

PLANIFICATION DE MISSION POUR UN SYSTÈME DE LANCEMENT AÉROPORTÉ AUTONOME

Svetlana DICHEVA

Directrice de thèse: Mme Yasmina BESTAOUI-SEBBANE
Université d'Evry-Val d'Essonne

24 Mai 2012



Plan de présentation

1. Introduction
2. Contexte et Motivation. Objectifs scientifiques
3. Planification
 - Environnement dynamique
 - Evitement d'obstacles
 - Algorithme A-étoile (A*) en 2D, en 3D et en 4D
 - Replanification
 - Scenarii de replanification et génération de chemin
4. Conclusions et Perspectives



INTRODUCTION

Contexte de systèmes de lancement aéroporté

✓ LES SYSTÈMES DE LANCEMENT ACTUELS:

- Fusée (1^{er} étage non-réutilisable)
- Coiffe contenant le(s) satellite(s) (2^{ème} étage intégré)
- Lancement vertical

✓ ETUDE D'UN NOUVEAU CONCEPT DE SYSTÈME DE LANCEMENT AÉROPORTÉ:

- Avion-porteur (1^{er} étage réutilisable)
- Lanceur (2^{ème} étage séparé)
- Lancement horizontal

Systeme de lancement « Perseus »

Type de classification du système de lancement	Concept « Perseus »
Concept de lancement	Système de deux étages principaux
Réutilisation	Système partiellement réutilisable
Plateforme de décollage	Site immobile situé sur la Terre
Lancement aérien	Lancement horizontal
Dimension de la charge utile	Système de lancement de microsatellite (10-100kg)
Séparation	Non-spécifiée
Autonomie	Partiellement - assistance pour la phase de décollage et d'atterrissage



✓ EOLE (2013)

- CNES/Perseus (Projet Etudiant de Recherche Spatiale Européen Universitaire et Scientifique)
- Tester différents systèmes de séparation à l'échelle d'une fusée expérimentale

Motivation

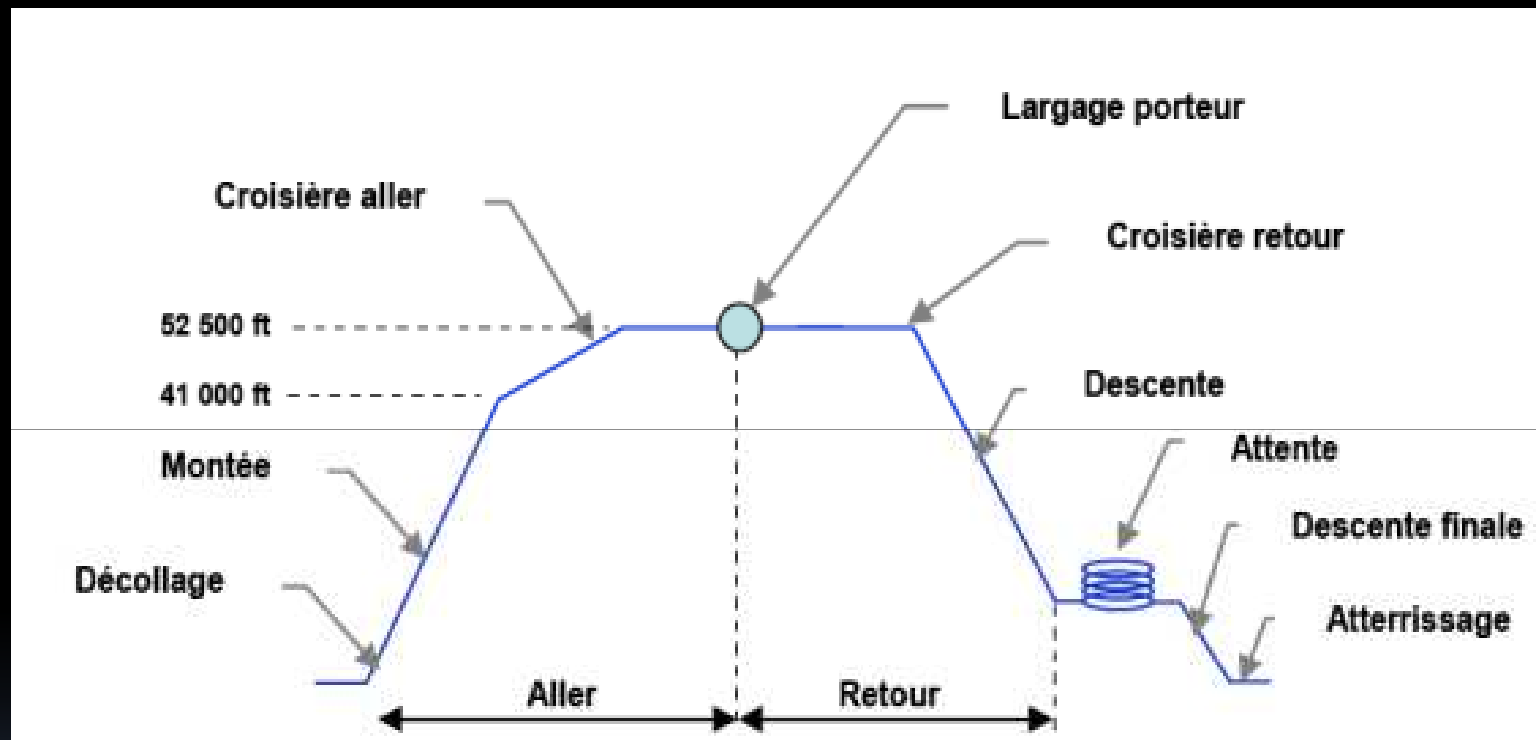
✓ PROBLÉMATIQUE DE PLANIFICATION

- Planification de l'avion-porteur dans un environnement dynamique
- Contraintes du lancement aéroporté:
 - ❖ Sécurité
 - ❖ Traitement des perturbations : atmosphériques et volées d'oiseaux
 - ❖ Traitement des limitations physiques de l'avion-porteur

✓ SOLUTION

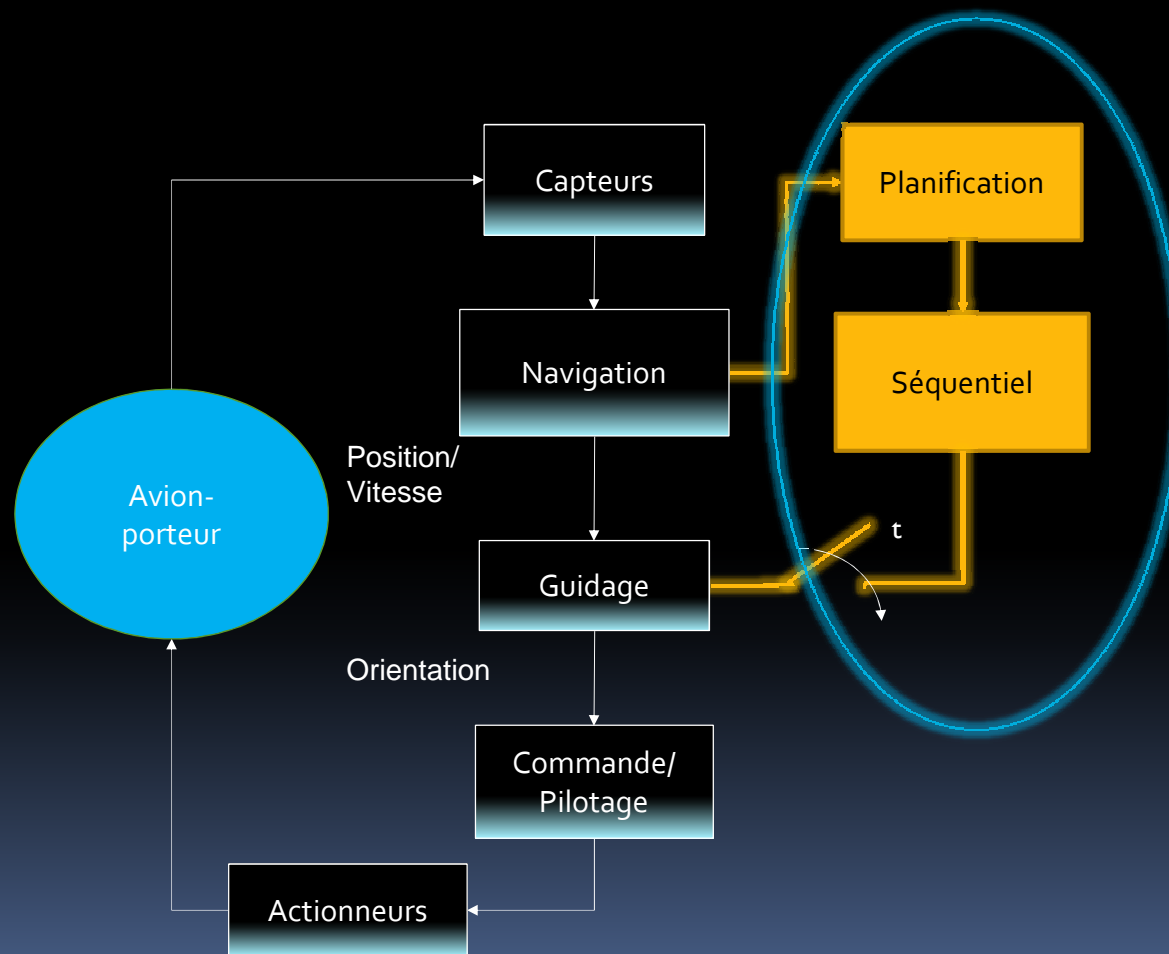
- Déterminer les régions et les phases de la mission
- Architecture et algorithme de planification
- Générer un chemin et une trajectoire pour réaliser les phases de la mission

Phases de la mission de lancement



- ✓ Lancement
 - Séparation à 16 000 m
 - Vitesse optimale de séparation Mach=0.8

Objectifs scientifiques



Apport original:

1. Evitement d'obstacles
2. Détermination de points de passage
3. Génération de chemin



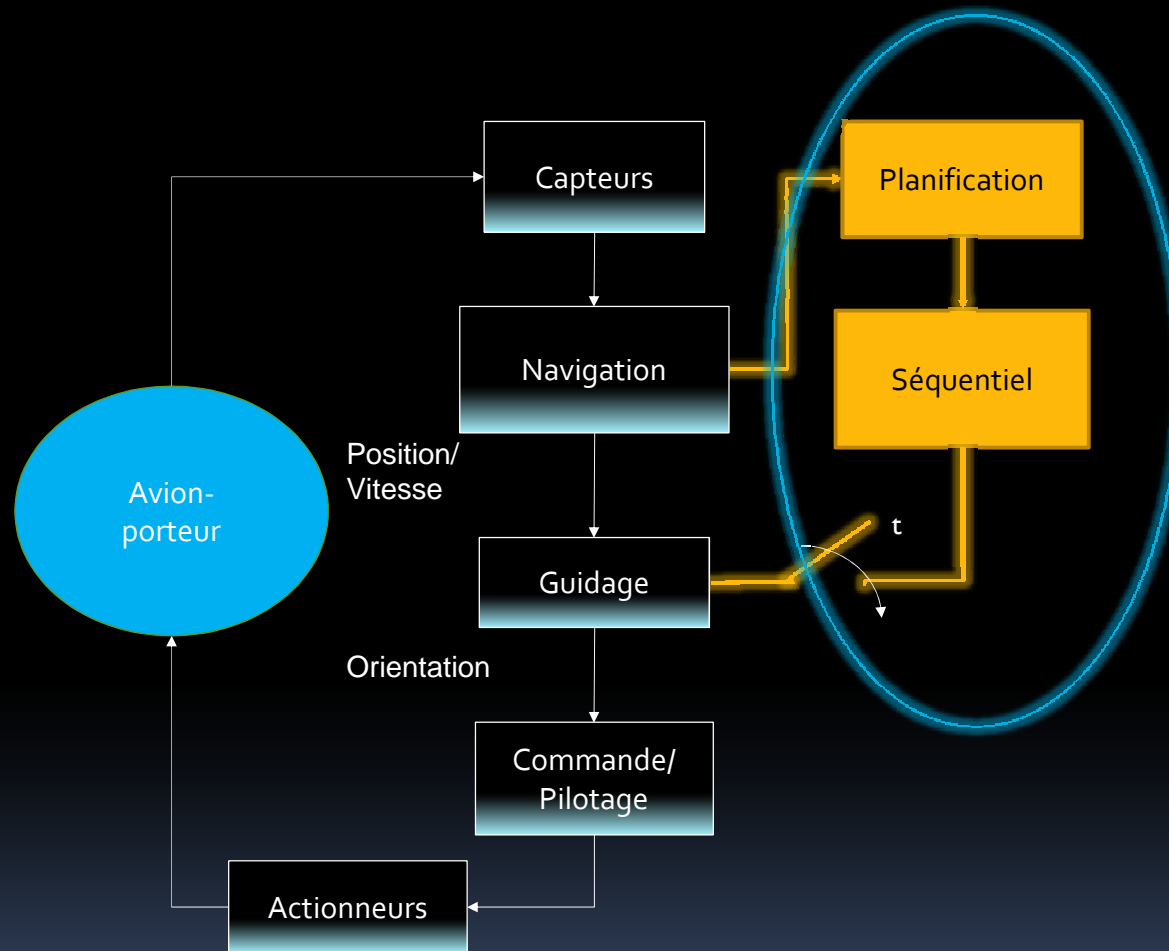
PLANIFICATION

Caractéristiques de la Planification

- ✓ Architecture **HYBRIDE**
 - Structure
 - Sauvegarde de l'information des états passés
 - Réaction aux stimuli externes
 - Exécution des objectifs de la mission

- ✓ Méthode **DE GRAPHE**
 - Représentation bien structurée
 - Exploration rapide de la région de mission

- ✓ Algorithme **PRÉDICTIF**
 - Planifier d'une manière prédictive hors ligne et en ligne
 - Appliquer en ligne à court terme
 - Traiter les incertitudes
 - Exécution périodique en boucle fermée



Apport original:

1. **EVITEMENT D'OBSTACLES**
2. Détermination de points de passage
3. Génération de chemin

Evitement d'obstacles et détermination des points de passage

1. Déterminer la région de mission avec ses obstacles
2. La région est discrétisée et chaque point est associé à une « cellule » elle-même associée à une région de mission
3. Choix d'un critère: le chemin le plus court
4. Contraintes: vitesse (V_{\min} , V_{\max}), angle de pente, rayon de courbure minimal (horizontal et vertical)

APPLICATION DE L'ALGORITHME D'ÉVITEMENT D'OBSTACLES

- Traiter les événements en provenance de l'environnement
- Déterminer une séquence de points de passage
- L'évolution dans la région représente un passage entre les « cellules »

Caractérisation de l'environnement dynamique

✓ PARAMÈTRES

- Types d'obstacles
 - ❖ Obstacles statiques dont les paramètres sont connus
 - ❖ Obstacles non-adverses à paramètres partiellement connus avec contraintes détectées au voisinage non-immédiat de l'avion

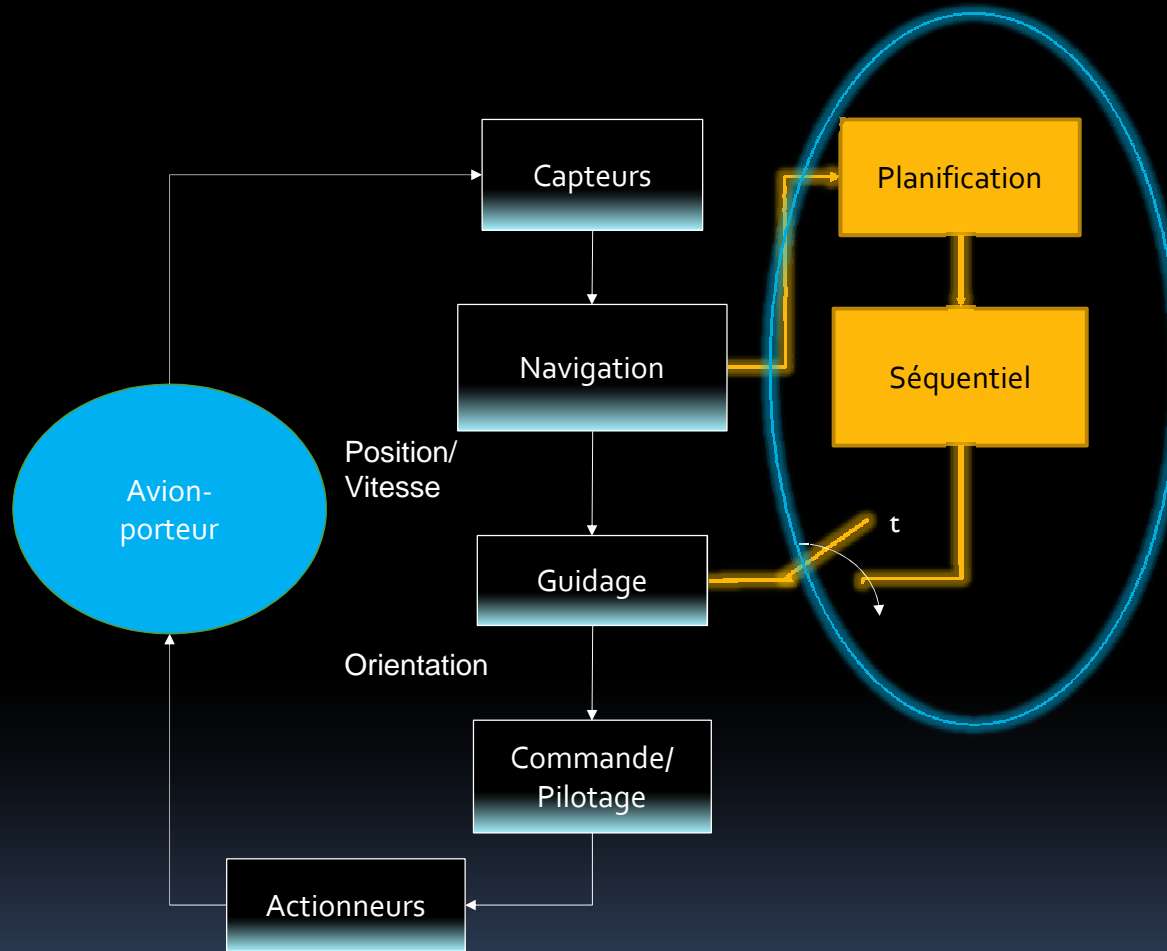


- Représentation des obstacles
 - ❖ Cylindre : cumulonimbus (position, hauteur, rayon, orientation)
 - ❖ Sphère : volée d'oiseaux (position, rayon, orientation)
 - ❖ Cube : zone de turbulence ou région de la trajectoire de lanceur (position, dimensions, orientation)



Discrétisation de la région en « cellules »

- ✓ Parallélépipède : Longueur L , Largeur D et Hauteur H (en fonction de R_{min} , et limitation sur l'angle de pente γ_{max})
- ✓ Taille de « cellules » : différente selon qu'on est proche d'un obstacle ou pas
- ✓ Maillage : composé par plusieurs nœuds positionnés dans chaque « cellule »



Apport original:

1. Evitement d'obstacles
2. **DÉTERMINATION DE POINTS DE PASSAGE**
3. Génération de chemin

Exploration de l'environnement statique par l'algorithme A* en 2D

- ✓ Exploration du graphe pour trouver le chemin le plus court
- ✓ Entrées :
 - ❖ le maillage
 - ❖ le point de départ
 - ❖ les obstacles dans l'espace
 - ❖ un point d'arrivée
- ✓ Sortie : une séquence de nœuds entre le point de départ et le point d'arrivée
- ✓ Résultat : un chemin optimal (retourne un coût optimal)

Fonction heuristique de A*2D

$f(n)=g(n)+h(n)$: coût total évalué pour chaque nœud dans la direction de l'objectif

$g(n)$: distance entre le point initial et le point courant

$h(n)$: distance entre le point courant et le point final

✓ LISTE FERMÉE

- Chemin déjà connu et rejeté comme solution pour un chemin optimal
- La position des obstacles
- La position de départ
- La position d'objectif

✓ LISTE OUVERTE

- Les chemins en cours d'évaluation du coût
- Les points non-visités
- L'information sur les positions passées (points parentaux) choisies comme solutions

Algorithme A* en 2D

✓ LIMITATIONS:

- La région possède des limitations horizontales
- Il n'est pas possible de rajouter une autre région d'exploration
- Les obstacles possèdent la même taille que les nœuds dans le maillage
- Les obstacles sont statiques et leurs positions connues d'avance
- Il n'est pas possible d'introduire plusieurs objectifs
- La position initiale ne peut pas être un objectif
- Cet algorithme ne traite pas les intersections avec les mêmes coordonnées horizontales mais à différentes altitudes
- Cet algorithme ne permet pas de replanifier le chemin

Algorithme A* en 3D

- ✓ Entrées :
 - ❖ le maillage
 - ❖ le point de départ
 - ❖ les obstacles
 - ❖ un ou plusieurs points d'arrivée (objectifs)
- ✓ Sorties: une séquence de nœuds entre le point de départ et le dernier objectif
- ✓ Résultat: un chemin optimal (associé à différentes contraintes)
 - ✓ La génération du graphe est en 3D
 - ✓ Le graphe est associé à la région de mission et aux limitations physiques du véhicule autonome
 - ✓ La priorité des objectifs est déterminée par avance
 - ✓ Les obstacles possèdent différentes formes, dimensions et orientations dans l'espace
 - ✓ Environnement dynamique (obstacles mobiles)
 - ✓ Détection d'obstacles
 - ✓ Replanifier le chemin avec de nouvelles informations sur les obstacles

Fonction heuristique de A*3D

$f(n)=g(n)+h(n)$: coût total évalué pour chaque nœud dans la direction de l'objectif

$g(n)$: distance entre le point initial et le point courant

$h(n)$: distance entre le point courant et le point final

✓ LISTE FERMÉE

- Chemin déjà connu et rejeté
- **Position, orientation et forme des obstacles connus par avance**
- Position de départ
- Positions des objectifs
- **Position, orientation et forme des obstacles détectés**

✓ LISTE OUVERTE

- Chemins en cours d'évaluation
- Points non-visités
- Information sur les positions passées (points parentaux) choisies comme solutions
- **Distance admissible à partir de laquelle le nouveau chemin peut être calculé**

Algorithme A* en 4D

- ✓ Parallélépipède – Longueur L , Largeur D et Hauteur H
(fonctions de R_{min} , limitation sur l'angle de pente γ_{max} ,
intervalle de temps T_s)
- ✓ Chaque segment du chemin est associé à un intervalle de temps nécessaire pour déterminer:
 - le temps passé
 - l'instant courant
 - le temps nécessaire pour arriver au point suivant
 - le temps total de parcours
- ✓ Limitations: l'intervalle de temps est calculé en fonction des contraintes imposées par la vitesse

Planification

1. PRÉPLANIFICATION

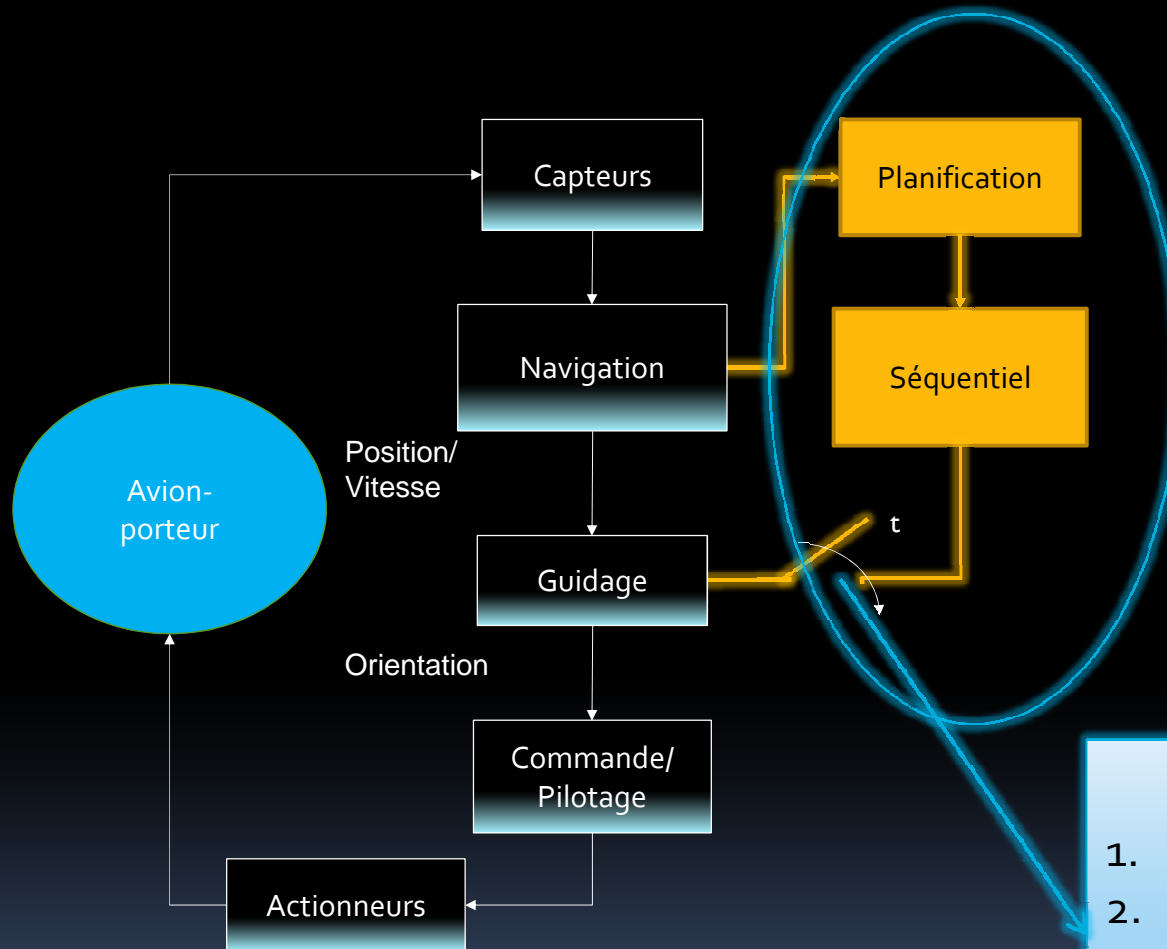
- Prévoir les limitations physiques de l'avion-porteur
- Temps d'exécution et implantation de l'algorithme en ligne
- Réduire les possibilités des manœuvres indésirables
 - Fonction de coût
 - Distance minimale
 - Chemin avec minimum de risque

2. PLANIFICATION

- Exécution des tâches prédéfinies, objectifs et sous-objectifs : un des objectifs est le point de largage qui peut changer en cours de mission
- Considérer les obstacles statiques

3. REPLANIFICATION

- Planification dynamique
- Considérer les obstacles dynamiques
- L'objectif final peut changer en cours de route, si nécessaire.

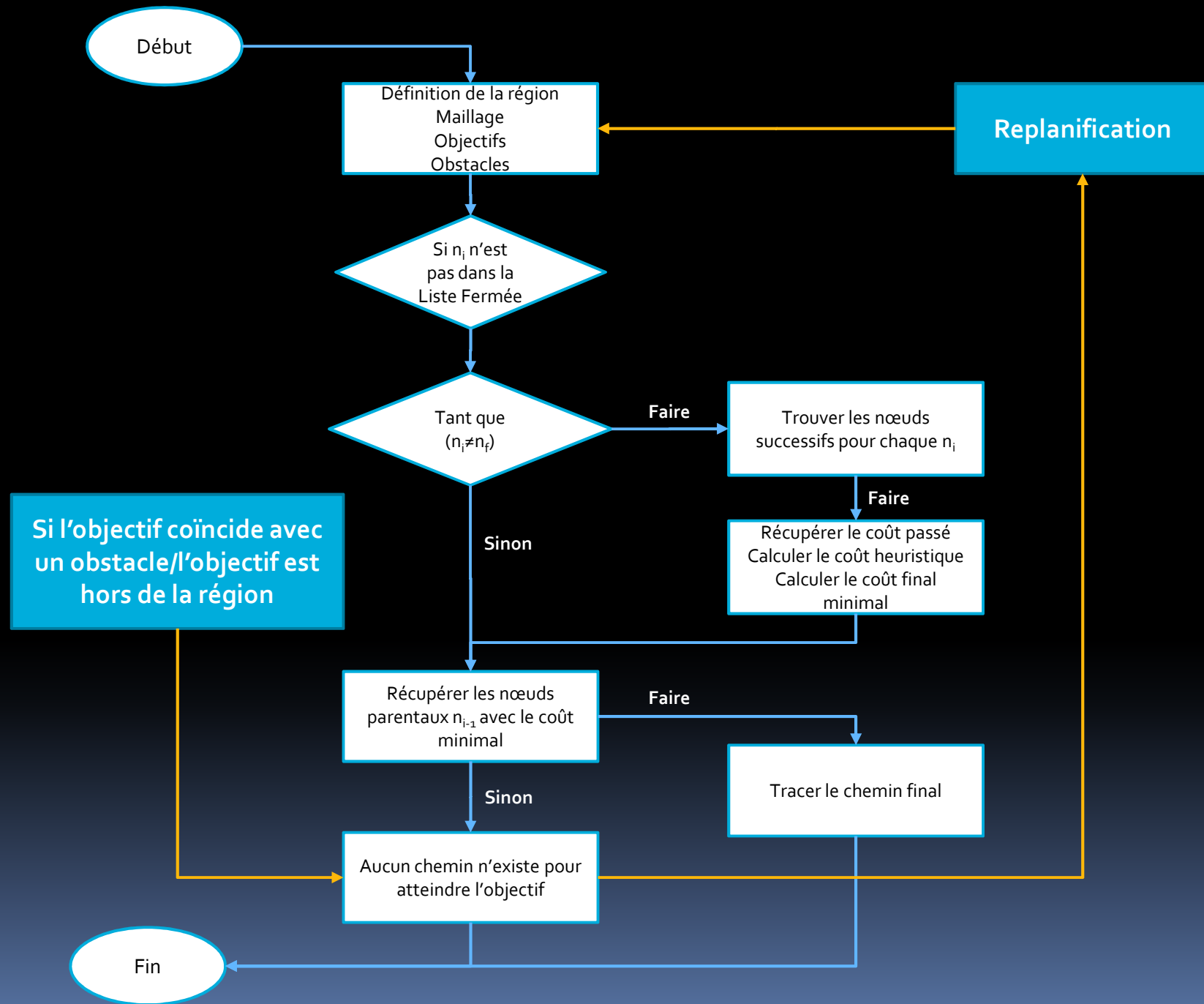


Apport original:

1. Evitement d'obstacles
2. Détermination de points de passage
3. Génération de chemin

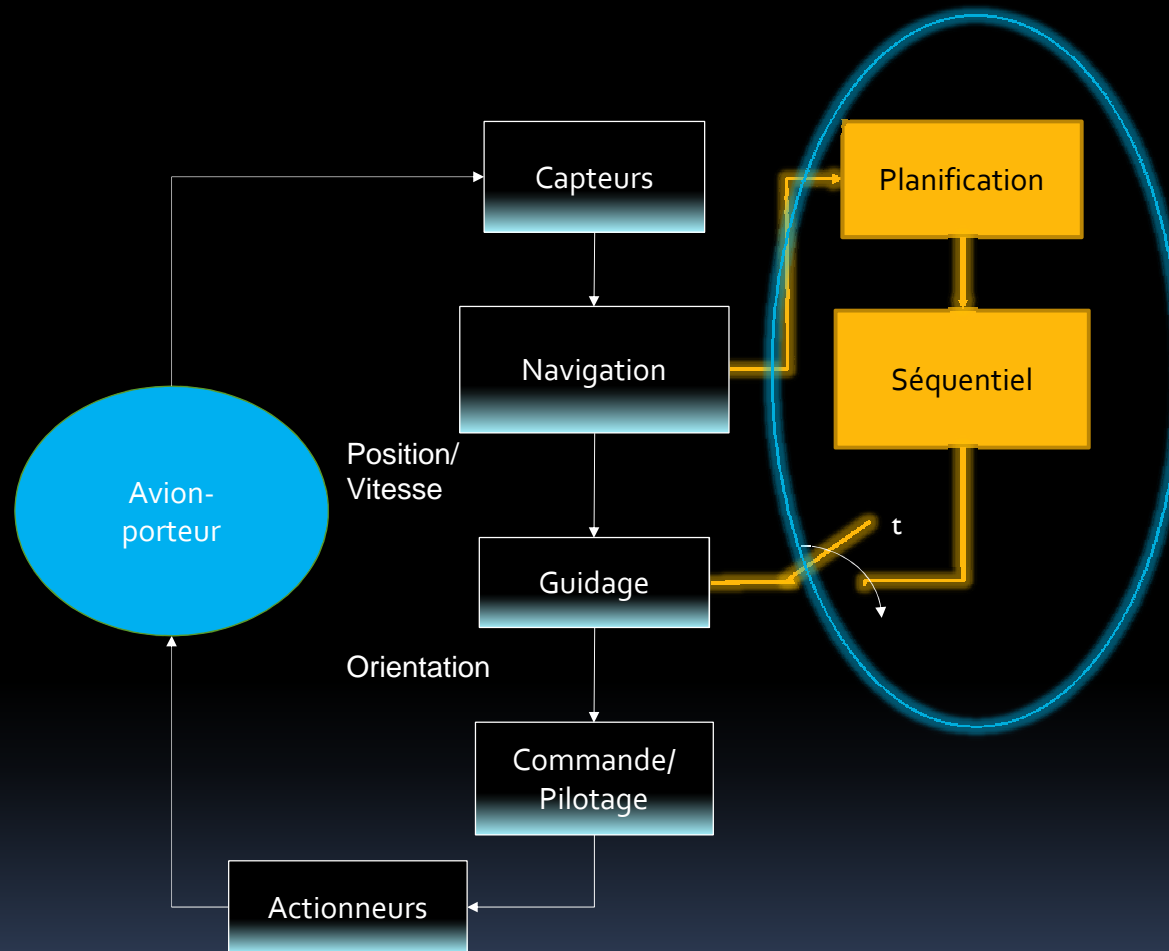
REPLANIFICATION:

1. Réactualisation périodique
2. Réactualisation anticipée en cas de danger détecté ou d'erreur de poursuite trop importante



Détermination des contraintes utilisées par A*4D

- ✓ Proviennent des limitations physiques de l'avion-porteur et de sa propulsion
- ✓ Nécessitent donc l'utilisation du modèle cinématique et dynamique du système pour remettre à jour périodiquement les contraintes dynamiques : R_{min}
- ✓ Particulièrement après le largage, plus grande manœuvrabilité de l'avion-porteur



Apport original:

1. Evitement d'obstacles
2. Détermination de points de passage
3. **GÉNÉRATION DE CHEMIN**

Génération de chemin

- Entrées: $q_i = (x_i, y_i, z_i, \gamma_i, \chi_i, V_i)$
 $q_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}, \gamma_{i+1}, \chi_{i+1}, V_{i+1})$
 t – le temps pour traverser une interconnexion
- Sortie: $q(s) = (x(s), y(s), z(s), \gamma(s), \chi(s), V(s))$
- Résultat: Un chemin réalisable en prenant en compte le temps
 - ✓ Les interconnexions déterminent les deux angles d'orientation (l'angle de cap et l'angle de pente)
 - ✓ Distance euclidienne entre deux points de passage
 - ✓ Vitesse moyenne

Génération de trajectoire avec des polynômes cartésiens

- Contraintes aux limites: positions et vitesses : ordre minimal : 3
- Polynômes cartésiens de 3^{ème} ordre : trajectoire entre les points de passage:

$$(x_i, y_i, z_i, \chi_i, \gamma_i, V_i) \longrightarrow (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}, \chi_{i+1}, \gamma_{i+1}, V_{i+1})$$

$$x(s) = s^3 x_{i+1} - (s-1)^3 x_i + \alpha_x s^2 (s-1) + \beta_x s (s-1)^2$$

$$y(s) = s^3 y_{i+1} - (s-1)^3 y_i + \alpha_y s^2 (s-1) + \beta_y s (s-1)^2$$

$$z(s) = s^3 z_{i+1} - (s-1)^3 z_i + \alpha_z s^2 (s-1) + \beta_z s (s-1)^2$$

s : temps normalisé

$$\alpha_x = tV_{i+1} \cos(\gamma_{i+1}) \cos(\chi_{i+1}) - 3x_{i+1}$$

$$\alpha_y = tV_{i+1} \cos(\gamma_{i+1}) \sin(\chi_{i+1}) - 3y_{i+1}$$

$$\alpha_z = tV_{i+1} \sin(\gamma_{i+1}) - 3z_{i+1}$$

$$\beta_x = tV_i \cos(\gamma_i) \cos(\chi_i) + 3x_i$$

$$\beta_y = tV_i \cos(\gamma_i) \sin(\chi_i) + 3y_i$$

$$\beta_z = tV_i \sin(\gamma_i) + 3z_i$$

Scenario de mission (I)

Paramètres	Coordonnées
$X_{\max} Y_{\max} Z_{\max}$	{10000 10000 10000}m
Position initiale	{50 50 50}m
Objectifs	{5000 5000 5000}m réactualisé dans 1s {7500 5000 8500}m apparait dans 1s {9600 9600 9600}m réactualisé dans 2s {10000 10000 10000}m réactualisé dans 3s {10000 2100 10000}m réactualisé dans 4s {7500 2000 5000}m réactualisé dans 5s {2500 1800 4000}m réactualisé dans 3s {50 50 50}m réactualisé dans 1s

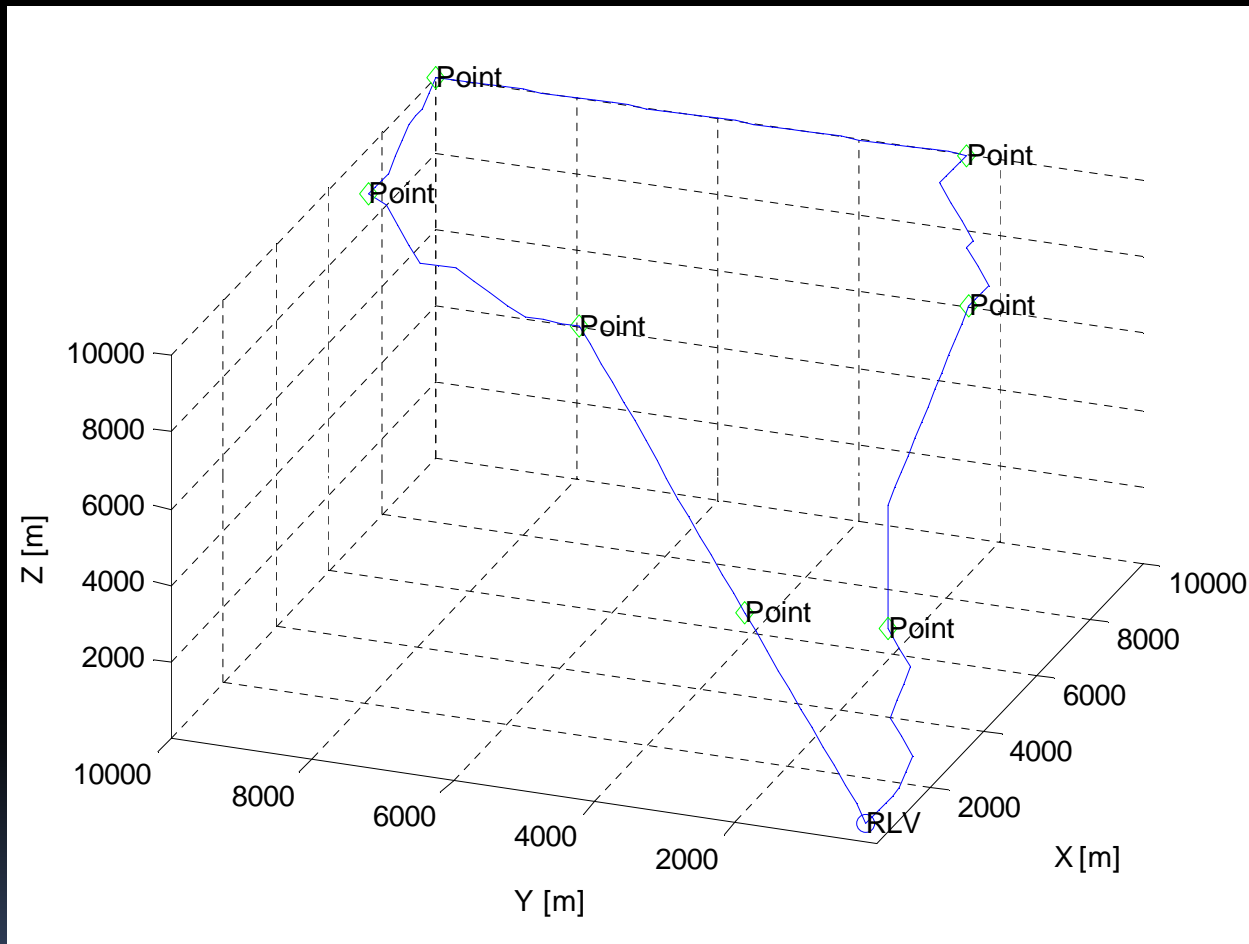


Fig.1 Mission de lancement chemin brut avec 8 objectifs

Scenario de mission (II)

Paramètres	Coordonnées
$X_{\max} Y_{\max} Z_{\max}$	{1000 1000 1000}m
Position initiale	{50 50 50}m
Objectifs	{500 500 500}m détecté après 1s {1000 1000 1000}m détecté après 2s
Sphère	{850, 850, 850}m R=300m détecté après 2s
Zone rouge	{160, 160, 140}m {130x130x130}m
Disque	{900, 966, 900}km R=100m
Cylindre	{800, 650, 25}km R ₁ =100m R ₁ =100m H=50m
Point	{960, 966, 960}km
Vitesse moyenne entre objectifs (2 et 4)	200m/s

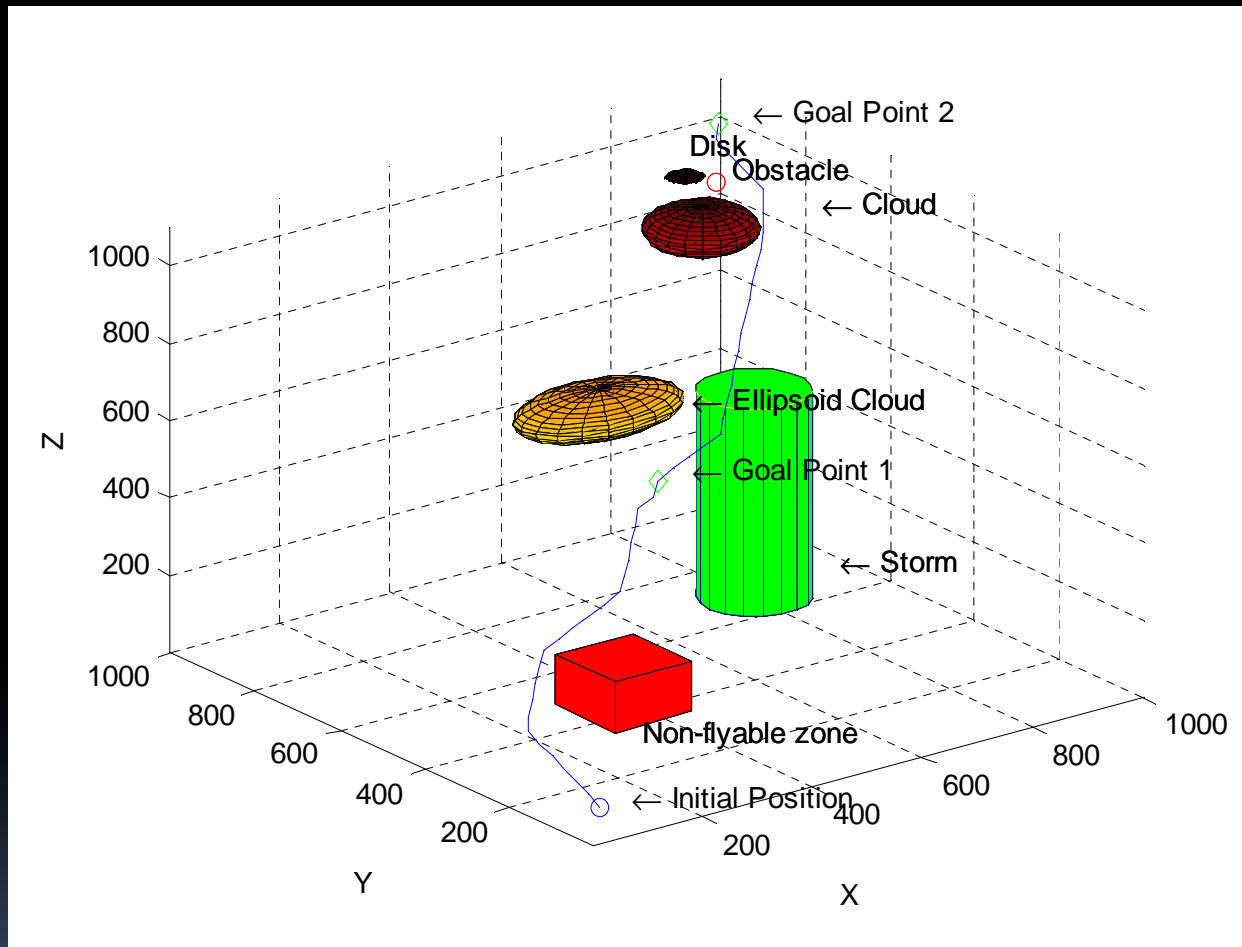


Fig.2 Scenario Evitement d'obstacles avec 2 objectifs et 6 obstacles

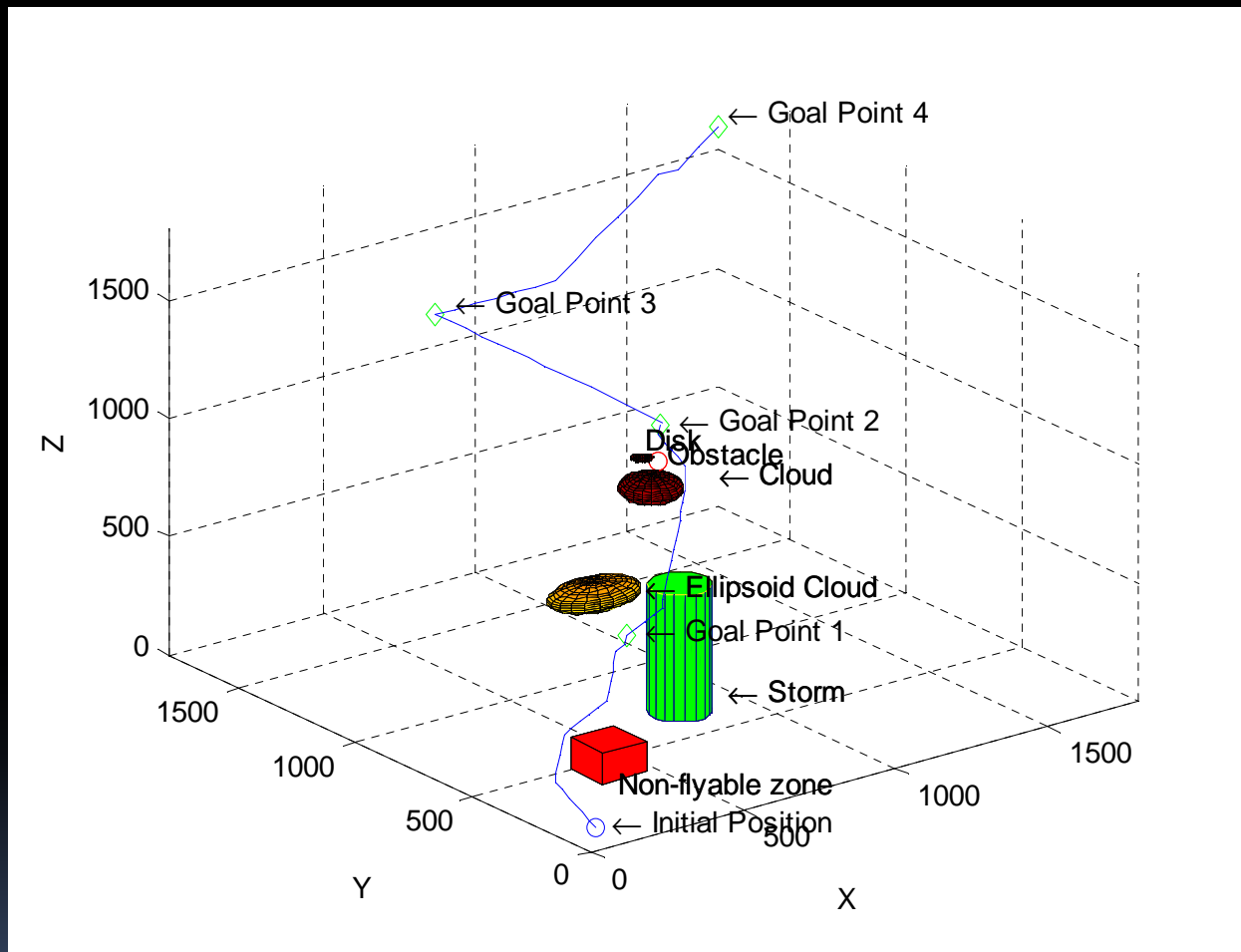


Fig.3 Scenario Evitement d'obstacles avec 4 objectifs et 8 obstacles en 4D

Scenario de mission (III)

Paramètres	Coordonnées
$X_{\max} Y_{\max} Z_{\max}$	{10000 10000 10000}m
Position initiale	{500 500 500}m
Objectifs	{5000 5000 5000}m détecté après 1s {10000 10000 10000}m détecté après 2s
Sphère	{8500, 8500, 8500}m R=3000m détecté après 2s
Zone rouge	{1600, 1600, 1400}m {1300x1300x1300}m
Disc	{9000, 9660, 9000}km R=1000m
Cylindre	{8000, 6500, 250}km R ₁ =1000m R ₁ =1000m H=8000m
Point	{9600, 9660, 9600}km
Vitesse moyenne entre objectifs (2 et 4)	200m/s

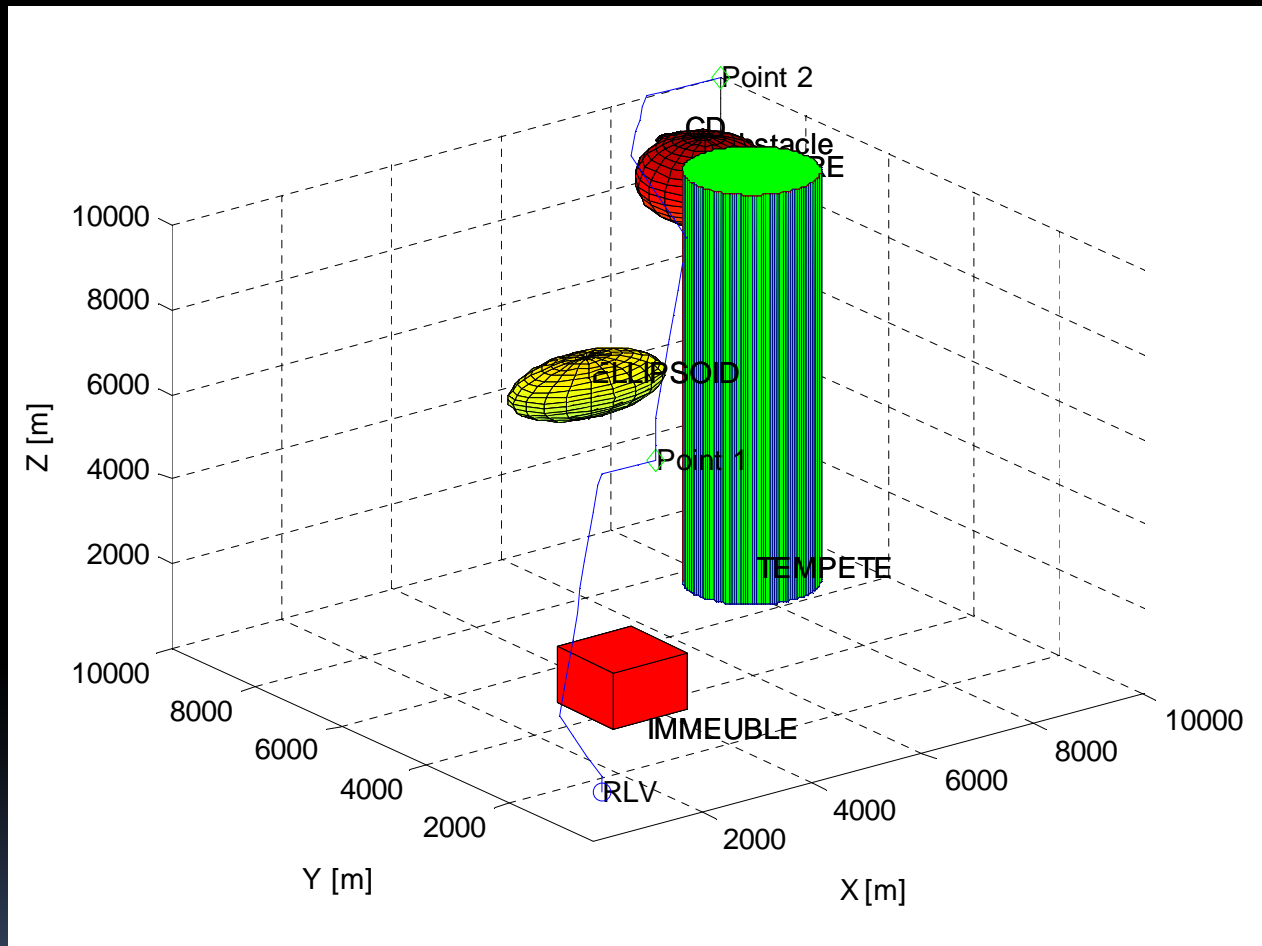


Fig.4 Scenario Evitement d'obstacles avec 2 objectifs et 8 obstacles

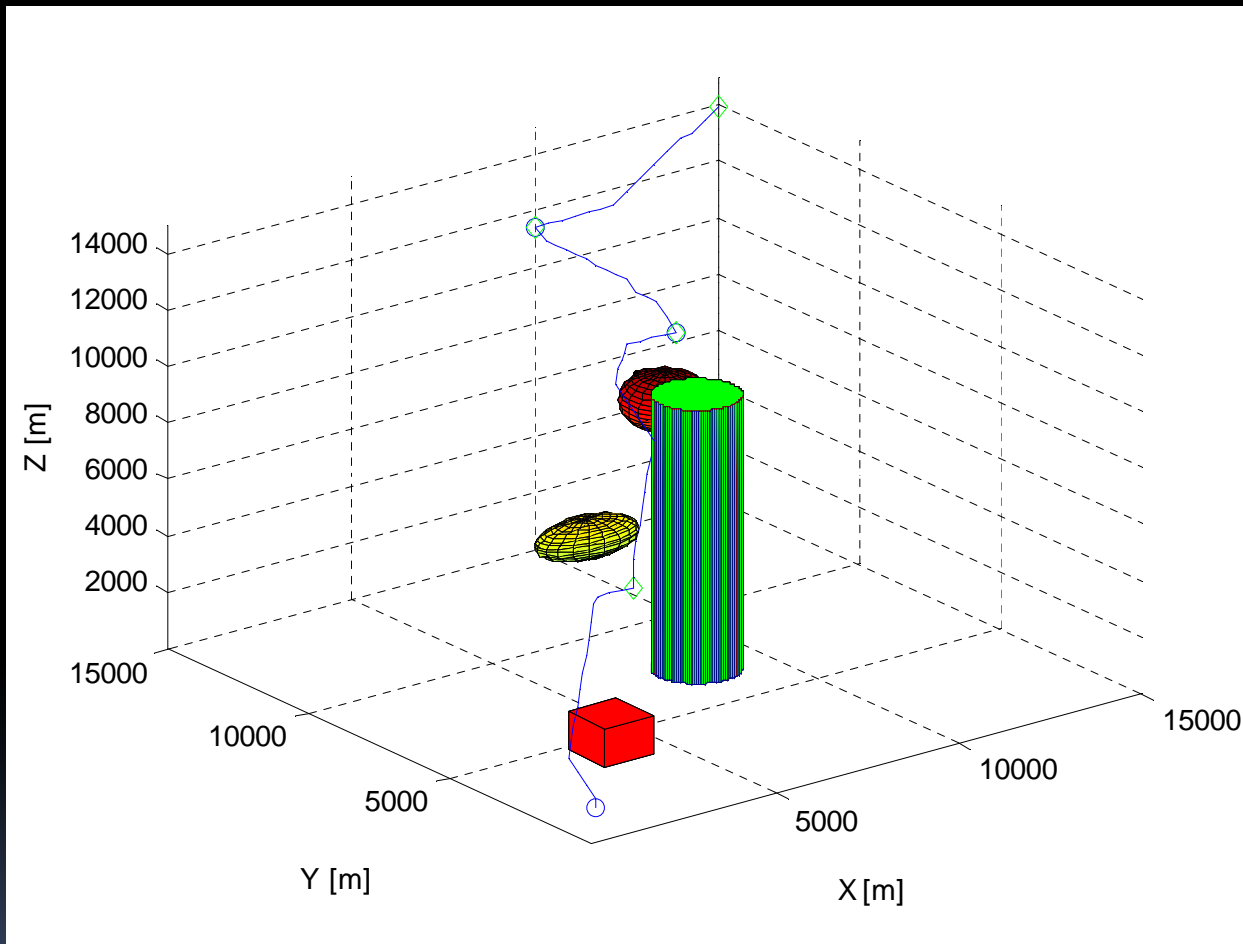


Fig.4 Scenario Evitement d'obstacles avec 4 objectifs 8 obstacles en 4D

Scenario de mission (IV)

Paramètres	Coordonnées
$X_{\max} Y_{\max} Z_{\max}$	{11000 11000 11000}m
Position initiale	{57 57 0.3}km
Objectifs	{565 565 4}km détecté après 1s
Coordonnées de la sphère avant le changement de position	{452, 5452, 2.9} R=1km détecté après 2s
Coordonnées de la sphère après le changement de position	{336, 524. 3}km
Obstacle Point	{226.8, 339.3, 2.6}km
Obstacle Point	{339.3, 339.3, 2.2}km
Zone interdite au vol	
Position initiale	{169.7, 167.4, 0.74}km
Dimensions	{113.5, 113.5, 1.47}km
Temps de simulation	
Avant le changement du chemin	64s
Après le changement du chemin	3s
Vitesse minimale	35m/s
Vitesse maximale	200m/s

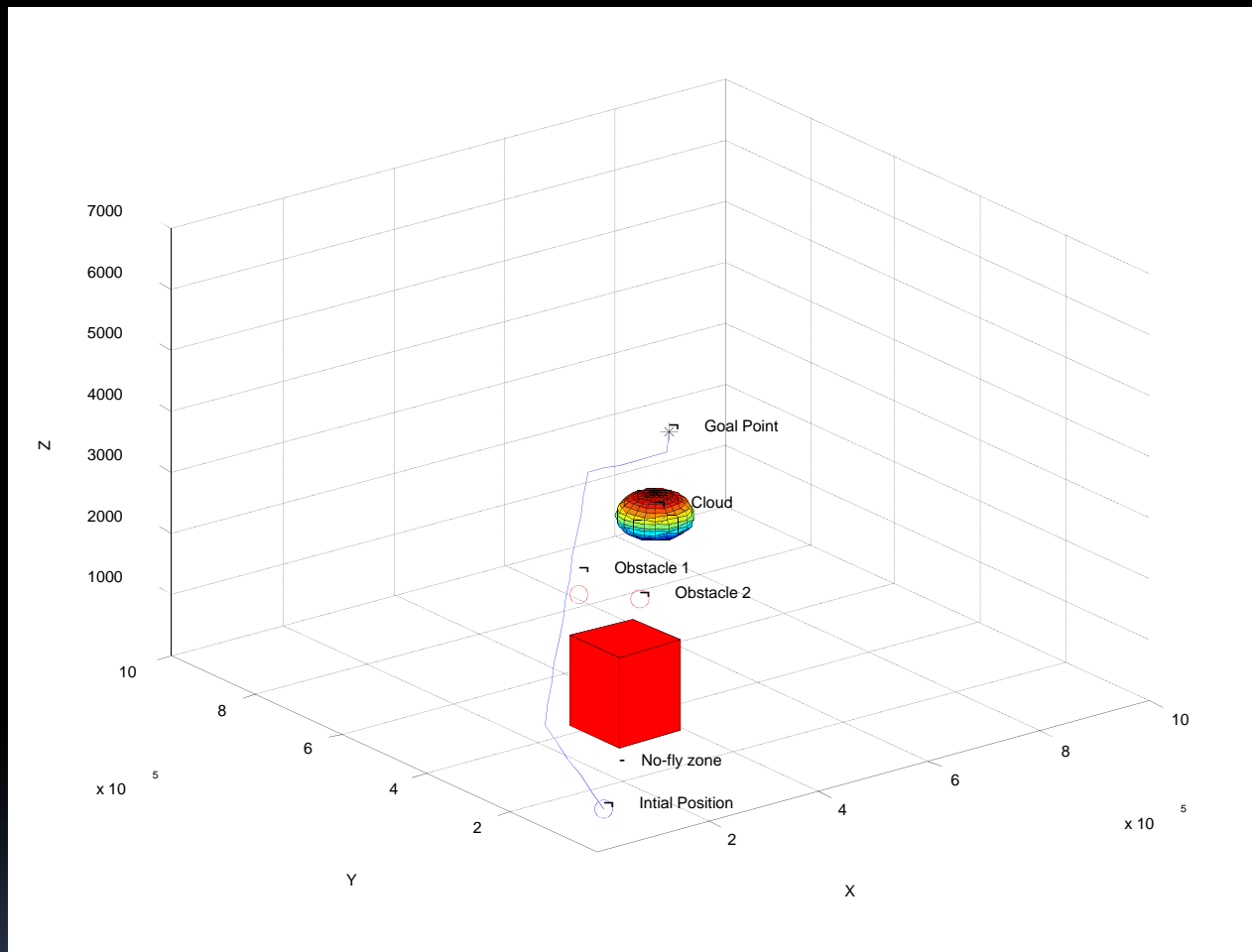


Fig.5 Scenario Evitement d'obstacles brut avec 1 objectif et 4 obstacles

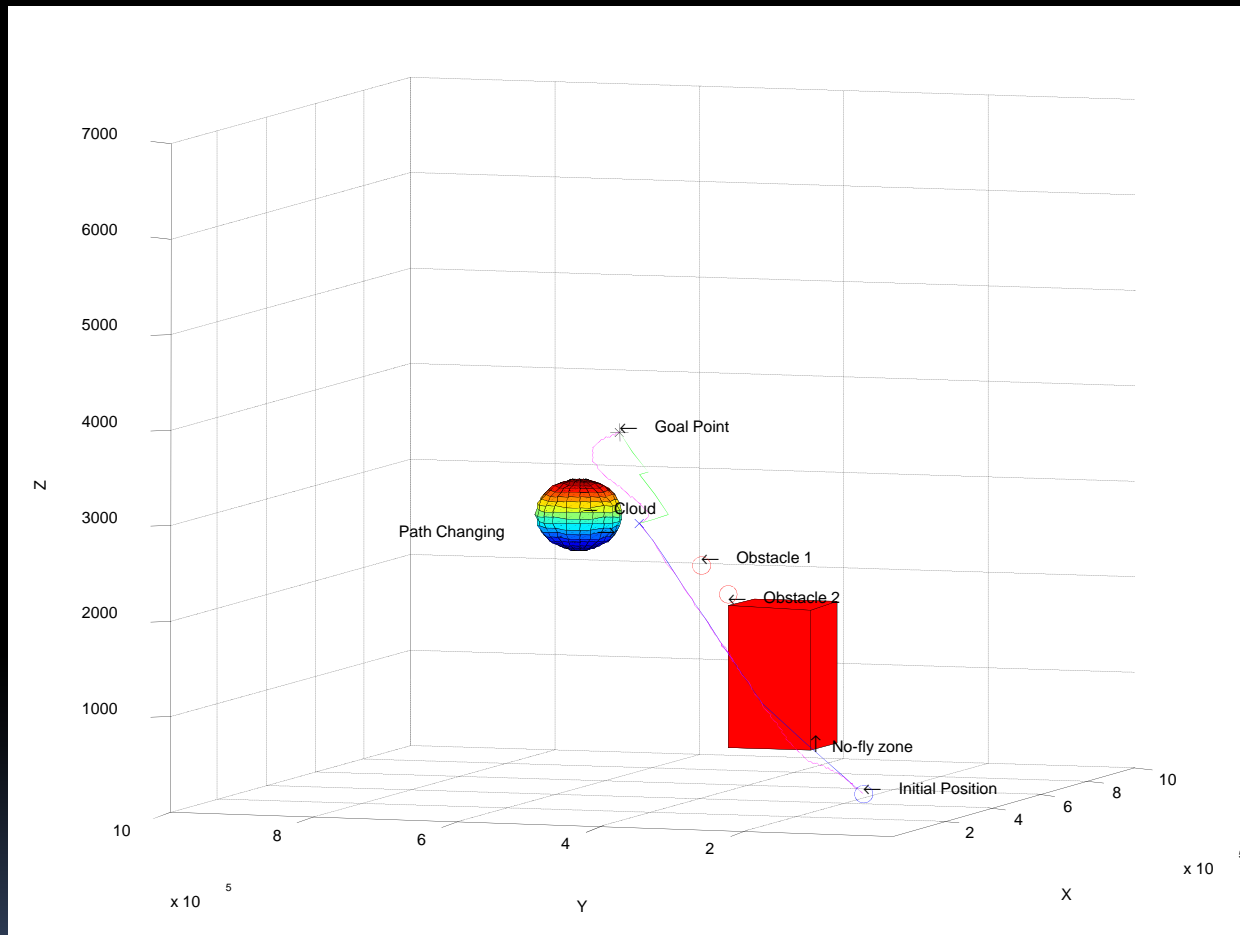


Fig.6 Scenario Evitement d'obstacles avec 1 objectif et 4 obstacles, replanification de chemin et génération de chemin

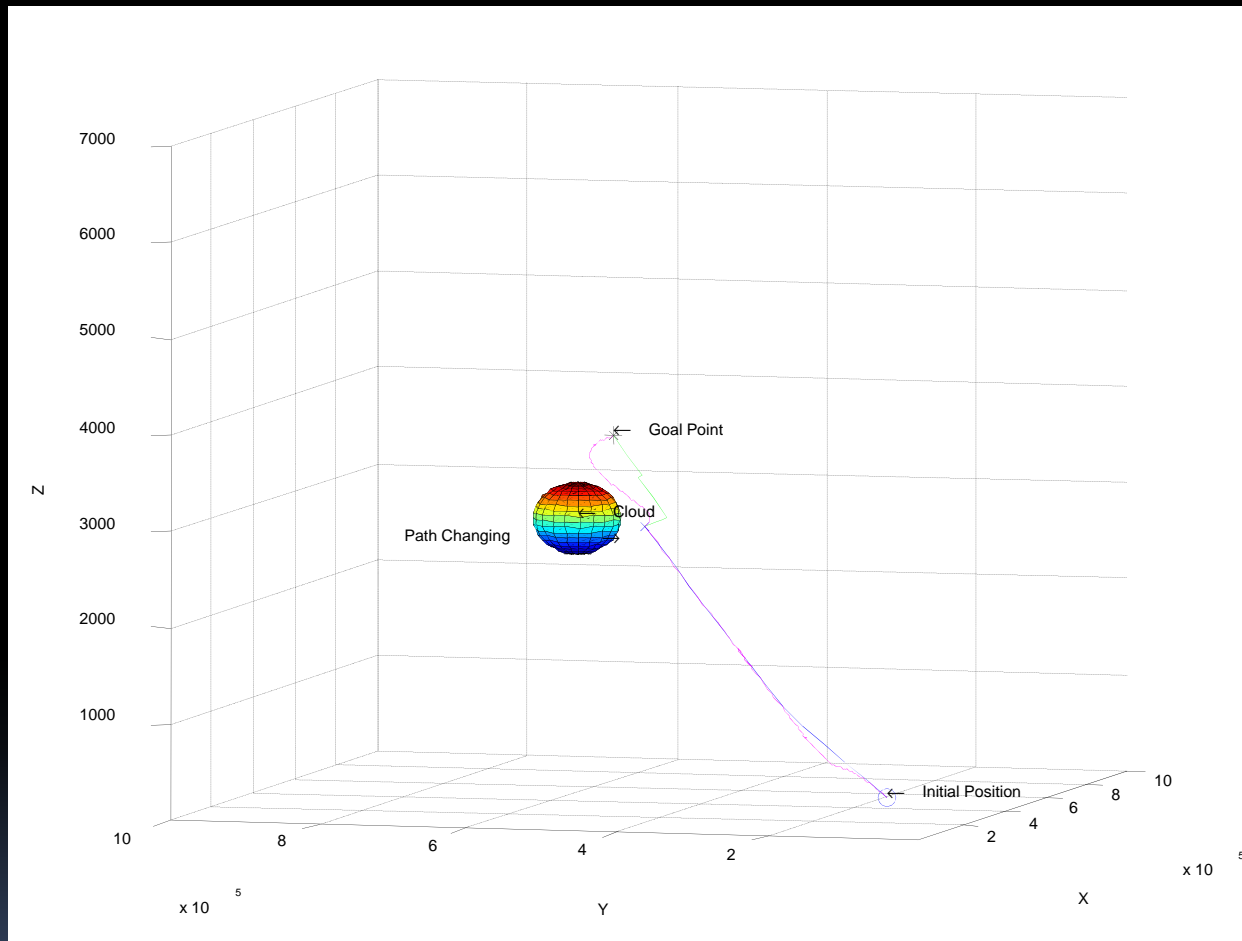


Fig.7 Scenario Evitement d'obstacles avec 1 objectifs 4 obstacles, récupération, replanification et génération de chemin



CONCLUSION

Conclusions

- ✓ Transformation de l'algorithme appliqué A* de 2D en 3D et en 4D
- ✓ Conception d'une méthode de planification de mission
 - ✓ Exploration d'une région de mission en présence d'obstacles dynamiques
 - ✓ Détection et mise à jour des obstacles
 - ✓ Détermination de points de passage et génération de chemin
 - ✓ Replanification
 - ✓ Association de différentes contraintes
- ✓ Module indépendant (applicable et testé avec d'autres modules de planification)
- ✓ Application dans différents scénarii de mission

Perspectives

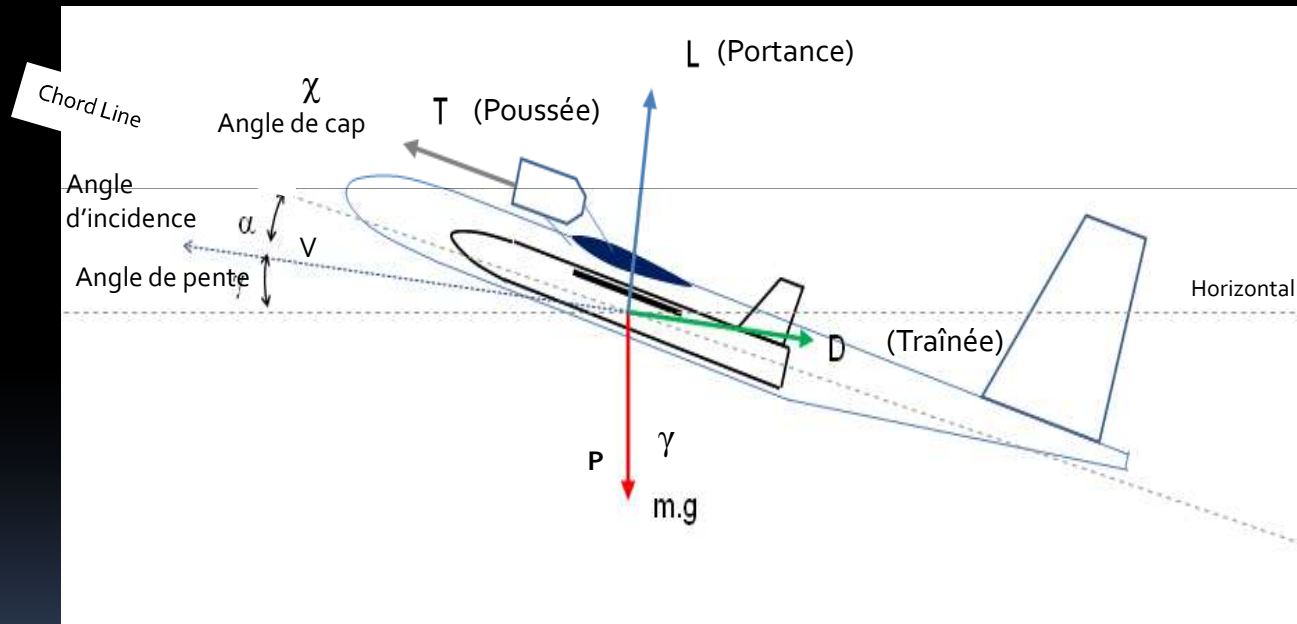
- ✓ Implantation dans le calculateur de bord en temps réel
- ✓ Tester avec d'autres types de générateurs de chemins
- ✓ Planification sous incertitude:
 - Incertitude d'observation
 - Incertitude d'action
 - Incertitude de détection



MERCI DE VOTRE ATTENTION

Modélisation: Forces agissantes

$$\text{Loi de Newton: } \sum \vec{F}_i = m\vec{a}$$



Modèle cinématique (Vent)

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

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

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

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$$

$$\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}$$

$$z \leq H$$

$$R_{\min} \leq R$$

Modèle dynamique (Vent)

$$\dot{V} = -\frac{D}{m_p + m_l} - g \sin \gamma + \frac{T \cos \alpha}{m_p + m_l} - W_x \cos \gamma \cos \chi - W_y \cos \gamma \sin \chi - W_z \sin \gamma$$

$$\dot{\gamma} = \frac{L \cos \sigma}{(m_p + m_l)V} - \frac{g \cos \gamma}{V} + \frac{T \sin \alpha \cos \sigma}{(m_p + m_l)V} + \frac{W_x \sin \gamma \cos \chi}{V} - \frac{W_y \sin \gamma \sin \chi}{V} - \frac{W_z \cos \gamma}{V}$$

$$0 \leq T \leq T_{\max}$$

$$\sigma_{\min} \leq \sigma \leq \sigma_{\max}$$

$$z \leq H$$

$$\dot{\chi} = \frac{L \sin \sigma}{(m_p + m_l)V \cos \gamma} + \frac{T \sin \alpha \sin \sigma}{(m_p + m_l)V \cos \gamma} + \frac{W_x \sin \chi}{V \cos \gamma} - \frac{W_y \cos \chi}{V \cos \gamma}$$

T: poussée, L: portance, D: Trainée, m_p : masse du porteur, m_l masse du lanceur