

# Commande Prédicative et Asservissement visuel

**Estelle Courtial**

Institut PRISME

Equipe-projet « Modélisation, Commande et Diagnostic des Systèmes »

Journée du pôle « Contrôle », jeudi 3 décembre 2009

# I. La commande prédictive

- Commande basée sur un **modèle**

Model-Based Predictive Control (MBPC)

- Formulation de l'objectif de commande en

un **problème d'optimisation non linéaire**

- **Horizon de prédiction fini et glissant**

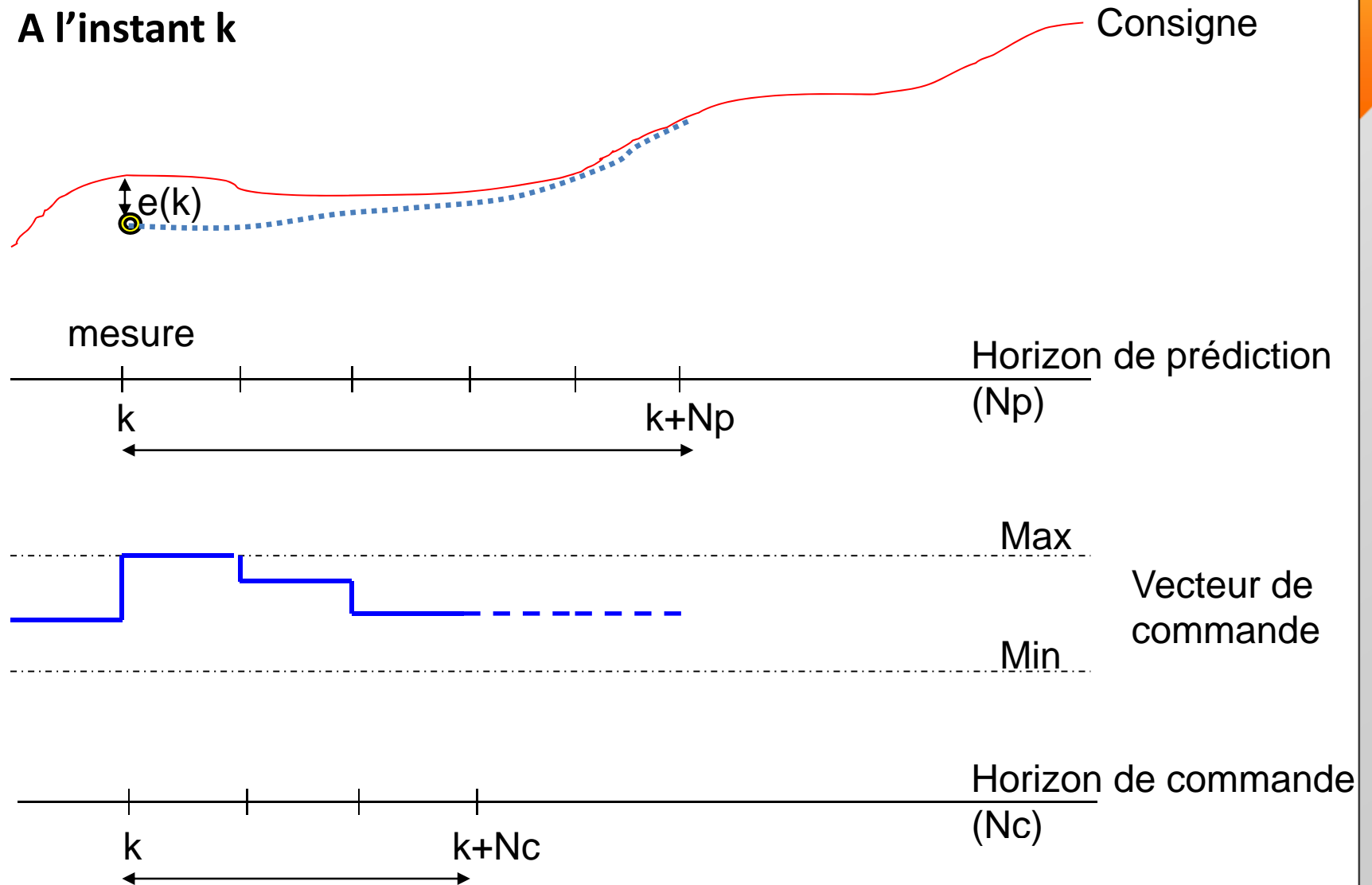
Commande optimale à horizon glissant

Receding horizon control

- **Prise en compte explicite des contraintes**

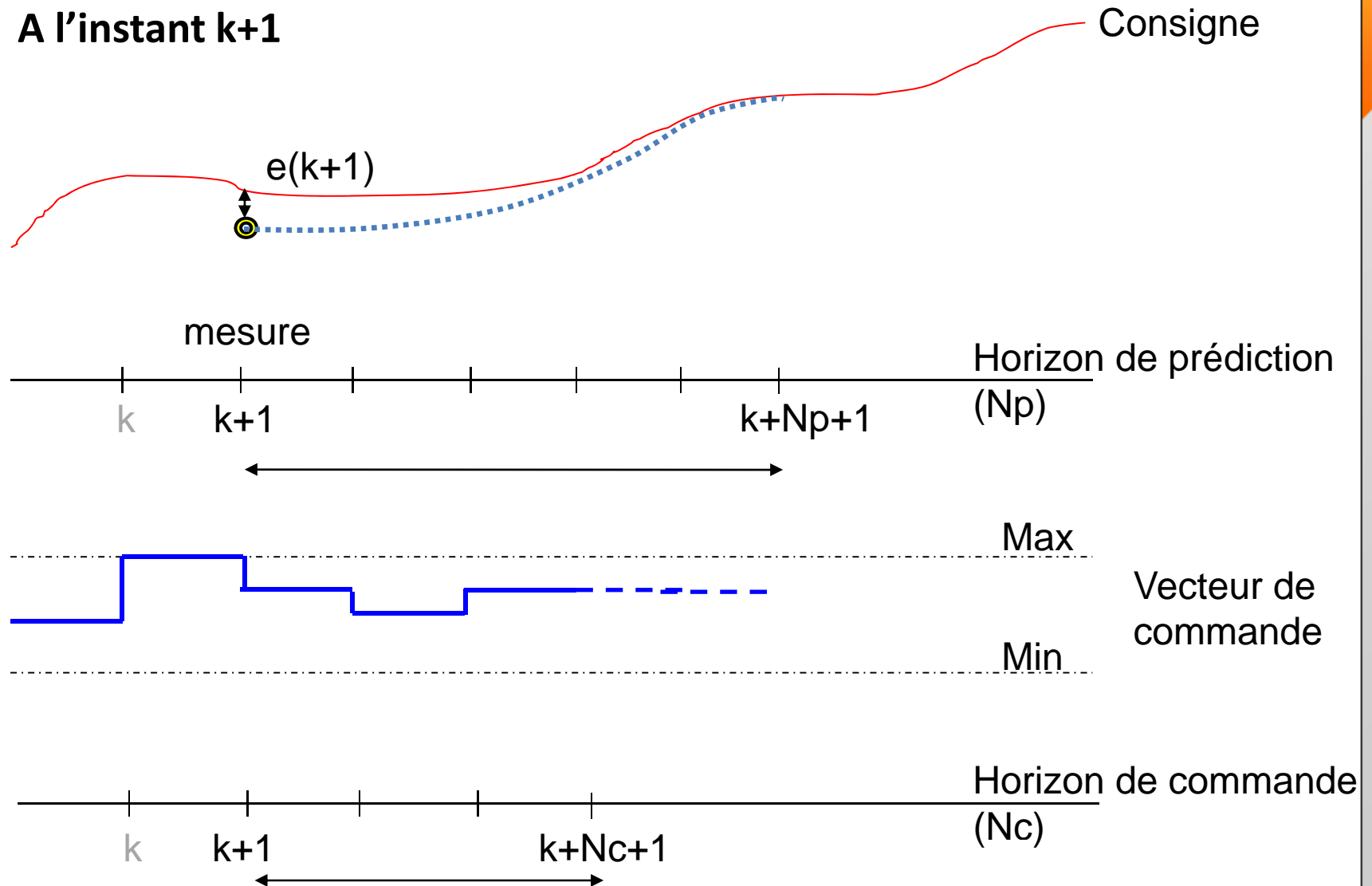
# I.2 Principe de la CP

A l'instant  $k$



# Principe de la CP

A l'instant  $k+1$



# Principe de la CP

Toutes les commandes prédictives ont en commun les quatre points suivants :

- Un **modèle** du procédé à commander,
- Une **trajectoire de référence** décrivant l'objectif de fonctionnement désiré,
- Un **critère d'optimisation** traduisant les objectifs de commande (cahier des charges),
- Une **méthode de résolution** permettant de déterminer la commande devant être appliquée au procédé et optimisant le critère défini ci-dessus.

## Formulation mathématique :

$$\min_{\tilde{u}} J = \sum_{i=k+1}^{k+N_p} L(\text{réf}_i, y_i, u_i)$$

- $L$  : fonctionnelle qui dépend de la consigne, de la sortie du modèle et de la commande
- $y_i = h(x_i)$  avec  $x_{i+1} = f(x_i, u_i)$
- $x_i \in \mathbf{X} \subset \mathbf{R}^n$ ,  $u_i \in \mathbf{U} \subset \mathbf{R}^m$ ,  $y_i \in \mathbf{Y} \subset \mathbf{R}^p$
- $\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{Y}$  : domaines définis par les contraintes sur les variables d'état, de commande et de sortie
- $\tilde{u} = \{u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N_c}, u_{k+N_c+1}, \dots, u_{k+N_p-1}\}$   $N_p > N_c$
- $N_p$  l'horizon de prédiction et  $N_c$  l'horizon de commande

## Avantages :

- Peut s'adapter à une **grande variété de procédés** : linéaires, non linéaires, stables ou non, décrits par des edo ou des edp, ....
- **Prise en compte explicite des contraintes**
- **Robustesse** par rapport aux perturbations
- **Facilité de mise en œuvre** : 3 paramètres de réglages

*Remarque : on dénombre plus de 4000 applications industrielles de CP dans les secteurs de l'alimentaire, du raffinage, de la chimie, des industries papetières, l'environnement, l'automobile, la robotique, ....*

## I.3 Problèmes ouverts

### ⇒ Problèmes de synthèse (pratiques)

- **Choix des horizons** de prédiction et de commande  
Compromis entre faisabilité numérique et poursuite
- **Le temps de calcul**  
Résolution du modèle et du problème d'optimisation  
en un temps inférieur à une période d'échantillonnage

### ⇒ Problèmes structurels (théoriques)

- **Faisabilité a priori**  
Existence ou non d'une solution au problème  
d'optimisation sous contraintes
- **Stabilité**  
Le retour d'état n'est pas explicite  
Contrainte terminale

## II L'asservissement visuel

II.1 Introduction à l'asservissement visuel

II.2 Commande prédictive visuelle

## II. L'asservissement visuel

**Définition :** Stratégie de commande permettant d'asservir des systèmes robotiques (bras manipulateur, robot mobile) à une position fixe ou variable en utilisant des informations visuelles.

### Plusieurs configurations :

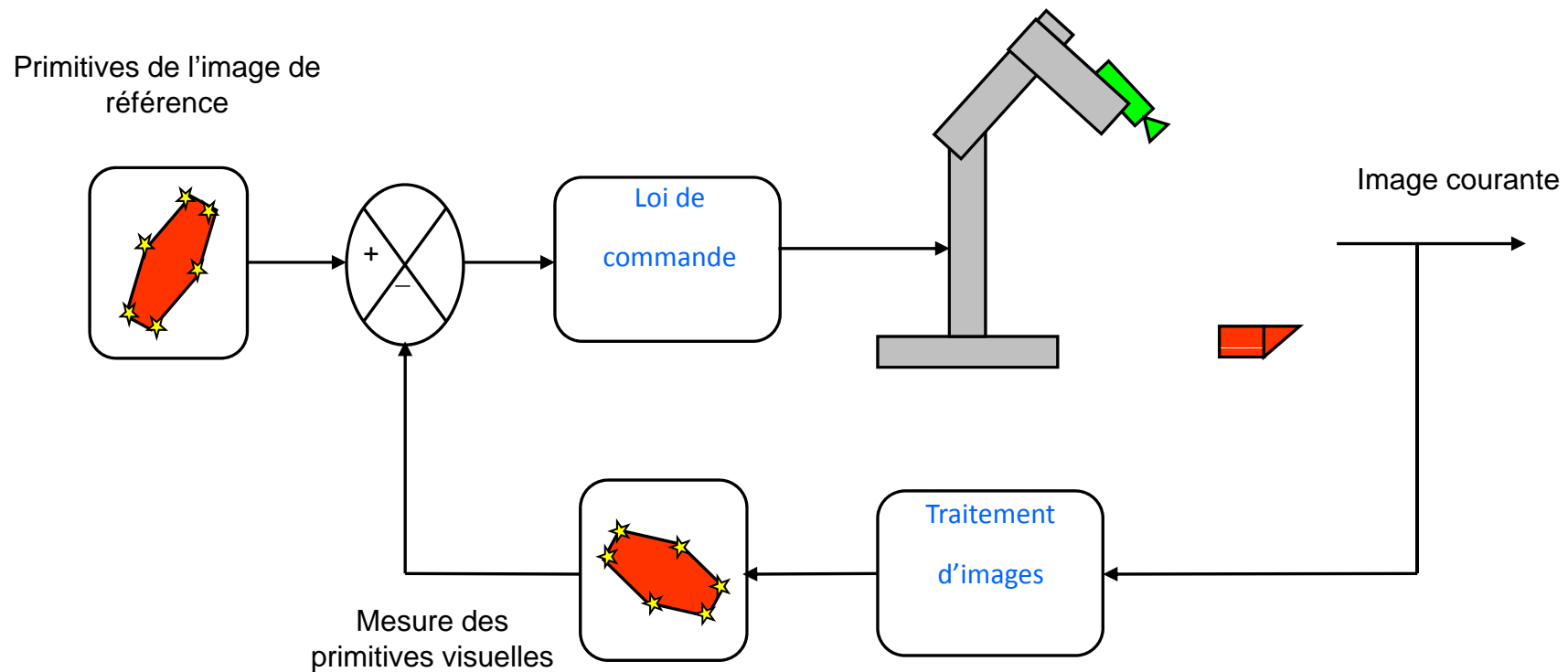
- Caméra déportée
- Caméra embarquée
- Stéréovision
  
- Caméra perspective
- Caméra omnidirectionnelle

### Plusieurs approches :

- AV 2D (Image Based Visual Servoing)
- AV 3D (Position Based Visual Servoing)
- Approches hybrides ( $2d^{1/2}$ ,  $2d/dt$ )

## L'asservissement visuel 2D

Exemple avec une caméra embarquée

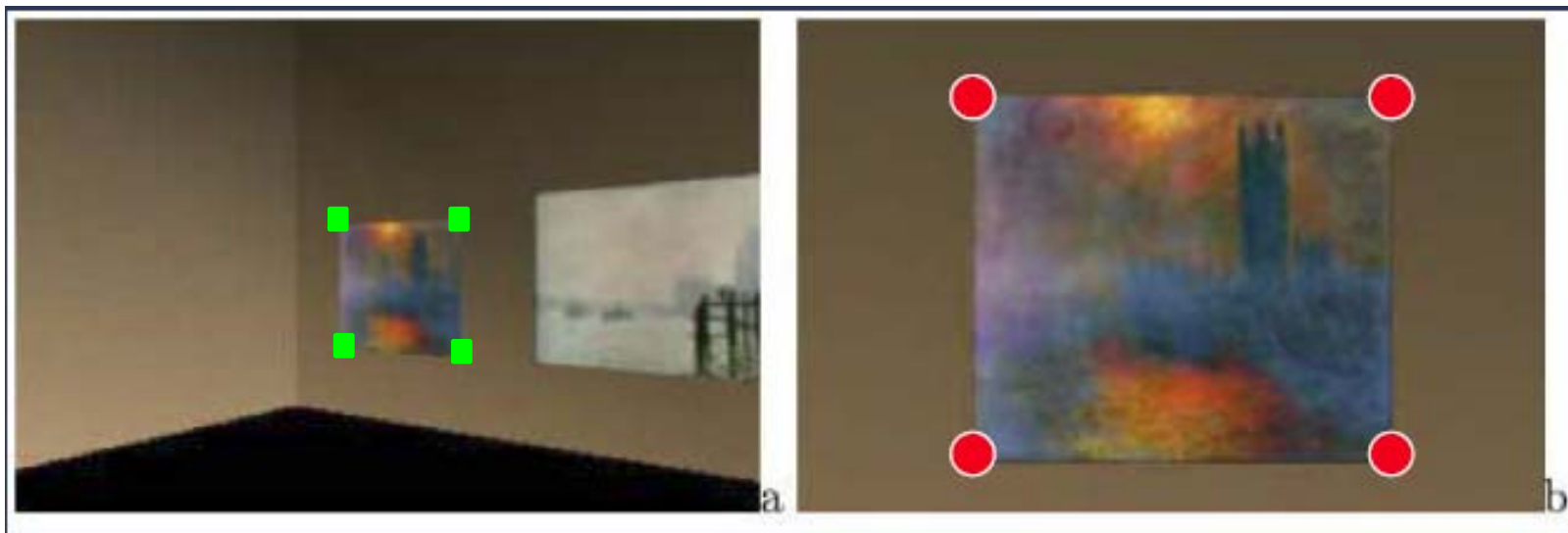


## Problématique de commande:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (s(t) - s^*(t)) \rightarrow 0$$

$s(t)$       Mesure des primitives dans l'image courante

$s^*(t)$       Primitives de l'image de référence



« Ce que j'ai »

« Ce que je veux »

## Deux notions :

- la détermination des primitives visuelles (TI)
- la détermination de la commande (contrôle)

## Deux approches :

- Approche 1 : (80%)  
effort sur la détermination des primitives  
utilisation d'une commande exponentielle décroissante
- Approche 2 : (20%)  
effort sur la commande  
utilisation de primitives visuelles simples de type point

## Difficultés de mise en œuvre

- Connaissance d'informations tridimensionnelles
- Prise en compte de contraintes de visibilité (contraintes 2D)
- Génération de trajectoires 3D irréalisables (contraintes 3D)
- .....

## Ce qu'il faut retenir :

1) Objectif de commande : faire tendre les primitives courantes vers les primitives désirées.

 **Cela revient à minimiser une erreur dans le plan image (2D)**

2) Par quel moyen ? En utilisant une matrice d'interaction reliant les variations des primitives aux variations du vecteur de commande.

 **Cela revient à utiliser un modèle**

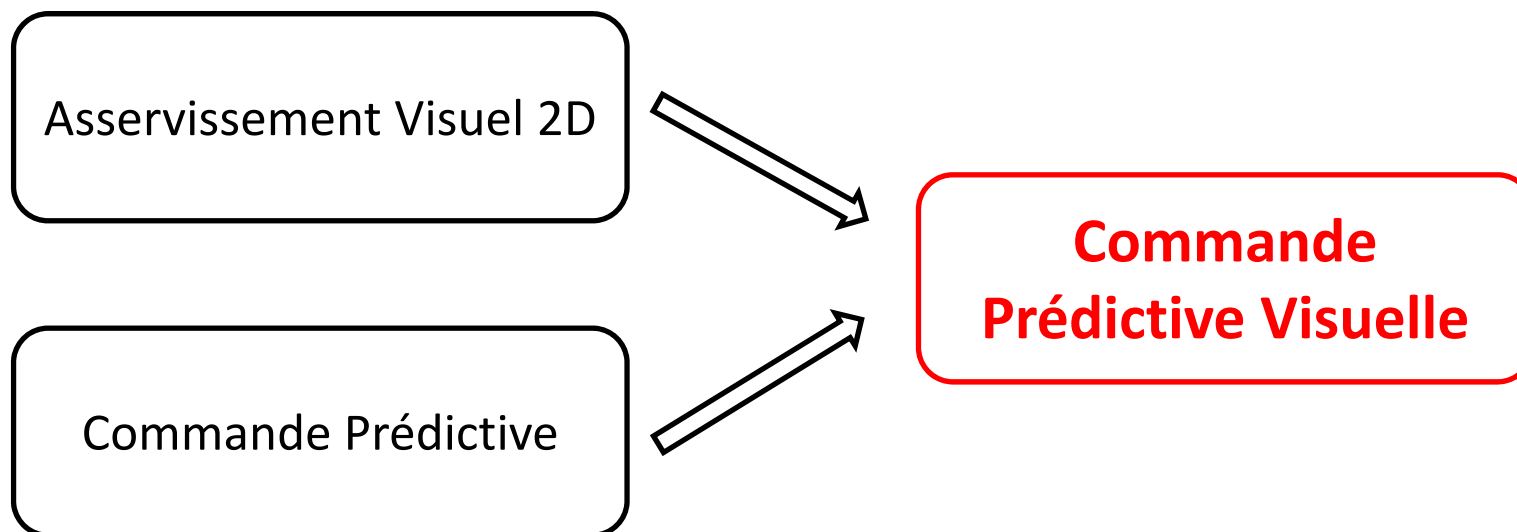
3) Satisfaire des contraintes de visibilité (2D) et des contraintes mécaniques (3D)

 **Cela revient à définir un domaine de contraintes**

# Commande prédictive visuelle

Problématique:

**Minimiser une erreur** dans **le plan image** en utilisant **un modèle** tout en tenant compte **de contraintes**



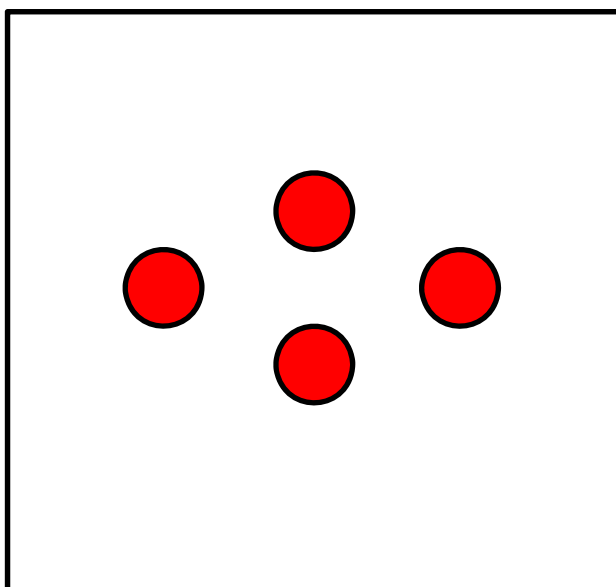
- La trajectoire de référence
- Le modèle
- Le critère d'optimisation
- La méthode de résolution

# Commande prédictive visuelle

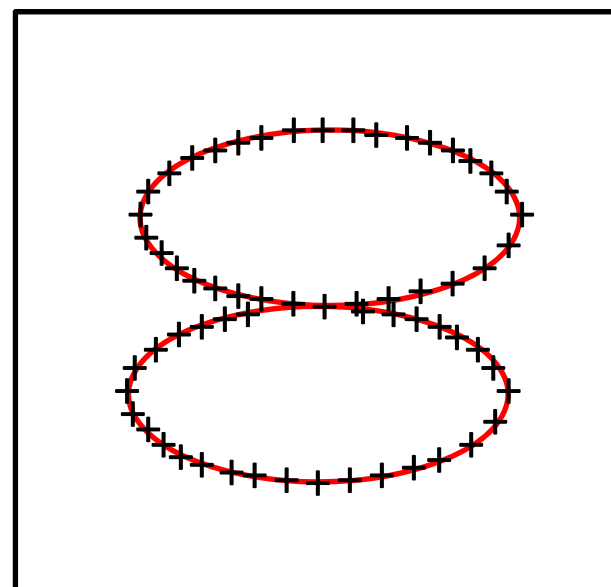
- La trajectoire de référence dans l'image

Elle traduit le comportement désiré du système en boucle fermée

**Constante**



**Variable**



- La trajectoire de référence
- Le modèle : **pièce maitresse**

✓ **Modèle global:**

Modèle du système robotique  
+  
Modèle de la caméra (système de vision)

✓ **Prédire l'image en fonction des variables de commande du système robotique:**



- La trajectoire de référence
- Le modèle
- Le critère d'optimisation
  - ✓ Partie relative à la poursuite de trajectoire
  - ✓ Partie relative aux contraintes
- La méthode de résolution

$$\underset{\tilde{u} \in \mathbf{U}}{\text{Min}} J(u)$$

$$\tilde{u} = \{u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N_c}, u_{k+N_c+1}, \dots, u_{k+N_p-1}\} \quad N_p > N_c$$

- ✓ Satisfaction des contraintes
- ✓ Temps de calcul

### Robot mobile

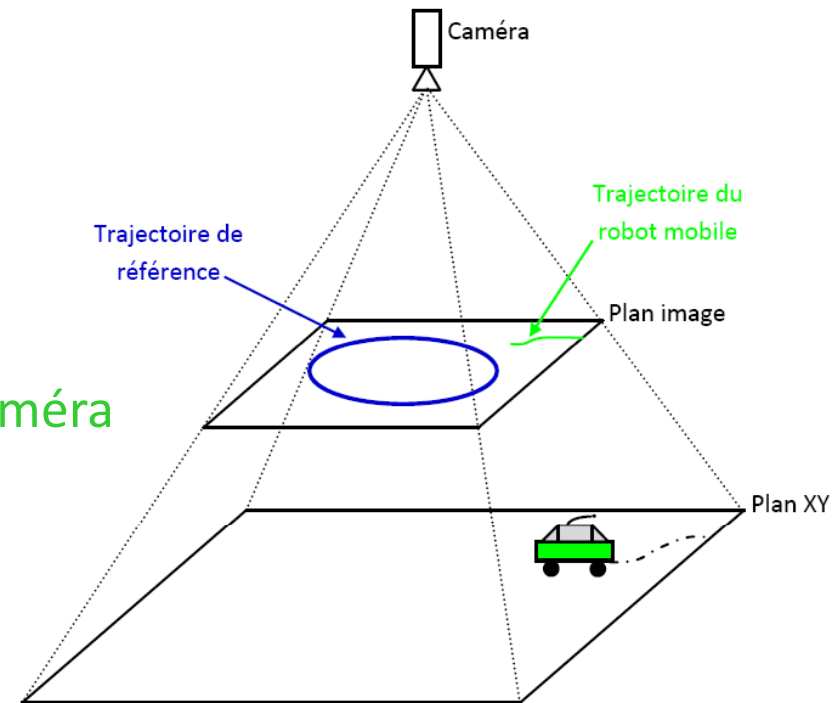
- Poursuite de trajectoire
- Stabilisation en une image fixe

- Contexte

- ✓ Poursuite d'une trajectoire visuelle

- ✓ Caméra perspective déportée

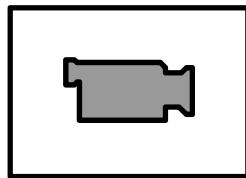
- ✓ Aucune restriction sur la pose de la caméra



# Poursuite de trajectoire

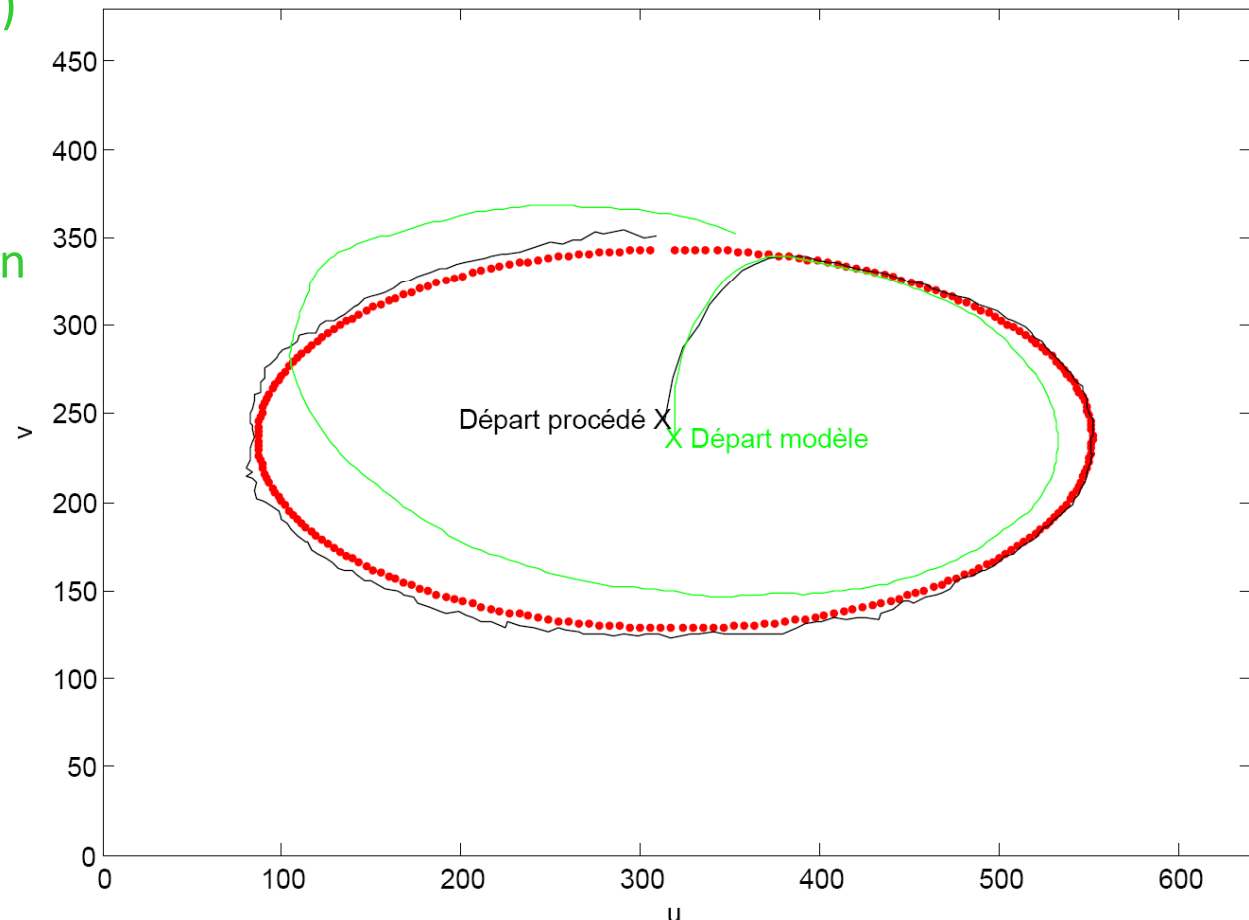
- Expérimentation 1: robustesse

- ✓ Erreurs caméra (20%)
- ✓ Bruits de mesure
- ✓ Erreurs d'initialisation



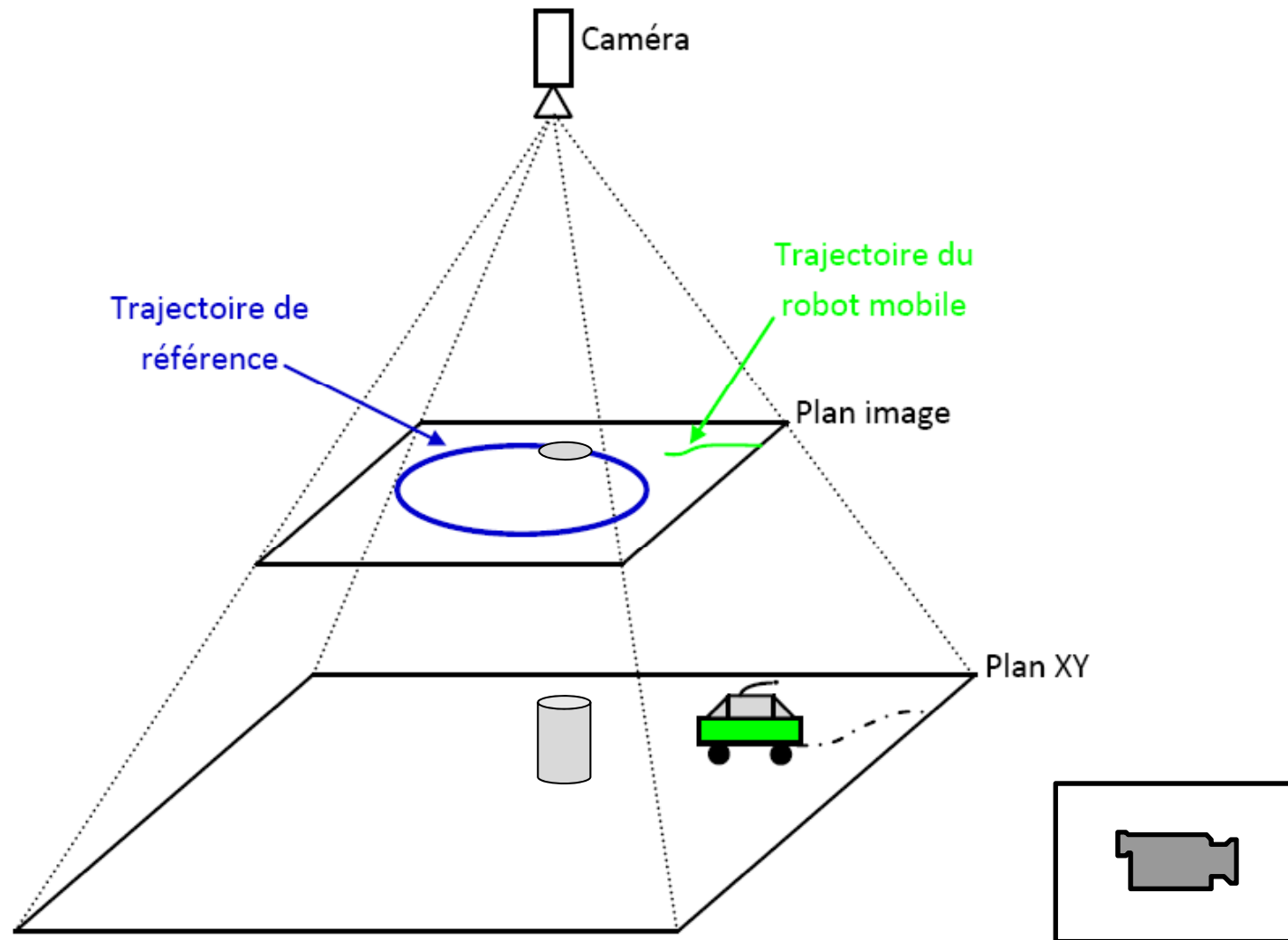
Référence  
Procédé  
Modèle

Plan image



# Poursuite de trajectoire

- Expérimentation 2: contraintes de visibilité et évitement d'obstacles



- Contexte

- ✓ Stabilisation de la configuration complète du robot en une image fixe
- ✓ Caméra omnidirectionnelle embarquée

- Objectif

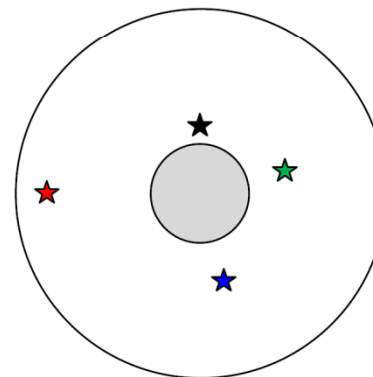
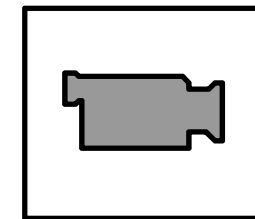
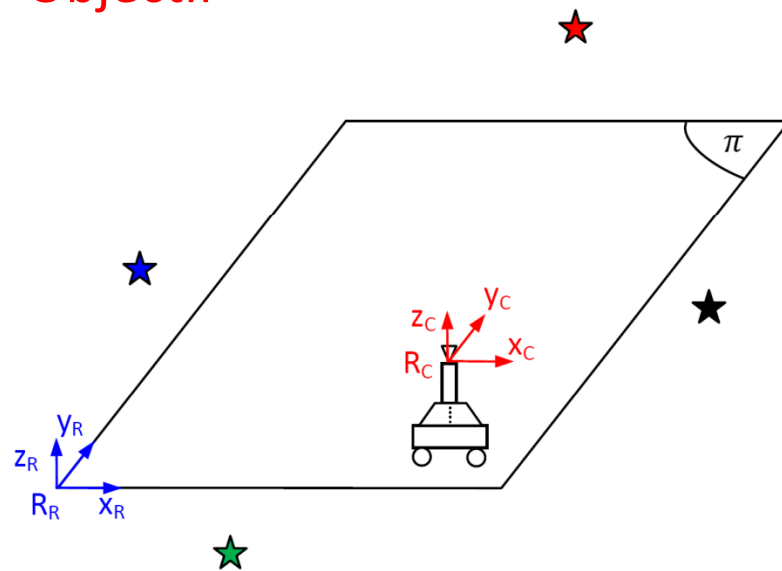


Image initiale

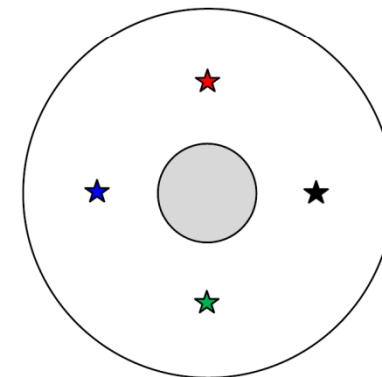


Image désirée

# Conclusions et perspectives

- **Commande Prédicative Visuelle:** solution efficace au problème d'asservissement visuel 2D sous contraintes
- **Adaptabilité** à tout type de configuration

## Perspectives :

- Amélioration du temps de calcul
- Combinaison AV 2D et AV 3D
- Détermination d'une solution explicite

Merci pour votre attention