

Localisation et navigation de robots

UPJV, Département EEA

M2 3EA, EC32, parcours RoVA

Année Universitaire 2025-2026

Fabio MORBIDI

Laboratoire MIS

Équipe Perception Robotique

E-mail: fabio.morbidi@u-picardie.fr

**Mercredi et Jeudi 9h30-12h00,
salle CURI 8 ou 305 : CM & TD
Jeudi, salle TP204 : TP**



Electronique

Energie Electrique

Automatique



Localisation et navigation de robots

UPJV, Département EEA

M2 3EA, EC32, parcours RoVA

Chapitre 2 : Navigation

Plan du cours

Chapitre 1: Localisation

- 1.1 Introduction et défis
- 1.2 Odométrie
- 1.3 Filtrage et fusion de capteurs
- 1.4 Autres techniques de localisation

Chapitre 2: Navigation

- 2.1 Stratégies de navigation
- 2.2 Architectures de contrôle
- 2.3 Navigation vers un but
- 2.4 Planification de trajectoire et évitement d'obstacles

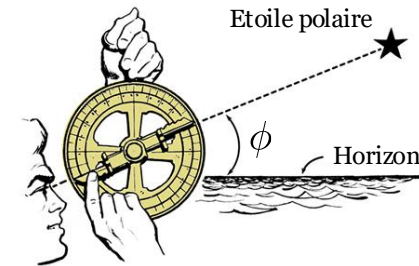
Introduction

- Naviguer

- **Étymologie** : du moyen anglais *navigate*, issu du latin *navigo*, composé de *nāvis* (« bateau ») et de *agō* (« mouvoir »)
- Étendu à tout véhicule

- XV^e et XVI^e siècles

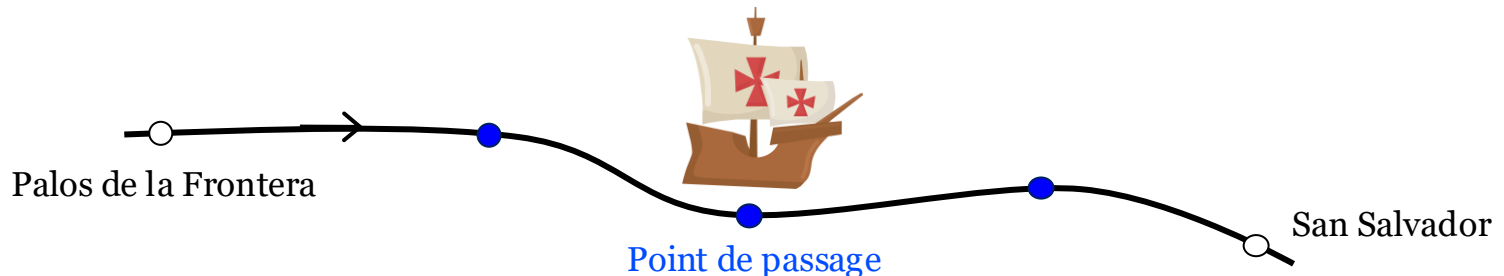
- Souvent associé à une idée de localisation
- Pourquoi ?
 - Naviguer = déterminer une route par points de passage : une trajectoire !
 - Les points de passage sont à déterminer (localiser)



Astrolabe

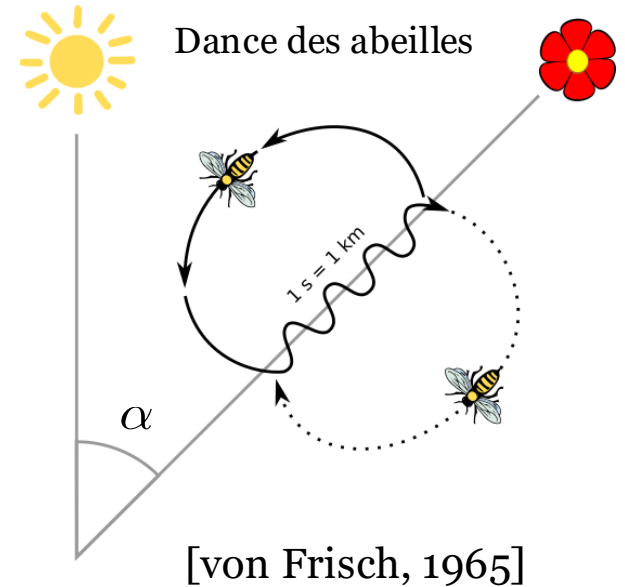


Sextant



Introduction

- Navigation
 - Beaucoup plus ancienne
 - Dès l'apparition d'une forme de vie

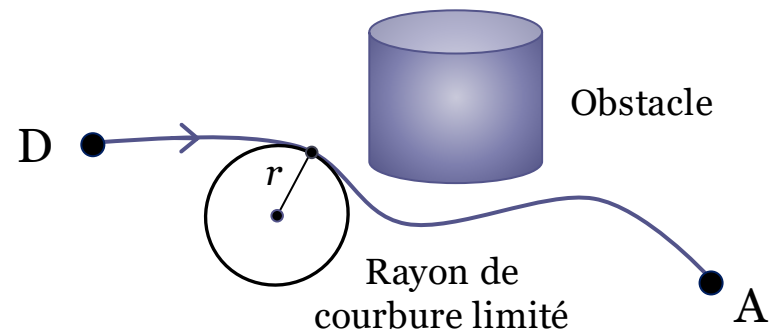


- Définition générique

- **Action de déplacement**

- Possibilité d'ajouter :

- Un point de départ « D »
 - Un but « A »
 - Des contraintes ou règles (par ex. des obstacles, un rayon de courbure limité)



Introduction

- Selon le standard IEEE 172-1983 :
“La navigation est le processus de guider un véhicule afin de parvenir à la destination”
- Selon *Levitt & Lawton** la navigation est définie par les trois questions suivantes :
 1. Où suis-je ?
 2. Où sont les autres endroits par rapport à moi ?
 3. Comment puis-je atteindre les autres endroits à partir d'ici ?

* *“Qualitative navigation for mobile robots”*, T.S. Levitt, D.T. Lawton, Artificial Intelligence, vol. 44, n. 3, pp. 305-360, 1990

Plan du chapitre

Stratégies de navigation

Partie 1

Architectures de contrôle

Partie 2

Navigation vers un but

Partie 3

Planification de trajectoire
et évitement d'obstacles

Partie 4

Partie 1: Stratégies de navigation

Les différents types de navigation

- Stratégies de navigation
 - Diverses ... leurs classifications aussi
 - Classification hiérarchique de *O. Trullier* à 5 niveaux basée sur le **type d'information perçue, représentée et traitée*** :
 1. Approche d'un objet
 2. Guidage
 3. Action associée à un lieu
 4. Navigation topologique
 5. Navigation métrique
- Complexité croissante

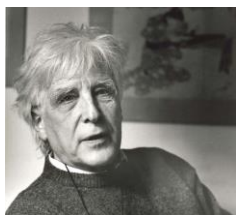
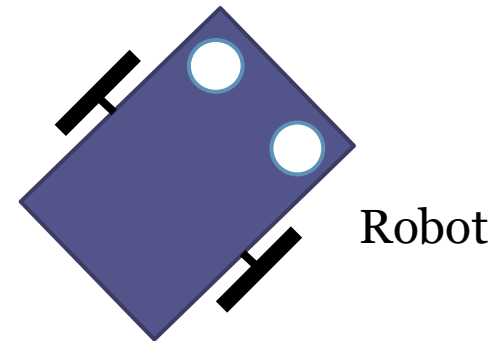
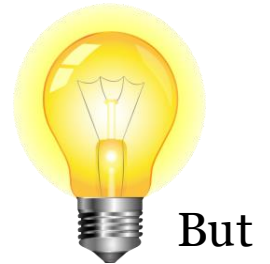
* "*Biologically based artificial navigation systems: Review and prospects*", O. Trullier, S.I. Wiener, A. Berthoz, J.-A. Meyer, *Progress in Neurobiology*, vol. 51, n. 5, pp. 483-544, 1997

"*Animat*" : un organisme artificiel, soit un animal simulé soit un robot semblable à un animal

Stratégies de navigation

1. Approche d'un objet

- Déplacement vers un *objet perceptible* (taxie)
- Remontée/descente de gradient
- Ex : véhicules de Braitenberg
 - 2 capteurs de lumière
 - Atteindre ou fuir une source lumineuse
 - Actions réflexes
 - Perception ➡ Action
- Stratégie *locale*: fonctionne ssi le but est visible



Valentino Braitenberg (1926-2011) :
scientifique expert en neurosciences et cybernétique

Stratégies de navigation

2. Guidage

- Atteindre un but *non visible* ...
... mais caractérisé par des amers (balises) situés autour
 - Descente de gradient
 - Diriger le robot dans la direction qui permet de reproduire cette configuration (comportement animal)
 - Actions réflexes
 - Stratégie *locale*
 - Les amers caractérisant le but doivent être *perceptibles*
-
- “A mobile robot employing insect strategies for navigation”, D. Lambrinos, R. Möller, T. Labhart, R. Pfeifer, R. Wehner, Robot. Auton. Syst., vol. 30, n. 1, pp. 39-64, 2000
 - “The visual homing problem: an example of robotics/biology cross fertilization”, P. Gaussier, C. Joulain, J.-P. Banquet, S. Leprêtre, A. Revel, Robot. Auton. Syst., vol. 30, n. 1, pp. 155-180, 2000

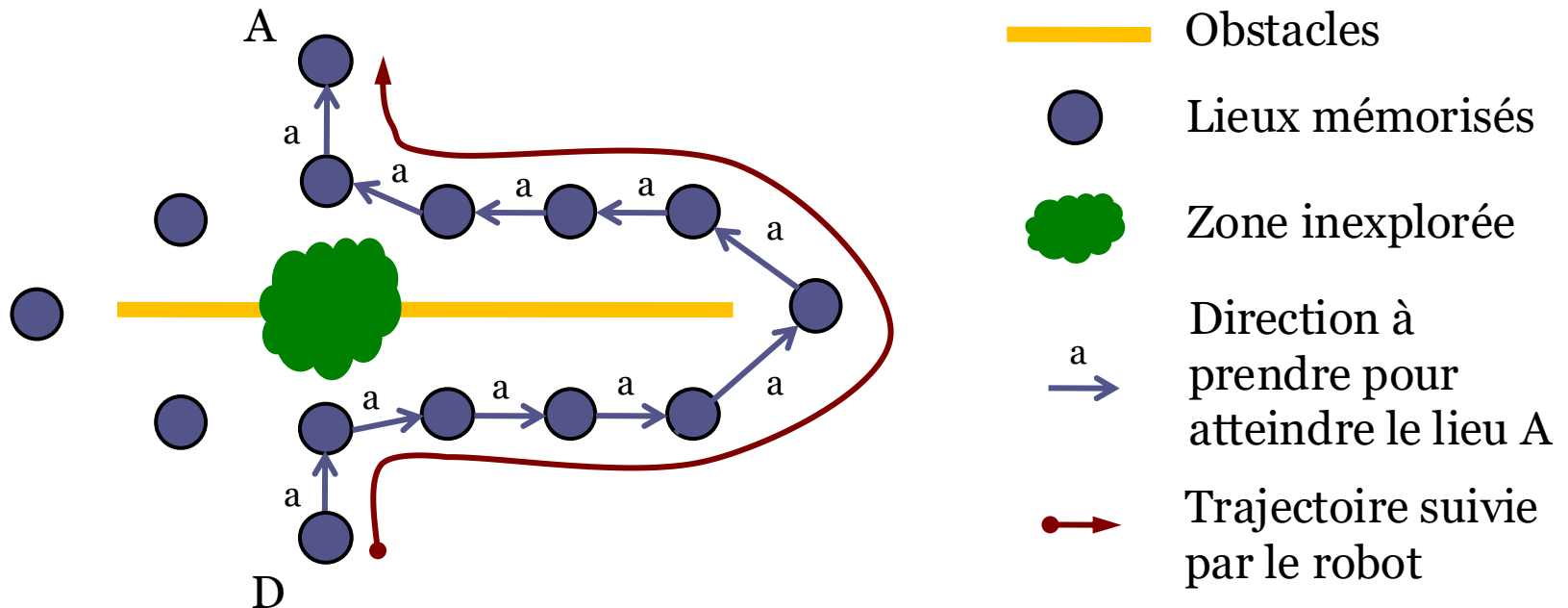
Stratégies de navigation

3. Action associée à un lieu

- Atteindre un but distant
 - But *non visible*
 - Amers voisins *non visibles*
- Représentation interne simple de l'environnement
 - Ensemble de lieux (zones de l'espace où les perceptions sont similaires)
 - À un lieu correspond une action à effectuer
- Enchaînement des actions = *route* pour rejoindre le but
- Autonomie plus importante, mais ... chemin figé !

Stratégies de navigation

- Action associée à un lieu

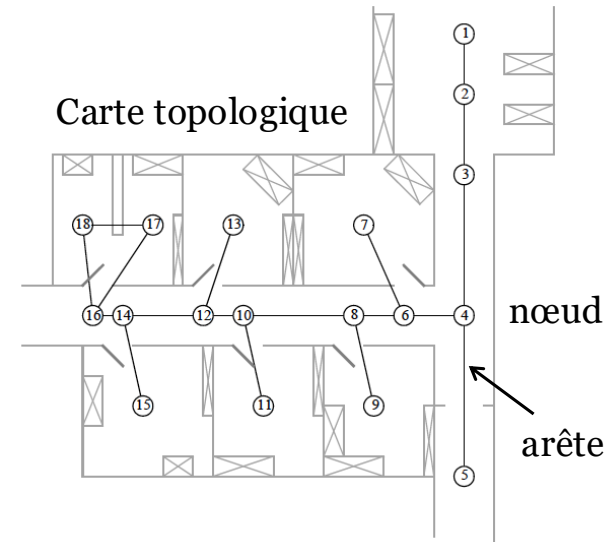


Stratégie à *chemin unique* : le raccourci empruntant le chemin de gauche est inutilisable !

Stratégies de navigation

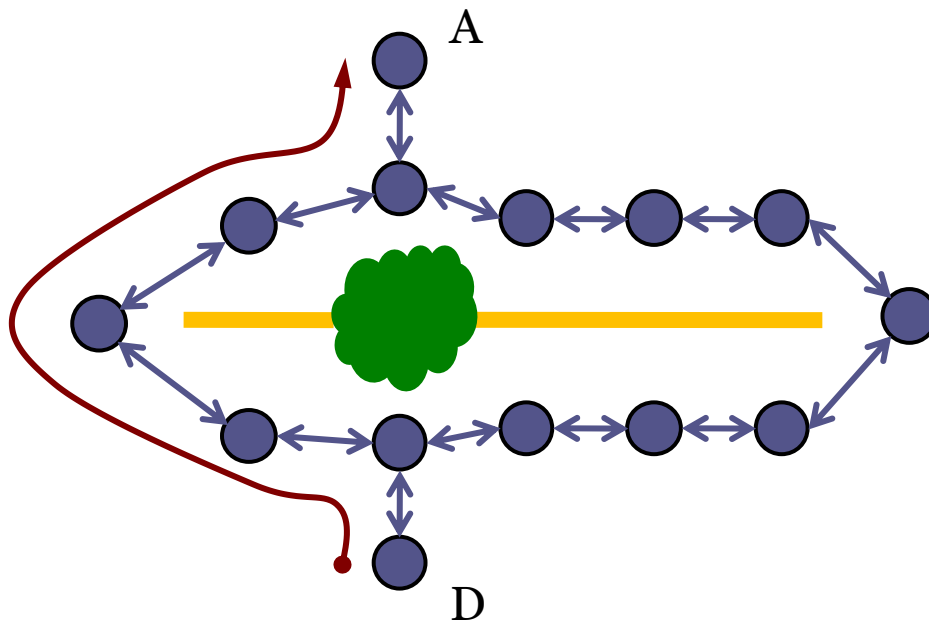
4. Navigation topologique






- Extension de la précédente
- Ajout à la représentation interne
 - Mémorisation des *relations spatiales* entre les lieux
- Déplacement d'un lieu à l'autre sans but fixé
- Modèle interne : graphe
 - Calcul de chemins entre deux lieux
 - Choix (optimal) d'un chemin
- Limites : lieux et chemins connus *au préalable*



Stratégies de navigation

- Navigation topologique



-  Obstacles
-  Lieux mémorisés
-  Zone inexplorée
-  Possibilité de passer d'un lieu à l'autre
-  Trajectoire suivie par le robot

Calcul de chemin de *distance minimale* possible : on peut donc éviter l'obstacle par la gauche cette fois-ci, mais on ne peut pas le traverser en ligne droite

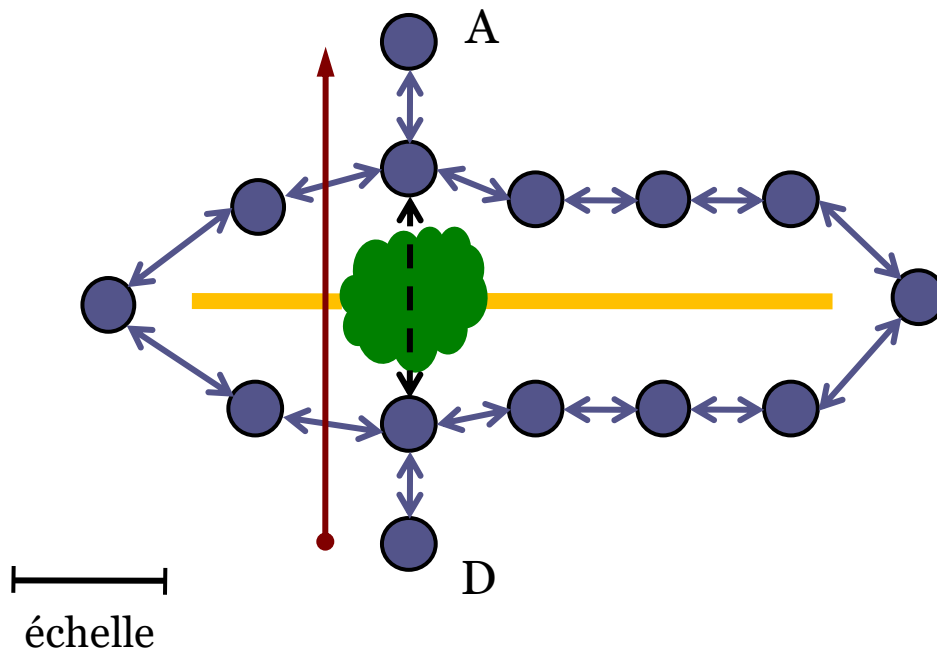
Stratégies de navigation

5. Navigation métrique

- Capacité étendue de la précédente
- Planification de chemins dans des zones *inexplorées*
- Informations à connaître :
 - Possibilité de passage d'un lieu à l'autre
 - Positions *métriques* relatives des différents lieux
- Trajectoire
 - Composition de vecteurs : aller d'un lieu à l'autre
 - La possibilité de déplacement n'a pas à être forcément connue sous forme de lien

Stratégies de navigation

- Navigation métrique



- Obstacles
- Lieux mémorisés
- ☁ Zone inexplorée
- ↔ Possibilité de passer d'un lieu à l'autre
- Trajectoire suivie par le robot
- ↔ Possibilité de passer d'un lieu à l'autre déduite de leur position relative

Stratégies de navigation : résumé

▫ 3 premières catégories

- Navigation *locale*
- Actions réflexes
- **Navigation réactive**
 - *Avantages*
 - Simple, pas de modèle global de l'environnement
 - *Inconvénient*
 - Applications souvent restreintes
- Comportement essentiel : problèmes avec obstacles imprévus
- Monde vivant :
 - Stratégies insectoïdes (par ex. abeilles)

Stratégies de navigation : résumé

▫ 2 dernières catégories

- Navigation *globale*
- On peut atteindre un *but arbitraire* de l'environnement
- Modèle interne du monde
 - Supporte la planification
 - Mémoire spatiale indépendante d'un but
- **Navigation par carte**
- Monde vivant :
 - Haut niveau : l'être humain
 - Instinct : les animaux supérieurs (mammifères)

"Biologically based artificial navigation systems: Review and prospects"

O. Trullier, S.I. Wiener, A. Berthoz, J.-A. Meyer, *Progress in Neurobiology*, vol. 51, n. 5, pp. 483-544, 1997

Table 1. A Hierarchy of Navigation Strategies

	Name	Stored spatial information	Procedure	Characteristics
1	Target approaching	None	Taxis*	Basic requirement for navigation
2	Guidance	Identity of the landmark configuration; raw state of the sensory inputs at goal location	Minimize the mismatch between the perceived configuration and the memorized configuration (approach)	Local navigation; only when direct perception is available
3	Place recognition-triggered response	Landmark configurations defining places; a local directional reference frame for each; the direction of movement that leads to the recognition-triggered response	Self-localize by recognizing the current place as an already experienced place; orient relative to it; move in the goal-associated direction from each place	Way-finding; stimulus-response type of behavior
4	Topological navigation	A set of landmark configurations linked by topological relationships	Search for the sequence of places linked by experienced routes from the current place to the goal	Way-finding; stimulus-response-stimulus type of behavior, topological detours (path selection)
5	Metric navigation	A set of landmark configurations linked by metric relationships	Plan a trajectory which will be followed by lower level strategies; the resulting path is not necessarily a previously taken one	Way-finding; metric detours, metric shortcuts, novelty

*Taxis (taxie, en français), est le déplacement orienté d'un organisme vivant lié à un stimulus extérieur

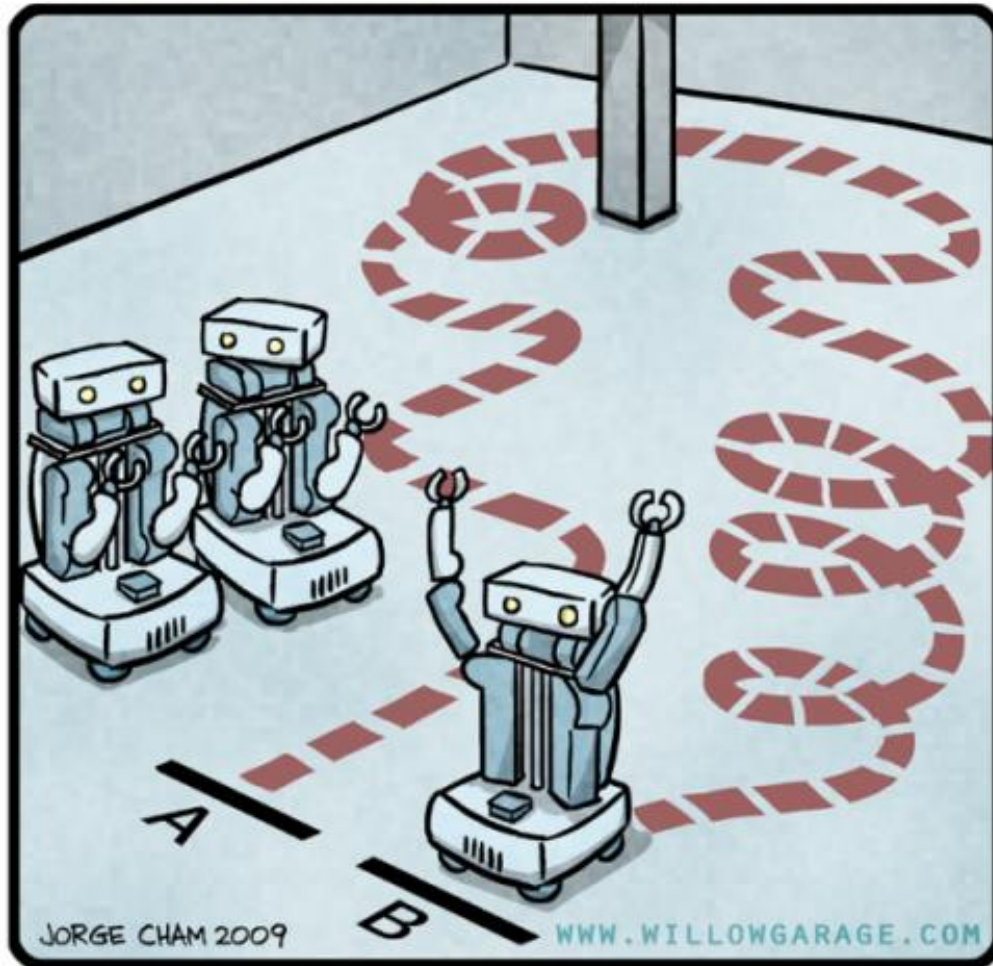
Stratégies de navigation

- Conclusion partielle
 - Homme, animal, robot mobile
 - ➡ Cartes presque indispensables
 - Mais *construire* et *utiliser* ces cartes est complexe
 - Robots ➡ mélange de **réactivité** et **planification**

(très) court terme

long terme

R.O.B.O.T. Comics



"HIS PATH-PLANNING MAY BE SUB-OPTIMAL, BUT IT'S GOT FLAIR."

Plan du chapitre

Stratégies de navigation

Partie 1

Architectures de contrôle

Partie 2

Navigation vers un but

Partie 3

Planification de trajectoire
et évitement d'obstacles

Partie 4

Partie 2: Architectures de contrôle

Architectures de contrôle

- Robot mobile : système *complexe* et *exigeant*
- Arbitrage à faire :
 - Exécution précise du plan pour atteindre le but
 - Gestion des événements imprévus
- Outils
 - Capteurs
 - Effecteurs
 - Ressources (de calcul)
- Besoin d'un ensemble logiciel gérant les outils pour organiser la *perception*, la *décision* et l'*action*

Architectures de contrôle

1. Contrôleurs hiérarchiques

- Viennent de l'I.A.
- Modèle du monde quasi parfait
- Fonctionnement:
 - Perception de l'environnement
 - Planification des actions
 - Exécution du plan
- Limites
 - Environnement statique
 - Boucle de décision trop grande
 - Pas de contrôle sur les actions

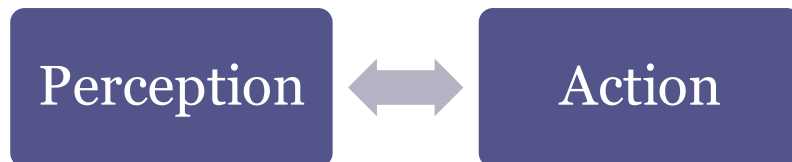
*rigide
limité*



Architectures de contrôle

2. Contrôleurs réactifs

- Ensemble de comportements réactifs en parallèle:
 - Évitement d'obstacle
 - Déplacement aléatoire
 - Déplacement vers un but
 - Fuite d'un point
 - Etc.
- Pas de modèle du monde



Idée utilisée aussi en *animation par ordinateur* (“boids”)

“*Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model*”, C.W. Reynolds, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 21, n. 4, pp. 25-34, 1987

Architectures de contrôle

2. Contrôleurs réactifs

▫ Avantages

- Rapide/robuste en environnement dynamique et complexe
- Pas de problème de modélisation de l'environnement
- Efficacité pour une tâche donnée

▫ Inconvénients

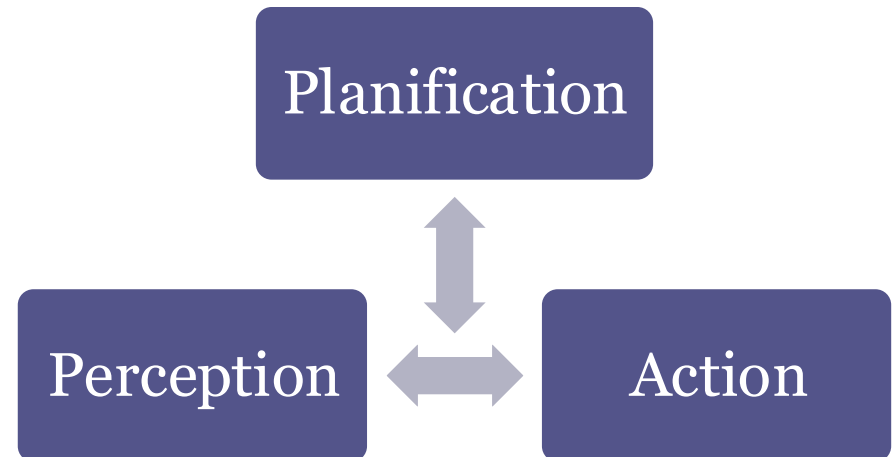
- Tâches limitées
- Pas de planification possible
- Comment sélectionner la bonne action à exécuter au bon moment ?
 - « Solution » : hiérarchie des comportements. Les comportements se déclenchent selon un *ordre de priorité* en fonction des perceptions

**Architecture
de
subsumption**

Architectures de contrôle

3. Contrôleurs hybrides

- Solution intermédiaire moderne
- Deux niveaux
 - *Haut* : localisation, cartographie et planification
 - *Bas* : réactivité et exécution
- Avantages
 - Réactions rapides
 - Planification d'actions



Plan du chapitre

Stratégies de navigation

Partie 1

Architectures de contrôle

Partie 2

Navigation vers un but

Partie 3

Planification de trajectoire
et évitement d'obstacles

Partie 4

Partie 3: Navigation vers un but

Partie 3: Navigation vers un but

1. Véhicules de Braitenberg (Catégorie 1)
2. Modèle de Cartwright et Collet (Catégorie 2)
3. Asservissement

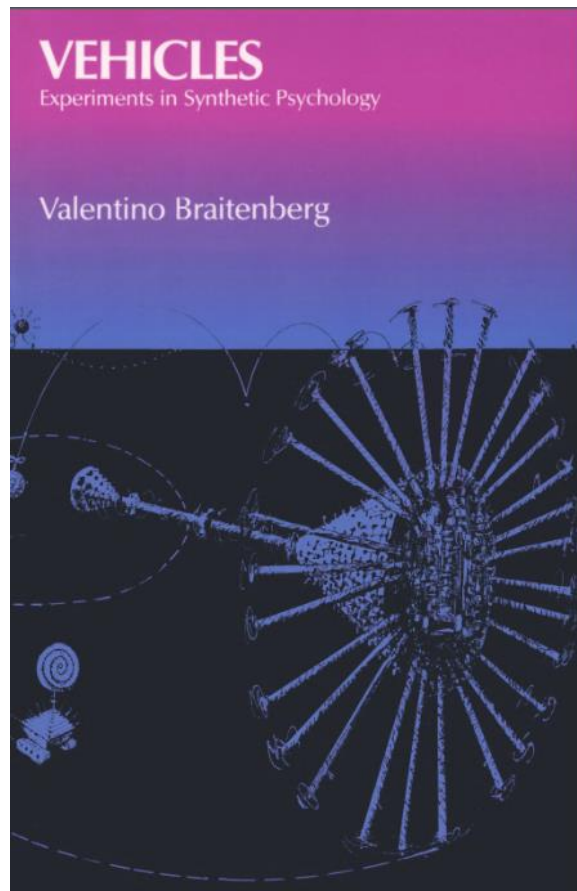
Navigation vers un but

- Stratégies de navigation réactive
 - Architectures purement réactives
 - Module de bas niveau d'une architecture hybride
- Qu'utilisent ces architectures ?
 - Valeurs de capteurs
 - Courantes ...
 - ... ou faible fenêtre temporelle
- Pas de modèle interne

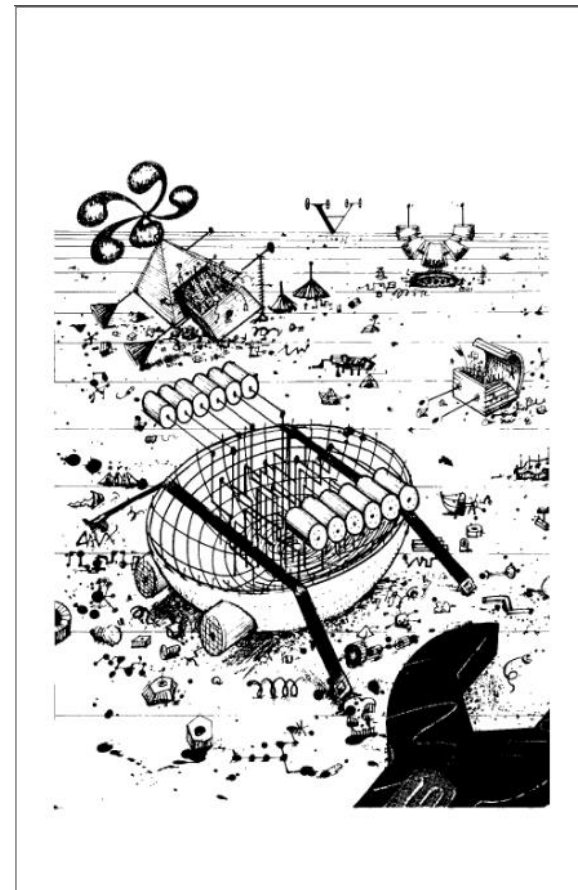
Décision de
l'action à
effectuer

Véhicules de Braitenberg

- « *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology* »
V. Braitenberg, MIT press, 1986



Couverture



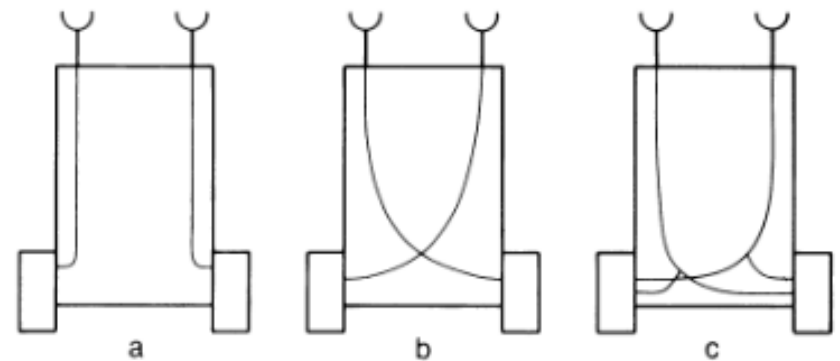
Page 87

Véhicules de Braitenberg

- *Robots extrêmement simples* pouvant évoluer par l'ajout de **capteurs**, d'**actionneurs** et de **connexions** simulant des réseaux de neurones
- Malgré leur simplicité, les **14 versions** de robots présentées dans le livre ont des comportements complexes et autonomes comme l'agression, l'attrance, la fuite (peur), etc.



Version 1 (1 capteur et 1 actionneur)



Version 2 (2 capteurs et 2 actionneurs)

Véhicules de Braitenberg

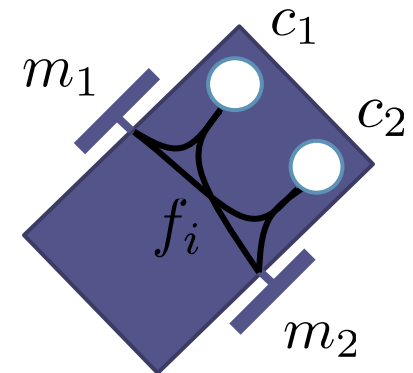
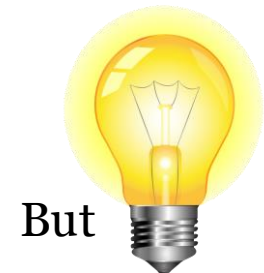
Comportement : rejoindre/fuir un but visible

- Robot :
 - Plateforme différentielle à deux roues m_1, m_2 commandables en vitesse
 - Deux capteurs c_1 et c_2 à l'avant qui mesurent l'intensité I de la lumière

- Architecture interne :
 - Liens capteurs-moteurs :

$$v_{m_i} = f_i(I_{c_1}, I_{c_2}), i \in \{1, 2\} : \text{vitesse de la roue } m_i$$

- La fonction f_i définit le comportement
 - Atteindre le but
 - Fuir le but



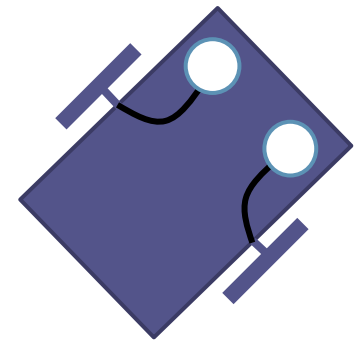
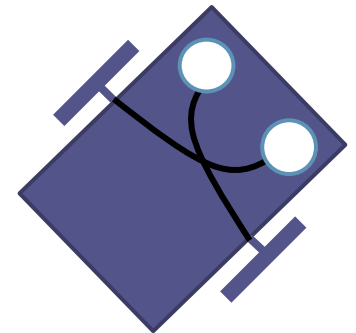
Véhicules de Braitenberg

- Atteindre le but

$$v_{m_i} = \lambda I_{c_j}, \quad i \neq j, \quad i, j \in \{1, 2\}, \quad \lambda > 0$$

- Fuir

$$v_{m_i} = \lambda I_{c_i}, \quad i \in \{1, 2\}, \quad \lambda > 0$$



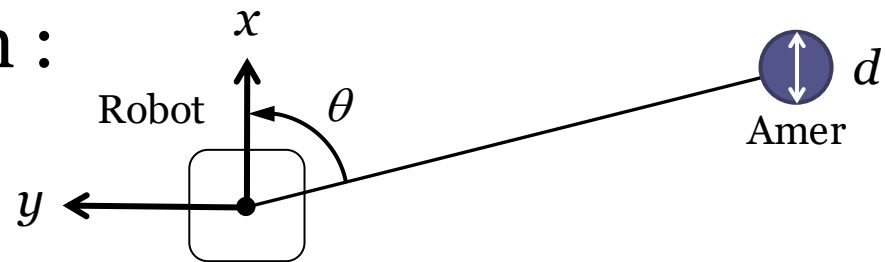
- Remontée/descente de gradient sur l'intensité de lumière (condition d'arrêt ?)
- Simple *contrôleur proportionnel* : oscillations possibles !
- Hypothèse forte : le but est visible *depuis tout l'environnement*

Partie 3: Navigation vers un but

1. Véhicules de Braitenberg (Catégorie 1)
2. Modèle de Cartwright et Collet (Catégorie 2)
3. Asservissement

Modèle de Cartwright et Collet

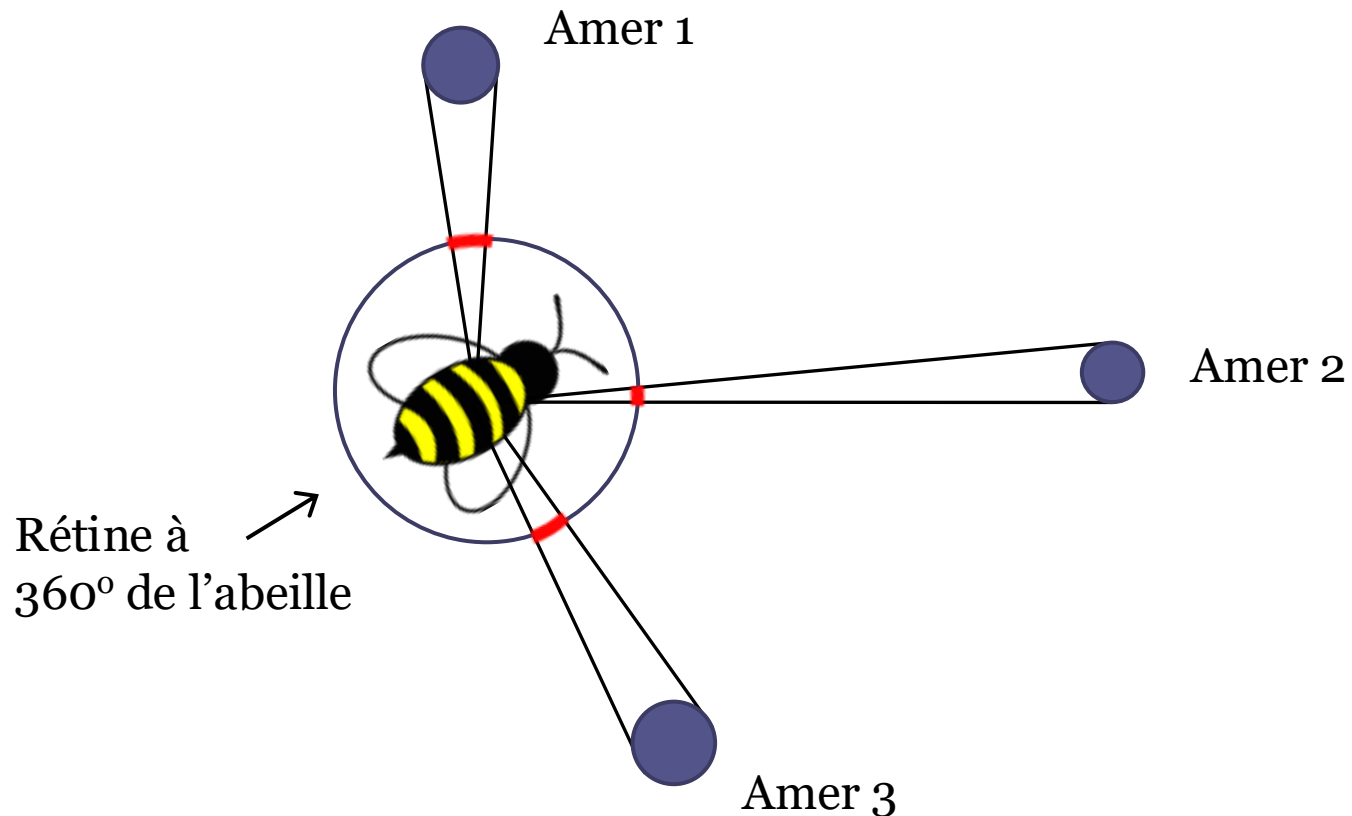
- *Snapshot model* : utilisé par les abeilles*
- Atteindre un but défini par des amers autour
- Capacités de perception :
 - Direction θ des amers
 - Taille d des amers
- Le robot mémorise le but par la configuration des amers vus depuis sa position (« snapshot »)



* “*Landmark maps for honeybees*”, B. Cartwright, T. Collett, Biological Cybernetics, vol. 57, n. 1-2, pp. 85-93, 1987

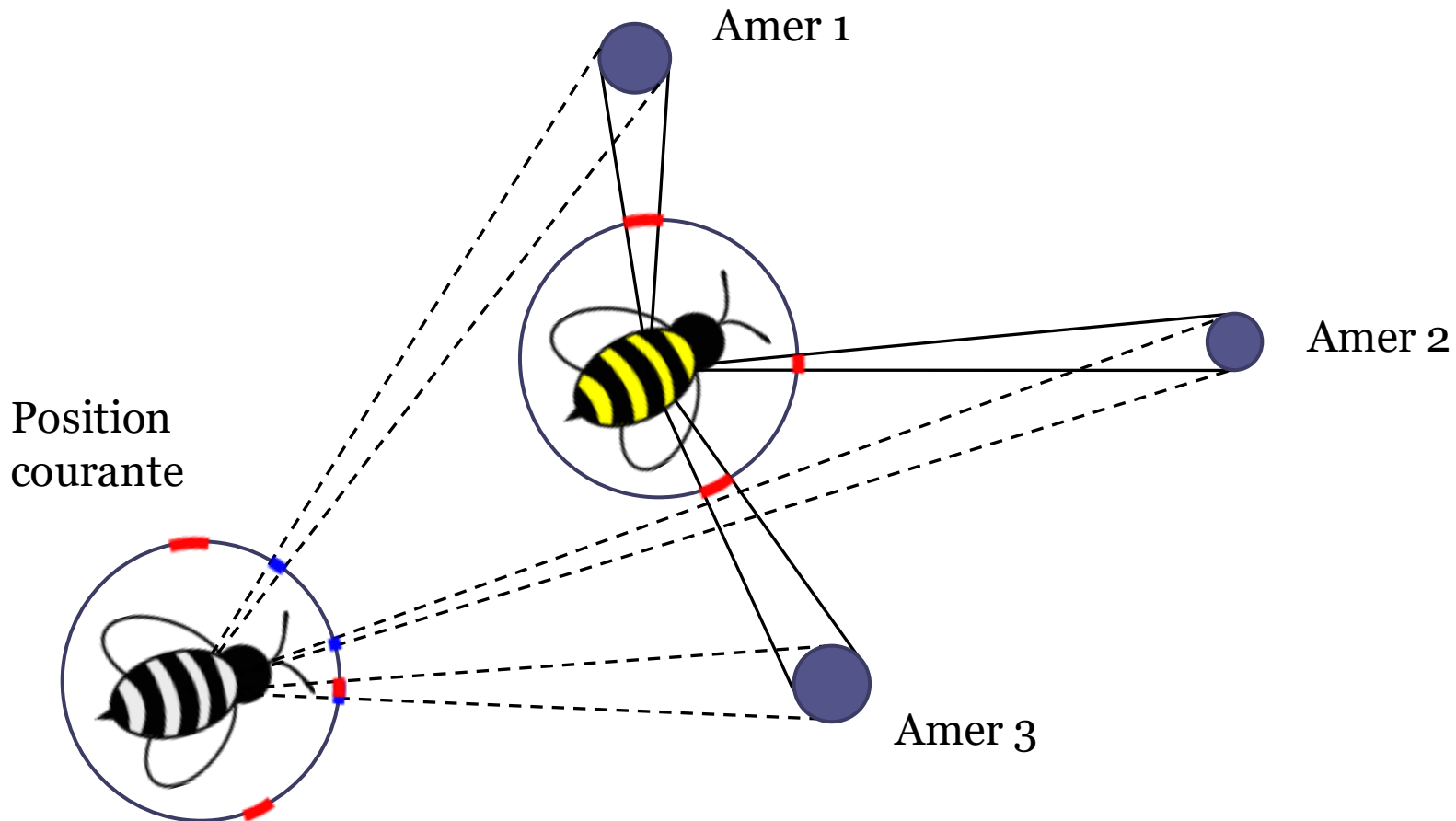
Modèle de Cartwright et Collet

- Amers vus depuis le but

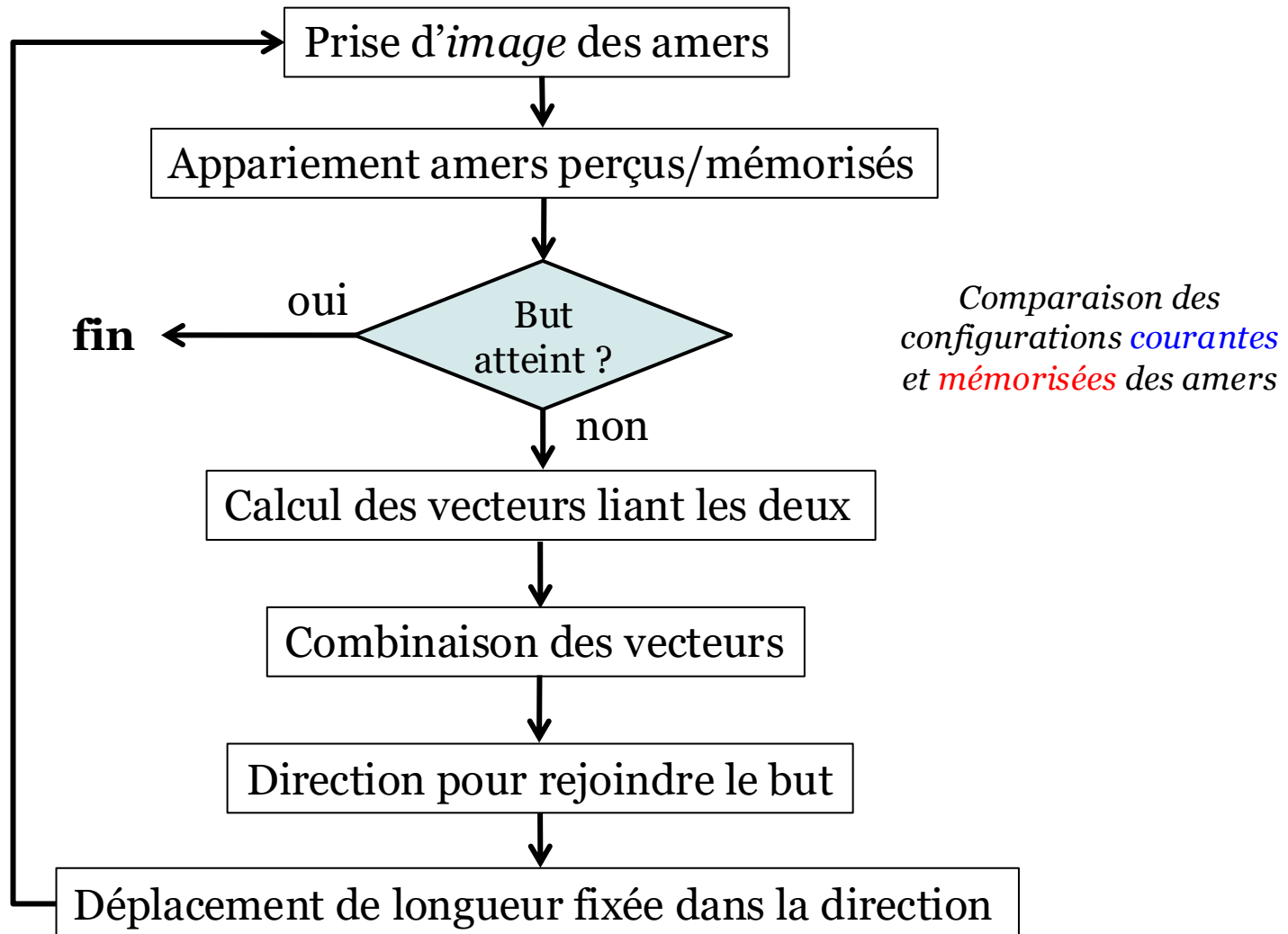


Modèle de Cartwright et Collet

- Appariement



Modèle de Cartwright et Collet: l'algorithme



Modèle de Cartwright et Collet

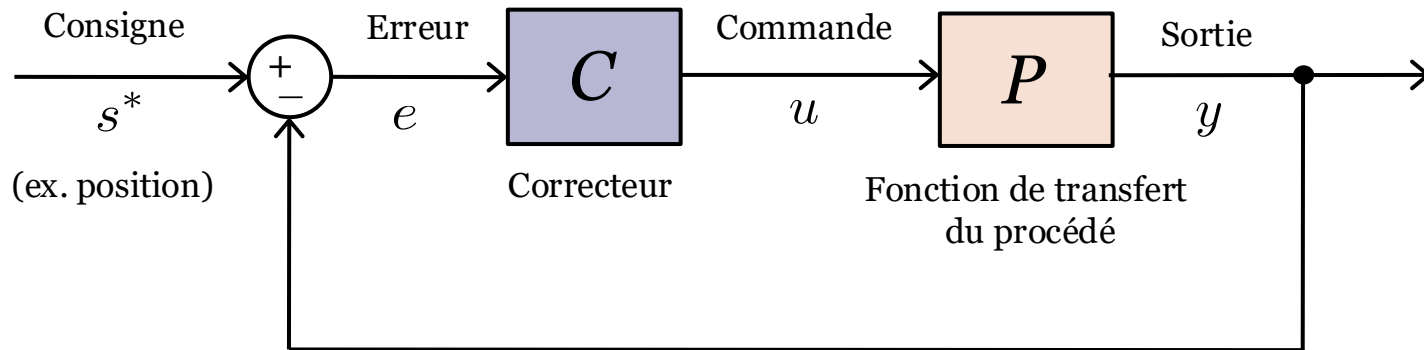
- Conclusion :
 - Modèle simple à descente de gradient sur la configuration des amers pour atteindre le but
 - Mais ...
 - Ne fonctionne pas dans tout environnement
 - Choix crucial de la configuration des amers (*ambiguïtés* sont possibles)
 - Qualité primordiale de l'appariement des amers
 - Si erreur, le vecteur de direction sera faux
 - Facilité par un *estimé préalable* de l'orientation du robot

Partie 3: Navigation vers un but

1. Véhicules de Braitenberg (Catégorie 1)
2. Modèle de Cartwright et Collet (Catégorie 2)
3. Asservissement

Asservissement : généralités

- Commande en boucle fermée (cas SISO)



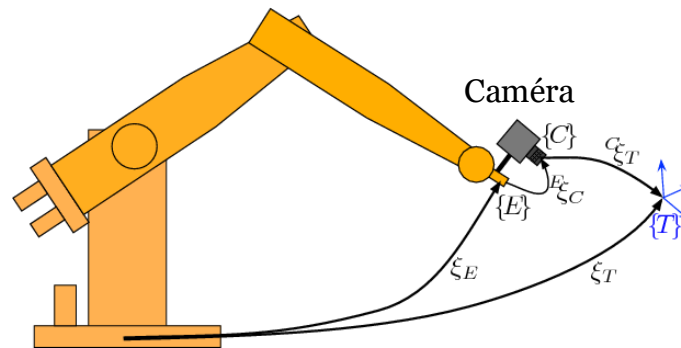
- **Asservissement** : concevoir le correcteur C pour générer une entrée de commande u telle que

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

Asservissement = *servoing*, en anglais

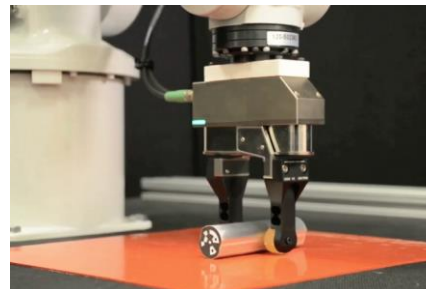
Asservissement visuel : généralités

- Commande en boucle fermée avec capteur visuel
 - Système monoculaire, stéréo ou omnidirectionnel



- Objectifs :

- Positionnement face à un objet
 - Suivi d'un objet
 - Saisie d'un objet (avec un préhenseur)
- } **Navigation vers un but**



Caméra

Asservissement visuel 3D ou « position-based »

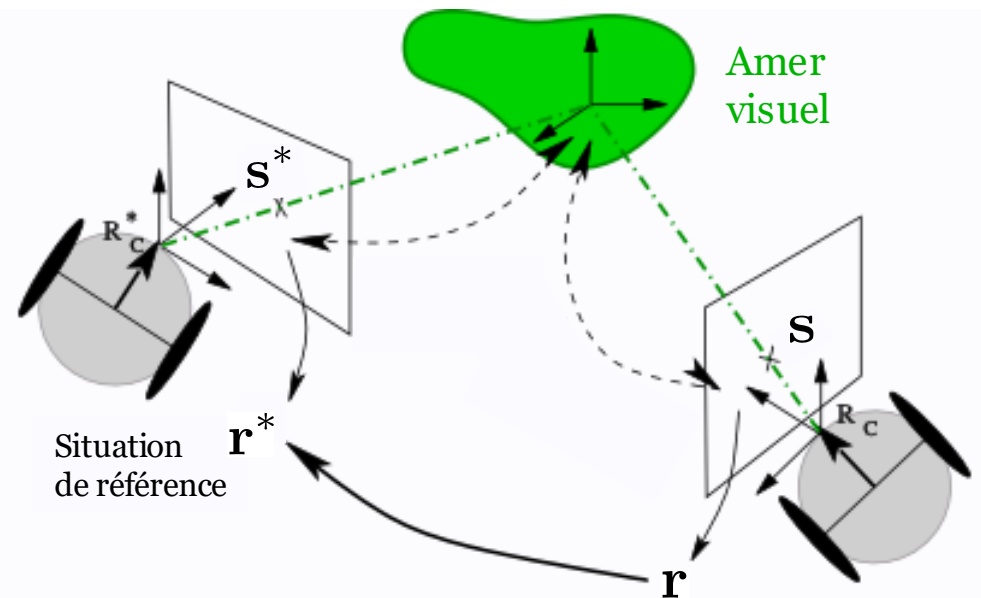
- \mathbf{r} : pose de la caméra par rapport à un amer/scène
- **Tâche** : atteindre une pose ou situation \mathbf{r}^* de référence
- Beaucoup de méthodes basées sur un modèle 3D (partiellement) connu

Avantage

- Commande non spécifique au capteur

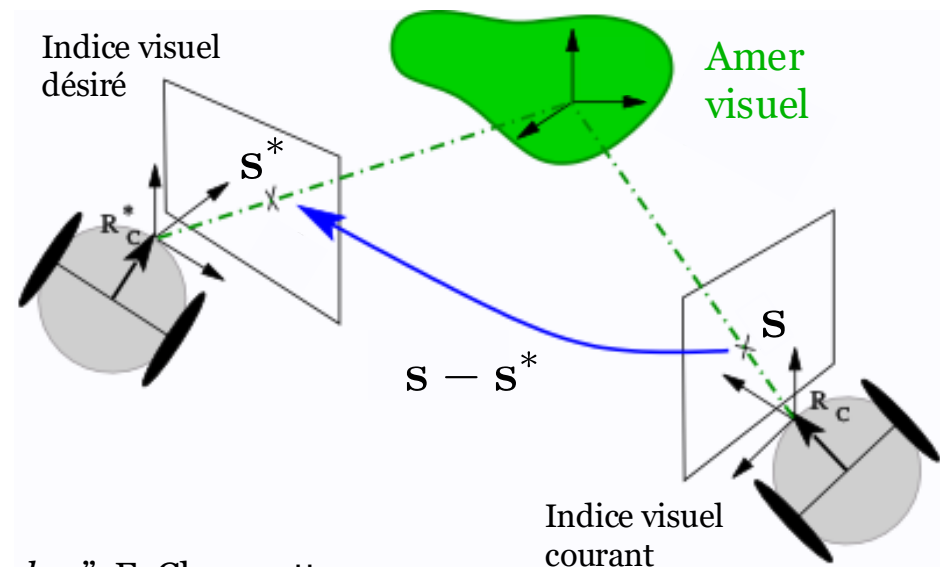
Inconvénients

- Difficile d'estimer précisément la pose (bon modèle de capteur, bon calibrage, etc.)
- Couplage avec la localisation



Asservissement visuel 2D ou « image-based »

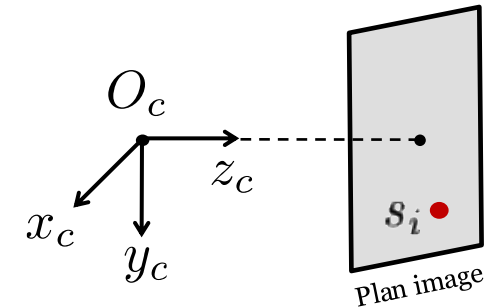
- Utilisation *directe* des informations visuelles s dans l'image
 - Par ex: points, droites, plans, centroïdes, moments, épipôles
- Tâche spécifiée directement dans l'image
 - Atteindre des indices visuels de référence s^* (consigne)
- Loi de commande
 - Contrôle le mouvement de la caméra
 - Objectif : annuler l'erreur $s - s^*$
- Pas de *reconstruction 3D* ni *d'estimation de pose*
 - Plus simple et robuste !



Asservissement visuel 2D

- Minimisation de l'erreur

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(t) - \mathbf{s}^*$$



par une *décroissance exponentielle* ($\mathbf{s}^* \in \mathbb{R}^m$ est la consigne, un vecteur constant) :

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\lambda \mathbf{e}(t), \quad \lambda > 0$$

- On a que :

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{d\mathbf{s}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{J}_s \mathbf{v}, \quad \mathbf{J}_s \in \mathbb{R}^{m \times 6} \quad \begin{array}{l} \text{Jacobienne de l'image} \\ \text{ou } \textit{matrice d'interaction} \end{array}$$

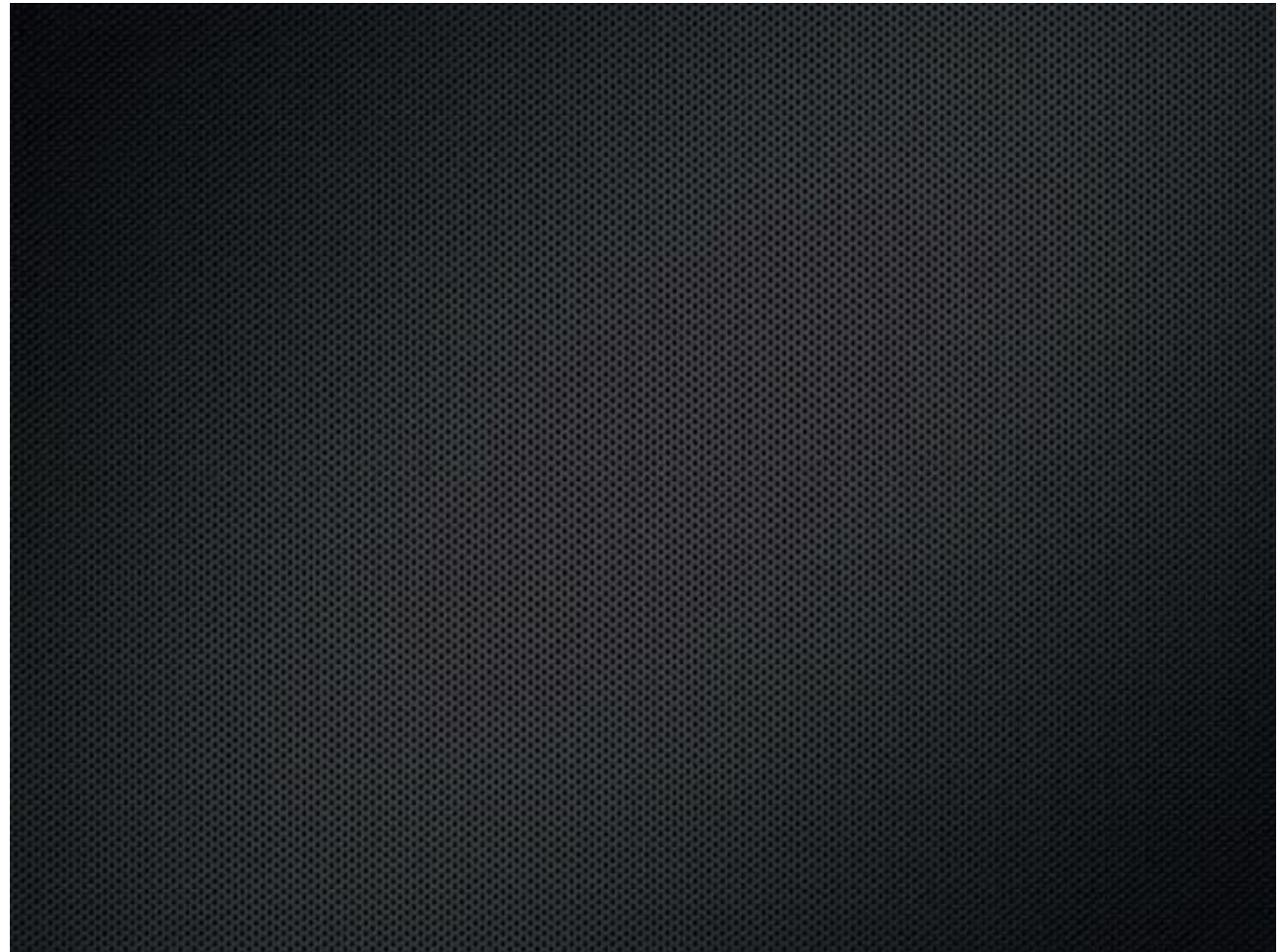
- La commande, la vitesse de la caméra $\mathbf{v} = (\mathbf{v}_c, \boldsymbol{\omega}_c)$, est donc :

$$\mathbf{v}(t) = -\lambda \mathbf{J}_s^+ \mathbf{e}(t)$$

où \mathbf{J}_s^+ est la pseudo-inverse de \mathbf{J}_s (car \mathbf{J}_s n'est pas nécessairement une matrice carrée)

Asservissement visuel 2D

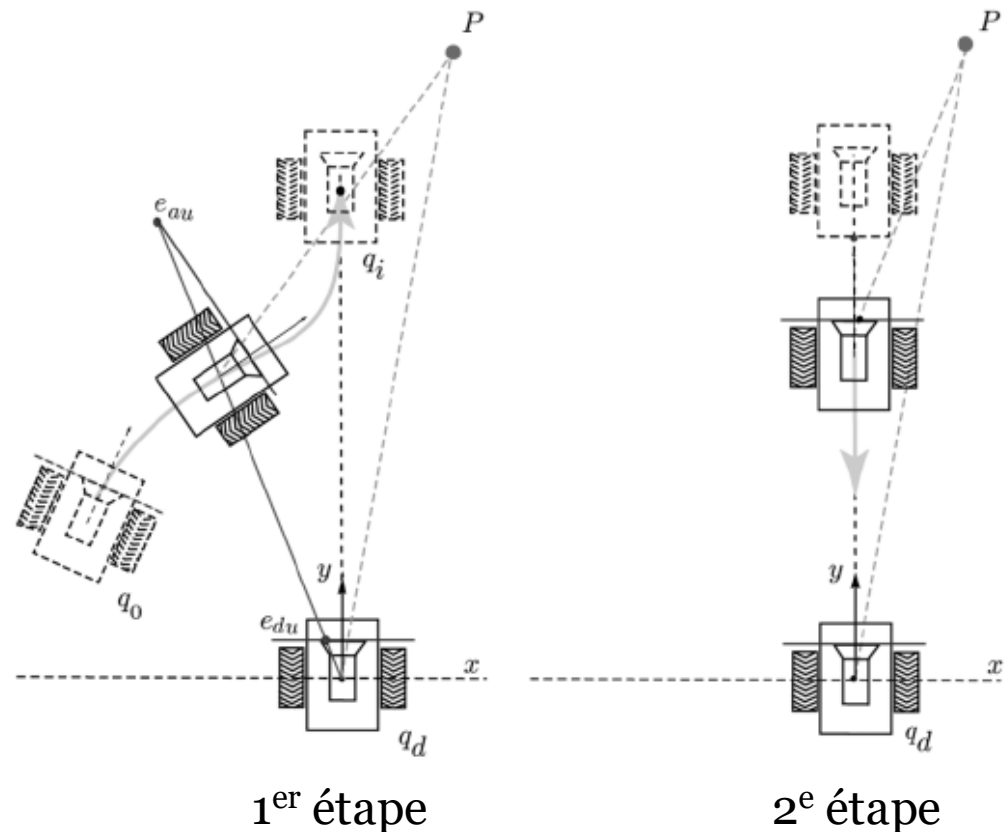
- *Exemple 1*
 - Robot industriel KUKA KR3
 - Utilisation de points dans l'image



www.youtube.com/watch?v=3UQ6AmNnx-g

Asservissement visuel 2D

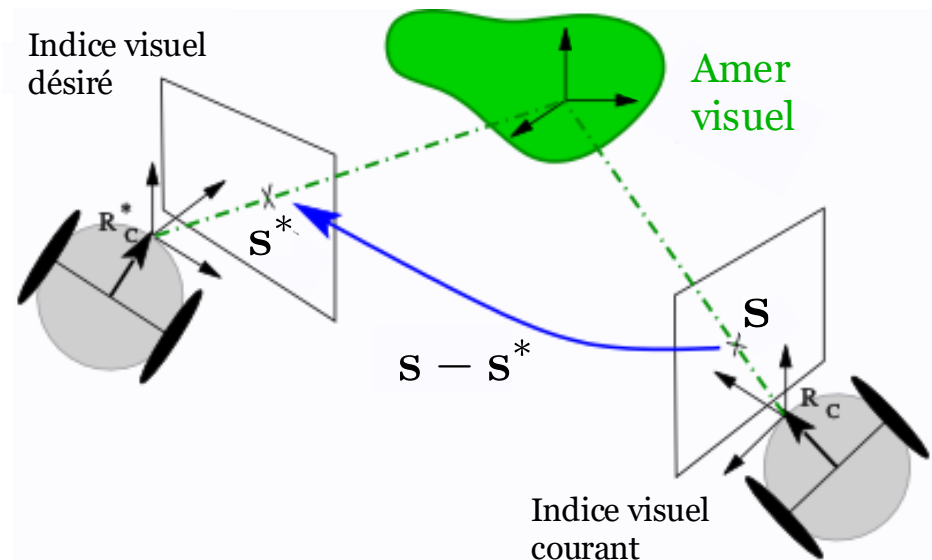
- *Exemple 2*
 - Robot de type unicycle
 - Deux étapes
 - 1^{re} étape : utilisation des épipôles dans l'image



“Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robots using epipolar geometry”, G.L. Mariottini, G. Oriolo, D. Prattichizzo, IEEE Trans. on Robotics, vol. 23, n. 1, pp. 87-100, 2007

Asservissement visuel 2D : sommaire

- Le gros du travail
 - Obtention de la relation liant les infos visuelles au mouvement de la caméra
 - Dérivée des infos sensorielles s par rapport à la pose du robot
(la jacobienne de l'image J_s)



Solution alternative : *approche hybride* \rightarrow asservissement visuel 2 $\frac{1}{2}$ D

"2 $\frac{1}{2}$ D visual servoing", E. Malis, F. Chaumette, S. Boudet, IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 15, n. 2, pp. 238-250, 1999