

ROB201 – Introduction à la robotique mobile

Cours 02 - Contrôle réactif – Thibault Toralba

Stratégies de navigation

Stratégies de navigation

- Plusieurs classifications possibles
- Si on suit la théorie de la navigation animale, 5 niveaux de comportements de complexité croissante selon l'information perçue, représentée et traitée (O. Trullier*):
 1. Approche / fuite
 2. Guidage
 3. Action associée à la reconnaissance d'un lieu
 4. Navigation topologique
 5. Navigation métrique

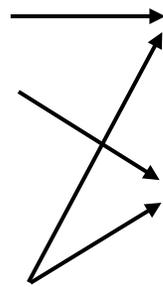


* "Biologically based artificial navigation systems: Review and prospects", O. Trullier, S.I. Wiener, A. Berthoz, J.-A. Meyer, *Progress in Neurobiology*, vol. 51, n. 5, pp. 483-544, 1997

Stratégies de navigation

1 – Approche / Fuite

- **Objet à approcher**
 - Objectif à atteindre
 - Chemin à suivre
- **Objet à fuir**
 - Esquive d'obstacle
- **Comportements**
 - Suivi de mur
 - Centrage...



Peut être

- L'élément principal d'un déplacement purement réactif
- La couche la plus proche des données capteur courantes d'une architecture hybride (gestion d'évènements imprévus)

Perception



Action

Stratégies de navigation

2 - Guidage

But à portée, mais invisible ? (sans localisation)



Stratégies de guidage

- Mémorisation d'amers visibles / repères à proximité de l'objectif
 - Tentative de reproduction de la configuration : mouvement selon l'écart entre l'état actuels des capteurs et l'état requis
- Actions réflexes
- Descente / montée de gradient
- Pas besoin de reconnaissance spatiale

Aperçu des contrôles réactifs

Modèle Snapshot

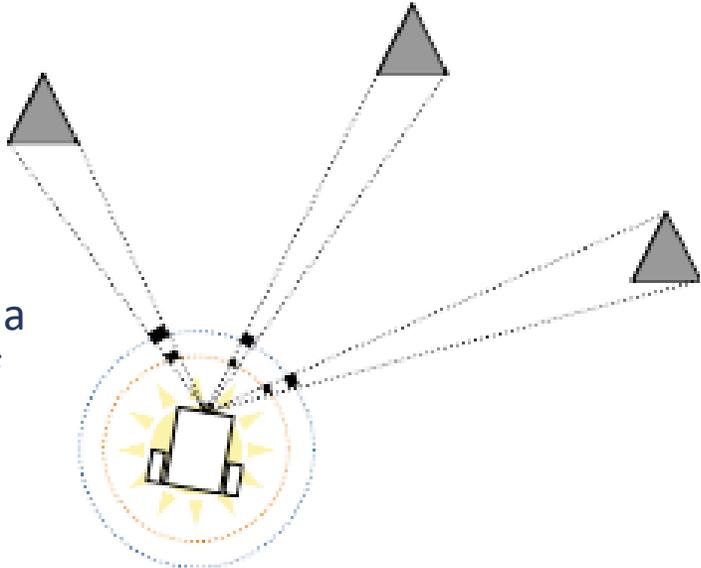
Ex : Modèle de Cartwright et Collet (abeille)

Perception de la direction et de la taille d'amers

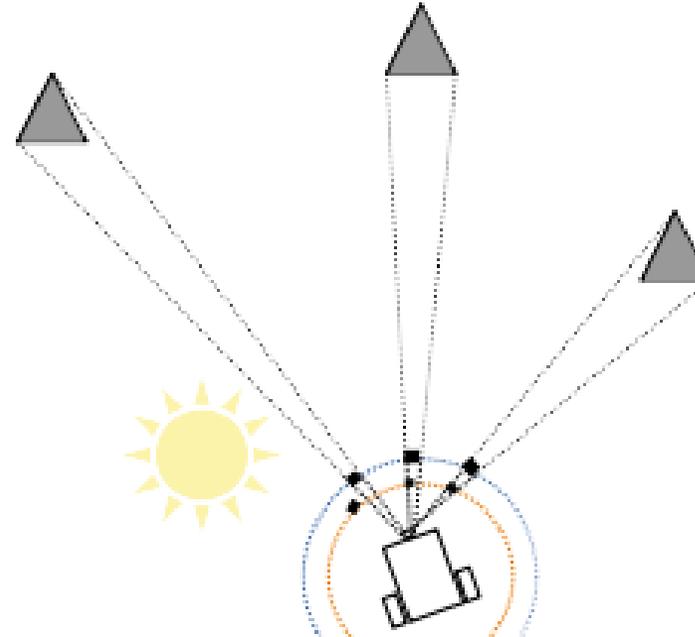
Appariement données capteurs /*snapshot* pour atteindre un objectif connu

- *Tailles différentes : avance / recul*
- *Mauvaise orientation : rotation du robot*

Snapshot pris à la position objectif



Tentative de retour à la position objectif



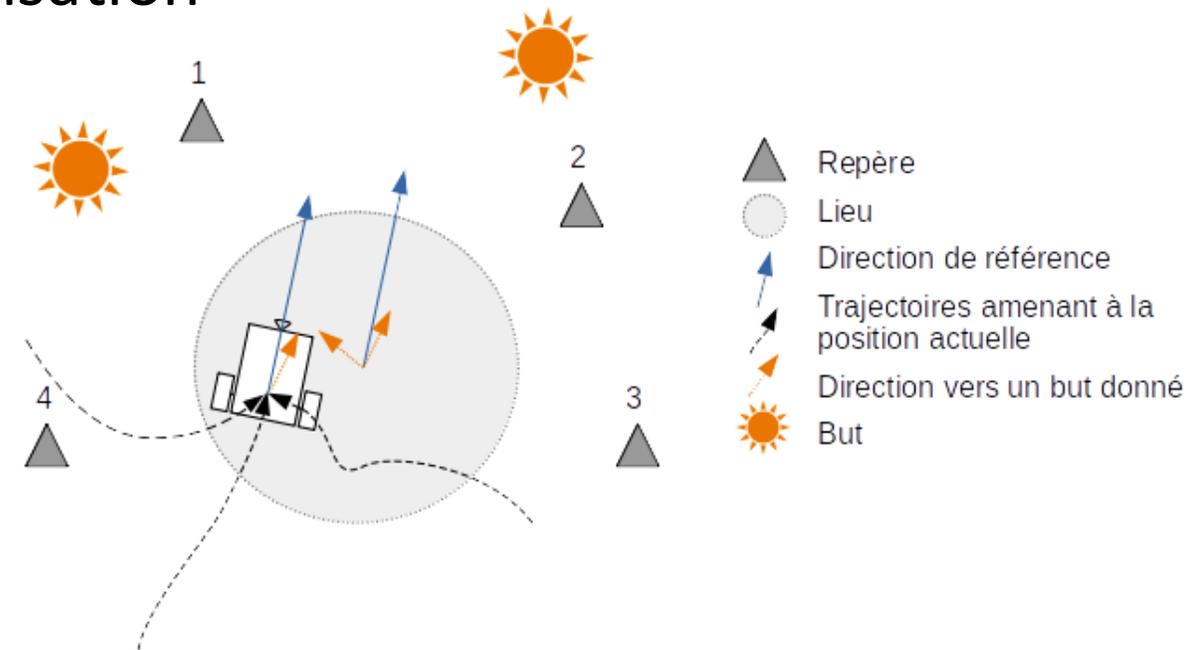
Stratégies de navigation

3 – Action associée à la reconnaissance d'un lieu

But et amers voisins invisibles, environnement large

➔ Notion de lieu et de localisation

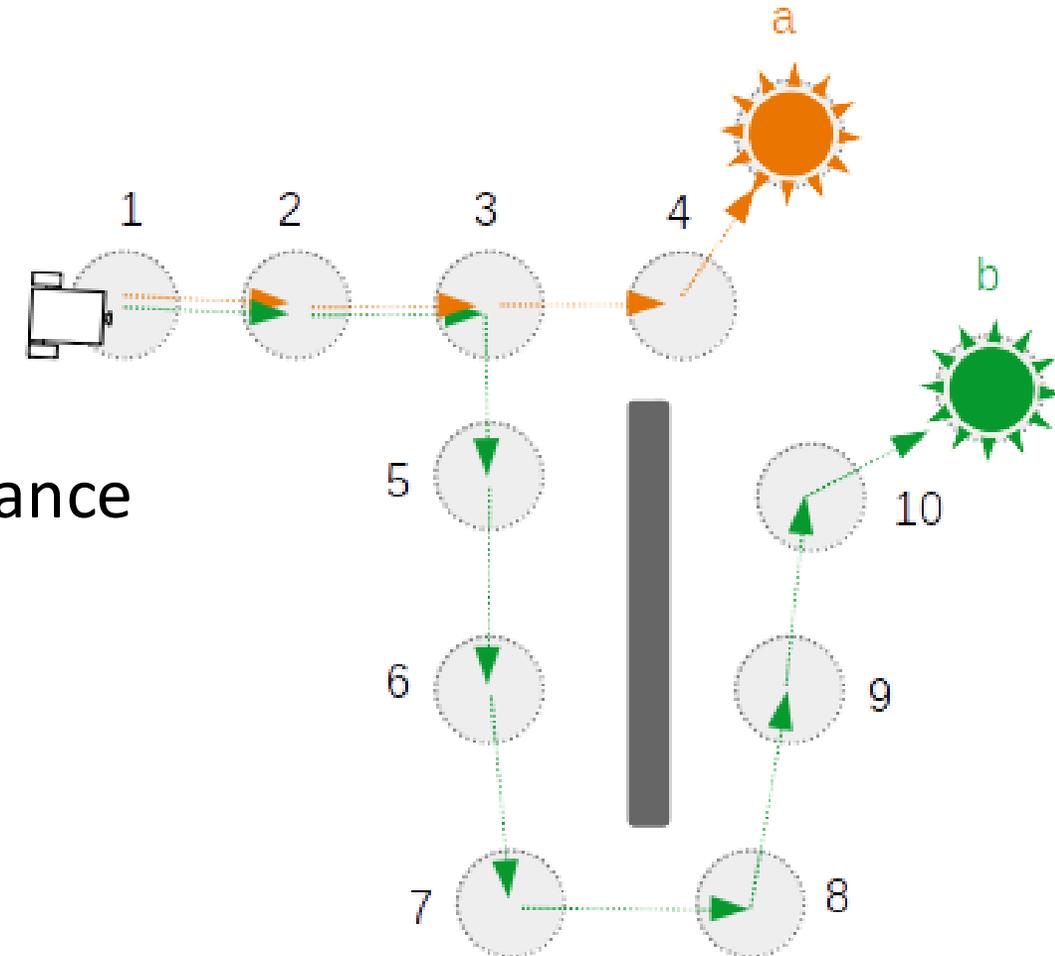
- Lieu représenté comme ensemble de points où les repères sont perçus de façon similaire
- Connaissance d'un ensemble de lieux
- A chaque lieu est associé une action pour un but donné
- Trajectoire constituée de l'enchaînement d'actions



Stratégies de navigation

3 – Action associée à la reconnaissance d'un lieu

- Décision uniquement au moment de sélectionner la prochaine action
- Pas de notion de **carte** : pas de connaissance de la relation entre les lieux connus
- Pas de planification possible en amont
- Impossibilité de rejoindre le but en cas d'imprévu (obstacle, conduite en un lieu inconnu...)



*Pas d'action associée au but b connue en lien 4
-> Pas d'optimisation possible*

Stratégies de navigation

4 – Navigation topologique

Lieux distants, dérive, recherche d'adaptabilité (chemins indépendant des buts)

 Prédiction des lieux à atteindre, représentation topologique

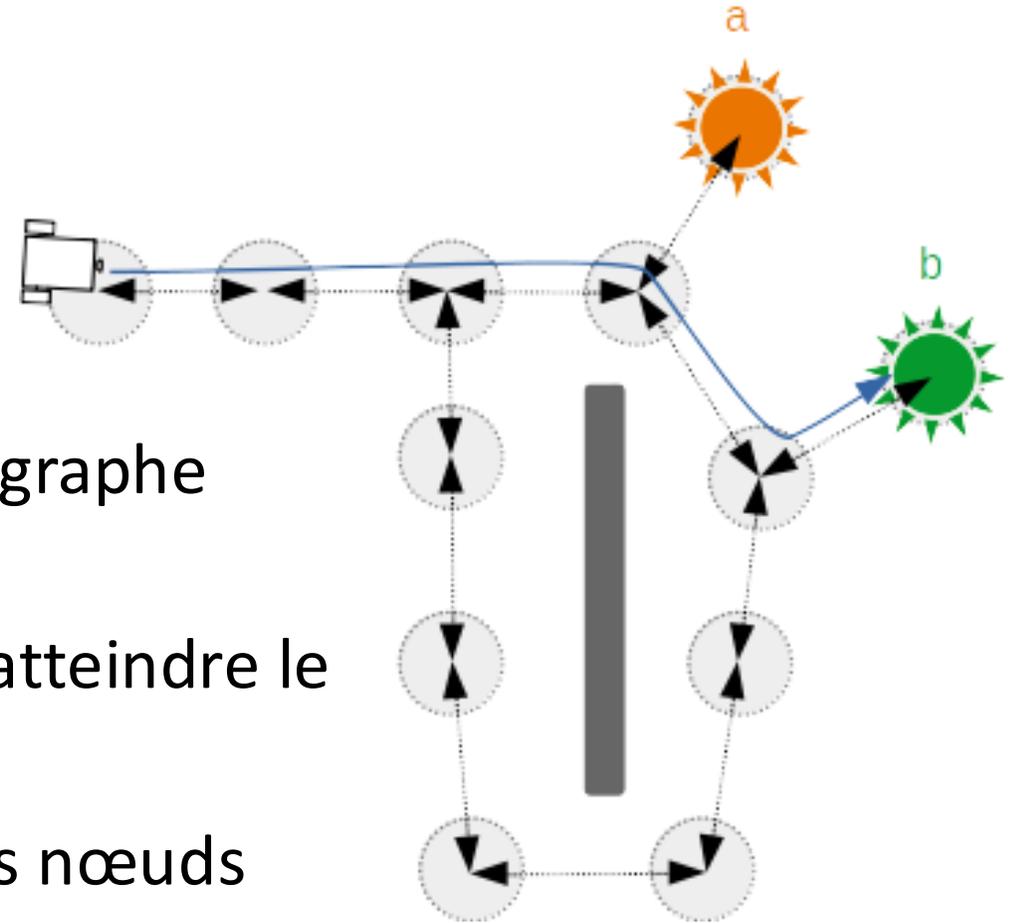
- Mathématiquement sous forme de graphe
 - Nœud = lieu
 - Arête = adjacence
- Adjacence si un chemin direct a déjà été visité entre deux lieux

Stratégies de navigation

4 – Navigation topologique

Atteindre un but non-visible :

- Reconnaître le lieu actuel
- Associer le nœud correspondant dans le graphe topologique
- Rechercher la séquence de nœuds pour atteindre le but
- Concaténer les chemins entre chacun des nœuds pour constituer la trajectoire



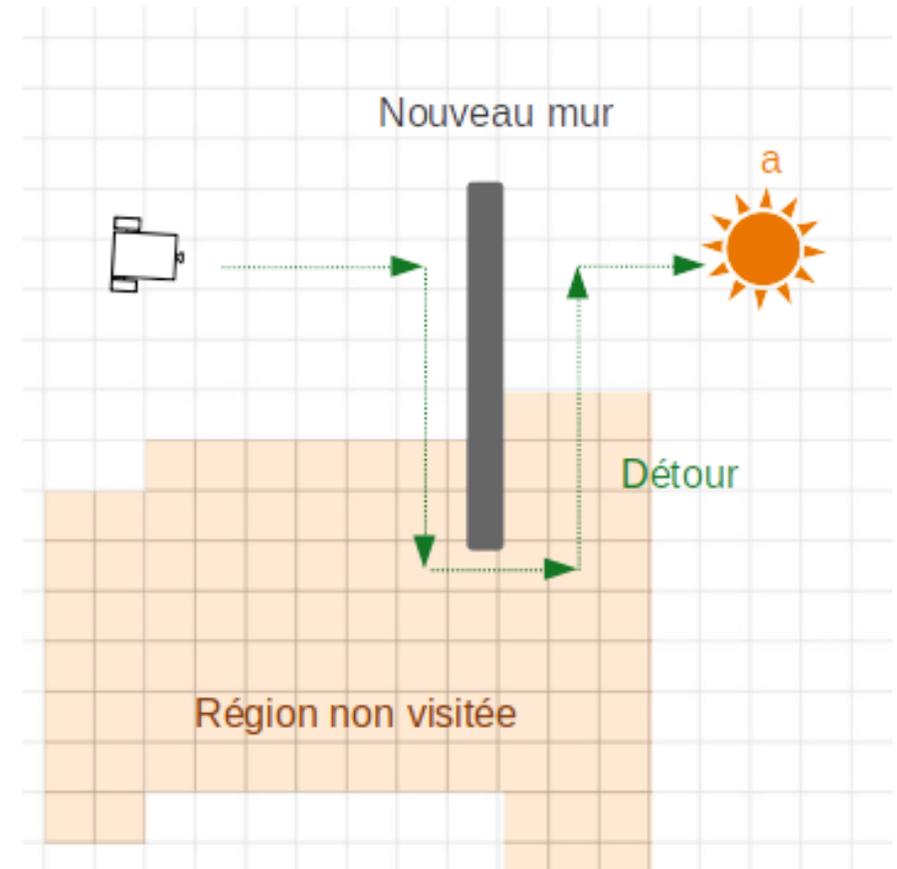
Stratégies de navigation

5 – Navigation métrique

Recherche de chemin optimal (plus court), trajectoires "inédites", obstacles imprévus

➔ Détours / raccourcis métriques

- S'écarter temporairement d'un chemin planifié ou du lieu suivant (ex : nouveau mur) nécessite de connaître la distance d'écart pour y retourner



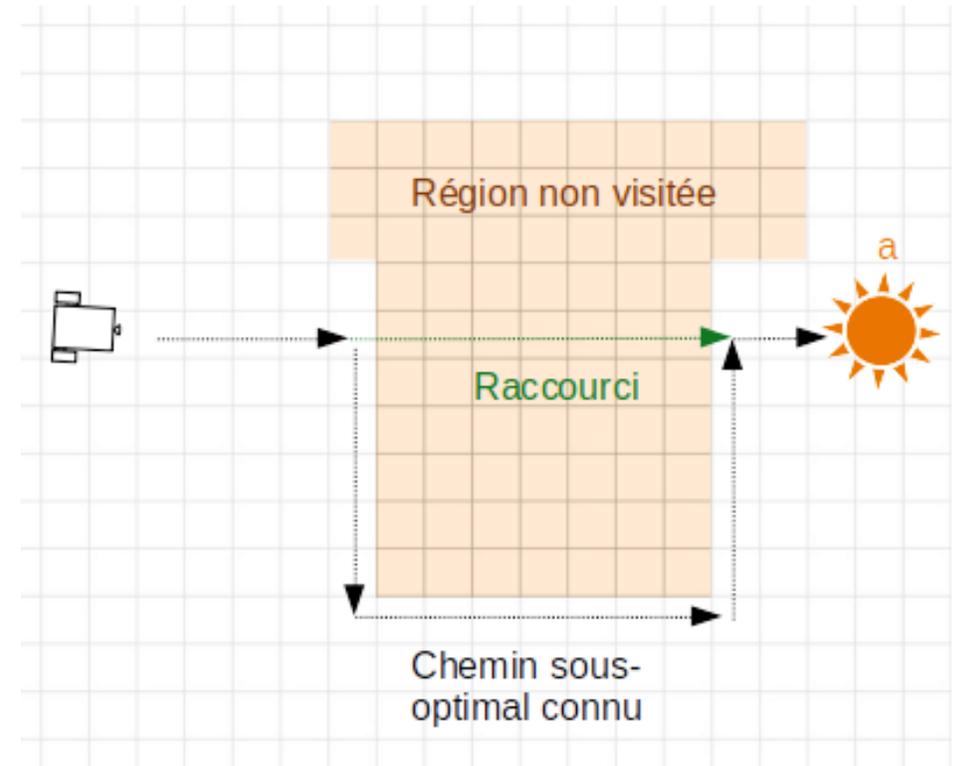
Stratégies de navigation

5 – Navigation métrique

Recherche de chemin optimal (plus court), trajectoires "inédites", obstacles imprévus

➔ Détours / raccourcis métriques

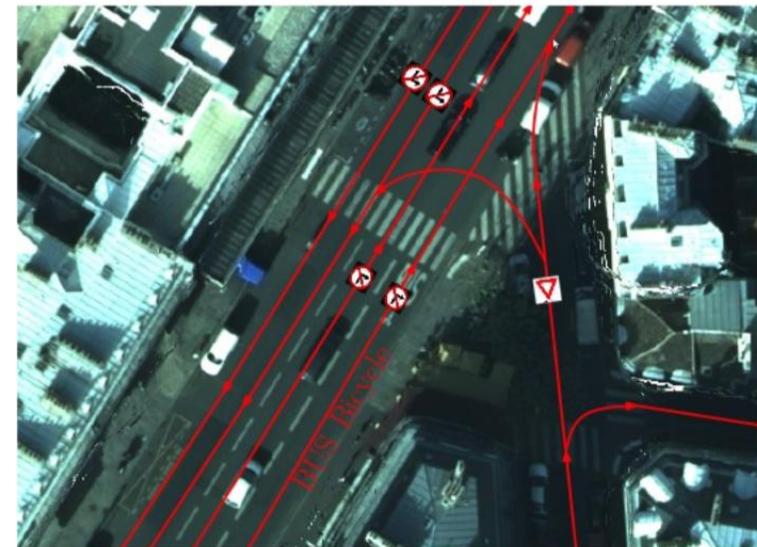
- Connaître les positions / orientations relatives permet d'optimiser le chemin



Stratégies de navigation

Résumé

- 1,2,3 : Navigation réactive
 - Champ d'application restreint
 - Très rapide
 - Robuste (potentiellement ...)
- 4,5 : Navigation avec une carte
 - Déplacements à long terme
 - Problème difficile
 - Naturel pour l'homme qui utilise des processus cognitifs élaborés



Navigation réactive

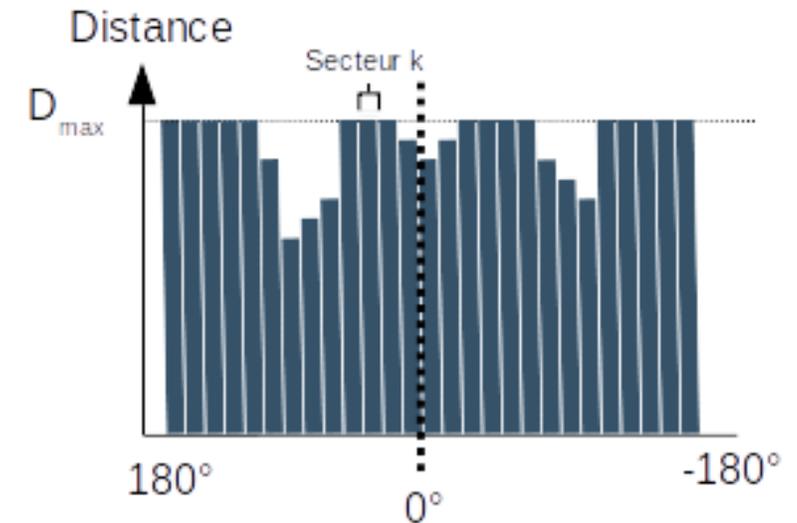
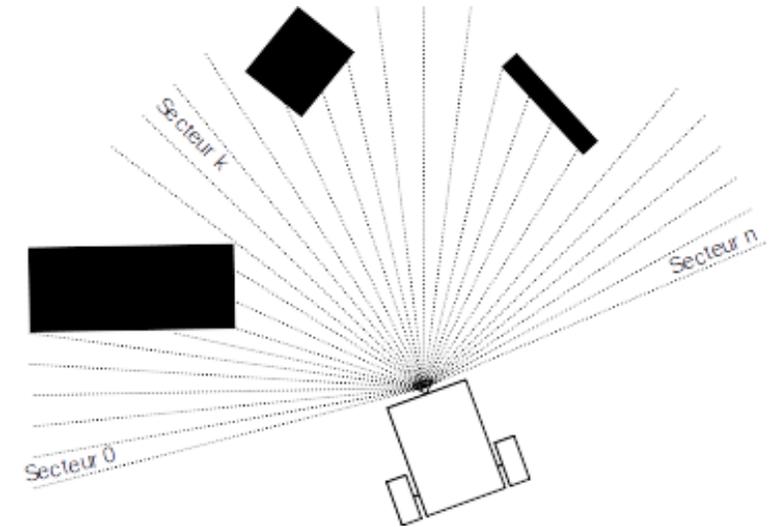
Vector Field Histogram

Stratégie d'évitement d'obstacle basée sur la répartition des obstacles autour du mobile

Version instinctive :

- Capteur à balayage (Rangée d'ultrason, LIDAR 2-3D)
- Donnée de distance à l'obstacle

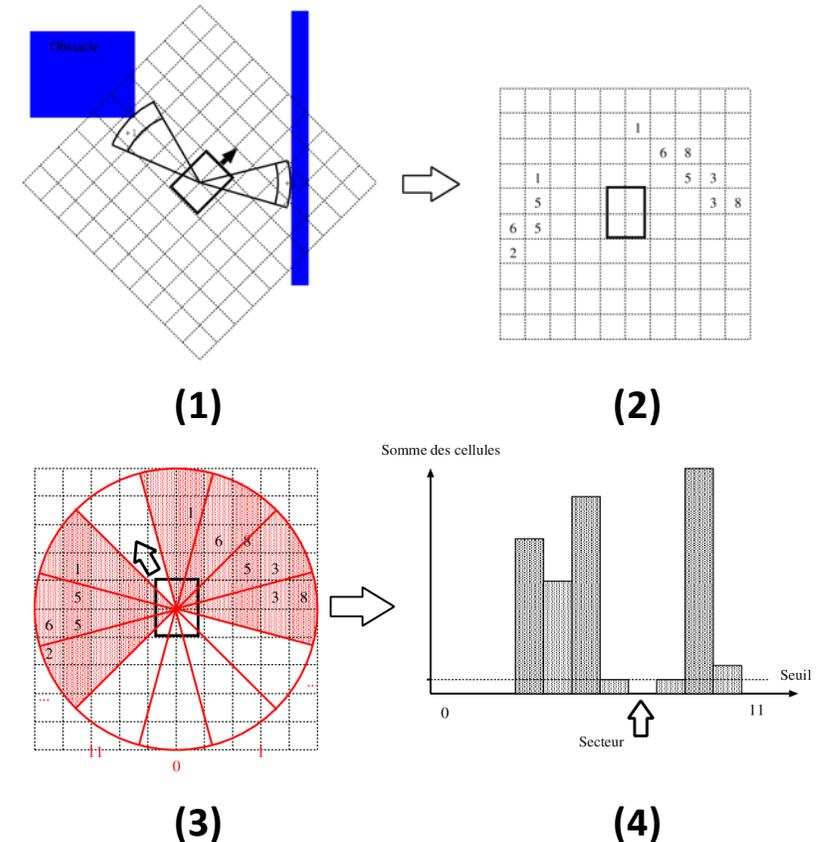
➡ Sélection du secteur avec le plus grand espace libre



Vector Field Histogram

Historiquement :

- Basée sur une discrétisation locale (grille d'occupation) **(1)**
- Chaque cellule contient une probabilité de présence d'obstacle affinée / actualisée à chaque mesure **(2)**
- Construction d'un histogramme polaire **(3)**
- Choix du secteur cible en fonction de la tâche **(4)**



J. Borenstein and Y. Koren. The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots. IEEE Journal of Robotics and Automation, 7 :278–288, 1991.

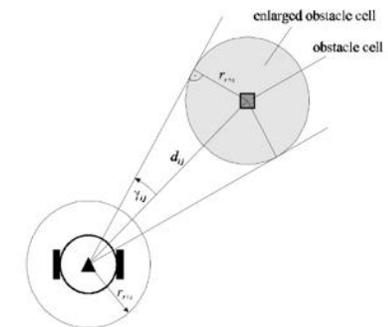
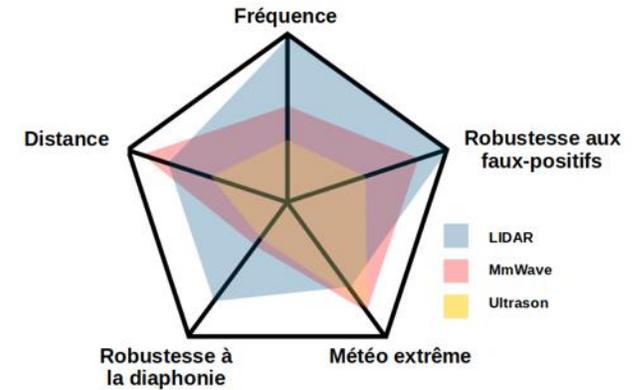
Vector Field Histogram

Efficacité dépendante de :

- La précision et de la densité de la perception
- La précision du modèle probabiliste du capteur
- La capacité à détecter l'ensemble des obstacles

Possibilité d'augmentation :

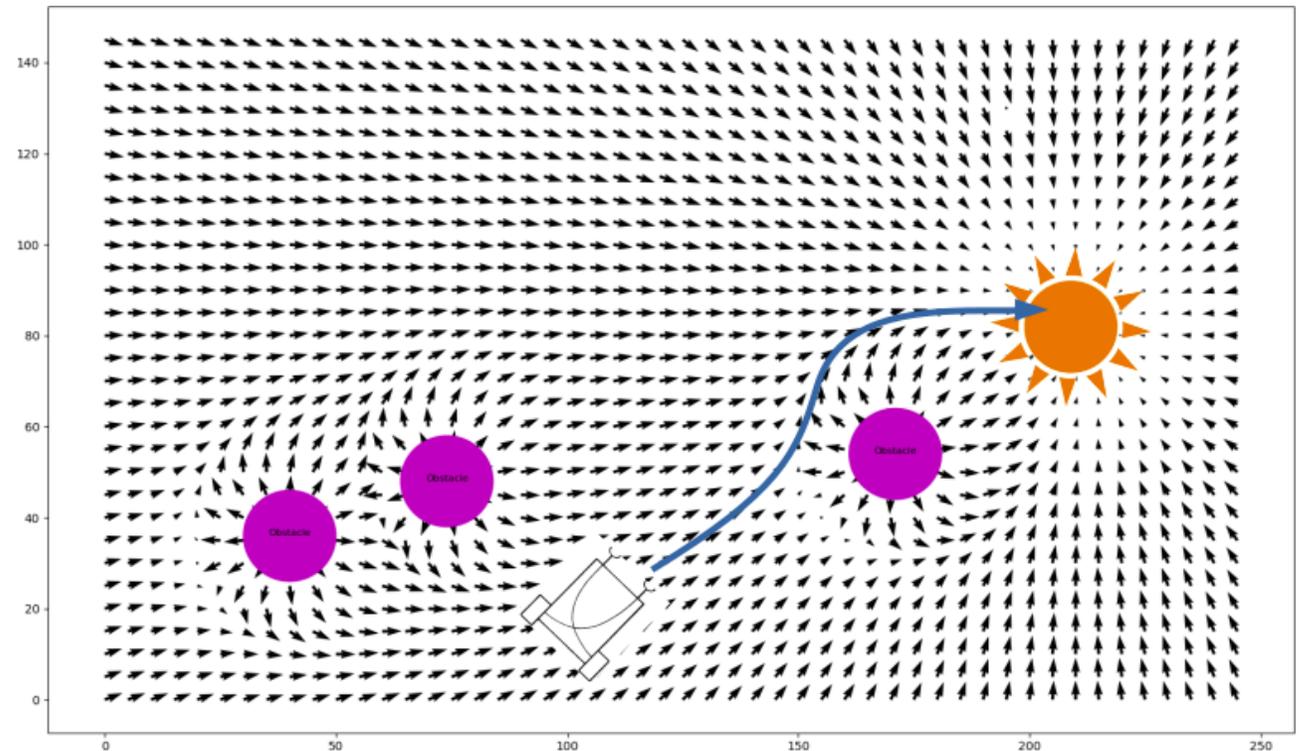
- Prise en compte de la dimension du mobile (VFH+)
- Ajout d'un planificateur local (A^*) pour prendre en compte de la cinématique du robot (VFH*)
- Etc.



Champ de potentiel

Hypothèses :

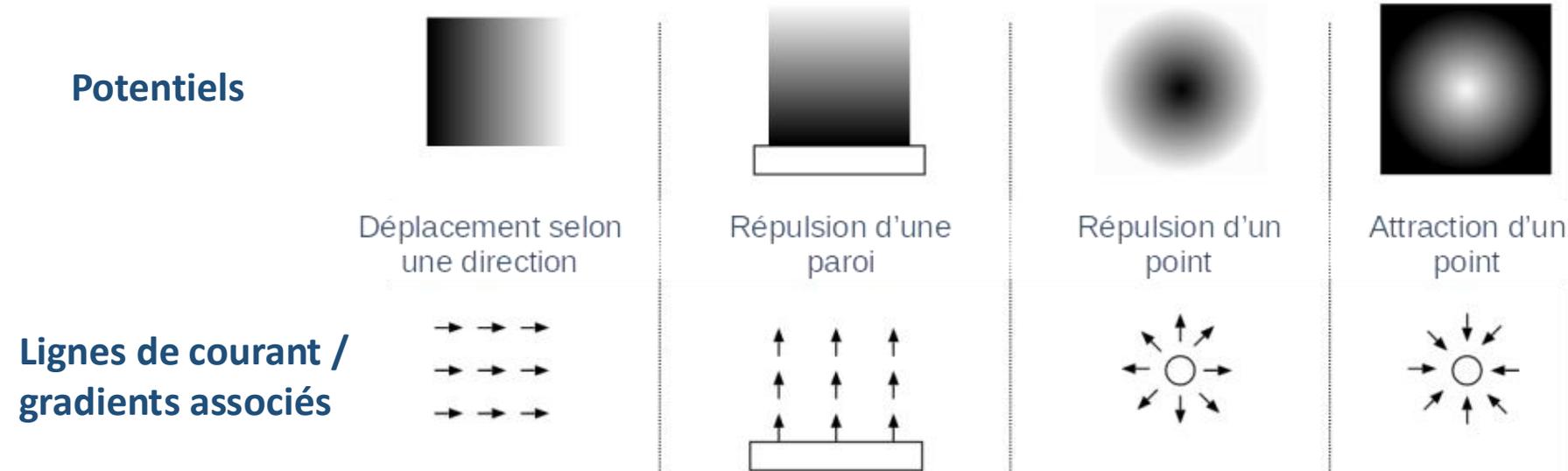
- Capteurs permettant de localiser l'objectif
- Capteurs de distance pour évitement
- Raisonnement en potentiels attractifs / répulsifs



Champ de potentiel

Le véhicule est assimilé à une particule suivant les lignes de courant d'un potentiel

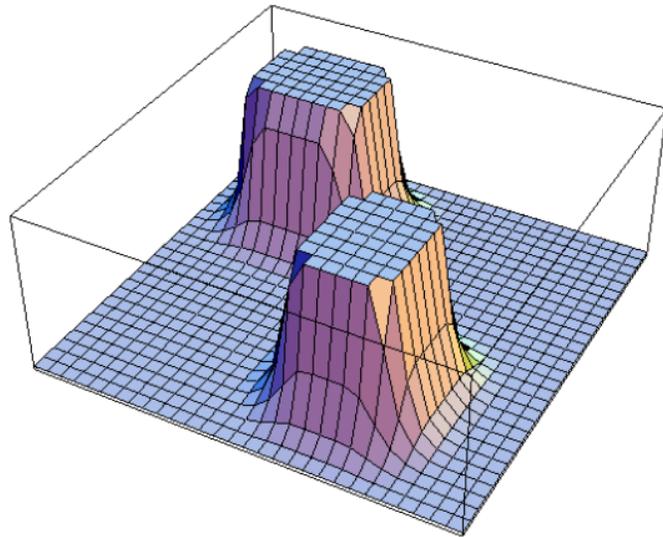
Le potentiel dépend de l'objectif choisi



Champ de potentiel

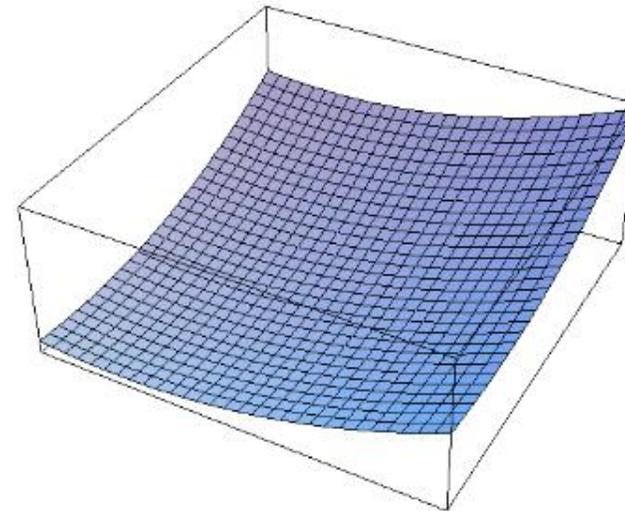
Le potentiel peut dépendre ou non de la distance au mobile, et avoir une portée :

Limitée



Obstacles

Infinie

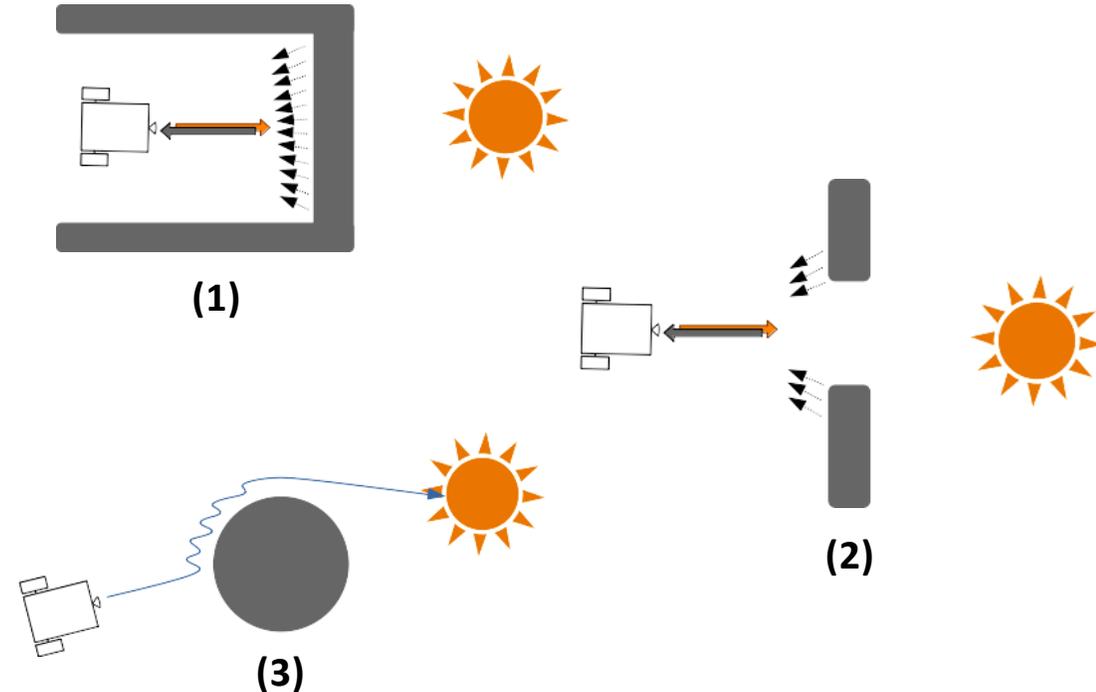


Objectif

Champ de potentiel

Inconvénients :

- Existence de minima locaux
compensation locale des gradients
- Gestion des espaces restreints
- Comportements oscillatoires
Evolution discontinue du gradient
- Faibles performances en environnement dynamique



- Potentiel exprimé comme fonction harmonique (calcul lourd)
- Recovery Behaviours (déplacement aléatoire, suivi de mur)
- Expression du potentiel...

Champ de potentiel : implémentation

Champs de potentiel

Potentiel

Rejoindre l'objectif \longleftrightarrow Suivre une descente de gradient de potentiel

En suivant l'analogie du champ de potentiel, le mobile suivra à chaque itération le vecteur / la force : $F_q = -\nabla f(q)$

Avec :
$$\nabla f(q) = \left[\frac{\delta f}{\delta q_1}(q), \dots, \frac{\delta f}{\delta q_m}(q) \right]^T$$

où q est le vecteur des paramètres

La fonction $f(x, y) : R^2 \rightarrow R$ (2D ici) aura une composante attractive (déplacement vers un objectif) et répulsive (obstacles).

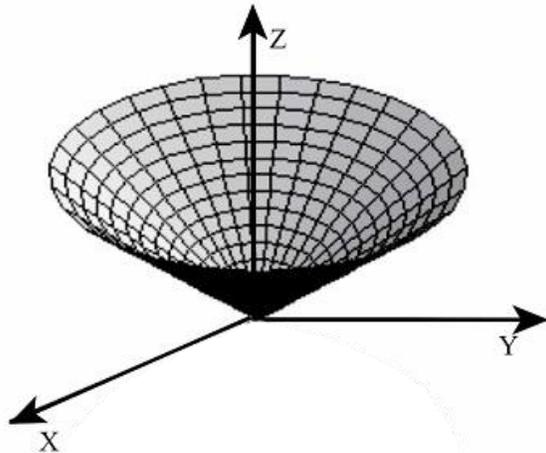
Champs de potentiel

Potentiel attractif

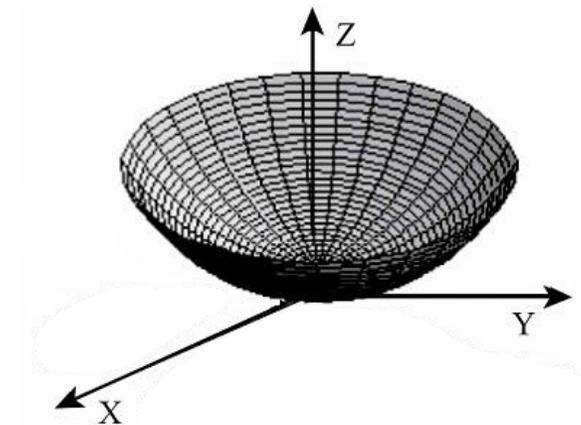
Soit $d(q, q_{goal})$ la distance entre le robot mobile et le point objectif *goal*

Choix du comportement d'approche ?

Potentiel conique



Potentiel quadratique



Champs de potentiel

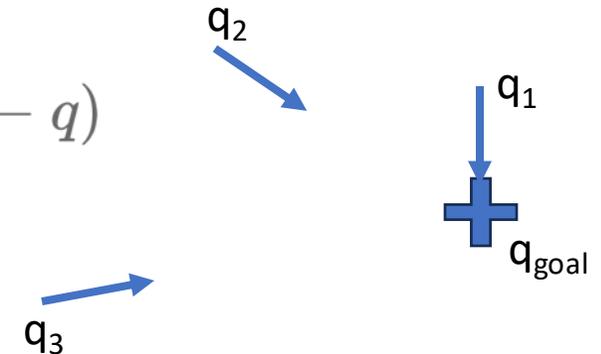
Potentiel attractif conique

Le potentiel en un point est directement proportionnel à la distance entre le robot et le *goal* : $f(q) = K \cdot d(q, q_{goal})$

Pour une distance cartésienne : $f(q) = K \cdot \sqrt{(x_{goal} - x)^2 + (y_{goal} - y)^2}$

$$\frac{\delta f}{\delta q_i}(q) = K \frac{1}{2d(q_i, q_{i,goal})} \cdot 2(q_{i,goal} - q_i)$$

Gradient au point q : $\nabla f(q) = \begin{pmatrix} \frac{\delta f}{\delta x}(q) \\ \frac{\delta f}{\delta y}(q) \end{pmatrix} = \frac{K}{d(q, q_{goal})} (q_{goal} - q)$



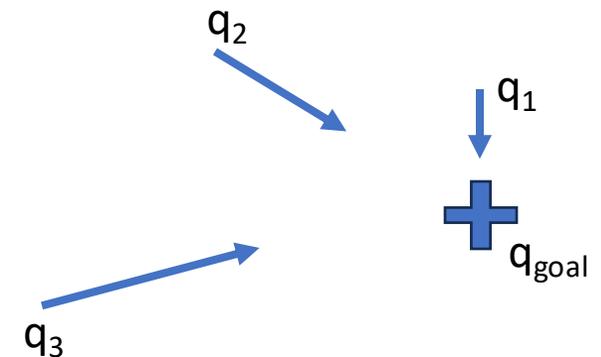
Champs de potentiel

Potentiel attractif quadratique

Le potentiel dont le gradient diminue pour atteindre 0 au niveau de l'objectif *goal* : $f(q) = \frac{1}{2}Kd^2(q, q_{goal})$

Pour une distance cartésienne :
$$\frac{\delta f}{\delta q_i}(q) = \frac{1}{2}K \frac{\delta(d^2(q, q_{goal}))}{\delta q_i}$$
$$= \frac{1}{2}K(2(q_{i, goal} - q))$$

Gradient au point q : $\nabla f(q) = K(q_{goal} - q)$



Champs de potentiel

Potentiels attractifs

Potentiel conique $\nabla f(q) = \frac{K}{d(q, q_{goal})} (q_{goal} - q)$

- ◆ + Vitesse constante dans tout l'espace
- ◆ - Dérivée seconde infinie au point objectif : à-coups, oscillations...

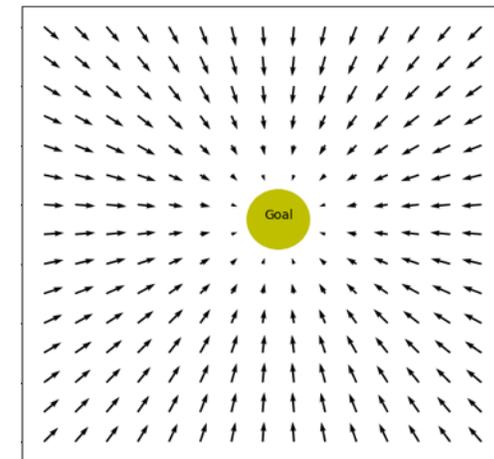
Potentiel quadratique $\nabla f(q) = K(q_{goal} - q)$

- ◆ - Fortes vitesses au démarrage (loin de l'objectif)
- ◆ + Décélération à proximité de l'objectif



Combinaison des avantages avec continuité à une distance d_{lim}

$$\nabla f(q) = \begin{cases} \frac{K}{d(q, q_{goal})} (q_{goal} - q) & \text{pour } d(q, q_{goal}) > d_{lim} \\ \frac{K}{d_{lim}} (q_{goal} - q) & \text{pour } d(q, q_{goal}) \leq d_{lim} \end{cases}$$



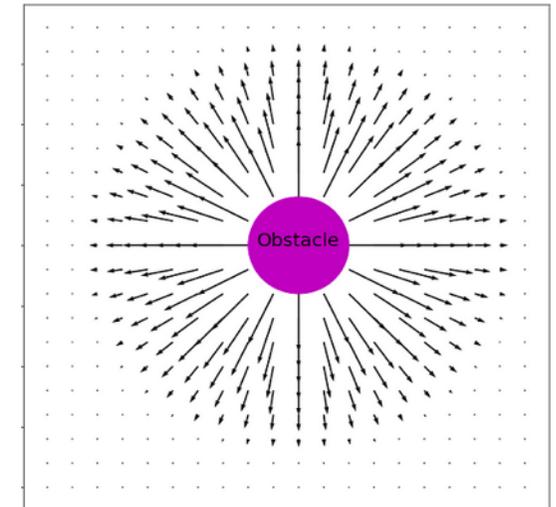
Champs de potentiel

Potentiel répulsif

Nécessité d'un potentiel répulsif pour éviter les collisions

Comportement souhaité :

- Pas de répulsion parasite au-delà d'une distance donnée
- Répulsion "infinie" à la frontière de l'obstacle
- Evolution sans à-coup (pic d'accélération) du robot mobile : fonction potentielle C^2



Champs de potentiel

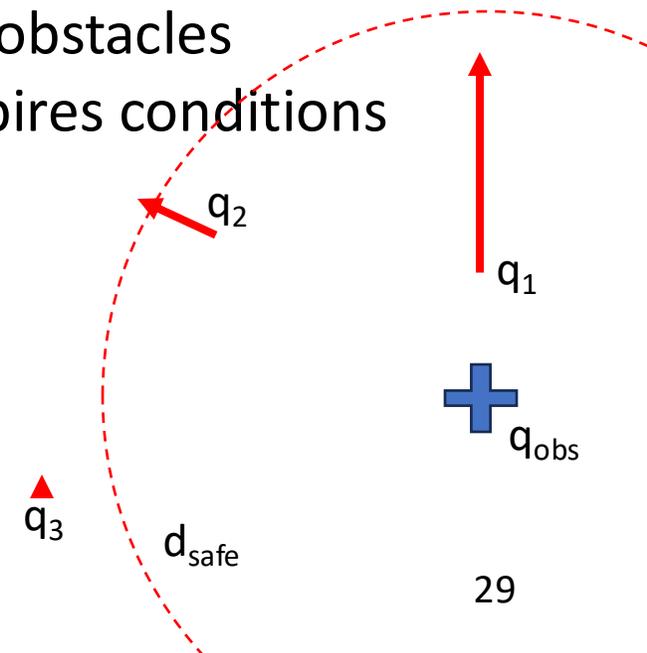
Potentiel répulsif

On propose un potentiel de la forme

$$f_{rep}(q) = \frac{1}{2} K_{obs} \left(\frac{1}{d(q, q_{obs})} - \frac{1}{d_{safe}} \right)^2$$

- K_{obs} facteur de répulsion des obstacles
- $d(q, q_{obs})$ distance la plus courte entre le point considéré et les obstacles
- d_{safe} la distance de sécurité des obstacles déterminée dans les pires conditions

Avec
$$\frac{\delta f}{\delta q_i} = \frac{K_{obs}}{d^3(q, q_{obs})} \left(\frac{1}{d(q, q_{obs})} - \frac{1}{d_{safe}} \right) (q_{i,obs} - q_i)$$



Champs de potentiel

Potentiel répulsif

Gradient de potentiel répulsif

$$\nabla f_{rep}(q) = \begin{cases} 0 & \text{pour } d(q, q_{obs}) > d_{safe} \\ \frac{K_{obs}}{d^3(q, q_{obs})} \left(\frac{1}{d(q, q_{obs})} - \frac{1}{d_{safe}} \right) (q_{obs} - q) & \text{pour } d(q, q_{obs}) \leq d_{safe} \end{cases}$$

d_{safe} pouvant être déterminé empiriquement ou analytiquement

- $V(0) = V_{max}$ vitesse initiale du mobile
- $d(0) = d_{lim}$ distance de début d'effet de la répulsion
- $V(t+\Delta t) = V(0) - \nabla f_{rep}(t)$ si gradient directement utilisé en consigne de vitesse
- $a(t) = V'(t) \leq a_{max}$

Champs de potentiel

Distance à un objet

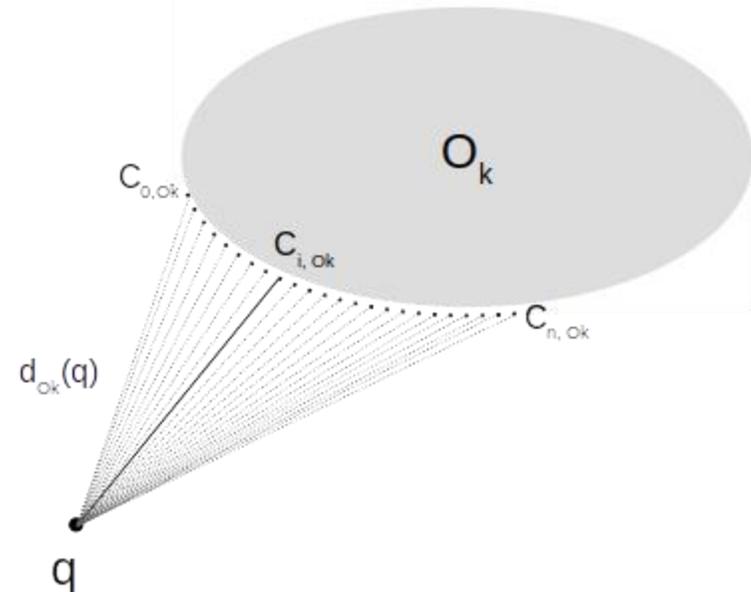
Choix de la distance à l'objet (obstacle) considéré ?

A partir des données capteurs

Soit $c_{0\dots n, O_k}$ les points de contact appartenant à l'obstacle O_k détectés par le capteur.

➔ Distance minimale à l'obstacle :

$$d_{O_k}(q) = \underbrace{\min}_{c \in O_k} d(q, c)$$



Champs de potentiel

Distance à un objet

Choix de la distance à l'objet (obstacle / objectif) considéré ?

A partir des données capteurs

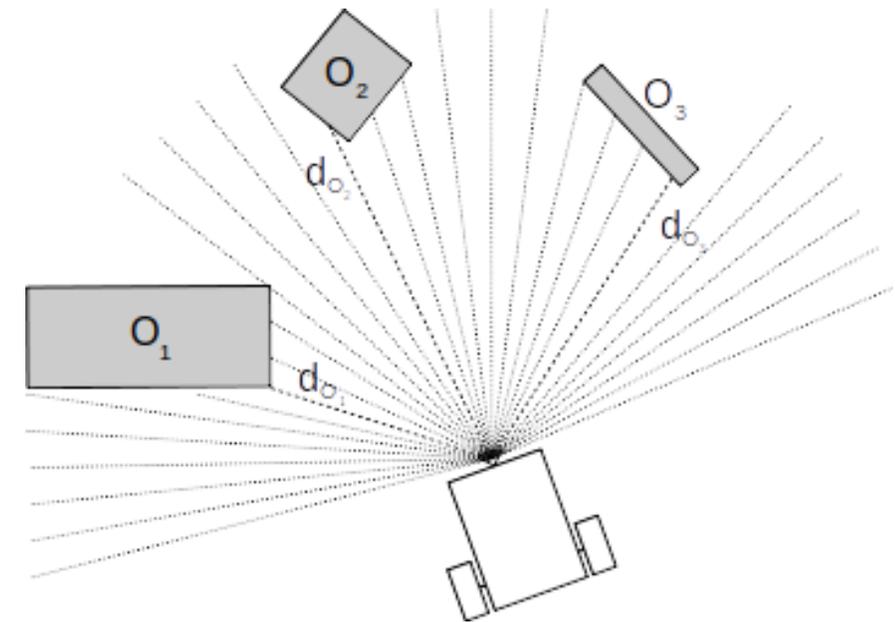
Multi-obstacle ?



- Distance minimale (oscillations)

$$d(q) = \min_k d_{O_k}(q)$$

- Segmentation des obstacles et somme des comportements
- Etc.

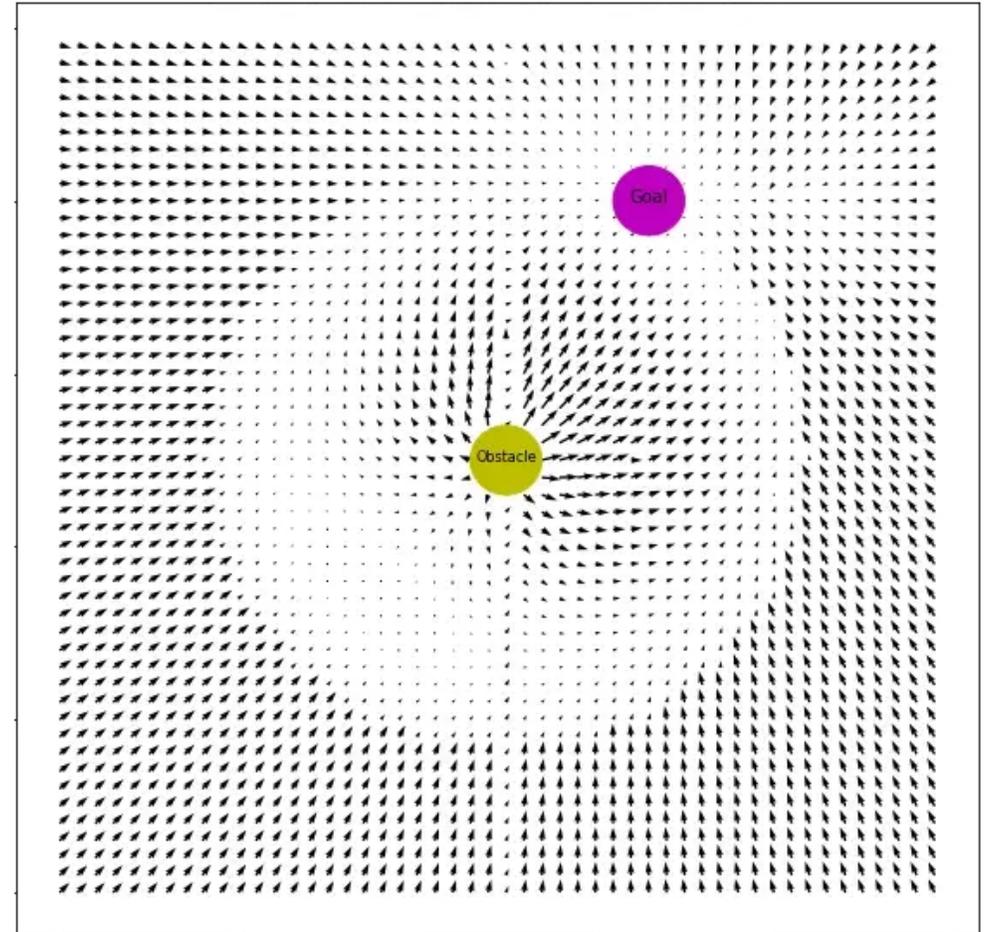


Champs de potentiel

Potentiel total

Gradient total = Somme des gradients

$$\nabla f_{tot} = \sum \nabla f_{att}(q) + \sum \nabla f_{rep}(q)$$

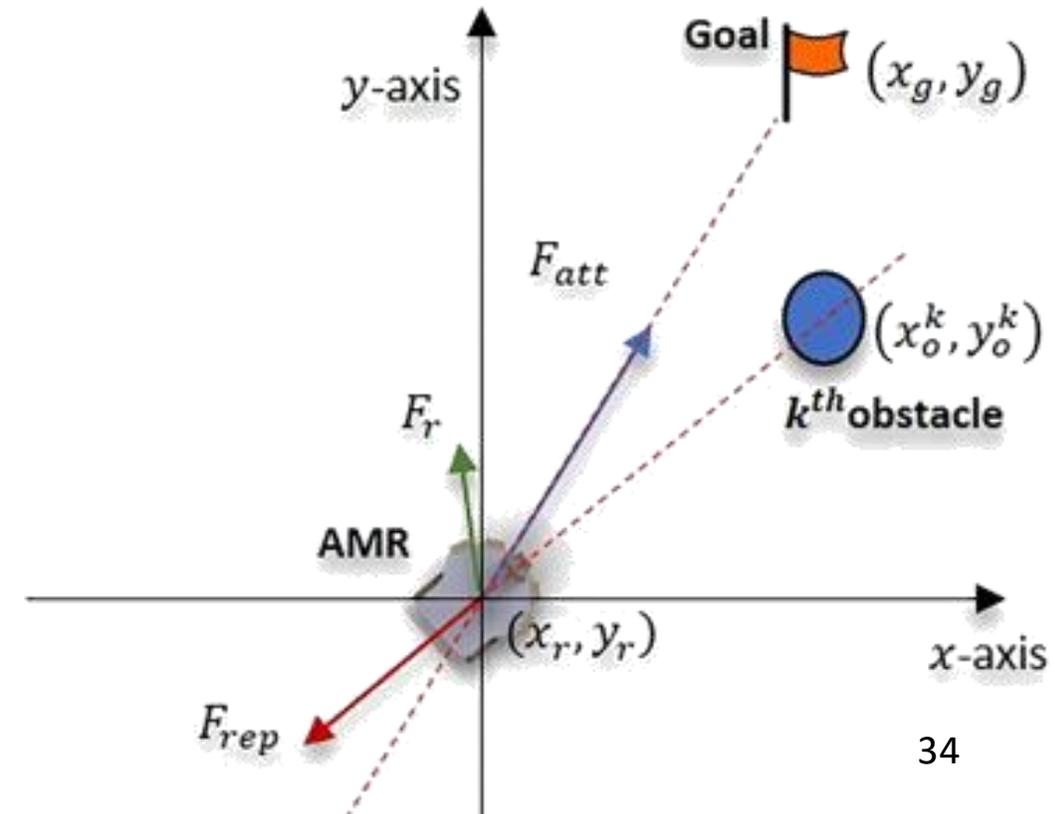


Champs de potentiel

Remarques

- Utilisation du gradient, et non de la valeur absolue du potentiel
- Calcul dans le repère relatif au robot pour décider de la vitesse et de la direction courante

➔ Gain de vitesse en calculant la somme des gradients des potentiels répulsifs / attractifs **uniquement au point courant du mobile**



Champs de potentiel

Suivi du potentiel

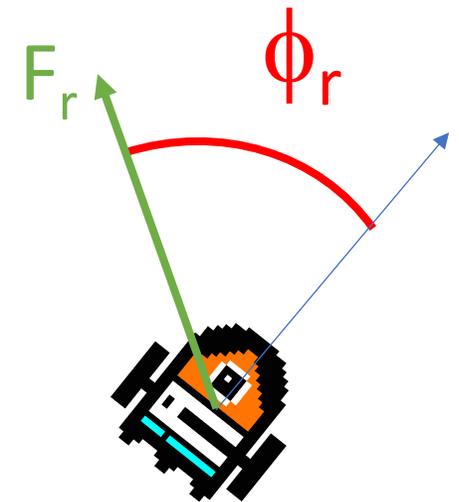
- Controlleur proportionnel pour la vitesse de rotation poursuivre la force :

$$\omega = K_{\omega} \phi_r$$

- Pour améliorer le suivi, réduire la vitesse si l'angle est trop grand :

$$V = K_v |F_r| \quad \text{si } \phi_r < \phi_{\max}$$

$$V = K_v |F_r| * \phi_{\max} / \phi_r \quad \text{si } \phi_r > \phi_{\max}$$



Champs de potentiel

Suivi de chemin

Application au suivi de chemin :

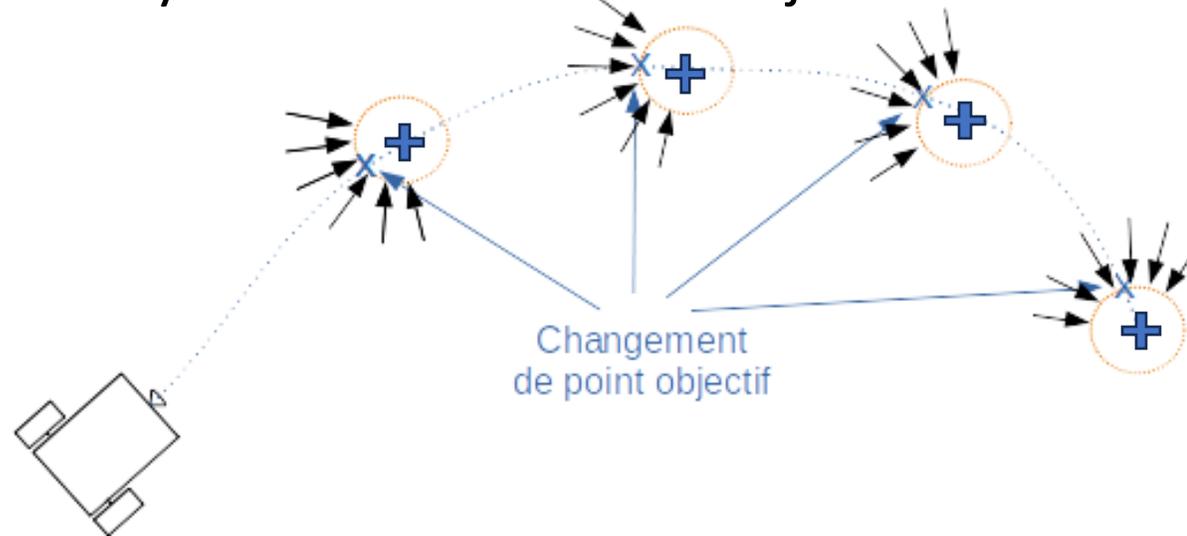


Choix d'un rayon de validation des objectifs intermédiaires (*waypoint*) selon la précision du chemin planifié, de la dynamique du robot mobile...



Format du potentiel attractif

Ralentissement à chaque objectif intermédiaire si potentiel quadratique de rayon $>$ rayon de validation de l'objectif



TP 02

1. Implémentation potentiel **attractif** vers un but aléatoire autour du robot en utilisant la position fournie par l'odométrie
2. Ajout de l'évitement d'obstacle par potentiel **répulsif**
3. Application pour **suivi de chemin** sur un chemin construit manuellement.

