoire en Temps Minimal (3D)

- Soit le système

$$\dot{x} = V \sin \chi \cos \gamma + W_x$$

$$\dot{y} = V \cos \chi \cos \gamma + W_y$$

$$\dot{z} = V \sin \gamma + W_z$$

- Hamiltonian

$$H = \lambda_x (V \cos \chi \cos \gamma + W_x) + \lambda_y (V \sin \chi \cos \gamma + W_y) + \lambda_z (V \sin \gamma + W_z) + 1.$$

- Solution

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} = & \cos^2 \chi \cos \gamma \sin \gamma \frac{\partial W_x}{\partial x} + \sin \chi \cos \gamma \sin \gamma \cos \chi \frac{\partial W_y}{\partial x} \\ & + \sin^2 \gamma \cos \chi \frac{\partial W_z}{\partial x} + \cos \chi \cos \gamma \sin \gamma \sin \chi \frac{\partial W_x}{\partial y} \\ & + \sin^2 \chi \cos \gamma \sin \gamma \frac{\partial W_y}{\partial y} + \sin^2 \gamma \sin \chi \frac{\partial W_z}{\partial y} \\ & - \cos \chi \cos^2 \gamma \frac{\partial W_x}{\partial z} + \sin \chi \cos^2 \gamma \frac{\partial W_y}{\partial z} + \sin \gamma \cos \gamma \frac{\partial W_z}{\partial z} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\chi} = & \sin^2 \chi \frac{\partial W_y}{\partial x} + \sin \chi \cos \chi \left( \frac{\partial W_x}{\partial x} - \frac{\partial W_y}{\partial y} \right) \\ & + \sin \gamma \sec \gamma \left( \sin \chi \frac{\partial W_z}{\partial x} - \cos \chi \frac{\partial W_z}{\partial y} \right) - \cos^2 \chi \frac{\partial W_x}{\partial y}. \end{aligned}$$

# Trajectoire en Temps Minimal; Vent Lineaire (3D)

- Soit le système

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \sin \chi \cos \gamma + W_x & W_x(x, y) &= \mp V_w y \\ \dot{y} &= V \cos \chi \cos \gamma + W_y \\ \dot{z} &= V \sin \gamma + W_z\end{aligned}$$

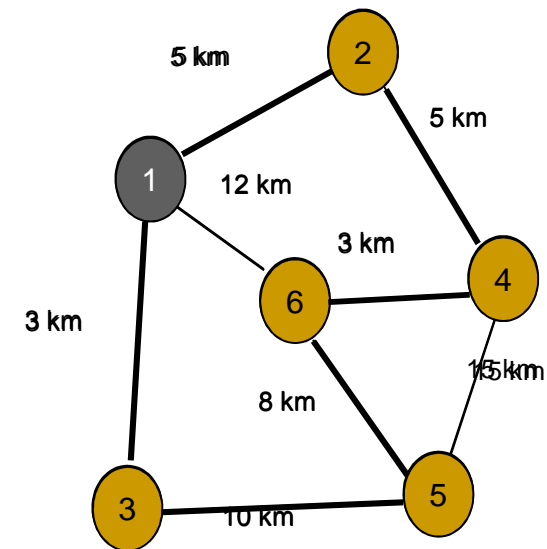
- Trajectoire en temps minimal

$$\dot{\chi} = \mp V_w \cos^2 \chi,$$

$$\dot{\gamma} = \pm V_w \sin \gamma \sin \chi \cos \gamma \cos \chi.$$

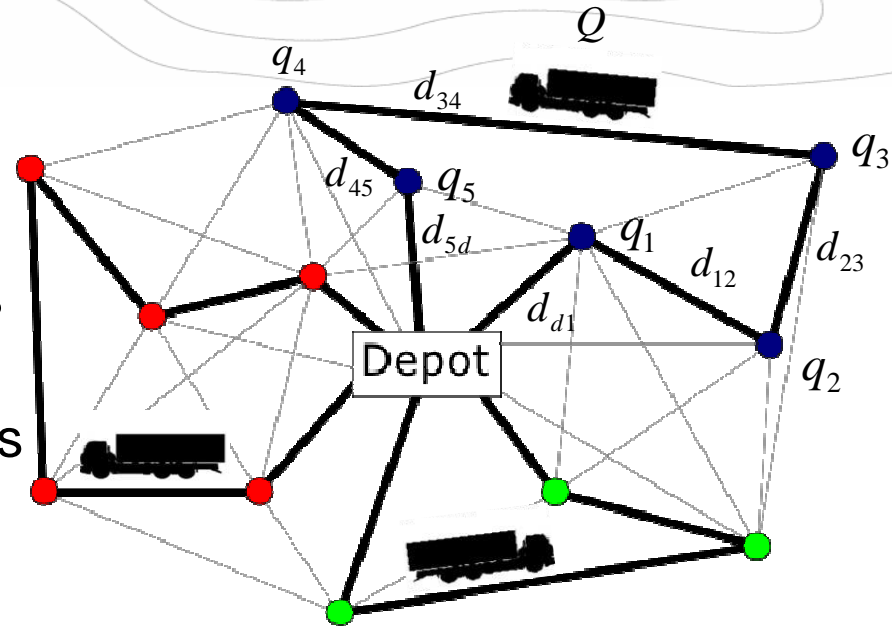
# Problème du Voyageur de Commerce

- Problème: Etant donné un ensemble de villes, trouver la route la plus courte qui relie toutes les villes.
- Soit un graphe  $G = (V, A, C)$  avec  $V$  un ensemble de sommets,  $A$  un ensemble d'arcs et  $C$  une fonction de coût sur les arcs. Trouver le cycle hamiltonien le plus court dans le graphe.
- Méthodes Exactes
  - Branch and Bound
  - Cutting Plane
- Méthodes Heuristiques
  - Constructive (Algorithmes Gloutons)
  - Itérative (k-opt, v-opt, etc.)
  - Aléatoire (Système de fourmis)



# Problème de Routage de Véhicule

- Il s'agit de déterminer les tournées d'un véhicule ou d'une flotte de véhicules afin de livrer une liste de clients, ou de réaliser des tournées d'interventions ou de visites.
- L'objectif principal est de trouver les tournées les plus courtes (temps) avec un ou plusieurs dépôts.
- C-VRP s'agit du problème VRP considérant des contraintes de capacité et de distance.
- Méthodes constructives (Savings)
- Méthodes d'amélioration (Sweeping)

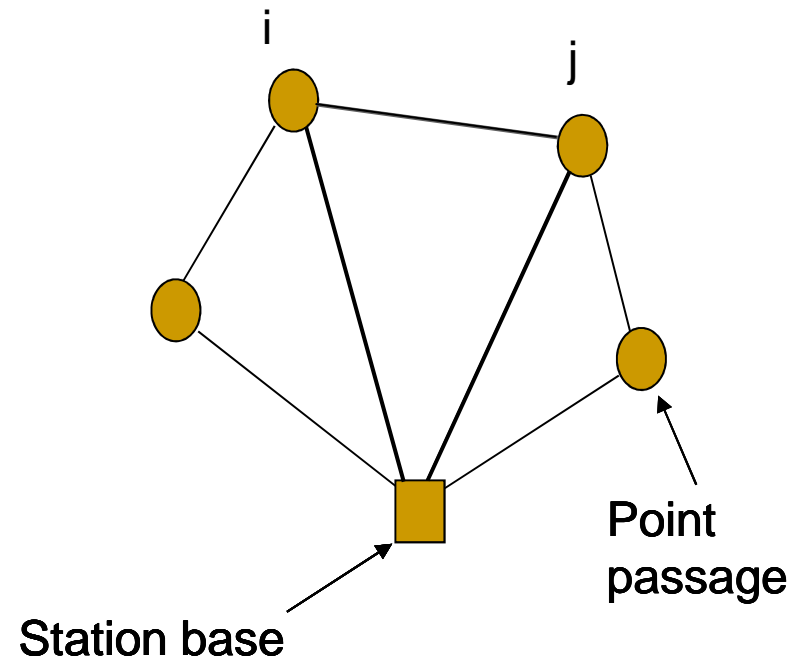


$$Q \geq \sum_{i=1}^n q_i$$

Objectif: Minimiser la distance pour chaque Tournée

# Méthode de 'Savings' pour CVRP

- Etape 1
  - Déterminer les « savings »  $s(i,j)$  pour chaque paire de points passage.
  - Trier les « savings ».
  - Créer les routes de départ et de retour pour tous les points de passage.
- Etape 2
  - Considérer la route  $(0,i,\dots,j,0)$  et déterminer les meilleurs « savings »  $s(k,i)$  et  $s(j,l)$  avec les routes contenant  $(k,0)$  et  $(0,l)$ .
  - Implémenter la meilleure des deux.
  - S'il n'y a plus de « savings » pour cette route continuer avec une autre route.



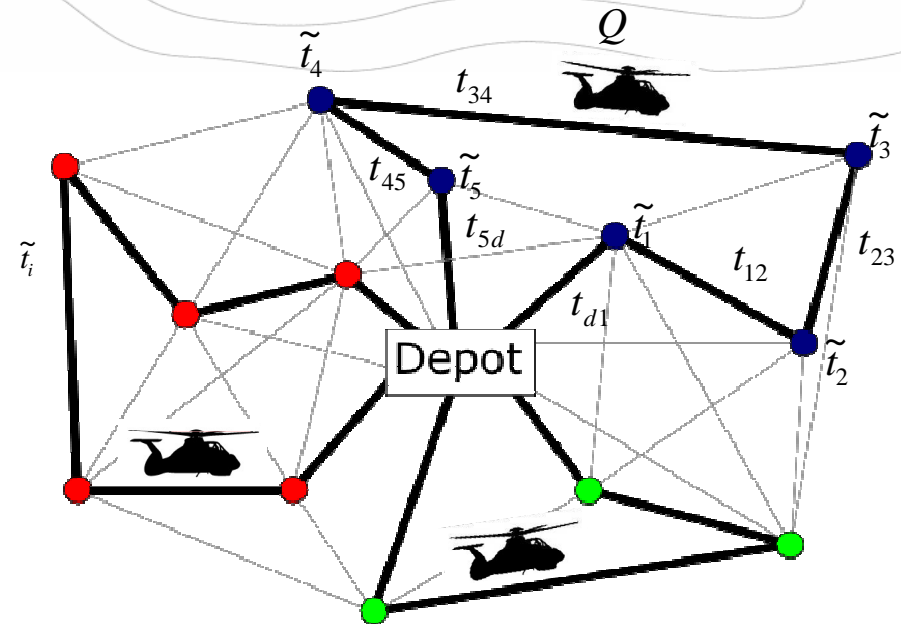


# Problème de Routage de Drones avec Contraintes de Temps

- Soit  $\mathbf{P}$  un ensemble des points de passage et  $p_0$  un point de départ ou une station base.
- La matrice  $\mathbf{T}$  détermine le temps optimal entre deux points de passage  $p_i$  et  $p_j$  en considérant le vent.
- Le vecteur  $\tilde{t}$  spécifie le temps nécessaire pour la collecte de données à partir du point de passage (surveillance)  $p_i$ .
- L'autonomie de vol du drone est définie par  $Q$  où  $Q \geq \max \tilde{t}_i$ . S'il y a un point de passage avec  $\tilde{t}_i \geq Q$  il est toujours possible de diviser le même point de passage en plusieurs points de passage avec les mêmes coordonnées spatiales telles que

$$\tilde{t}_i = \sum_{k=1}^n \tilde{t}_k$$

- L'objectif est de déterminer l'ensemble le plus petit de tournées qui respecte les contraintes dynamiques du drone, la présence du vent ainsi que la contrainte d'autonomie.



$$C \geq r_t = \sum_{k \in r_t}^{n-1} q_k + \sum_{k=1}^{n-1} t(P_k, P_{k+1}) + t(P_n, P_1)$$



# Liste de Scenarios de Simulation

- Multiple points de passage (Zermelo)
- Tournée optimale avec TSP
- Tournée optimale avec Maillage et TSP
- Tournées optimales avec CVRP
- Tournées optimales avec CVRP modifié
- Tournées optimales avec Maillage et CVRP modifié

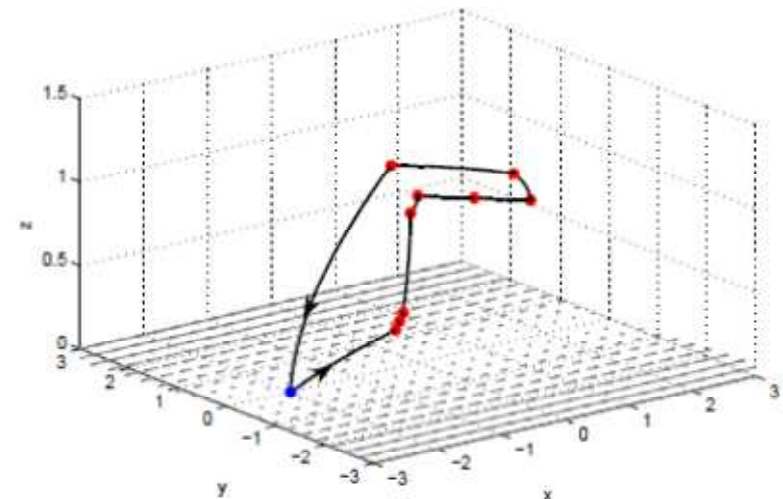
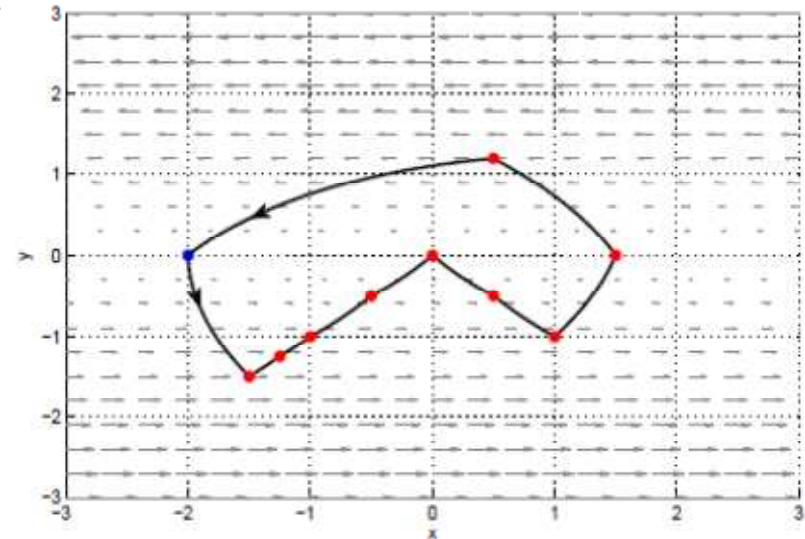
# Multiple Point-Passage (Zermelo)

- Etant donné un ensemble de points de passage, calculer les trajectoires optimales en utilisant l'approche de Zermelo.

$$\dot{x} = V \cos \chi \cos \gamma + W_x,$$

$$\dot{y} = V \sin \chi \cos \gamma + W_y,$$

$$\dot{z} = V \sin \gamma + W_z$$



# Trajectoire Temps Minimale en utilisant TSP

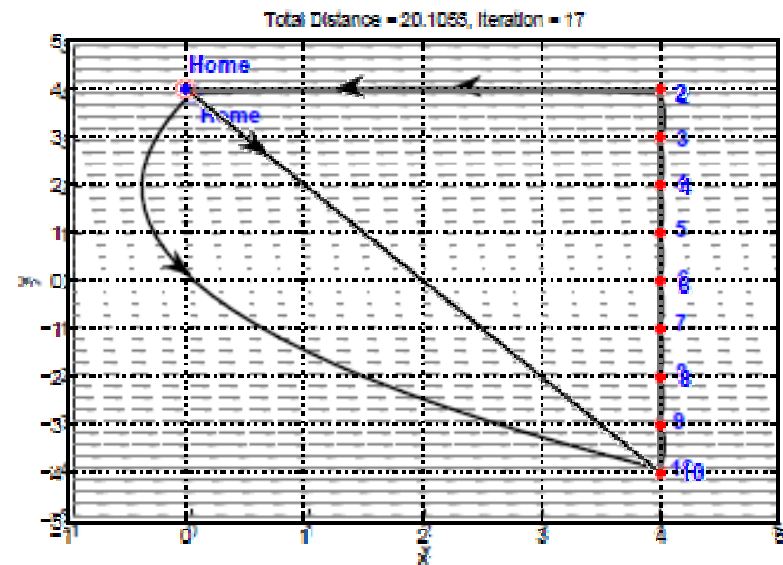
- Etant donné un ensemble de points de passage,
- calculer les trajectoires optimales en utilisant l'approche de Zermelo.
- Définir une station base (Home)
- Calculer la tournée qui minimise le temps total du vol, en utilisant TSP.
- Solution en 2D et 3D
- Vent: Linéaire

$$\dot{x} = V \cos \chi \cos \gamma + W_x,$$

$$\dot{y} = V \sin \chi \cos \gamma + W_y,$$

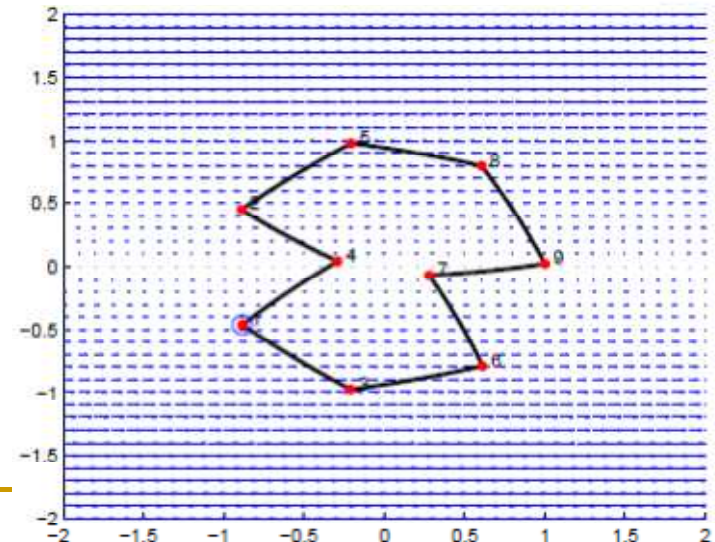
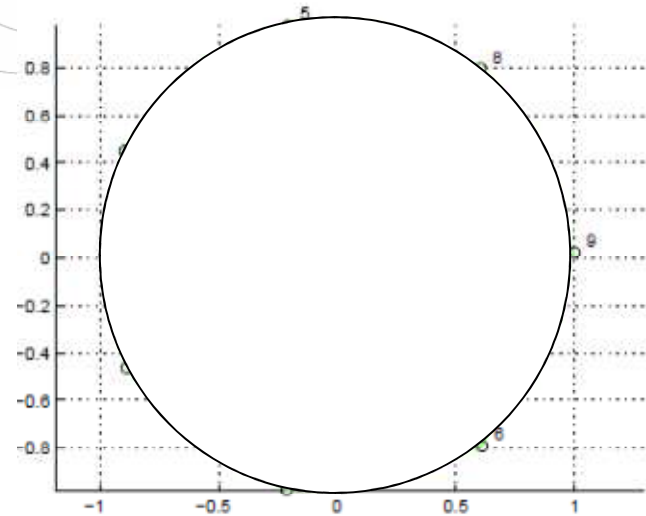
$$\dot{z} = V \sin \gamma + W_z$$

$$W_x = -y * V_w,$$



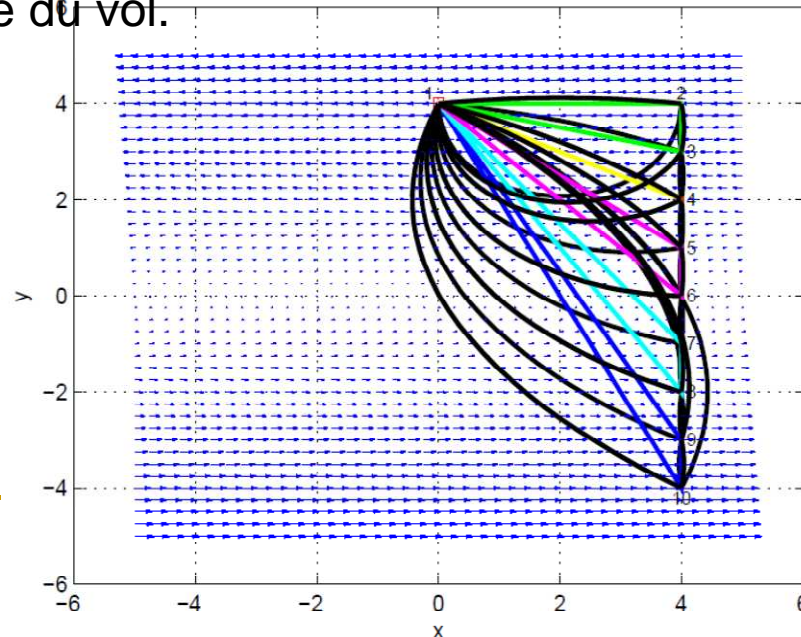
# Trajectoire en Temps Minimal avec Grillage Non-Structuré et TSP

- Soit **A** une région.
- Trouver la discrétisation de la région en utilisant une méthode de grillage non-structuré.
- Calculer les trajectoires optimales en utilisant l'approche de Zermelo.
- Déterminer la tournée qui minimise le temps de déplacement en utilisant TSP.
- Solution en 2D.
- Vent: Linéaire



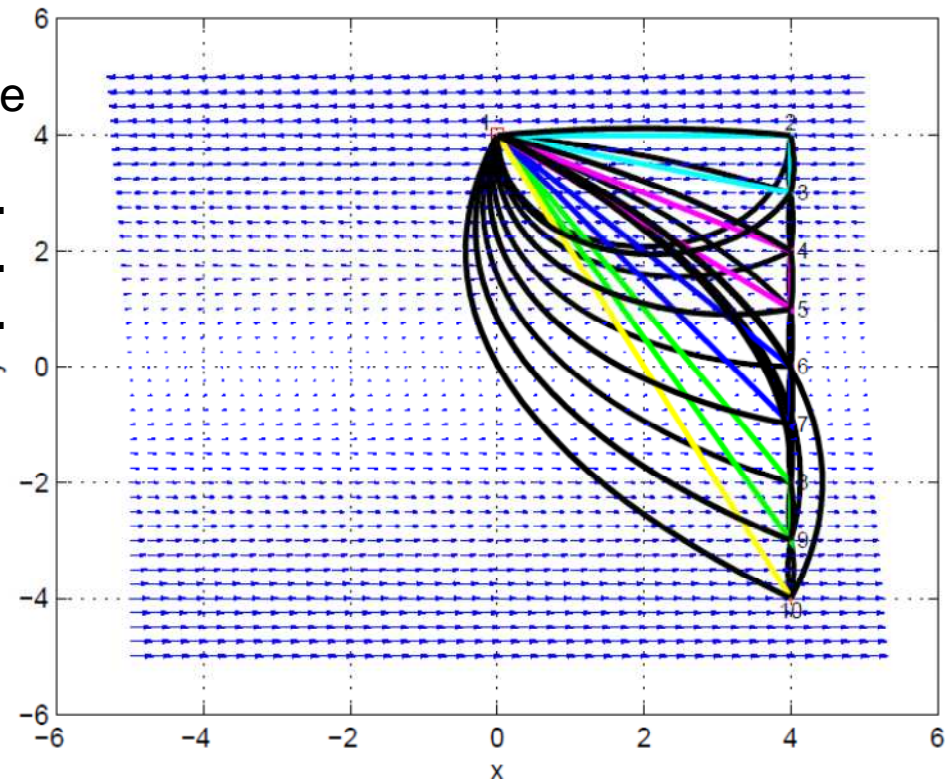
# Méthode CVRP Sweeping (2D)

- Autonomie vol  $Q=38$  min. avec  $q=15$  min. p/ pilier pour la collecte de données.
- 1. Cycle: **1 - 3 - 2 - 1**. Temps du vol+collecte de données :  $5,12 + 30 = 35,12$ .
- 2. Cycle: **1 - 10 - 9 - 1**. Temps du vol+collecte de données :  $16,73 + 30 = 36,73$ .
- 3. Cycle: **1 - 8 - 7 - 1**. Temps du vol+collecte de données :  $12,33 + 30 = 32,33$ .
- 4. Cycle: **1 - 6 - 5 - 1**. Temps du vol+collecte de données :  $8,69 + 30 = 38,69$ .
- 5. Cycle: **1 - 4 - 1**. Temps du vol+collecte de données :  $3,18 + 30 = 33,8$ .
- Temps de vol total:  $69,23 + 75 = 144,23$
- Les résultats pour  $Q \in [30, 44]$  sont toujours les mêmes cycles sans respecter la contrainte d'autonomie du vol.



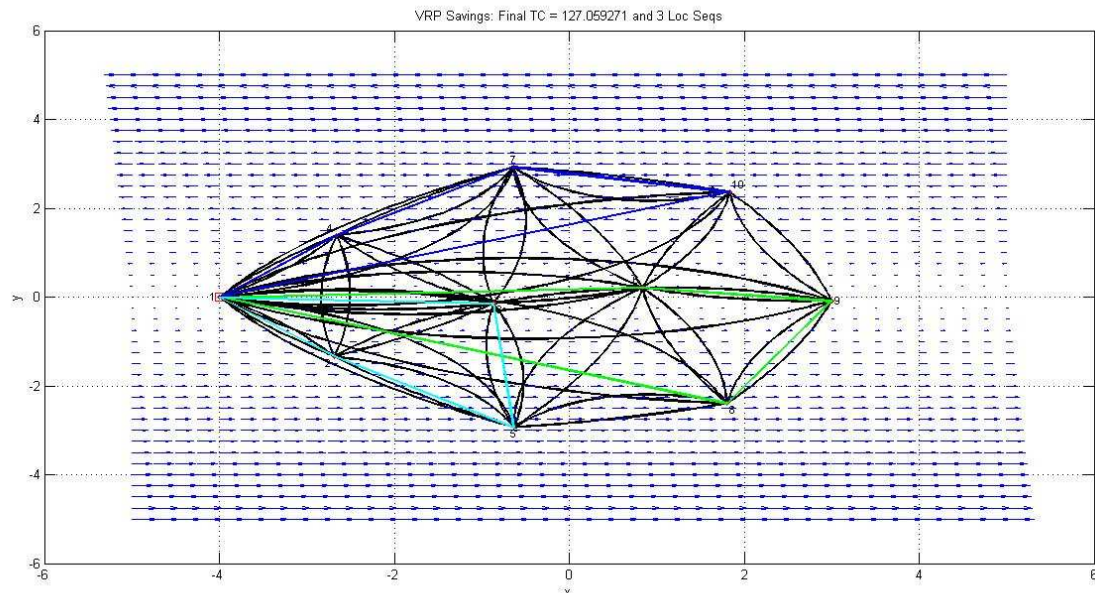
# Méthode MCVRP Savings (2D)

- Autonomie du vol  $Q=38$  min. avec  $q=15$  min. p/ pilier pour la collecte de données.
- 1. Cycle: **1 - 9 - 8 - 1**. Temps : **36,23**.
- 2. Cycle: **1 - 7 - 6 - 1**. Temps : **33,67**.
- 3. Cycle: **1 - 3 - 2 - 1**. Temps : **32,56**.
- 4. Cycle: **1 - 5 - 4 - 1**. Temps : **31,9**.
- 5. Cycle: **1 - 10 - 1**. Temps : **27,9**.
- Temps total du vol: **162,28**.
- Les résultats respectent toujours la contrainte d'autonomie du vol.



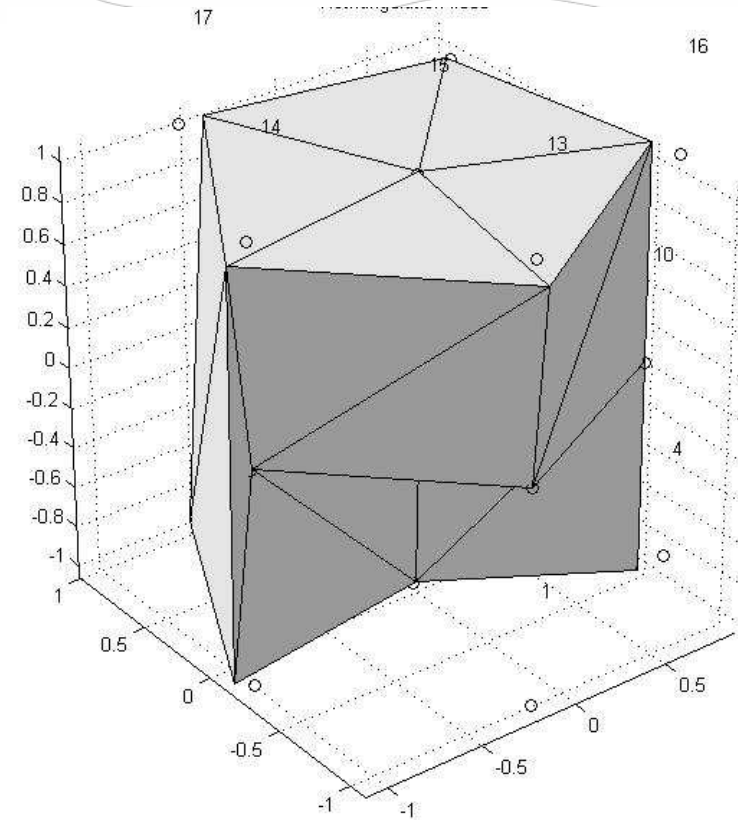
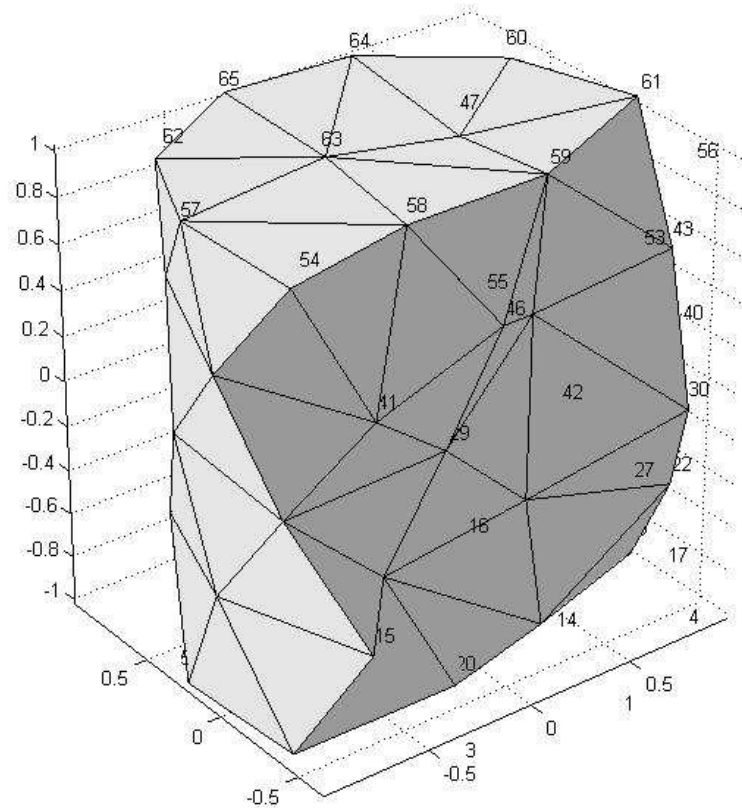
# Routage en Temps Minimal avec Grillage Non-Structuré et Savings: 2D

- Calculer les trajectoires optimales en utilisant l'approche de Zermelo.
- Déterminer la tournée qui minimise le temps de déplacement en utilisant la méthode savings.
- Solution en 2D.
- Vent: Linéaire

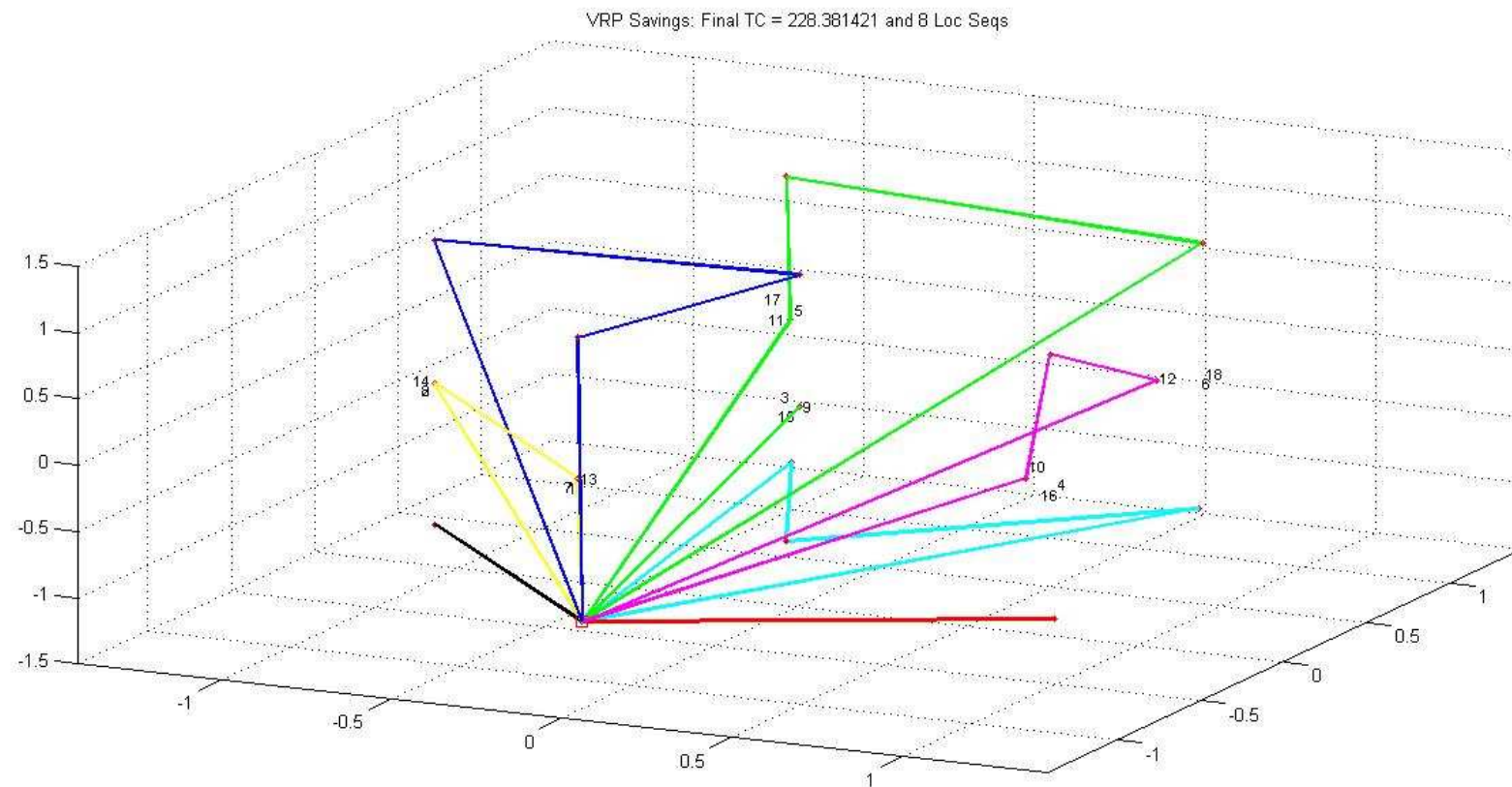




# Méthode MCVRP Savings (3D)



# Méthode MCVRP Savings (3D)





# Méthode MCVRP Savings (3D)

- Autonomie du vol  $Q=45$  min. avec  $q=10$  min. p/ pilier pour la collecte de données.
- 1. Cycle: **1 – 18 – 17 – 11 – 1**. Temps : **37,99**.
- 2. Cycle: **1 – 14 – 15 – 13 – 1**. Temps : **42,56**.
- 3. Cycle: **1 – 6 – 3 – 5 – 1**. Temps : **39,93**.
- 4. Cycle: **1 – 10 – 16 – 12 – 1**. Temps : **37,04**.
- 5. Cycle: **1 – 8 – 7 – 1** Temps : **26,84**.
- 6. Cycle: **1 – 2 – 1**. Temps : **14,73**.
- 7. Cycle: **1 – 4 – 1**. Temps : **14,98**.
- 8. Cycle: **1 – 9 – 1**. Temps : **14,31**.
- Temps total du vol: **228,38**.
- Les résultats respectent toujours la contrainte d'autonomie du vol.

# Conclusions



- Développement d'une méthode d'optimisation pour le calcul des tournées optimales (temps) en utilisant des méthodes d'optimisation telles que: problème de Zermelo, problème du voyageur de commerce, problème de routage de véhicules.
- La méthode du VRP avec des contraintes d'autonomie de vol permet de déterminer des tournées à temps minimal en considérant aussi les contraintes dynamiques du véhicule.
- Les résultats ont été obtenus hors ligne avec un temps de calcul d'environ 1.5 minutes dans un ordinateur avec Processeur Intel Pentium Core I5.

A topographic map with contour lines representing elevation. The contours are labeled with values such as 560, 565, 570, 575, 580, 585, 590, 595, 600, 605, and 610. A path is shown starting from the left and moving towards the right, following the contours. The path is composed of several segments, each ending in a small grey triangle pointing to the right. The path starts at a lower elevation and moves towards higher elevations, crossing several contour lines. The word 'Perspectives' is written in a green, serif font on the left side of the map, partially overlapping the contour lines.

# Perspectives

- Développer une méthode hybride à partir du problème de Zermelo avec d'autres méthodes de planification de trajectoires et des méthodes d'évitement d'obstacles
- Développer une approche de planification en temps réel.



# Remerciements

- Les auteurs remercient la ‘Direction de la Recherche et de l’Innovation, Ministère de l’Ecologie, du Développement Durable, du Transport et du Logement’ pour leur soutien financier
- **Grant 10 MGC S 003**



# Questions