RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Contrôle optimal et planification de trajectoire pour le guidage des systèmes aérospatiaux

Soutenance HDR

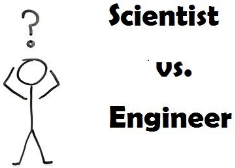
Bruno Hérissé
bruno.herisse@onera.fr

ONERA Palaiseau, 17 Mars 2023

université PARIS-SACLAY

CV et activités

- **2004–2007** : Ingénieur Supélec, M2 Rercherche Supélec et Université de Rennes 1
- **2007–2010** : Doctorat en Automatique, CEA-List, Université Côte d'Azur
- **2011–** : Ingénieur de recherche, ONERA/DTIS, Palaiseau



Études :

- Projets au profit de DGA et CNES (réalisations techniques, gestion et expertises)

Recherche :

- Projets de recherche internes ONERA
- Encadrement de stages M2(9), thèses(5) et post-docs(2)

Enseignement :

- Automatique, ENSTA Paris (~23h/an)

ONERA DTIS

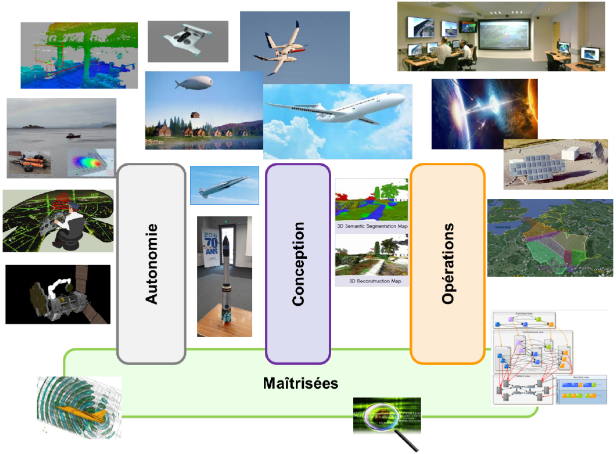
Département Traitement de l'Information et Systèmes

ONERA :

- EPIC sous tutelle du MinArm
  ~2000 personnes
  ~230 M€ (55% externe)
- 7 départements métiers, souffleries

DTIS :

- 3 sites (Palaiseau, Toulouse, Salon de Provence)
- 16 unités (~300 personnes dont ~80 doctorants)

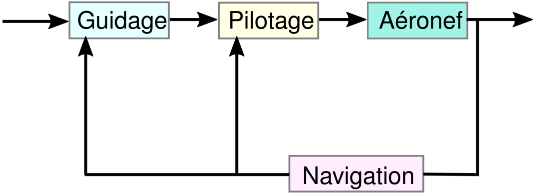


Études et recherches appliquées dans l'équipe NGPA

Navigation-Guidage-Pilotage des véhicules Autonomes

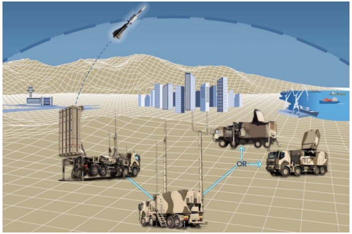
Activités :

- Modèles véhicules et systèmes
- Modèles NGP
- Simulations, expérimentations
- Évaluations de performance systèmes



Démarche :

- Méthodologie (thèses)
  $\rightarrow$ **nouveaux algorithmes**
- Méthodologie/développements (projets internes)
  $\rightarrow$ **outils logiciels, brevets**
- Études/Expertises/Transferts (contrats externes)
  $\rightarrow$ **valorisation**



SAMP/T NG (EUROSAM)

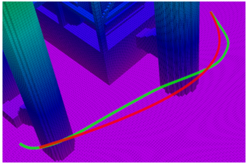
Thèmes de recherche

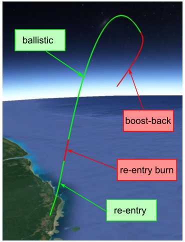
Guidage des véhicules aérospatiaux

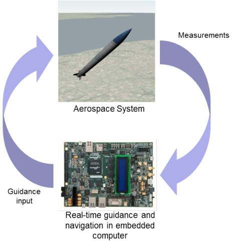
- Lois de commande boucle fermée (atterrissage, interception, rendez-vous)
- Contrôle optimal et méthodes de tir

Planification de trajectoire et commande en environnement contraint et incertain

- Planification sous contraintes d'état
- Planification robuste







Encadrements de thèses

- **2012–2015** : **Pawit Pharpatara** (50%) avec Yasmina Bestaoui (Université d'Evry)
  Planification de trajectoire sous contraintes d'aéronefs.
- **2015–2018** : **Riccardo Bonalli** (50%) avec Emmanuel Trélat (Sorbonne Université)
  Contrôle optimal de systèmes aérospatiaux avec contraintes sur le contrôle et l'état et avec retards.
- **2016–2019** : **Émilien Flayac** (40%) avec Karim Dahia (ONERA) et Frédéric Jean (ENSTA Paris)
  Méthodes couplées de contrôle et d'estimation non linéaires adaptées à la navigation par corrélation de terrain.
- **2019–2022** : **Étienne Bertin** (30%) avec Julien Alexandre dit Sandretto, Alexandre Chapoutot et Goran Frehse (ENSTA Paris)
  Contrôle optimal et robuste pour le guidage de véhicules autonomes.
- **2020–2023** : **Clara Leparoux** (50%) avec Frédéric Jean (ENSTA Paris)
  Commande sous incertitudes pour l'atterrissage d'un premier étage de lanceur réutilisable.

Synthèse des travaux de recherche

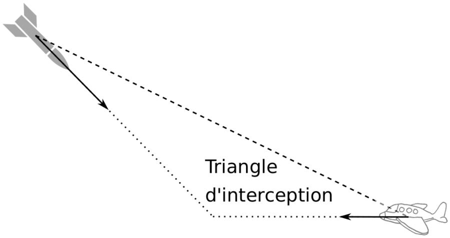
Lois de commande pour le rendez-vous

Problème Linéaire-Quadratique en temps fini

Loi de Navigation Proportionnelle

Annulation de la "distance de passage" :

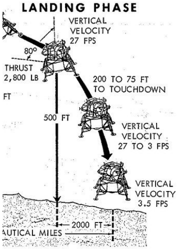
$$a^{\perp} = -K(t_{go})\frac{ZEM^{\perp}}{t_{go}^2}$$



Loi de rendez-vous

Annulation de position et vitesse :

$$a = K_r(t_{go})\frac{ZEM}{t_{go}^2} - K_v(t_{go})\frac{ZEV}{t_{go}} + a_f$$

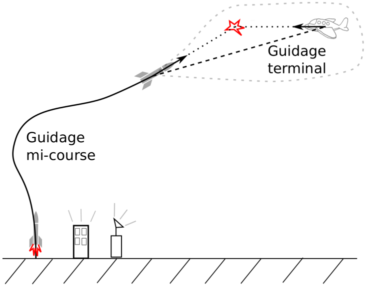


Guidage optimal

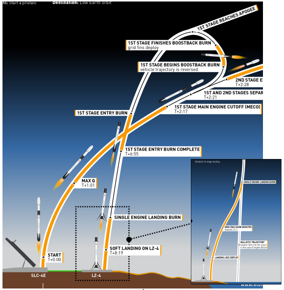
Problème de contrôle optimal

- Optimiser un critère (énergie cinétique, consommation de carburant)
- Respecter des contraintes (facteur de charge, pression dynamique, flux thermiques)
- Calculs embarqués (changement de mission, dispersions)

Guidage mi-course



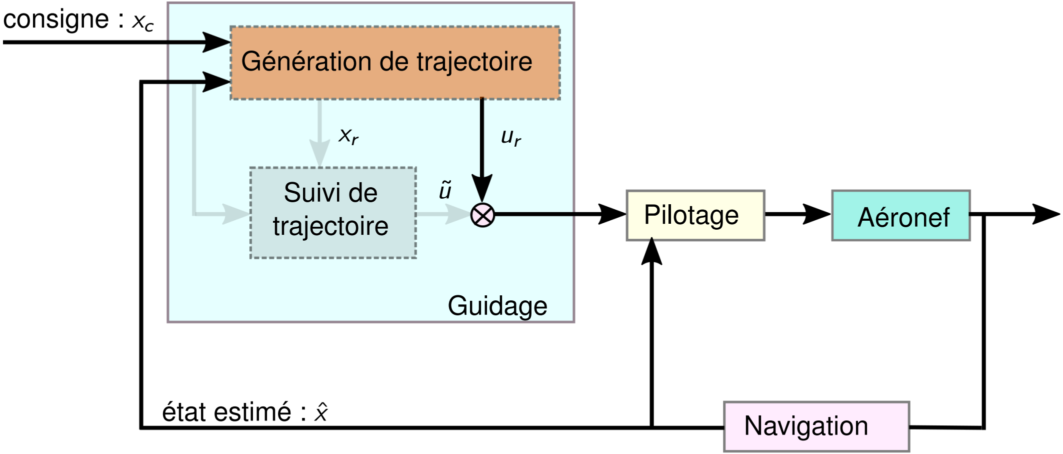
Rentrée atmosphérique



www.elonx.net

Guidage optimal

Stratégie de Guidage



Guidage optimal

Problème de contrôle optimal sous contraintes

$$
\begin{cases}
\min & C_t(u) = g(t_f, x(t_f)) + \int_t^{t_f} f^0(\tau, x(\tau), u(\tau))\, d\tau, \\
\text{t.q.} & \dot{x}(\tau) = f(\tau, x(\tau), u(\tau)), \\
& c(\tau, x(\tau), u(\tau)) \geq 0, \quad \forall \tau \in [t, t_f], \\
& x(t) = x_t, \quad x(t_f) \in M_f.
\end{cases}
$$

Méthodes directes

- Discrétisation (Runge-Kutta, méthodes pseudo-spectrales)
- Optimisation (LP, QP, SOCP, CP, SQP, SCP, etc.)

Méthodes indirectes

- Conditions nécessaires (PMP)
- Problème aux deux bouts (méthode de tir)

Guidage optimal

Problème de contrôle optimal sous contraintes

$$\begin{cases} \min & C_t(u) = g\left(t_f, x(t_f)\right) + \displaystyle\int_t^{t_f} f^0\left(\tau, x(\tau), u(\tau)\right) \, d\tau, \\ \text{t.q.} & \dot{x}(\tau) = f\left(\tau, x(\tau), u(\tau)\right), \\ & c\left(\tau, x(\tau), u(\tau)\right) \geq 0, \quad \forall \tau \in [t, t_f], \\ & x(t) = x_t, \quad x(t_f) \in M_f. \end{cases}$$

Méthodes directes

- Discrétisation (Runge-Kutta, méthodes pseudo-spectrales)
- Optimisation (LP, QP, SOCP, CP, SQP, SCP, etc.)

Méthodes indirectes

- Conditions nécessaires (PMP)
- Problème aux deux bouts (méthode de tir)

Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d’une méthode directe (intuition)

Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d'une méthode directe (intuition)
- Analyse des conditions nécessaires (preuve)

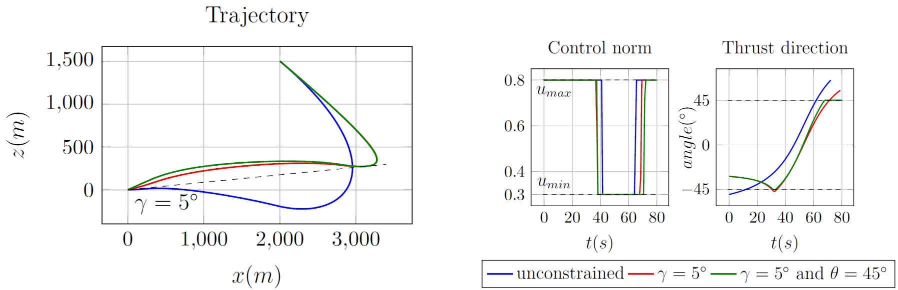
Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d'une méthode directe (intuition)
- Analyse des conditions nécessaires (preuve)

Atterrissage optimal en carburant : structure Max-Min-Max



Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d'une méthode directe (intuition)
- Analyse des conditions nécessaires (preuve)

Initialisation :

- Utilisation d'une méthode directe
  Multiplicateurs de Lagrange $\rightarrow$ vecteur adjoint

Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d'une méthode directe (intuition)
- Analyse des conditions nécessaires (preuve)

Initialisation :

- Utilisation d'une méthode directe
  Multiplicateurs de Lagrange $\rightarrow$ vecteur adjoint
- Méthode de continuation
  Continuation discrète : $\mathcal{P}_0 \rightarrow (\mathcal{P}_{\lambda_k})_{0 \leq \lambda_k \leq 1} \rightarrow \mathcal{P}_1$

Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d'une méthode directe (intuition)
- Analyse des conditions nécessaires (preuve)

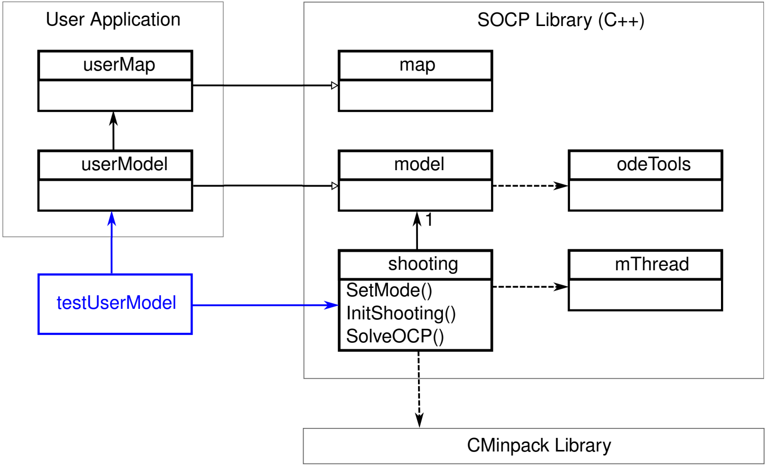
Initialisation :

- Utilisation d'une méthode directe
  Multiplicateurs de Lagrange $\rightarrow$ vecteur adjoint
- Méthode de continuation
  Continuation discrète : $\mathcal{P}_0 \rightarrow (\mathcal{P}_{\lambda_k})_{0\leq\lambda_k\leq 1} \rightarrow \mathcal{P}_1$

Exemple : $\lambda = (\mu, \delta, r_x, r_u) \quad \mapsto \quad \begin{cases} \min & C_t(u) = g(t_f, x(t_f)) + \int_t^{t_f} f^0(\tau, x(\tau), u(\tau), \mu)\, d\tau, \\ \text{t.q.} & \dot{x}(\tau) = f(\tau, x(\tau), x(\tau - r_x), u(\tau), u(\tau - r_u)), \\ & c(\tau, x(\tau), u(\tau), \delta) \geq 0, \quad \forall \tau \in [t, t_f], \\ & x(t) = x_t, \quad x(t_f) \in M_f. \end{cases}$

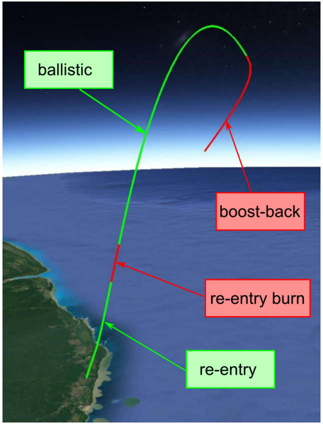
Guidage optimal

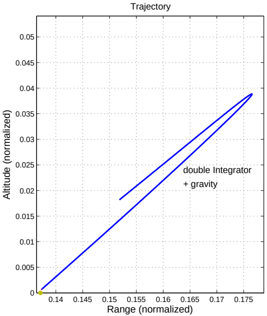
Outil logiciel SOCP : Shooting for Optimal Control Problems (https://github.com/bherisse/socp)

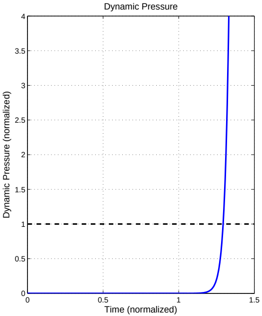


Guidage optimal

Récupération d'un étage VTVL







Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d'une méthode directe (intuition)
- Analyse des conditions nécessaires (preuve)

Initialisation :

- Utilisation d'une méthode directe
  Multiplicateurs de Lagrange $\rightarrow$ vecteur adjoint
- Méthode de continuation
  Continuation discrète : $\mathcal{P}_0 \rightarrow (\mathcal{P}_{\lambda_k})_{0\leq\lambda_k\leq 1} \rightarrow \mathcal{P}_1$

Calcul en ligne :

- Continuation discrète sur l'état courant (correction) :
  $(\mathcal{P}_{\lambda_k})_{0\leq\lambda_k\leq 1} : x_{ref}(t) + \lambda_k \left(x_{mes}(t) - x_{ref}(t)\right)$

Guidage optimal

Méthodes indirectes

Structure du contrôle :

- Utilisation d'une méthode directe (intuition)
- Analyse des conditions nécessaires (preuve)

Initialisation :

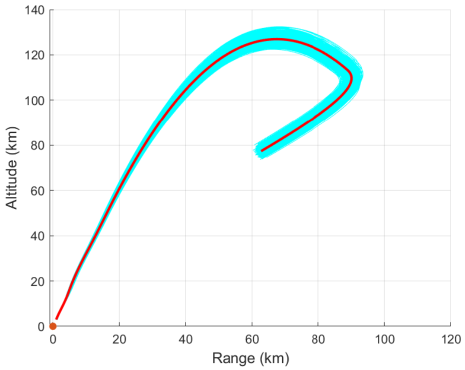
- Utilisation d'une méthode directe
  Multiplicateurs de Lagrange $\rightarrow$ vecteur adjoint
- Méthode de continuation
  Continuation discrète : $\mathcal{P}_0 \rightarrow (\mathcal{P}_{\lambda_k})_{0 \leq \lambda_k \leq 1} \rightarrow \mathcal{P}_1$

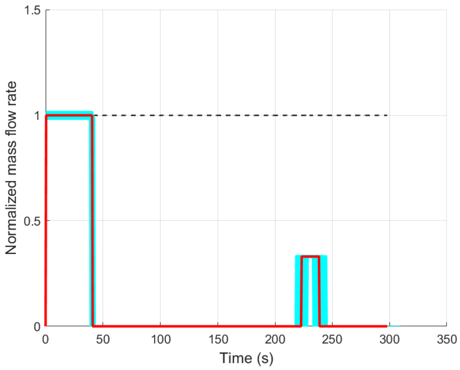
Calcul en ligne :

- Continuation discrète sur l'état courant (correction) :
  $(\mathcal{P}_{\lambda_k})_{0 \leq \lambda_k \leq 1} : x_{ref}(t) + \lambda_k \left(x_{mes}(t) - x_{ref}(t)\right)$
- Continuation discrète sur l'état final (modification de mission) :
  $(\mathcal{P}_{\lambda_k})_{0 \leq \lambda_k \leq 1} : x_{ref}(t_f) + \lambda_k \left(x_{cons} - x_{ref}(t_f)\right)$

Guidage optimal

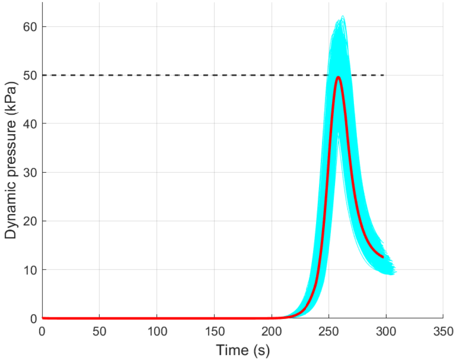
Récupération d'un étage VTVL

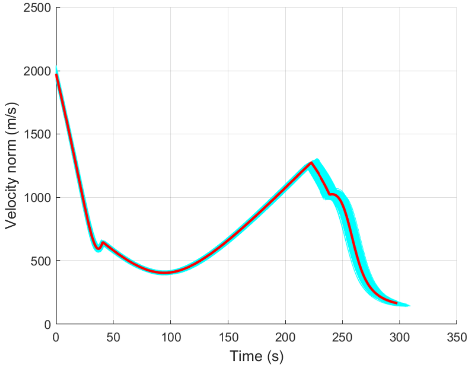




Guidage optimal

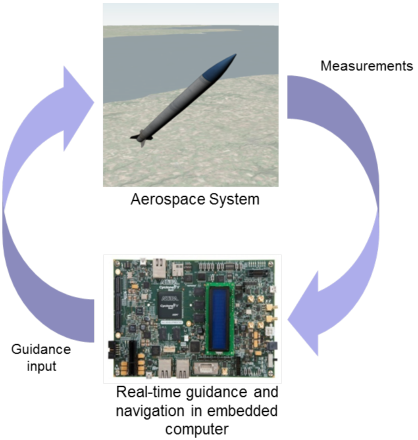
Récupération d'un étage VTVL





Guidage optimal

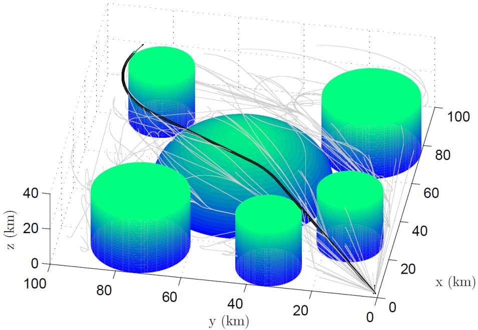
Interception : simulations avec calculateur dans la boucle



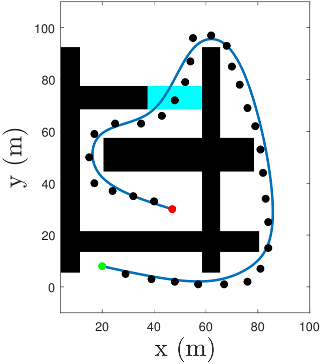
Planification de trajectoire sous contraintes d'état

Méthodes hybrides : techniques probabilistes et contrôle optimal

RRT* (avec métrique CSC)



PRM/RRT + Contrôle optimal



Travaux actuels et projet de recherche

Robustesse en planification de trajectoire

Problématique :

- Méconnaissances sur les paramètres du modèle
- Bruits de modèle (diffusion)
- Bruits de mesure

Robustesse en planification de trajectoire

Problématique :

- Méconnaissances sur les paramètres du modèle
- Bruits de modèle (diffusion)
- Bruits de mesure

Solutions :

- Définir des marges de robustesse dans le problème de planification
  $\rightarrow$ Réglage des marges par **simulations de Monte-Carlo**

Robustesse en planification de trajectoire

Problématique :

- Méconnaissances sur les paramètres du modèle
- Bruits de modèle (diffusion)
- Bruits de mesure

Solutions :

- Définir des marges de robustesse dans le problème de planification
  $\rightarrow$ Réglage des marges par **simulations de Monte-Carlo**
- Tenir compte des incertitudes dans la modélisation
  $\rightarrow$ **Contrôle stochastique en boucle ouverte**

Robustesse en planification de trajectoire

Problématique :

- Méconnaissances sur les paramètres du modèle
- Bruits de modèle (diffusion)
- Bruits de mesure

Solutions :

- Définir des marges de robustesse dans le problème de planification
  $\rightarrow$ Réglage des marges par **simulations de Monte-Carlo**
- Tenir compte des incertitudes dans la modélisation
  $\rightarrow$ **Contrôle stochastique en boucle ouverte**

$$dx_t = f(x_t, u(t))dt + \sigma(x_t, u(t))dW_t,$$
$$x_0 \sim x^0.$$

Robustesse en planification de trajectoire

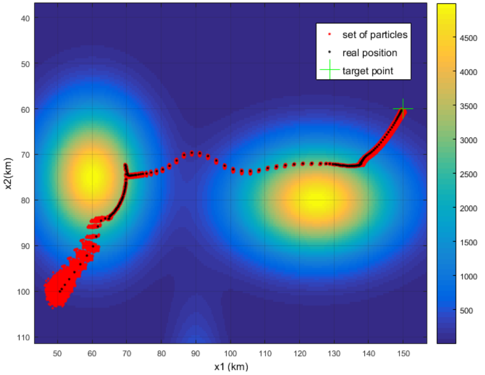
Robustesse à la qualité de mesure :

- Équation de mesure : $dy_t = h(x_t, u(t))dt + dV_t$
- Commande duale explicite :

$$\min \quad J(u) = \mathbb{E}[C(u)] + \mathbb{E}\left[g^{FIM}(x_{t_f}) + \int_0^{t_f} f^{FIM}(x_t)dt\right]$$

Robustesse en planification de trajectoire

Navigation par corrélation de terrain : commande SMPC duale explicite et filtre particulaire



Robustesse en planification de trajectoire

Robustesse à la qualité de mesure :

- Équation de mesure : $dy_t = h(x_t, u(t))dt + dV_t$
- Commande duale explicite :

$$\min \quad J(u) = \mathbb{E}[C(u)] + \mathbb{E}\left[g^{FIM}(x_{t_f}) + \int_0^{t_f} f^{FIM}(x_t)dt\right]$$

Robustesse aux incertitudes :

- Minimisation de la covariance :

$$\min \quad J(u) = \mathbb{E}[C(u)] + \mathrm{tr}(\bar{Q}_f \mathbf{P}(t_f)) + \int_0^{t_f} \mathrm{tr}(\bar{Q}\mathbf{P}(t))dt$$

Robustesse en planification de trajectoire

Linéarisation statistique

Problèmes en stochastique :

- Difficulté d'analyse
- Difficulté de résolution numérique (optimisation stochastique)

Robustesse en planification de trajectoire

Linéarisation statistique

Problèmes en stochastique :

- Difficulté d'analyse
- Difficulté de résolution numérique (optimisation stochastique)

Linéarisation statistique :

- Approximation de x_t par (m, P) :

$$\begin{cases} \dot{m} &= f(m,u), \\ \dot{P} &= D_x f(m,u)P + PD_x f(m,u)^\top + \sigma(m,u)\sigma(m,u)^\top, \end{cases}$$

$$m(0) = \mathbb{E}[x^0], \quad P(0) = \mathrm{Cov}(x^0),$$

Robustesse en planification de trajectoire

Linéarisation statistique

Problèmes en stochastique :

- Difficulté d'analyse
- Difficulté de résolution numérique (optimisation stochastique)

Linéarisation statistique :

- Approximation de x_t par (m, P) :

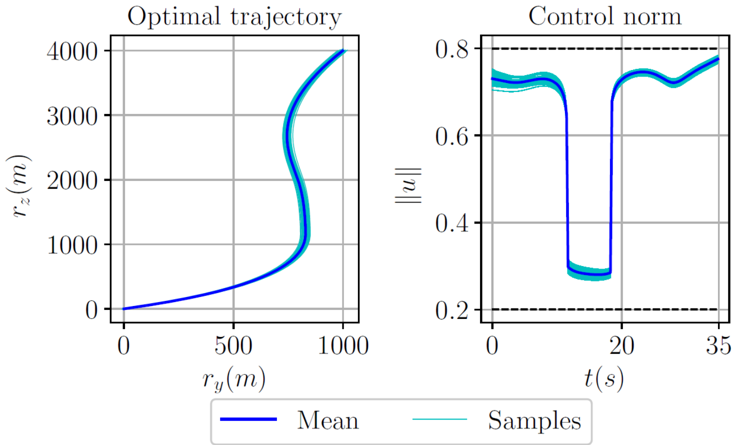
$$\begin{cases} \dot{m} &= f(m,u), \\ \dot{P} &= D_x f(m,u)P + PD_x f(m,u)^\top + \sigma(m,u)\sigma(m,u)^\top, \end{cases}$$

$$m(0) = \mathbb{E}[x^0], \quad P(0) = \mathrm{Cov}(x^0),$$

- **Bonne approximation ? Accessibilité sur P ? Gestion des contraintes ?**

Robustesse en planification de trajectoire

Trajectoire d'atterrissage robuste avec retour d'état partiel et commande saturée



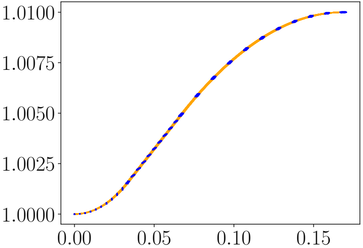
Robustesse en planification de trajectoire

Analyse de robustesse par méthodes ensemblistes :

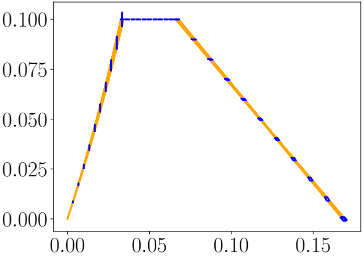
- Équation ensembliste :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)),$$
$$x(0) \in [x^0].$$

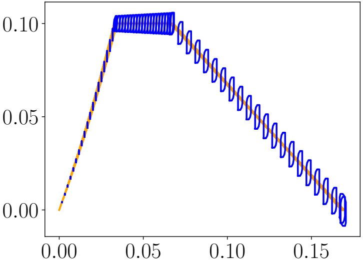
- Problème : obtenir une **enveloppe des trajectoires optimales**



Position (x, z)



Vitesse (v_x, v_z)



Simulation BO : vitesse (v_x, v_z)

Conclusion

Synthèse des travaux :

- Guidage optimal pour les systèmes aérospatiaux (missiles, lanceurs)
- Planification de trajectoire

Conclusion

Synthèse des travaux :

- Guidage optimal pour les systèmes aérospatiaux (missiles, lanceurs)
- Planification de trajectoire

Perspectives :

- Développement de méthodes et outils numériques efficaces pour le guidage optimal : dynamiques plus réalistes (retards, dynamique d'attitude)
- Planification de trajectoire robuste : trajectoires en plusieurs phases, analyse de la structure du contrôle robuste, systèmes à commande tout-ou-rien
- Applications : nouveaux problèmes de rendez-vous et de rentrée atmosphérique

MERCI à tous :
ingénieurs/chercheurs de l'ONERA,
collaborateurs,
doctorants, post-doctorants, stagiaires !

Questions ?