

Navigation pour les systèmes autonomes

Cours ENSTA Paris - 5RO12 / 01

David FILLIAT

david.filliat@ensta-paris.fr

2024-2025



David Filliat

- Navigation pour la robotique mobile
ENSTA Paris – U2IS

<http://u2is.ensta.fr/>

Nicolas Merlinge

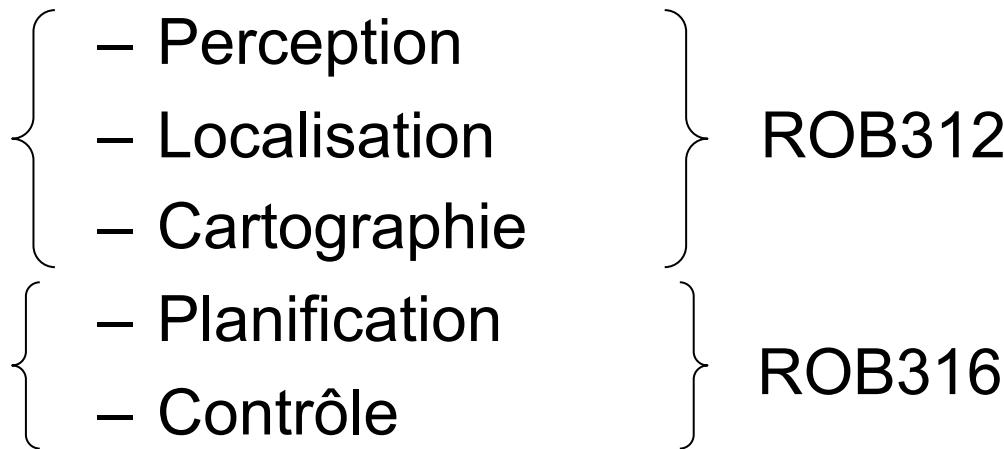
- Localisation, filtrage
ONERA

<https://w3.onera.fr/copernic/>

La navigation est la science et l'ensemble des techniques qui permettent de :

- connaître la position (ses coordonnées) d'un mobile par rapport à un système de référence, ou par rapport à un point fixe déterminé ;
- calculer ou mesurer la route à suivre pour rejoindre un autre point de coordonnées connues ;
- calculer toute autre information relative au déplacement de ce mobile (distances et durées, vitesse de déplacement, heure estimée d'arrivée, etc.).

Aperçu des problèmes de navigation des robots mobiles / véhicules autonomes



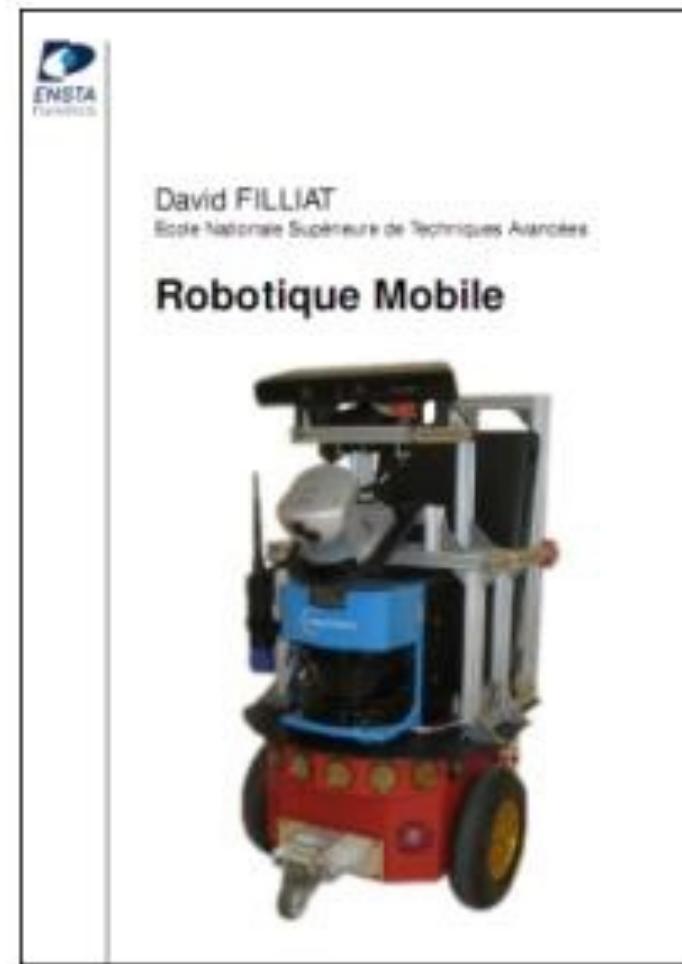
Présentation des méthodes classiques

- Filtrage de Kalman, filtrage particulaire, SLAM, aperçu des méthodes à base d'IA

TP Python - voir Moodle

Polycopié en ligne

<https://perso.ensta-paris.fr/~filliat/>



Slides + vidéos en anglais

voir Moodle

Compte-rendus de TP

- Individuel
- 3 TP notés sur 5
 - ICP
 - **Filtrage de Kalman**
 - **Filtrage particulaire**
 - **SLAM EKF**
 - Graph SLAM

Introduction

Les architectures de Contrôle

Types d'information

Capteurs classiques

Les différents types de navigation

Navigation utilisant une carte

Représentations de l'environnement

Introduction



ENSTA



Machine équipée de capacités de *perception*, d'*action* et de *décision* qui lui permet d'agir de manière *autonome* dans son *environnement* en fonction de la perception qu'il en a et de ses objectifs.

Machine physique

- Pas juste une simulation (constraint par la physique...)
- Capteurs / effecteurs... (bruit, problèmes d'observabilité...)
- Moyens de décisions : électronique, calculateurs (capacité limitée...)

Machine autonome

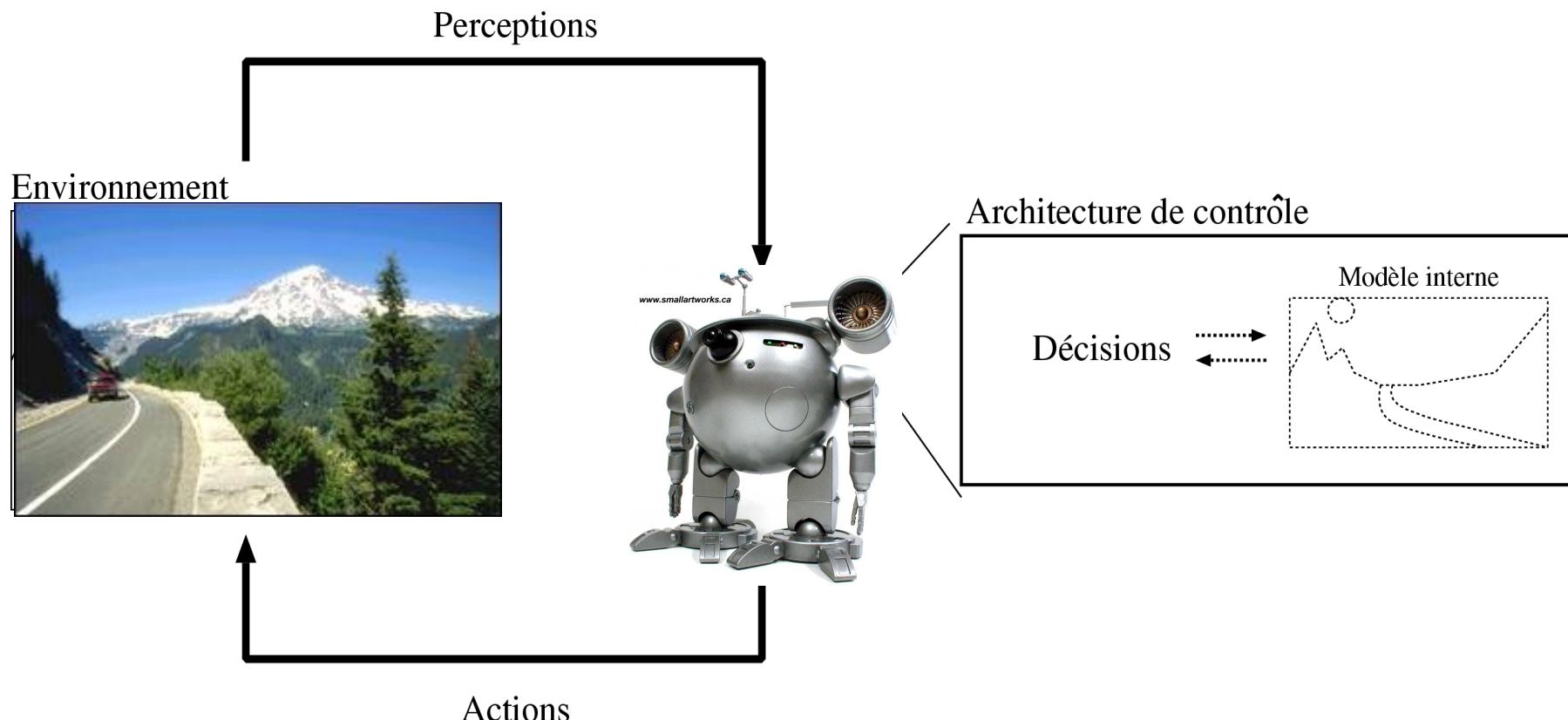
- Capacité à percevoir l'environnement de manière subjective
- Adapter son comportement en fonction des perceptions

Confronté au vaste monde

- Problème de la navigation (Où suis-je ? Où aller ? Comment y aller ?)
- Environnement inconnu, varié, changeant

Perception - Décision - Action

Un cycle au cœur de la robotique vue par l'intelligence artificielle



Machine télécommandée

- Capacité d'Action seule
- En vue de l'opérateur qui assure perception et décision
- Vue objective



Limitations

- Zone d'action limitée
- Danger pour l'opérateur



Machine télé opérée

- Perception, Action
- L'opérateur assure la décision en utilisant les perceptions provenant de la machine
- Vue subjective



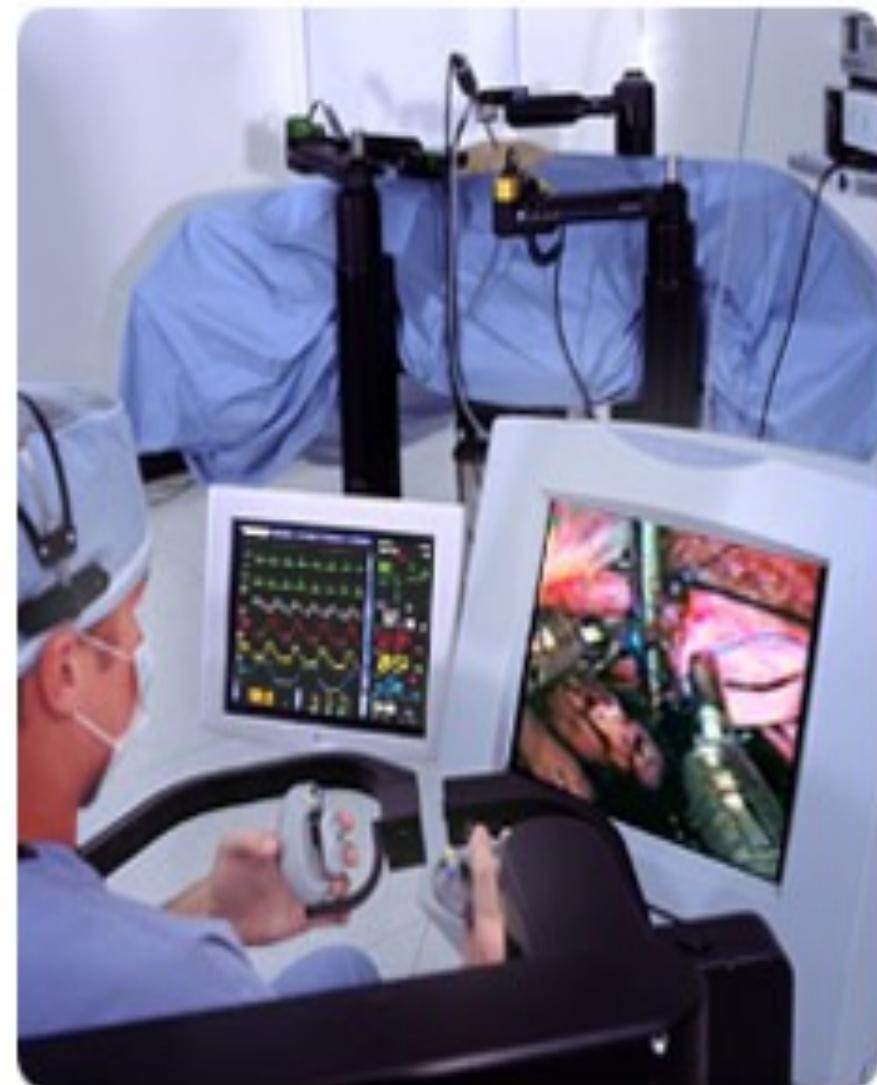
iRobot

Avantages

- Tâches non structurées, non répétitives
- Manipulation précise (coordination œil-main)
- Analyse de la situation faite par l'opérateur

Limitations

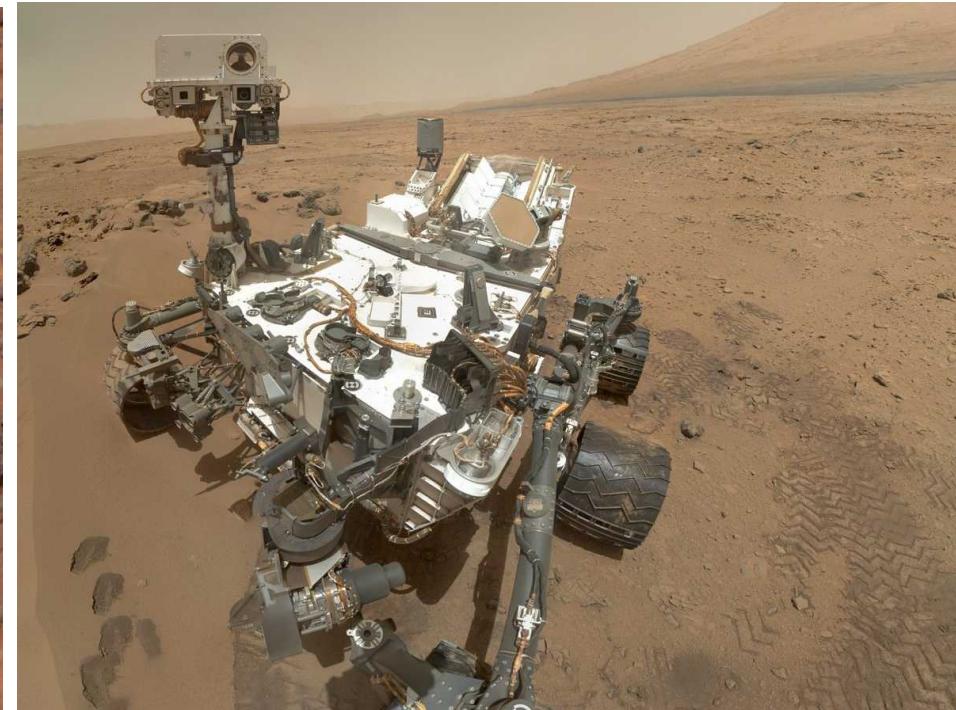
- Manque de retour sur la situation
- Manque de vue objective
- Problèmes de communication (délais, pertes, bande passante...)
- Besoin de nombreux opérateurs (par ex pour les drones)



Copyright Computermotion

Robot

- Perception, Décision, Action
- Autonome ou semi-autonome
- Un opérateur peut intervenir dans le processus de décision



Processus de décision :

- Réaction aux évènements imprévus
- Localisation, navigation
- Représentation du monde
- Planification
- Apprentissage
- Vision
- ...

Différents modes d'intervention de l'opérateur :

- Supervision par l'opérateur
 - Lancement d'actions
 - Arrêt d'actions
 - Réalisation par l'opérateur d'actions trop complexes
- Initiative partagée
 - Lancement ou arrêt d'actions par le robot et l'opérateur

Niveaux d'autonomie

- Définie par OICA (Organisation Int. des Constructeurs Automobiles)

LES 6 NIVEAUX D'AUTONOMIE D'UN VÉHICULE

	ACCÉLÉRATION FREINAGE & VOLANT	SURVEILLANCE DE LA ROUTE	CONTRÔLE EN CAS DE PROBLÈME	QUELLES CONDITIONS
Niveau 0				
Niveau 1				Certaines routes
Niveau 2				Certaines routes
Niveau 3				Certaines routes
Niveau 4				Certaines routes
Niveau 5				Toutes les routes

Architectures de contrôle



Un robot est un système complexe

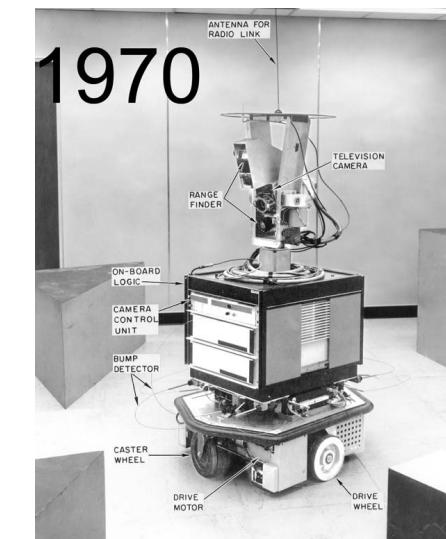
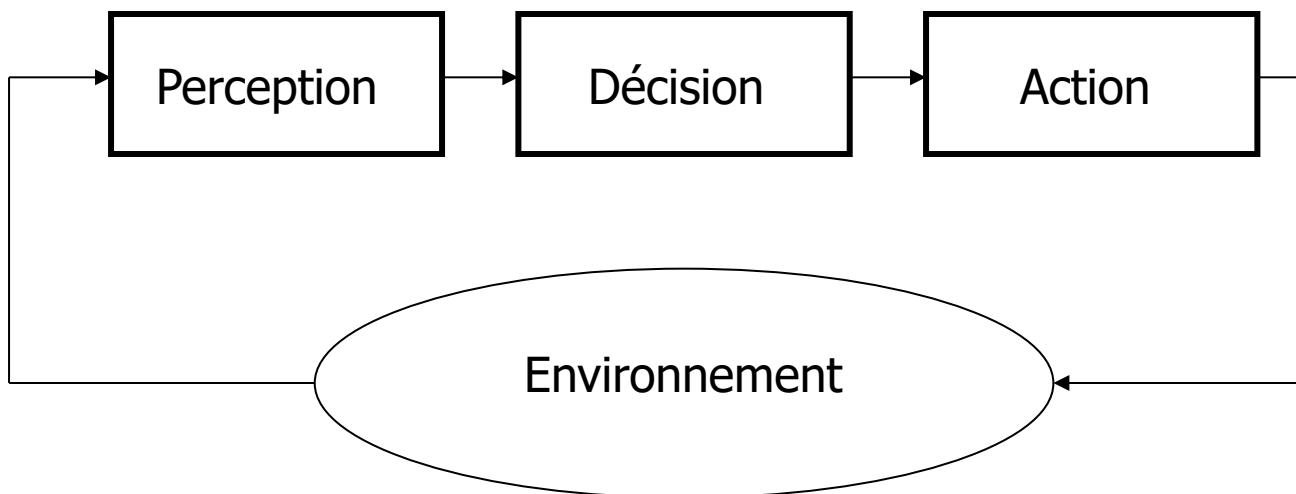
- Buts à court ou long terme
- Buts contradictoires
- Besoin de réactivité (temps réel)
- Gestion des capteurs et des ressources

L'architecture de contrôle définit comment ces différentes contraintes sont gérées

Elle définit comment organiser le cycle
Perception-Décision-Action

Les contrôleurs hiérarchiques

- Historiquement les premiers (Shakey - 1967)
- Privilégie les capacités de raisonnement sur un *modèle du monde* (premières applications de l'IA: STRIPS)
- Perception et action assurent simplement les entrées-sorties du système de planification (décision)



SHAKEY

STRIPS (1971)

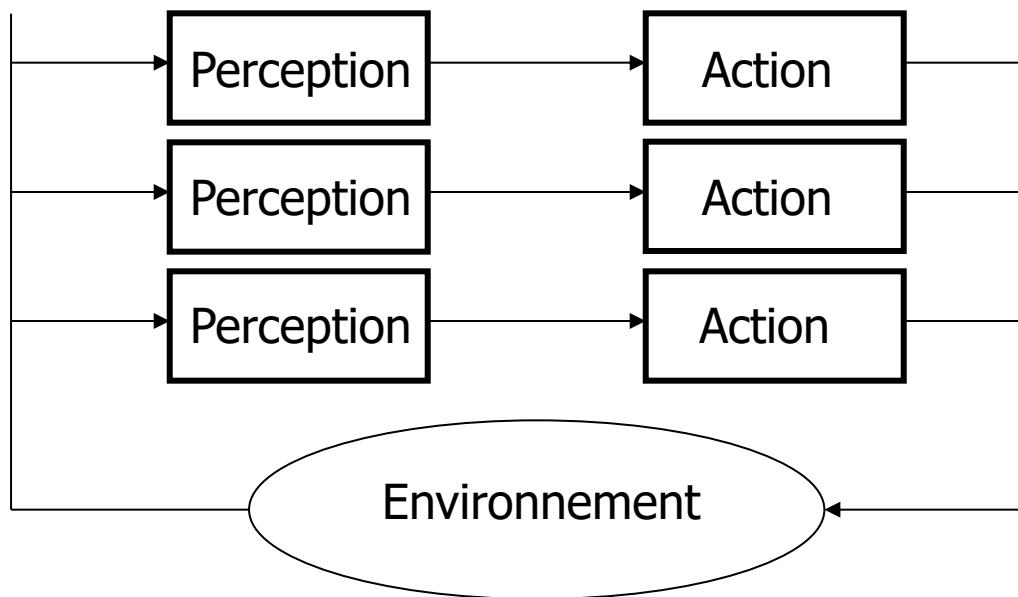
- Stanford Research Institute problem solver
- Planification symbolique
- Description de l'état à atteindre
- Planification des actions pour réduire les différences entre l'état courant et l'état but
- Actions représentées sous forme
 - Précondition move (x, y, z)
 - Liste ajout precondition: on (x, y) \wedge clear (x) \wedge clear (z)
 delete-list: clear (z), on (x, y)
 - Liste retrait add-list: on (x, z), clear (y), clear (Table)
 in case $z=Table$

Caractéristiques :

- **Planification a long terme**
- **Repose sur le modèle du monde unique qui doit contenir toutes les informations nécessaires**
 - Hypothèse de monde fermé (pas de surprises) non vérifiée
 - *Frame problem* (comment définir le monde de manière suffisante ?)
 - Problème de validité dans le temps (l'action est déclenchée alors que le modèle n'est plus valable)
 - Planification (longue) à chaque cycle
- **Manque de réactivité face aux situations imprévues**
- **Boucle P/D/A très longue**
- **Contrôle des actions difficile**

Les contrôleurs réactifs (Rodney Brooks, 1991)

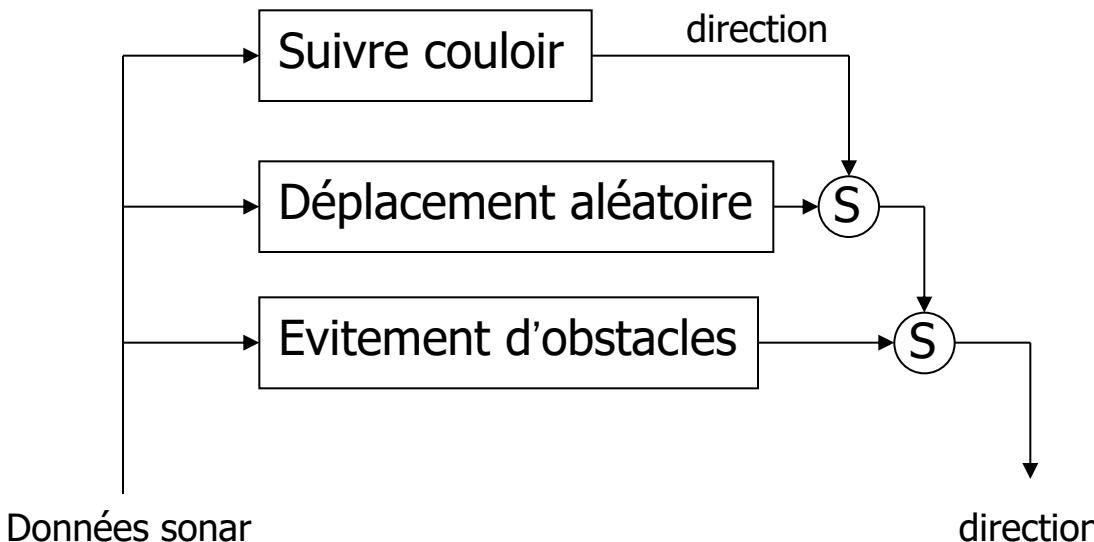
- Complètement opposé à l'approche hiérarchique et à son modèle du monde
- Privilégie la réactivité
- Ensemble de *comportements* fonctionnant en parallèle + arbitrage
- Comportement global émergent des comportements élémentaires
- Pas de modèle interne pour les comportements



GENGHIS

Choix de l'action réalisée en fonction des choix des différents comportements

- Combinaison linéaire (direction, vitesse ...)
 - Ex : champs de potentiels, logique floue ...
- Arbitrage (hiérarchisé, vote, etc.)
 - Ex : Architecture de subsomption (R. Brooks)



Les slogans de l'approche :

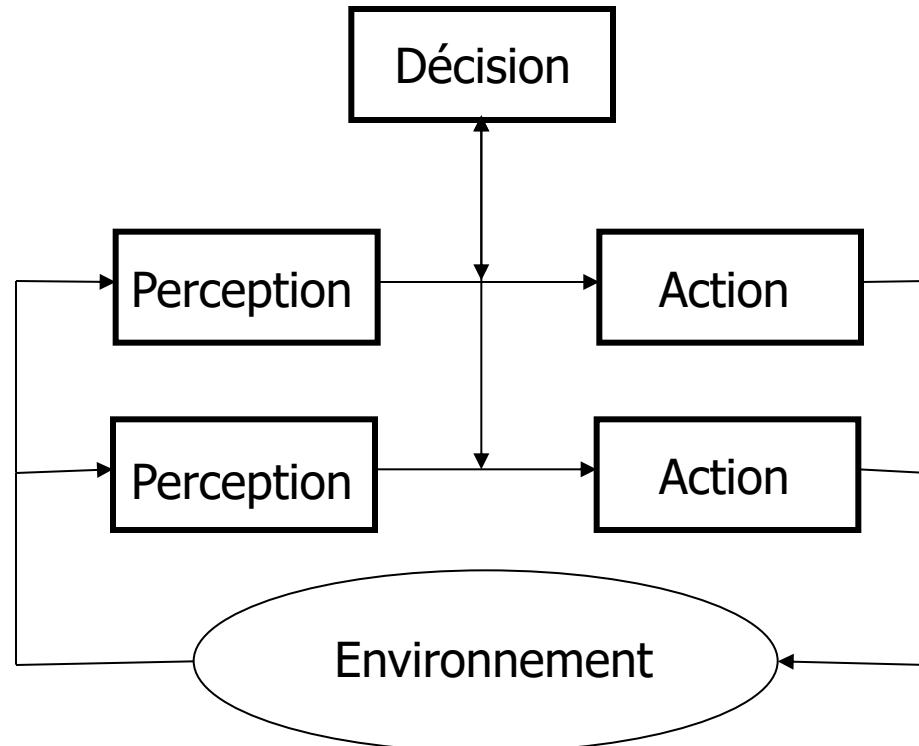
- *Les éléphants ne jouent pas aux échecs*
- *L'intelligence est dans l'œil de l'observateur*
- *Le monde est son meilleur modèle*

Caractéristiques:

- **Liens avec la biologie**
- **Boucle P/D/A très courte**
- **Modulaire**
- **Implémentations très spécifiques à un problème**
- **Limité par le manque de modèle du monde comme support de prévision des actions à long terme**

Les contrôleurs hybrides

- Synthèse des deux approches précédentes
- Bas niveau réactif
- Haut niveau délibératif (planification)
- Le haut niveau contient une ou des représentations du monde et planifie des actions que le bas niveau peut exécuter
- Le bas niveau gère les imprévus en exécutant le plan au mieux
- Possibilité de hiérarchie de niveaux



2 boucles P/D/A longues et courtes

Niveau réactif

- Différents comportements
- Sélection par champs de potentiels, subsomption, vote, logique floue

Niveau délibératif

- Différents modèles du monde
- Différentes échelles de temps
- Différents plans : objectifs, chemins...
- Un plan peut être un enchaînement de comportements, des paramètres des comportements ...
- Capteur virtuel: haut niveau->bas niveau

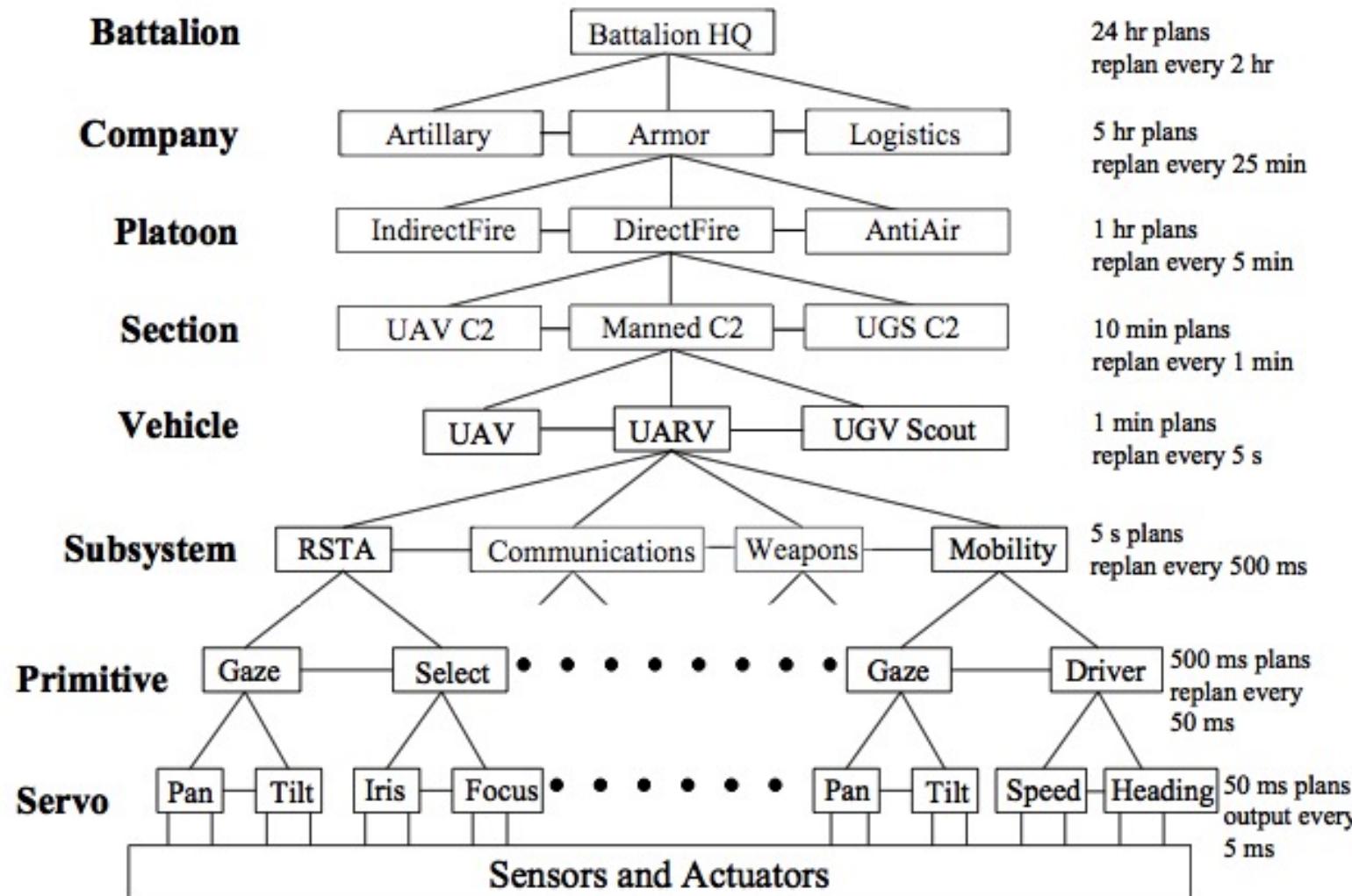
Architectures très répandues, nombreuses variantes

- AuRA
- 3T (Planner,Sequencer,Skills)
- Saphira
- 4D/RCS
- HARPIC

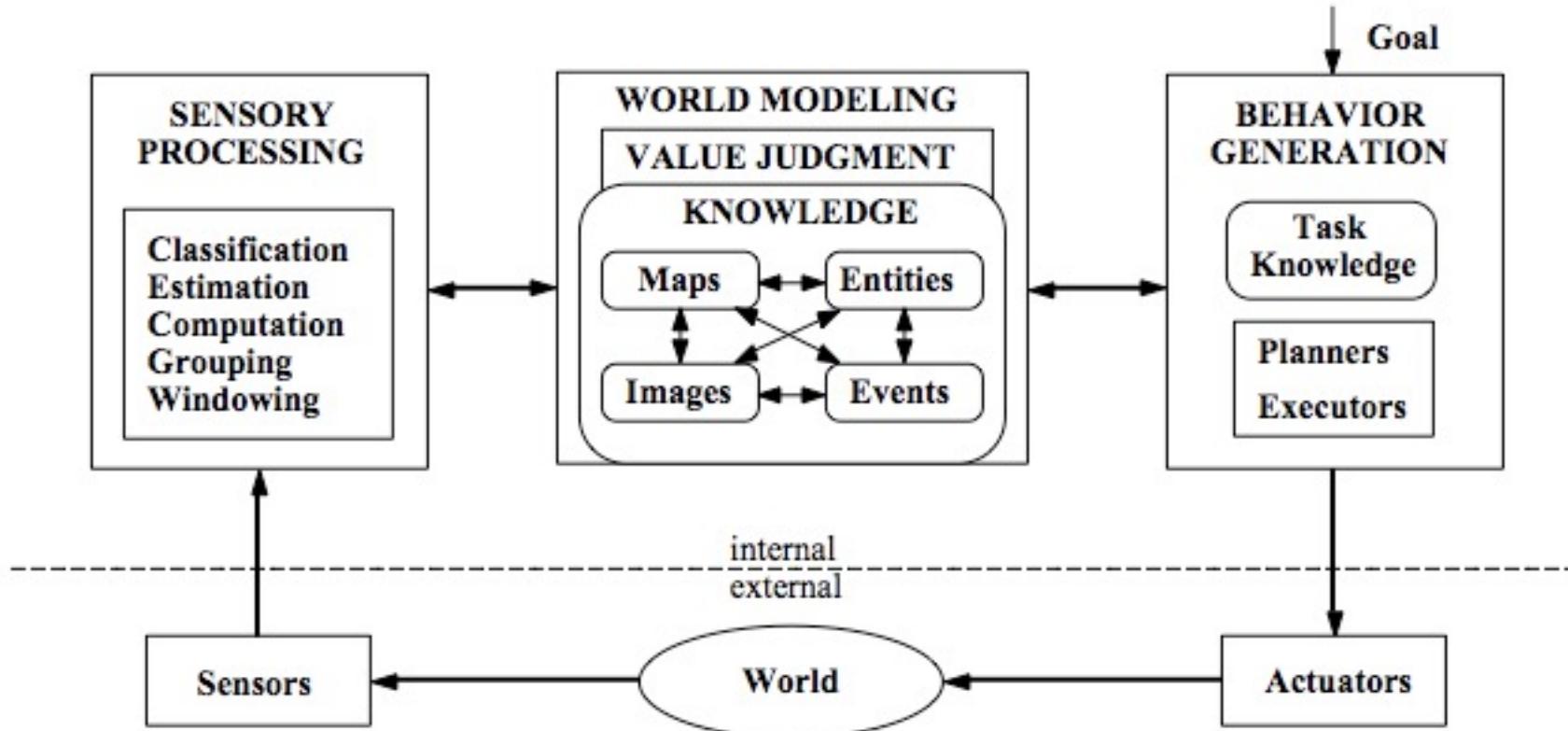
Exemple : 4D/RCS

- Architecture développée au NIST (National Institute of Standard and Technologies, USA)
- Real-time Control System (dernière génération)
- Mature, nombreuses applications :
 - 1979 : RCS 1 : Laboratory robot control
 - 1981 : RCS 2 : Automated Manufacturing
 - 1987 : RCS 3 : NASREM Space Telerobotics
 - 1988 : RCS 4 DARPA Multiple AUVs
 - 1998 : 4D/RCS : Demo III Multiple UGVs

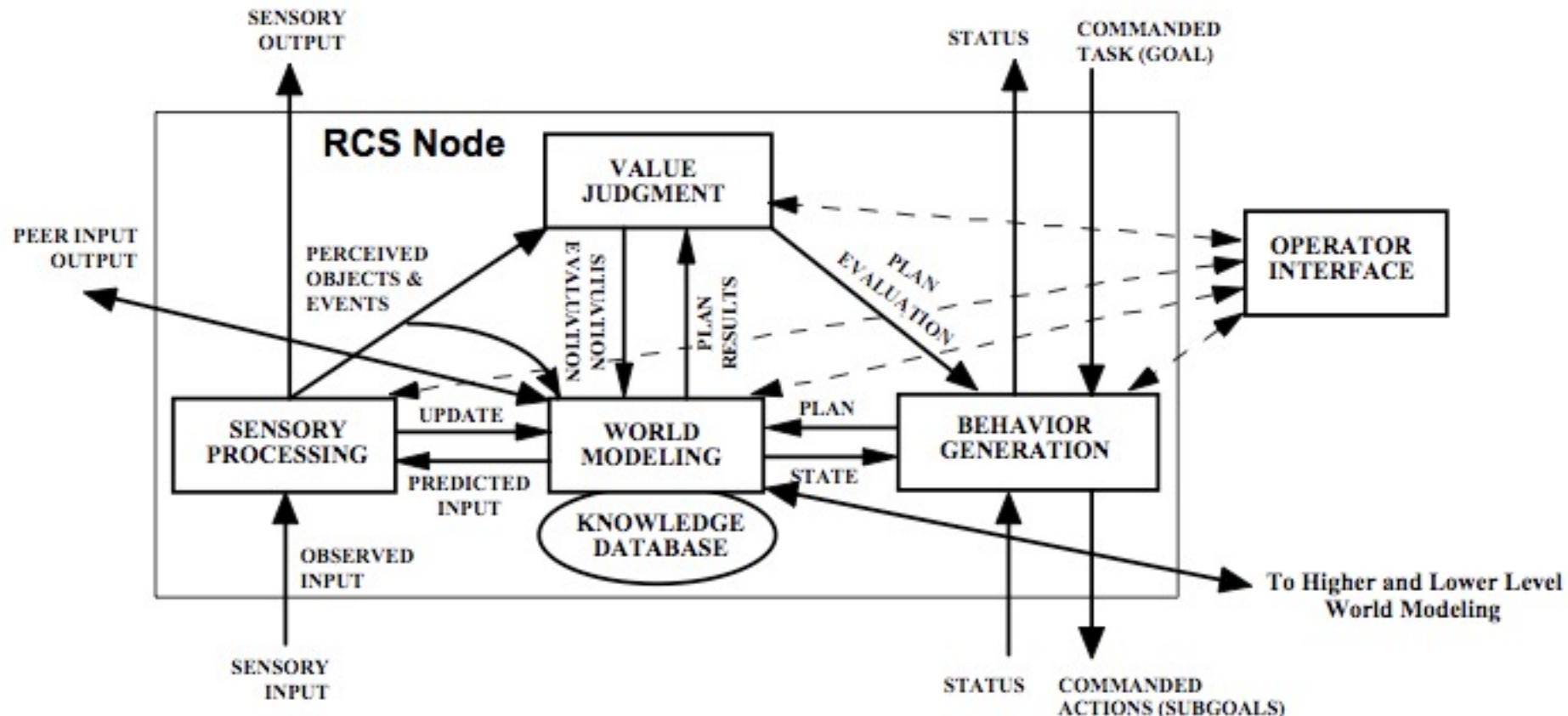
Structure hiérarchique



Structure commune des nœuds

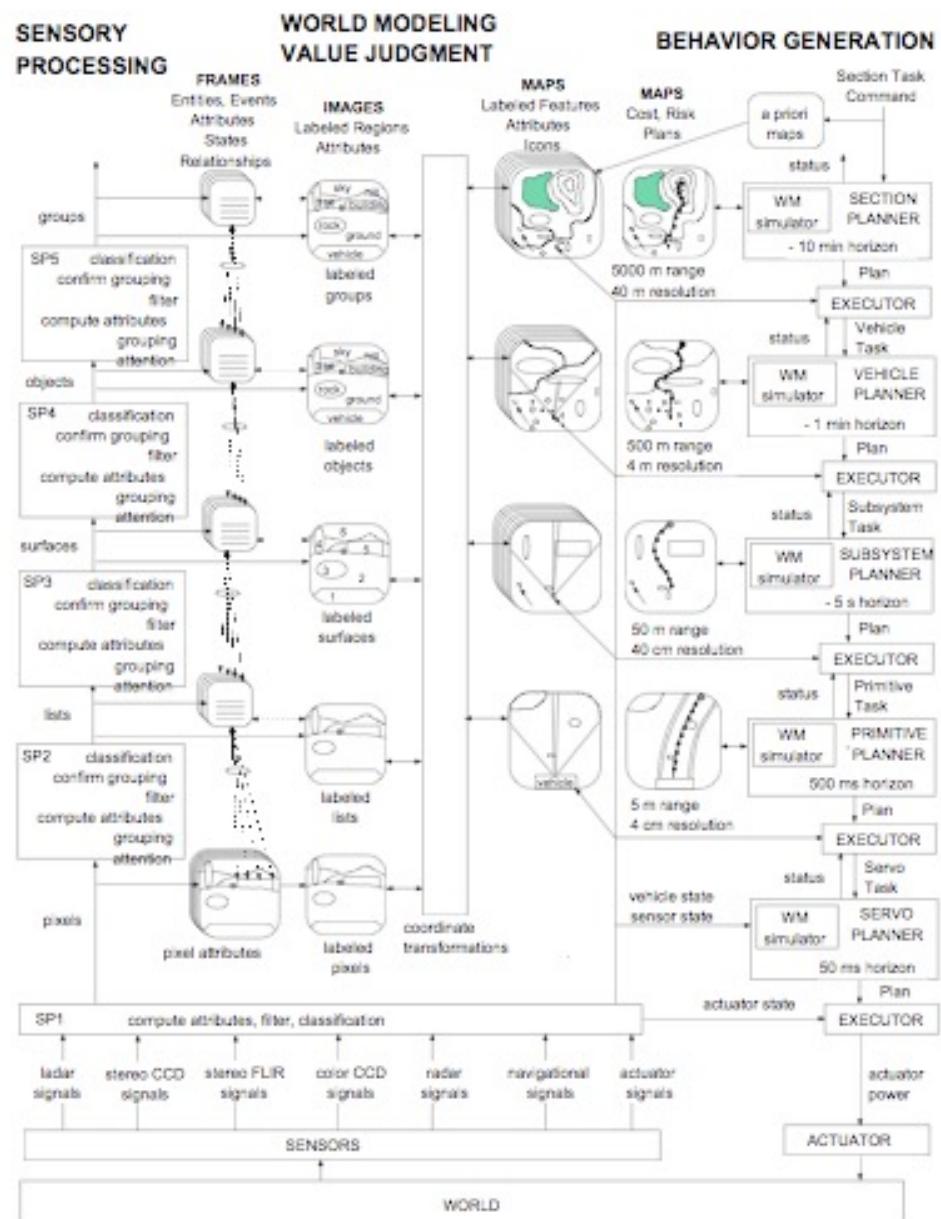


Structure commune des nœuds



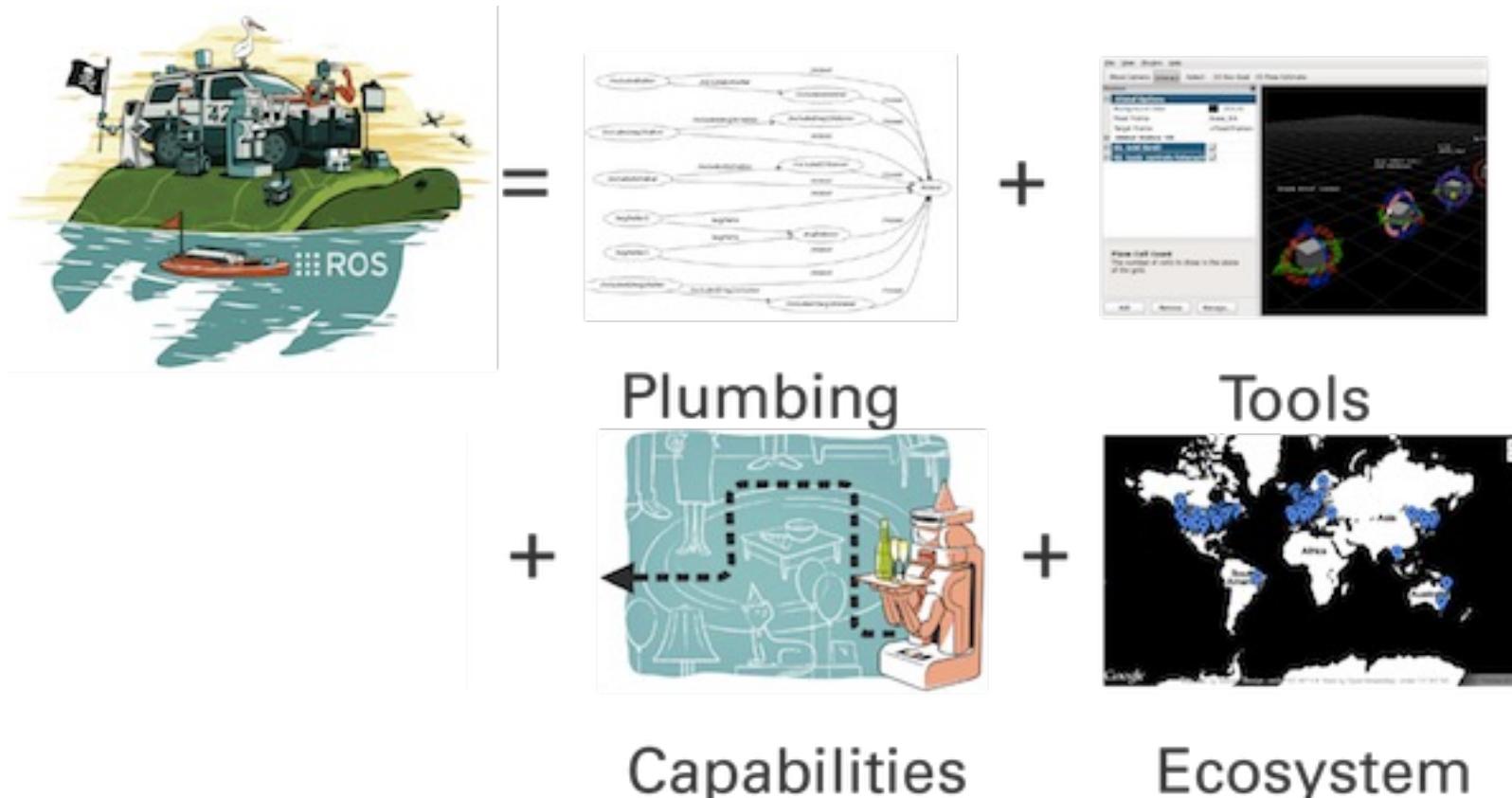
- Service de messagerie
- Interfaces capteurs, algorithmes réutilisables

Ex : Demo III



Robot Operating System

- Software architecture for robots (middleware)
- ! Different from control architecture



ROS

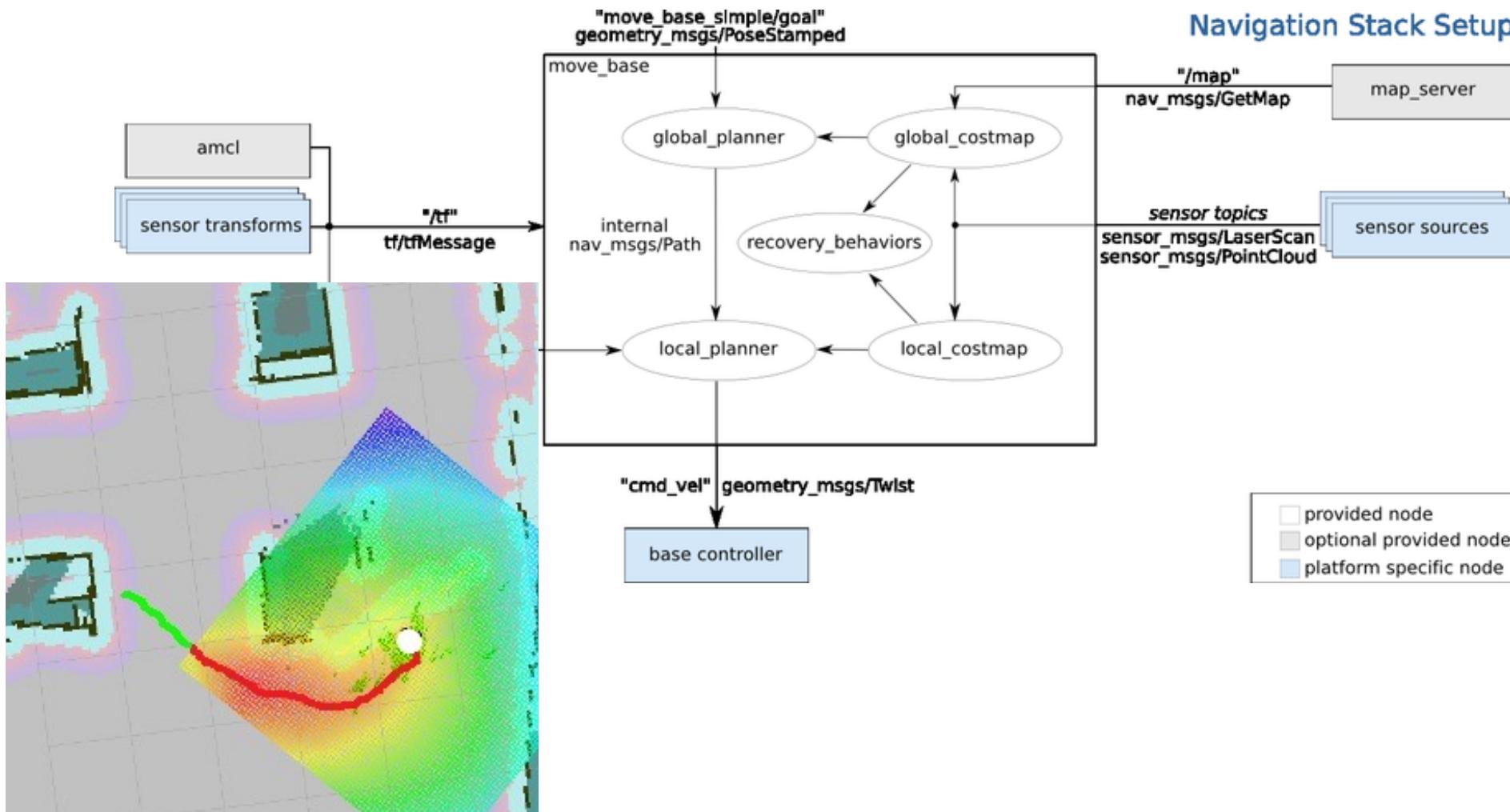
- Ce n'est pas une architecture
- Permet d'implémenter les 3 types d'architectures
- Souvent utilisé pour implémenter des architectures hybrides

Points communs

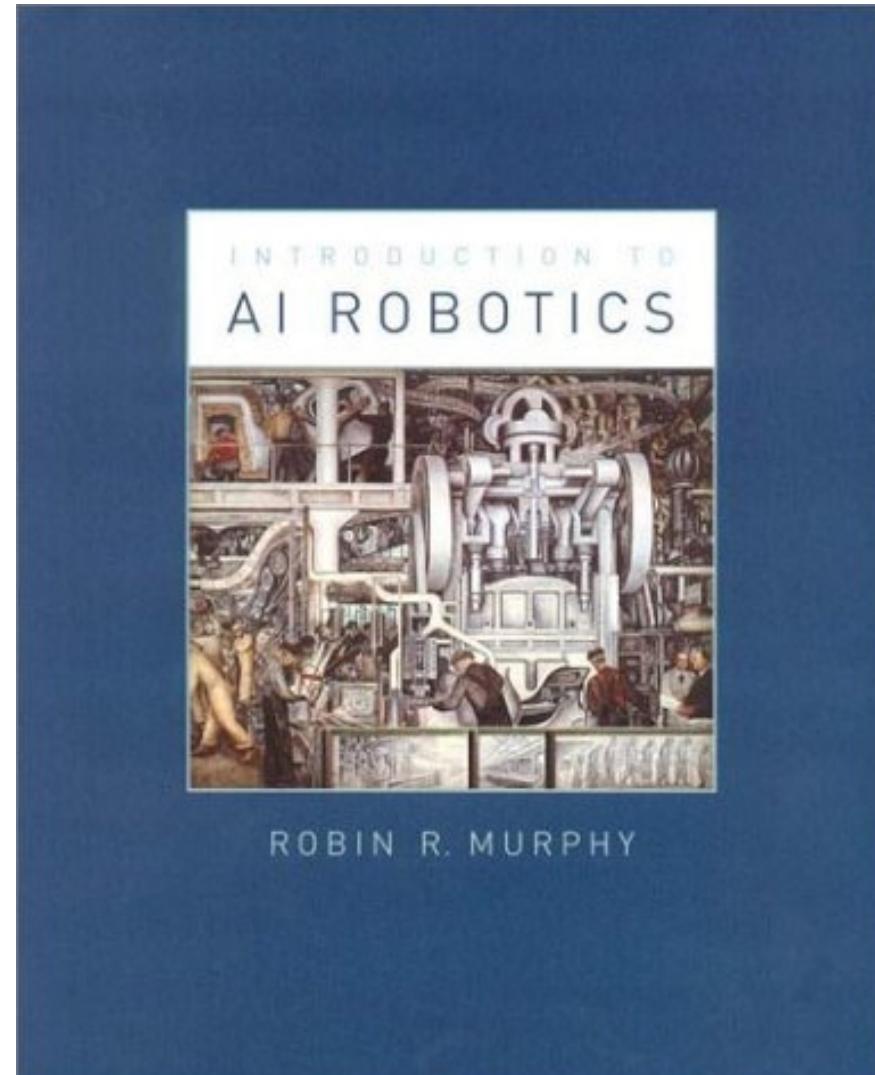
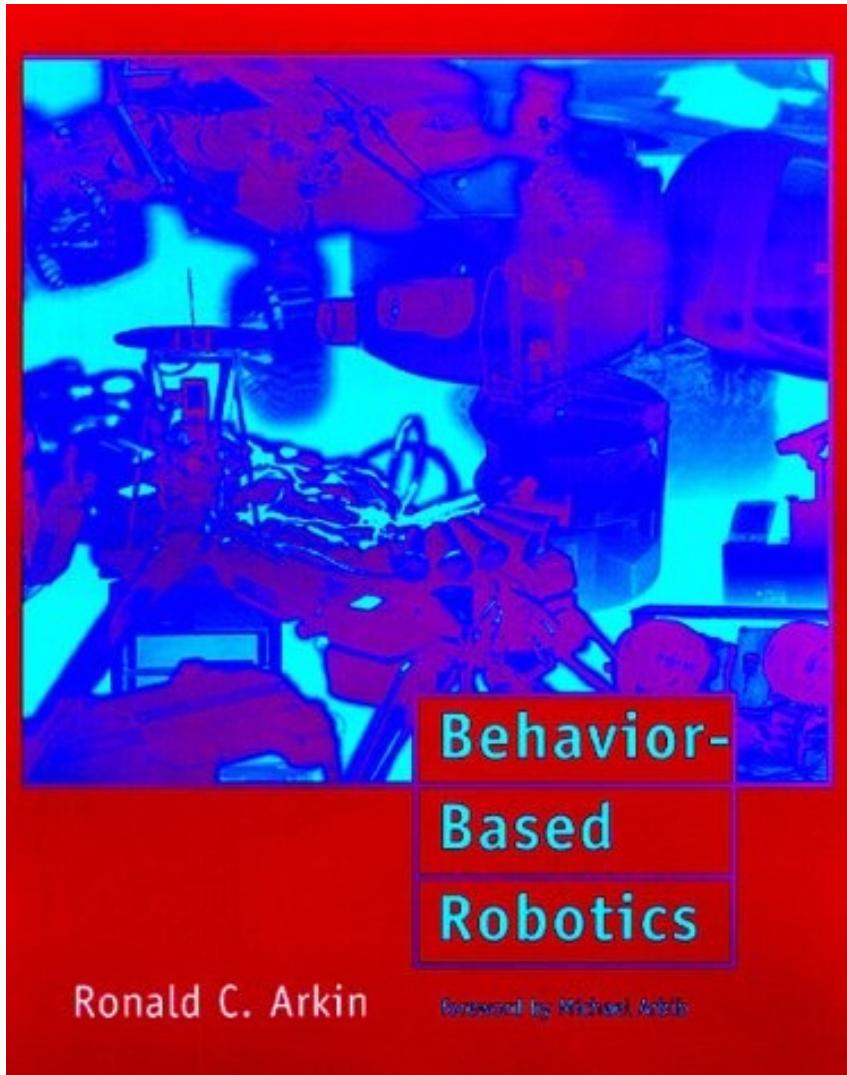
- Standardisation (messages, représentations,...)
- Modularisation du code
- Réutilisabilité de composants
- Propose des parties d'architecture (ex: Navigation stack)

Navigation Stack

- Used to guide a robot in a known map



Pour plus de détails



Types d'information pour la robotique mobile

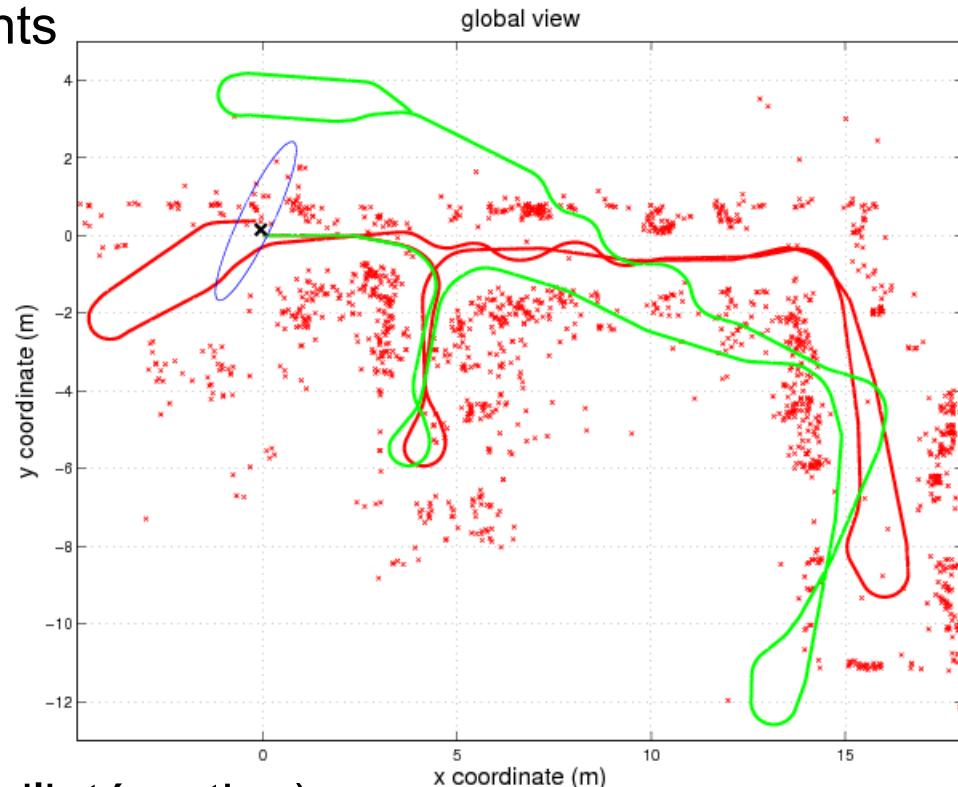


ENSTA



Informations internes

- informations *proprioceptives* (ou idiothétiques)
- renseignent sur les déplacements



Ex : Odométrie, inertie

- Renseigne sur le déplacement
- **Erreur cumulative** (processus d'intégration)
- Inutilisable à long terme
- **Référence simple à utiliser, peu dépendante de la position**

Informations externes

- informations extéroceptives (ou allothétiques, ***perceptions***)
- renseignent sur la position

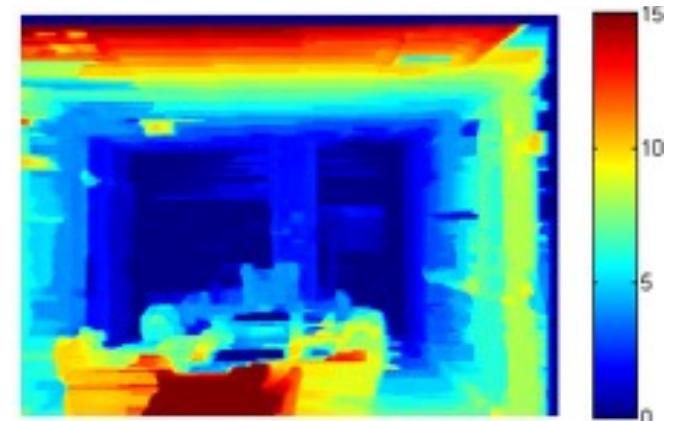
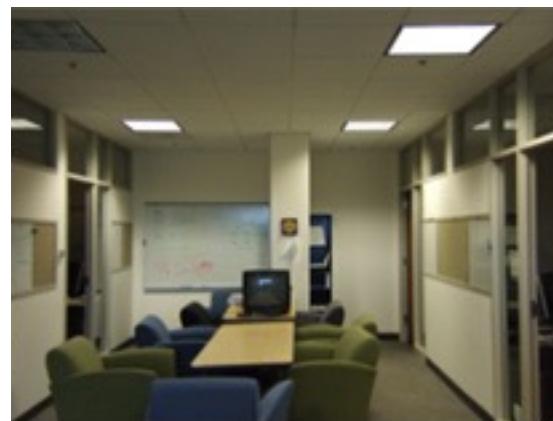
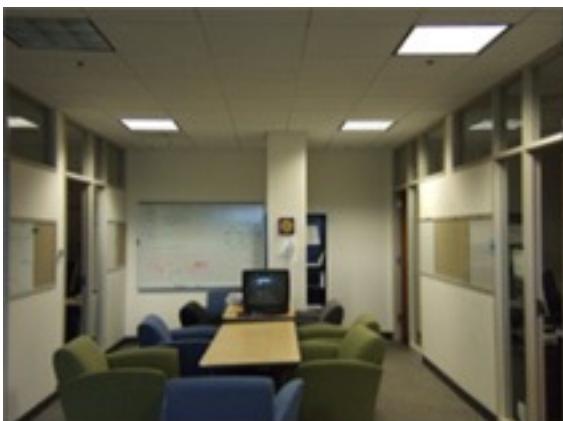
Ex : Capteurs de contact, télémètre, caméra

- Renseignent sur la position
- **Erreur non cumulative**, mais :
 - **Perceptual aliasing**
 - **Variabilité perceptuelle**
- Difficilement utilisables seules



Modèle métrique pour les perceptions

- Permet de retrouver la position métrique d'objets perçus à partir des perceptions (ex : stéréo-vision)



- Possible pour un télémètre, avec des caméras stéréoscopiques, ou une caméra en mouvement
- Impossible ou très difficile pour d'autres capteurs : température, odeur...
- Permet de faire abstraction du capteur utilisé
- Peut dépendre de l'environnement et être complexe à estimer

Perceptions **sans** modèle métrique

- Possibilité de mémoriser et reconnaître une position



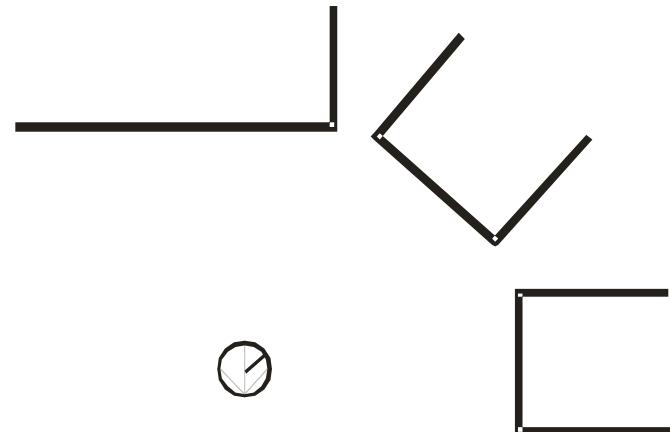
- Mais pas d'information autre que l'identité



-> pas d'info sur la position

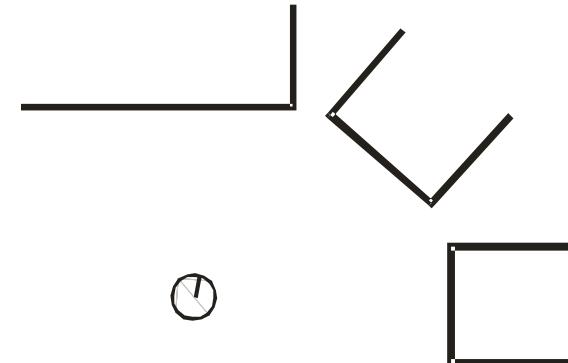
Perceptions **avec** modèle métrique

- Possibilité d'extraire des objets avec leurs positions (dans l'espace des données proprioceptives)
- Création d'une représentation objective

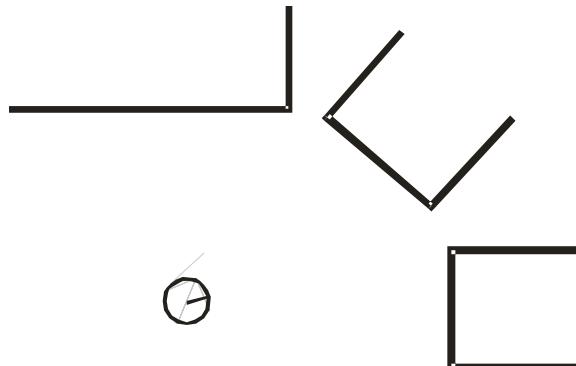


Perceptions **avec** modèle métrique

- Permet de calculer la position du robot par rapport à un objet perçu



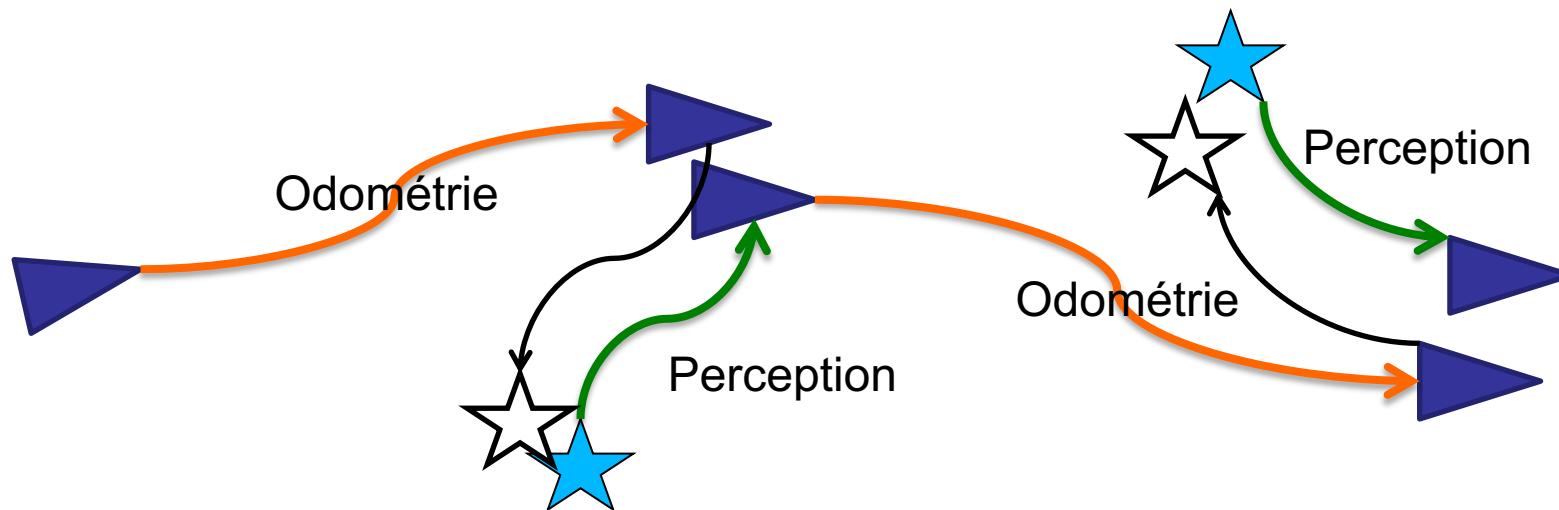
- Permet de calculer les perceptions pour une nouvelle position / un autre capteur



Utilisation conjointe des deux types d'information

- Compenser la dérive de la proprioception par les perceptions
- Lever les ambiguïtés des perceptions par la proprioception

Un bon système de navigation fusionne efficacement ces deux informations



Gestion des incertitudes

- Nombreux algorithmes utilisent de modèles probabilistes
- Information utile pour pondérer les mesures
 - Incertitude faible \rightarrow Confiance accrue

Modèles direct

- $P(\text{mesure} \mid \text{valeur réelle})$
- Simple à obtenir, peut être dans la documentation capteur

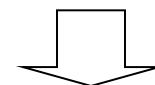
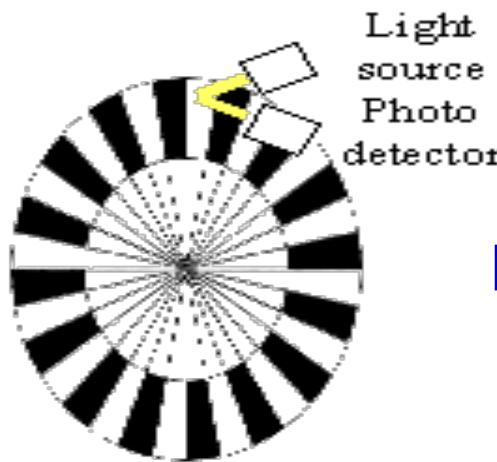
Modèles inverses

- $P(\text{valeur réelle} \mid \text{mesure})$
- Généralement beaucoup plus complexe
- Mais c'est de qui nous intéresse

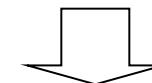
Capteurs proprioceptifs



Mesure de la rotation des roues (par ex codeur optique)
ou du déplacement des pattes



Intégration



Estimation du déplacement

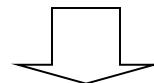
Dépend beaucoup du contact au sol

-> radar doppler / odomètre optique

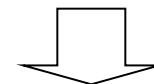
Estimation de la direction peu fiable



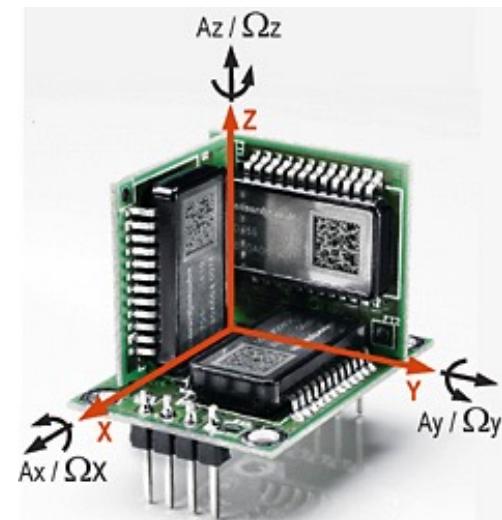
Mesure de l'accélération en translation/rotation



Intégration (2 fois)



Estimation du déplacement



- Les senseurs doivent être très précis : coût élevé
- Capteurs bas coût (précision faible)
 - Estimation de la position quasi impossible
 - Fusion avec accelero/gyro/magnéto pour une bonne estimation de la direction

Gyrosopes / Gyromètres

- Direction par rapport à une direction de référence arbitraire
- Systèmes mécaniques, optiques ...

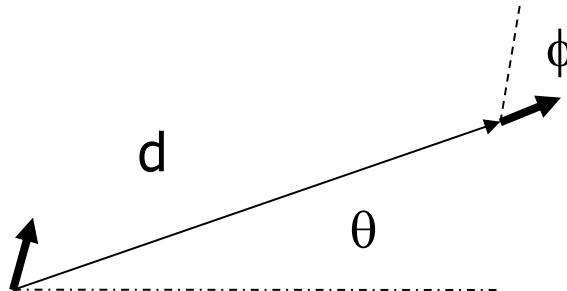
Magnétomètres : mesure le champ magnétique local

- En extérieur, donne le nord magnétique
- Difficile à utiliser en intérieur (perturbation par les masses métalliques)

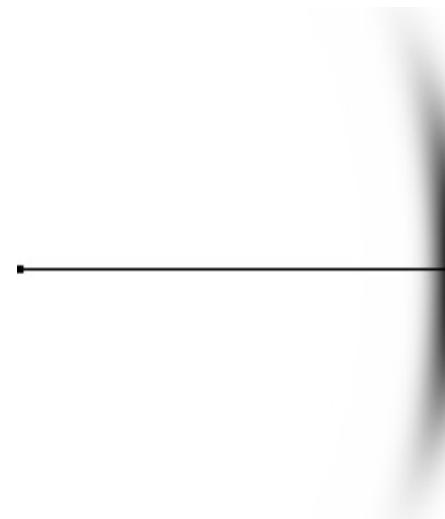
2 méthodes

- Hypothèses de bruit sur la mesure puis utilisation du processus de calcul de l'odométrie
- Modèle directement sur la sortie : bruit gaussien sur distance, direction et angle

$$P(X|X_m) = \text{Gauss}(d-d_m) * \text{Gauss}(\theta-\theta_m) * \text{Gauss}(\phi-\phi_m)$$



ex :



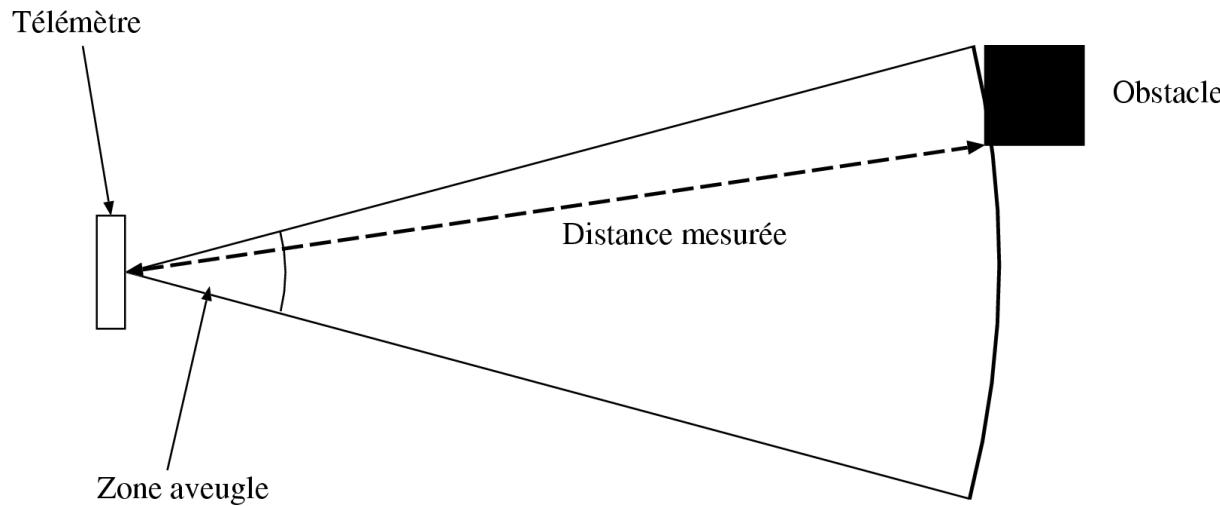
Capteurs extéroceptifs



ENSTA



Mesure du temps de vol d'une onde sonore

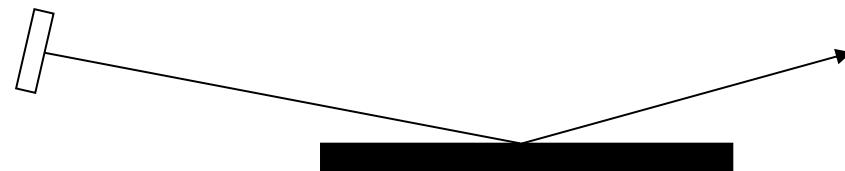


Avantages

- Peu cher
- Angle d'ouverture environ 30 degrés

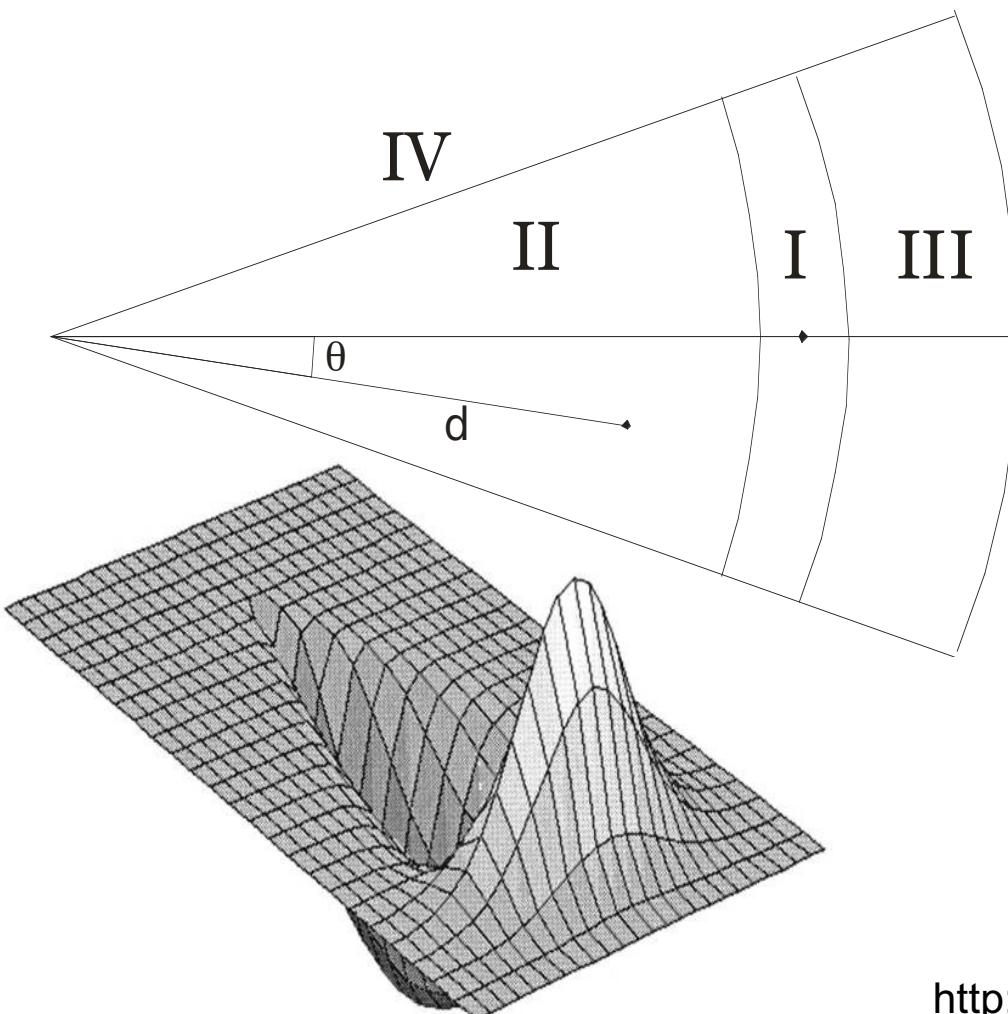
Limitations

- zone aveugle
- crosstalk (→ fréquence qq Hz)
- réflexions multiples
- réflexions spéculaires
- Réponse dépend du matériaux



$P(\text{mesure}|\text{valeur réelle})$: voir plus loin (télémètre laser)

$P(\text{valeur réelle}|\text{mesure})$:

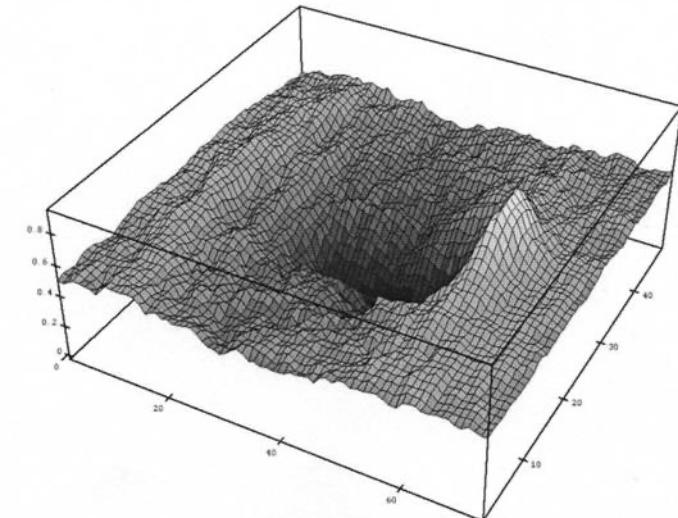


$$\text{I} : \text{Gauss}(\theta) * \text{Gauss}(d-d_m)$$

$$\text{II} : \exp(d) * \exp(-\theta)$$

$$\text{III} : \exp(d) * \exp(-\theta)$$

$$\text{IV} : 0$$



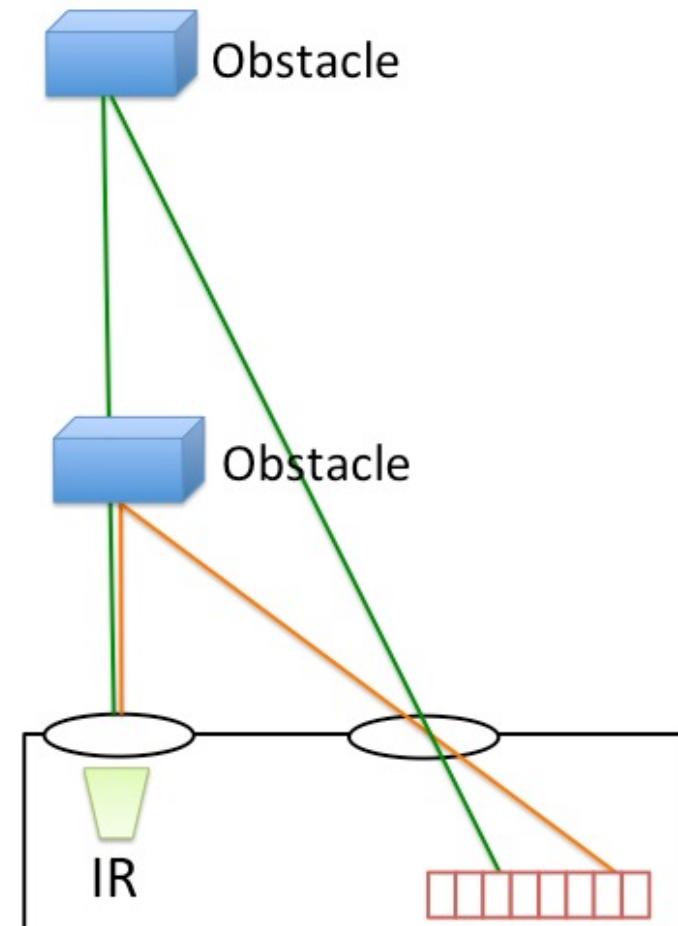
<http://www.cs.hmc.edu/courses/2003/spring/cs154/>

Triangulation d'un faisceau IR

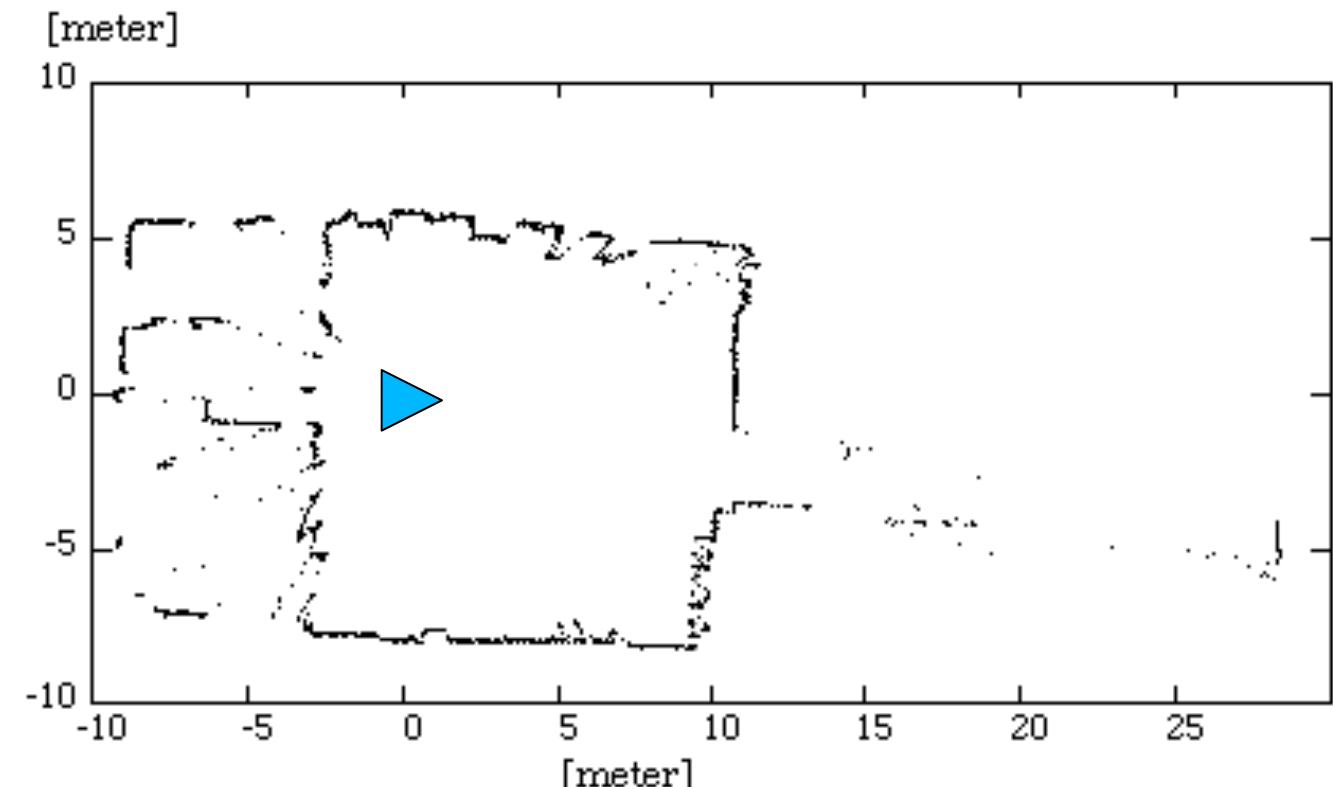
- Peu cher
- Faible consommation
- Peu d'interférences

Limitations

- Faible angle d'ouverture
- Sensible à la lumière extérieure



Mesure de distance grâce à un laser balayant un plan



Hokuyo UTM30LX

Avantages

- Couvre 180 à 360 degrés jusqu'à environ 50m
- Résolution $\frac{1}{2}$ ou 1 degré
- Fréquence : 10 -> 75 Hz
- Bruit de qq cm

Limitations

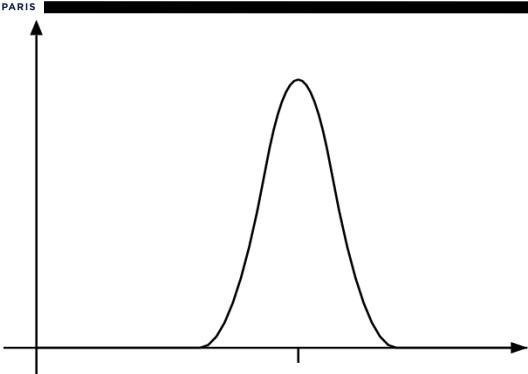
- Restreint à un plan → des obstacles non perçus
- Certains objets réfléchissants non détectés (réflexions spéculaires)
- Vitres (propres!) non détectées
-> association avec sonars

Pour 1 faisceau

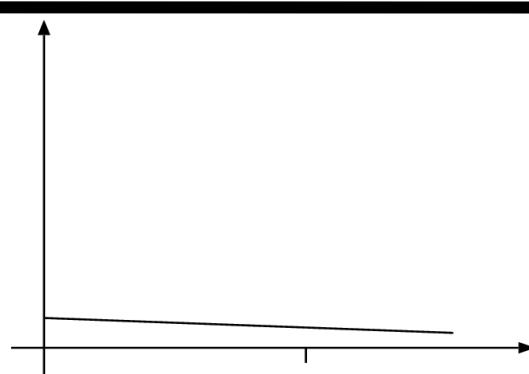
- Combinaison d'évènements
 - Perception de l'obstacle : bruit gaussien : $\text{gauss}(d-d_m)$
 - Perception d'un obstacle inattendu (personne ...) : bruit décroissant : $\exp(-d)$
 - Non perception des obstacles : bruit ponctuel de valeur max

Estimation des paramètres

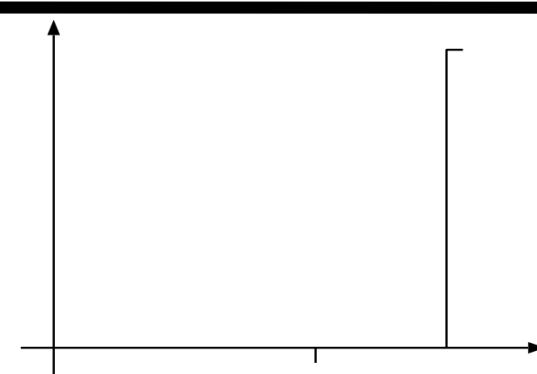
- Sur un ensemble de données
- Algorithme Expectation-Maximization
 - Associer les mesures à un évènement (plus probable)
 - Estimer paramètres des distributions élémentaires
 - Ré-associer



Perception de l'obstacle

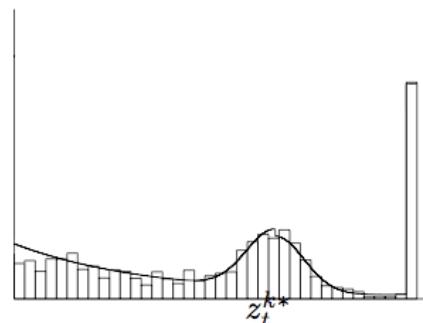
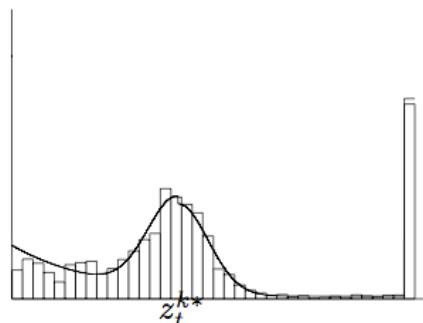


Perception d'un obstacle imprévu

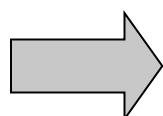
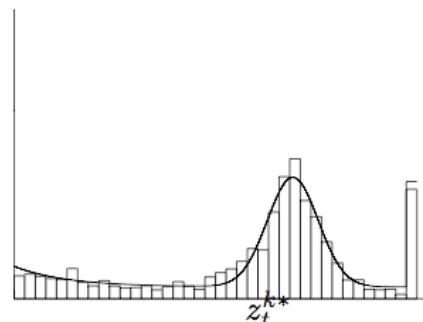
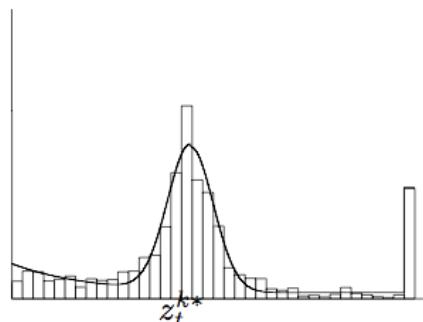


Retour de la valeur maximale

(a) Sonar data, plots for two different ranges



(b) Laser data, plots for two different ranges



Pour 1 scan

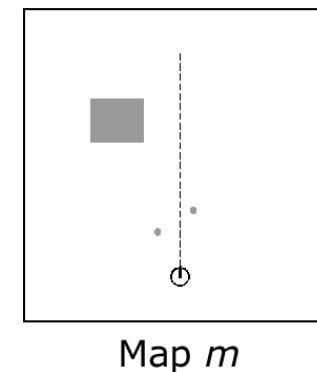
- Faisceaux supposés indépendants

$$P(S) = \prod_{i=0}^n P(s_i)$$

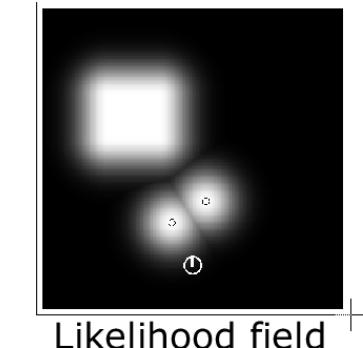
Rq : Approximation pour un faisceau

- Ne prendre en compte que le point mesuré
- probabilité = fct de la distance à l'obstacle le plus proche (pré-calcul)
- Ignore les occultations
- Utile si besoin de beaucoup d'évaluations

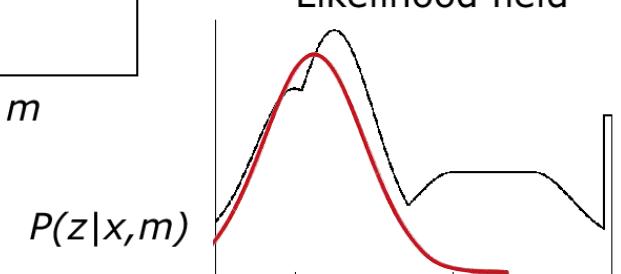
Example



Map m



Likelihood field



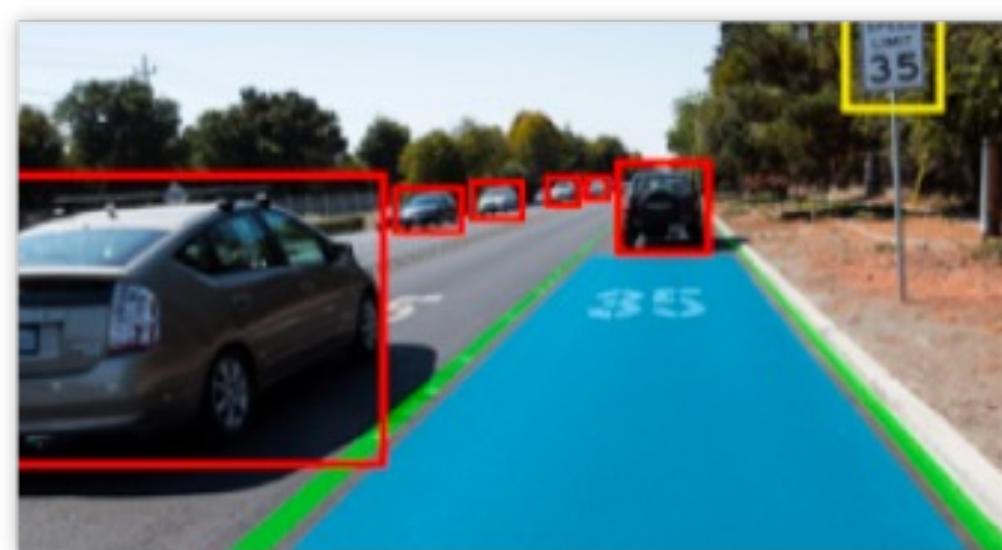
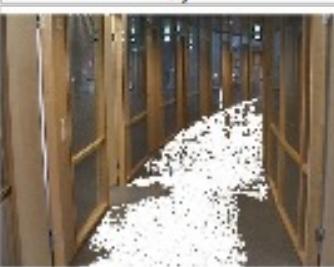
$P(z|x,m)$

Caméra simple

- Détection d'amers 2d ou 3d (points, segments, imagettes, objets ...)

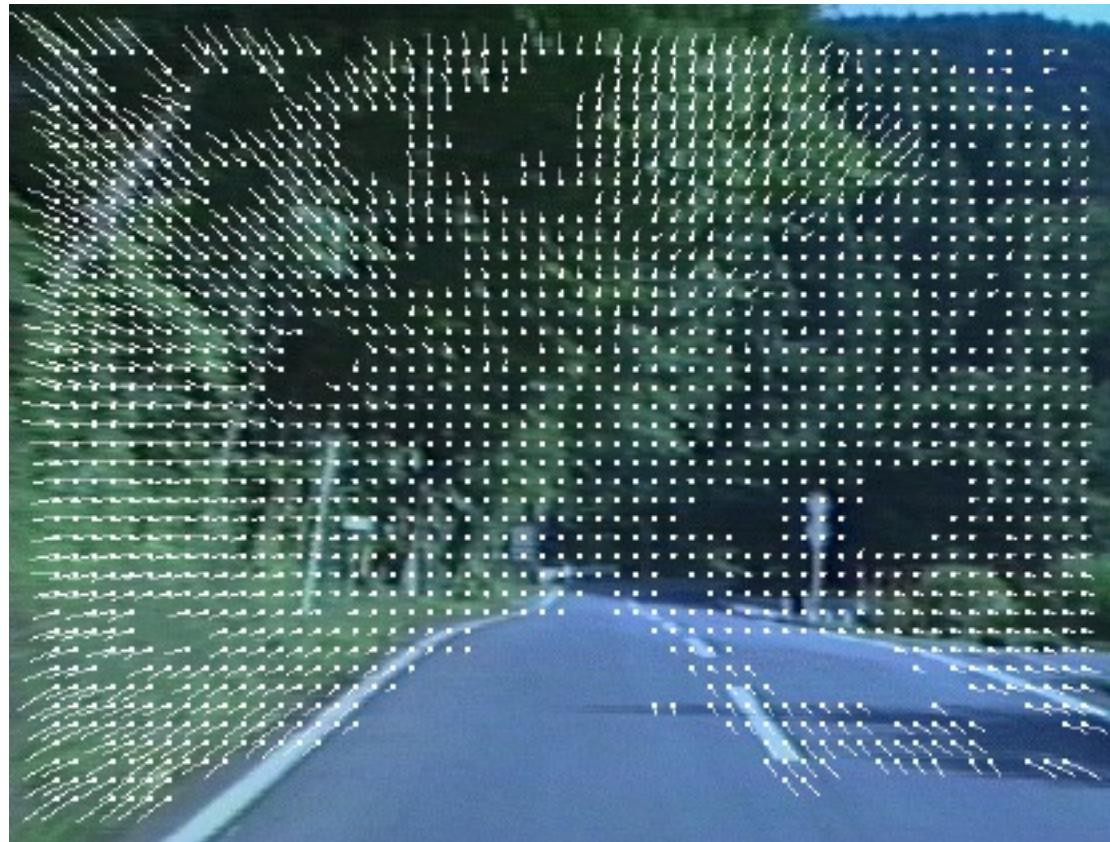


- Détection du sol, de couloirs, de portes...



Caméra simple

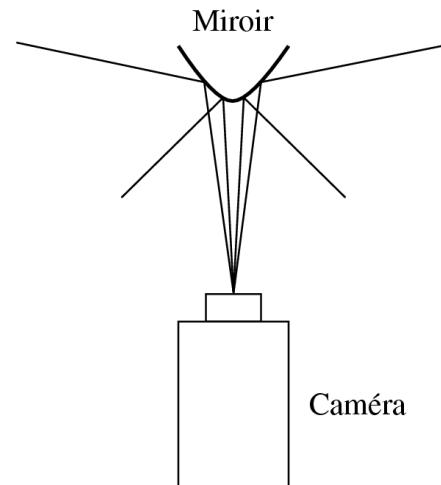
- Flot optique (odométrie, éviteme nt d'obstacles)



- Détection et suivi d'objets mobiles ...

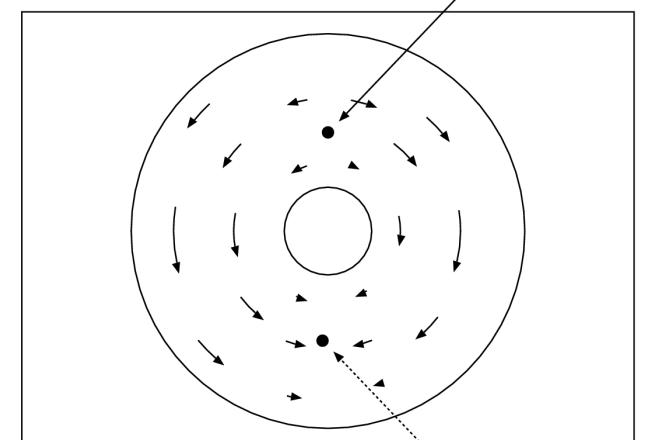
Caméra panoramique

– Caractérisation de position



– Flot optique

- Evitement d'obstacles
- Odométrie visuelle



Point de contraction

Caméra stéréoscopiques

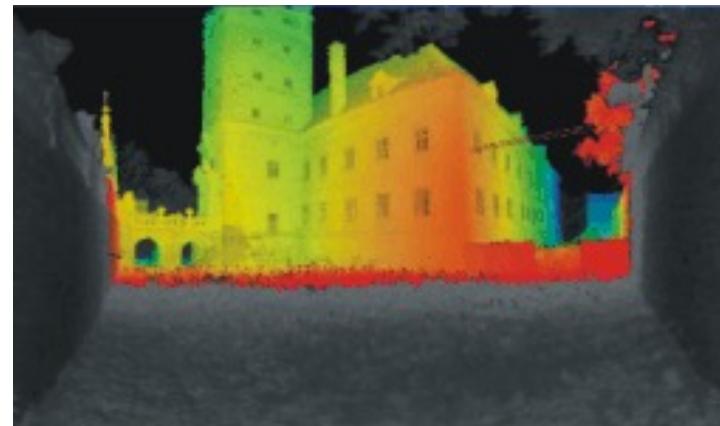
- Info 3D
- Portée limitée
- Besoin de textures (lumière)



Caméra en mouvement

- 'Structure from motion'
- Approche complexe
- Appariements difficiles
- Similarités avec le SLAM

Laser balayant sur 2 axes

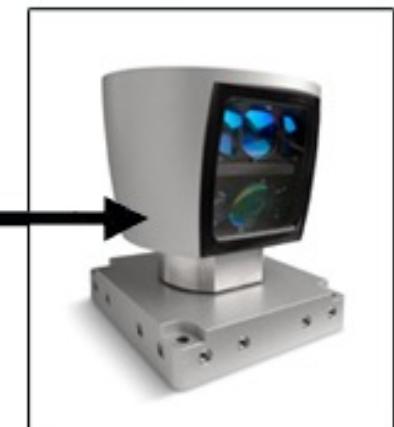


Très bonne info 3D
Fréquence d 'acquisition faible
Mécanique importante (lourdeur, fragilité)

Laser multi-nappes



Velodyne 64



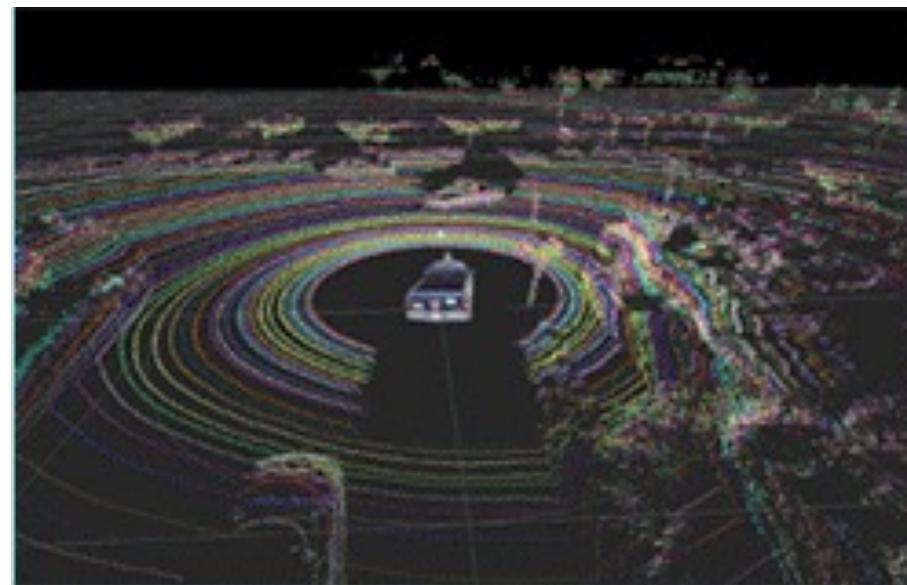
Faisceaux laser rotatifs
Vision à 360 degrés



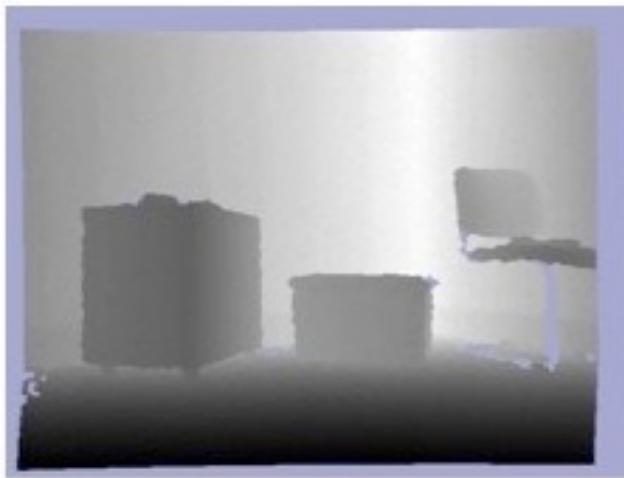
32



16

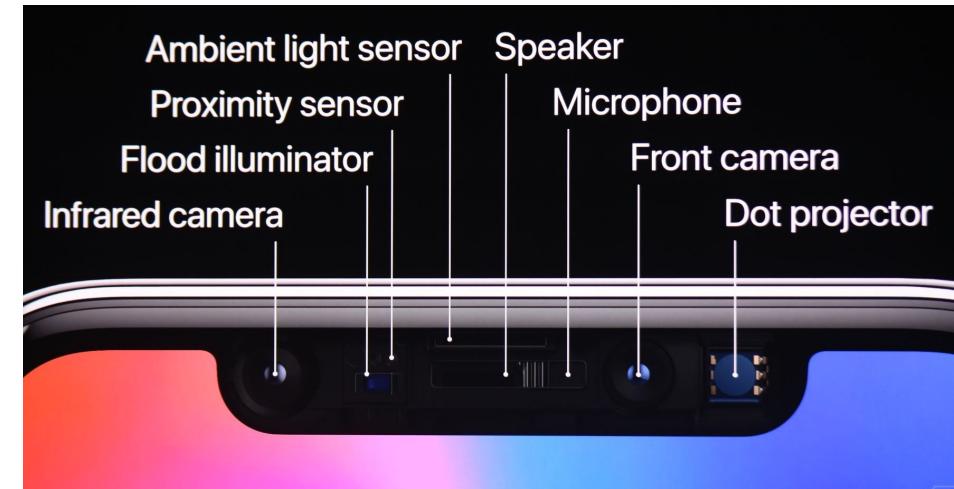


Triangulation en infrarouge + caméra couleur

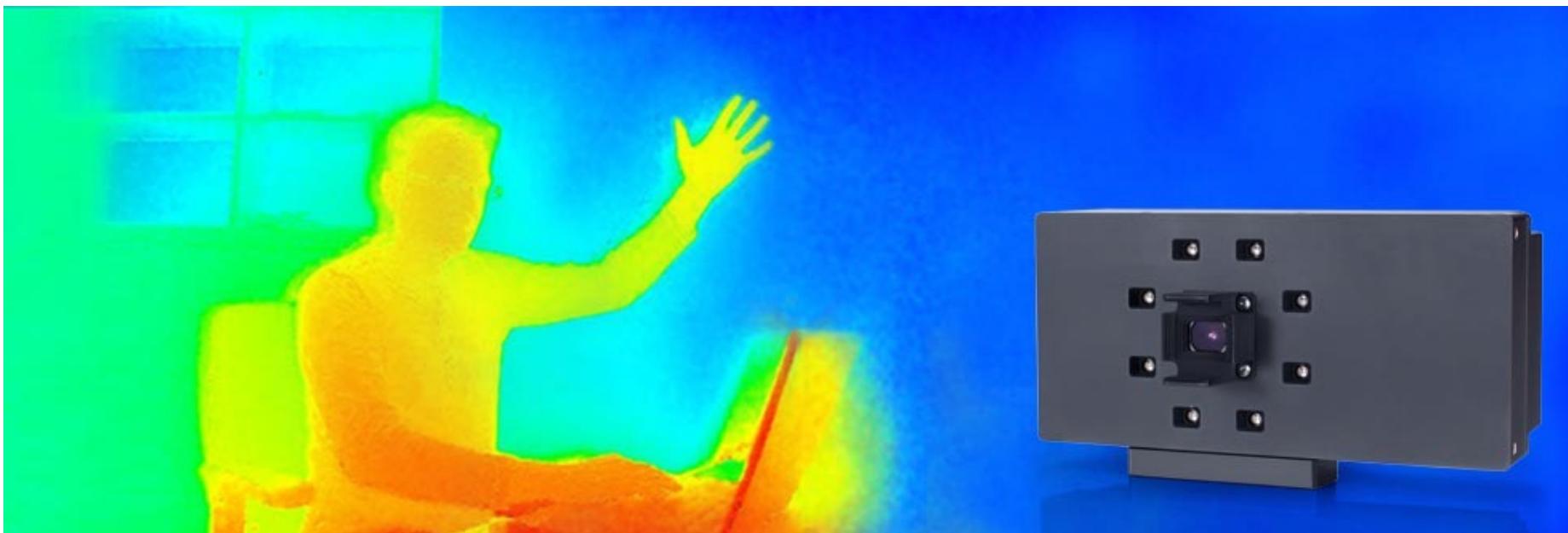


Acquisition dense à grande fréquence
Sensible au conditions d'éclairage
Mesure bruitée

Kinect v1, Xtion, iPhone X;



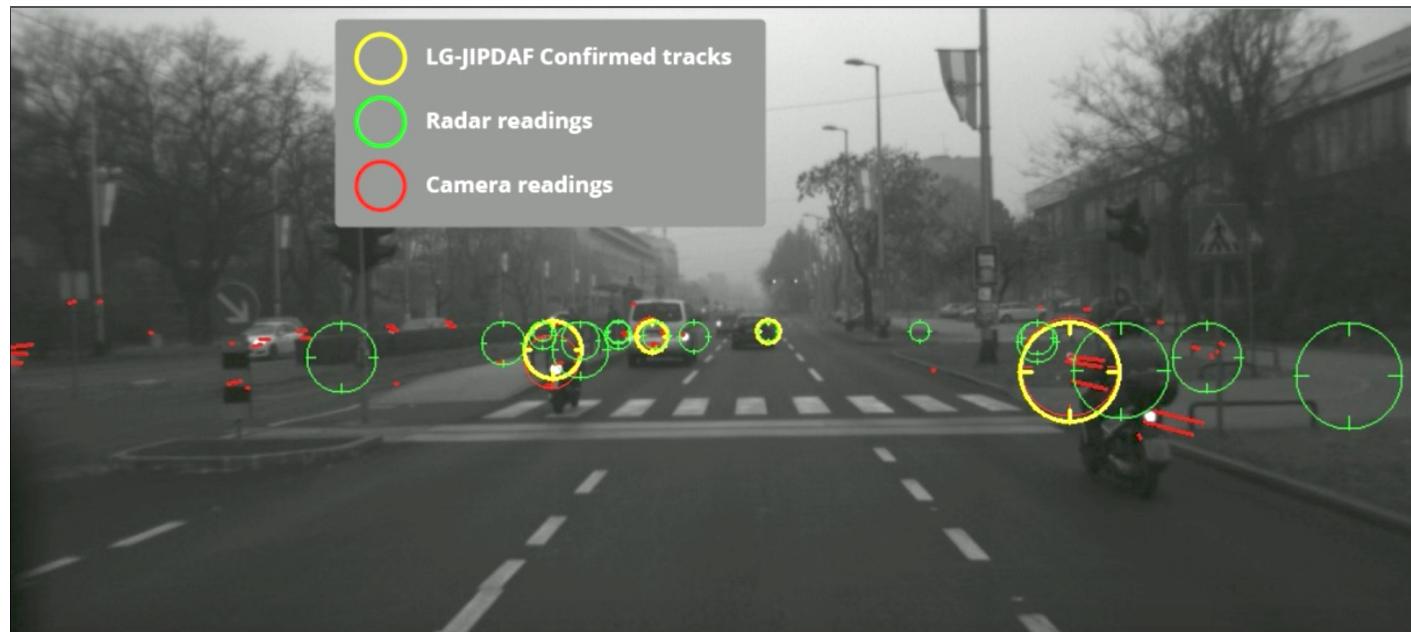
Caméra temps de vol



Kinect v2, Swiss Ranger
Acquisition dense à grande fréquence
Moins sensible au conditions d'éclairage
Plus couteux que la triangulation IR

Radar FMCW

- Frequency Modulated Continuous Wave
- Bonne mesure de distance, vitesse
- Portée élevée ($> 250m$), peu sensible à la météo
- Résolution angulaire limitée, beaucoup de bruit
- Difficulté pour les objets non métalliques (piétons...)

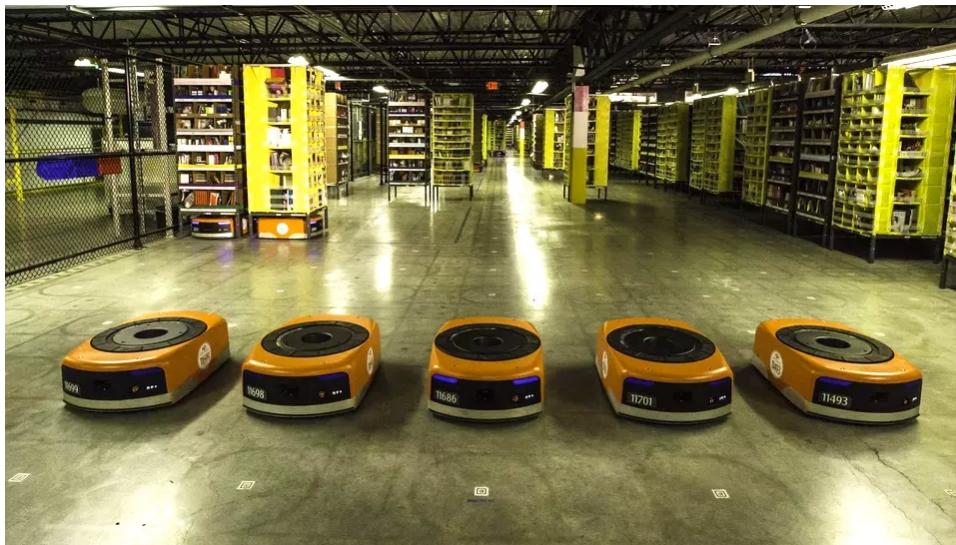


Capteurs de contact

- Arrêt d'urgence, évitemen t d'obstacles

Systèmes de balises

- **Préparation de l'environnement**
- Couleurs, codes barres, radio, infrarouge
- Utile dans certaines applications

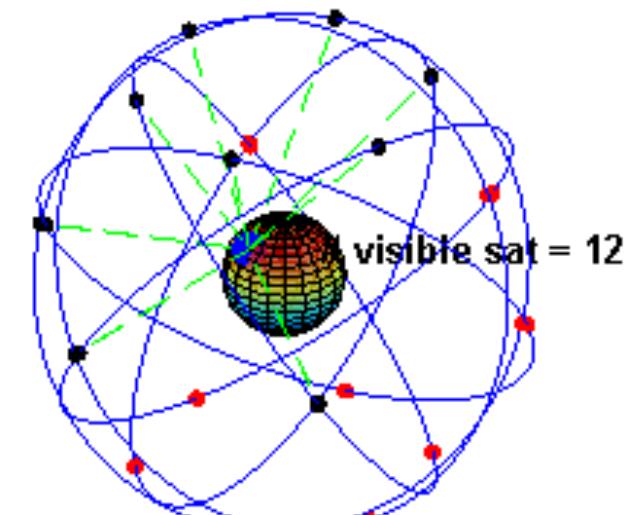


Kiva Systems



GPS

- Système de balise global
- **Pas d'info sur l'environnement**
- Limitations en intérieur/urbain
- Précision typique
 - GPS ~ 6/8 m
 - DGPS ~ 1m

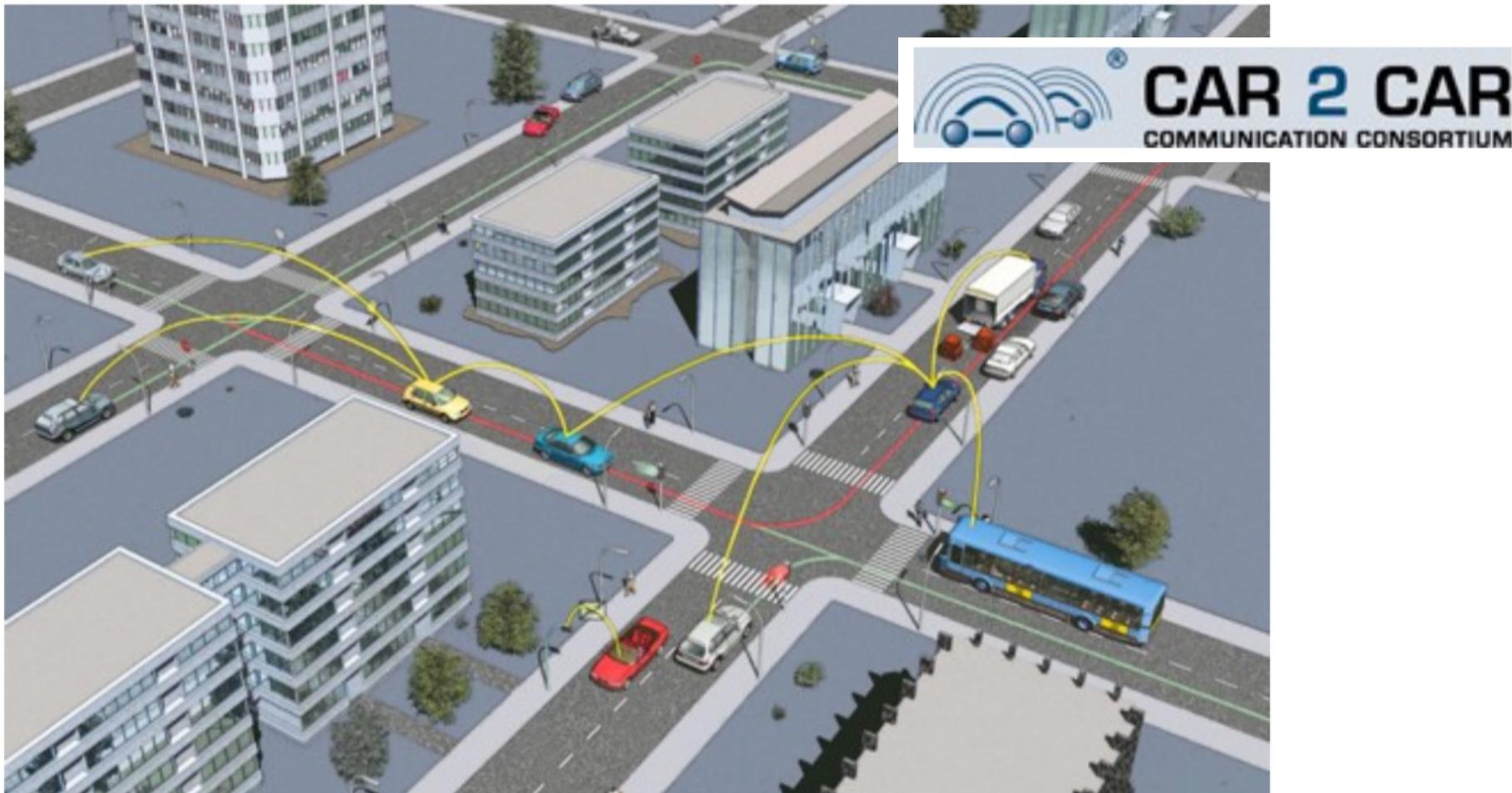


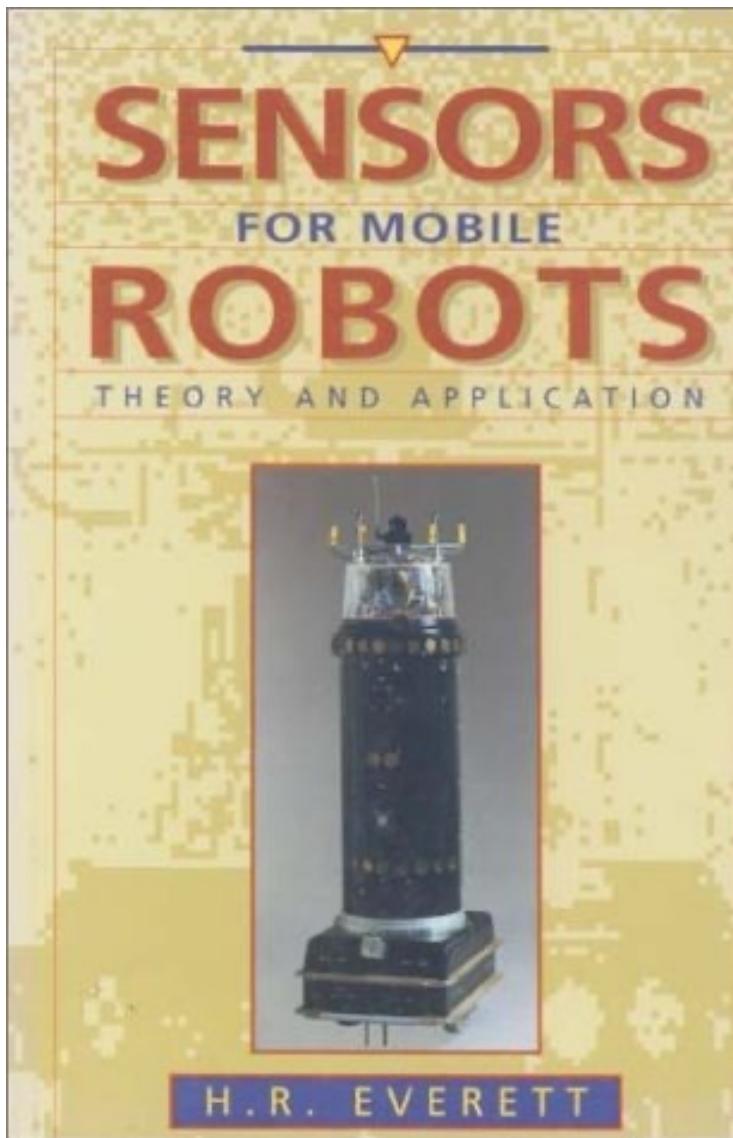
Nombreuses possibilités d'amélioration

- Corrélation avec carte
- Fusion avec inertie/vision...
- Inévitable en extérieur

V2X

- Informations venant de l'infrastructure / des autres usagers





**Sensors for Mobile Robots:
Theory and Application**
by H. R. Everett

Les différents types de navigation



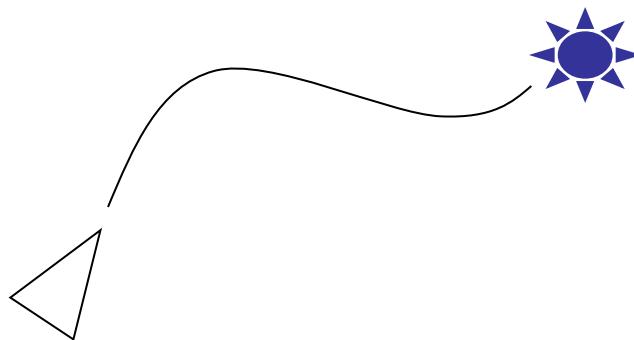
Classification établie par O. Truillier

O. Trullier and J. A. Meyer. **Biomimetic navigation models and strategies in animats.** *AI Communications*, 10 :79–92, 1997.

- 5 catégories
- Couvre les stratégies avec et sans modèle interne
 - Approche d'un objet
 - Guidage
 - Action associée à un lieu
 - Navigation topologique
 - Navigation métrique

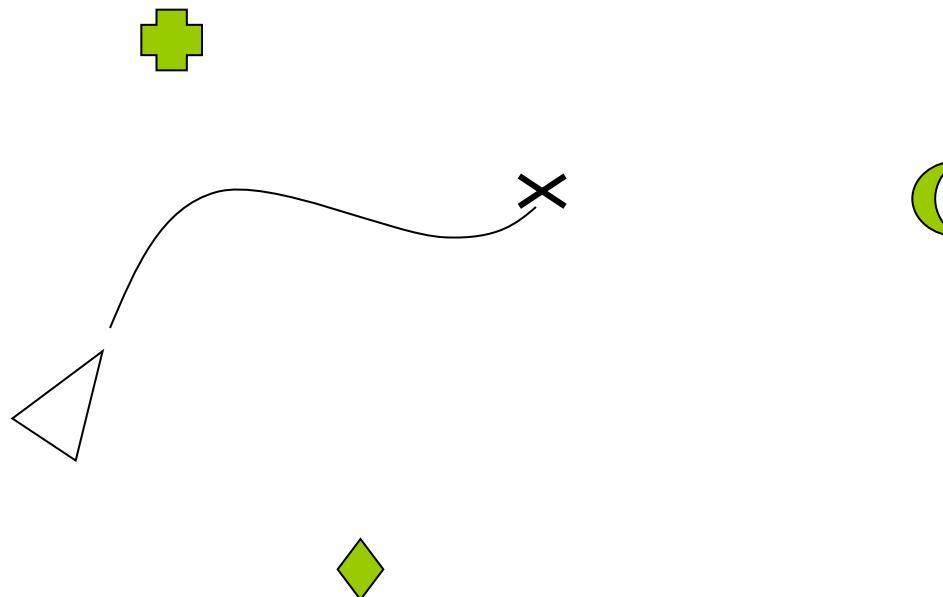
1. Approche d'un objet

- Stratégie réactive (perception => action)
- Stratégie locale
- But matériel et visible (lampe...)



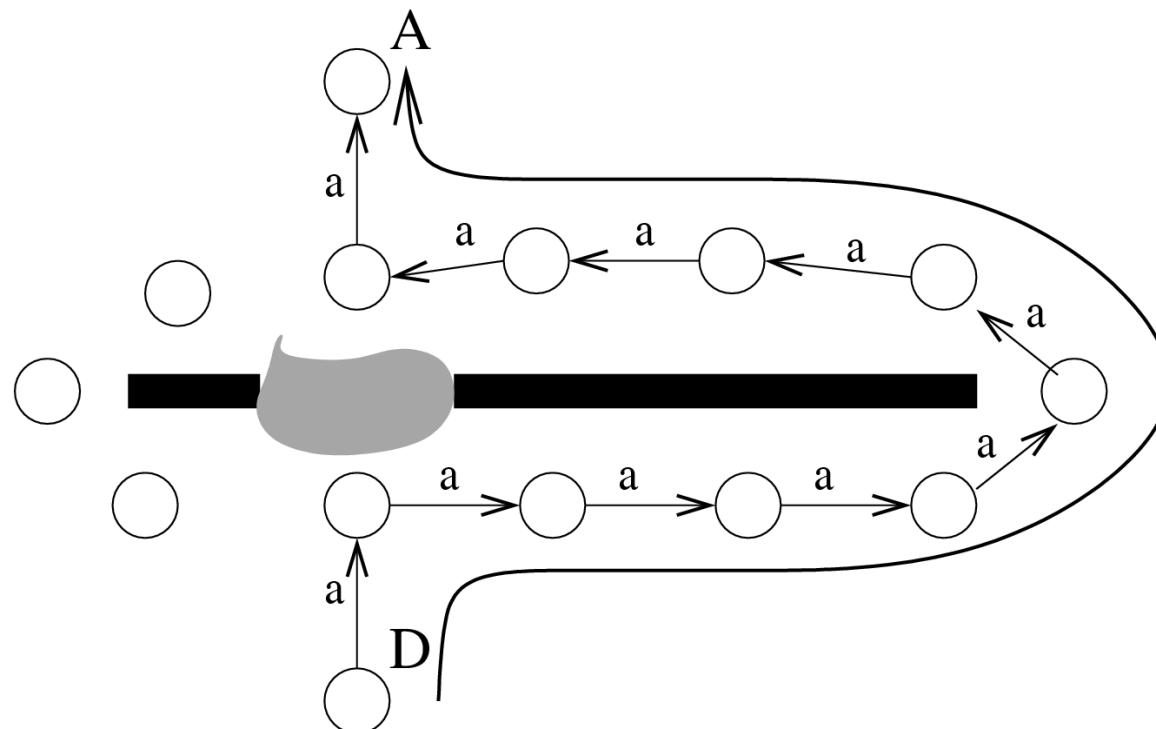
2. Guidage

- Stratégie réactive (perception => action)
- Stratégie locale
- But défini par des repères distants (amers)



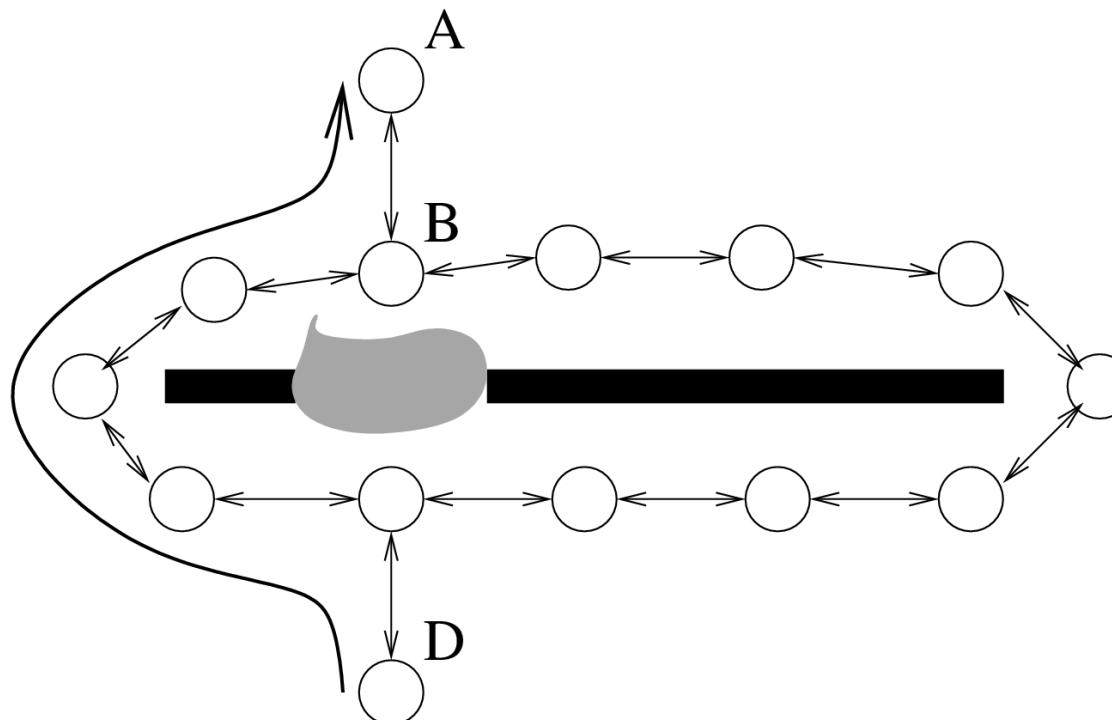
3. Action associée à un lieu

- Stratégie réactive (lieu => action), mais modèle du monde (lieux)
- Stratégie globale
- Mémorisation de routes sous la forme (lieu => action)



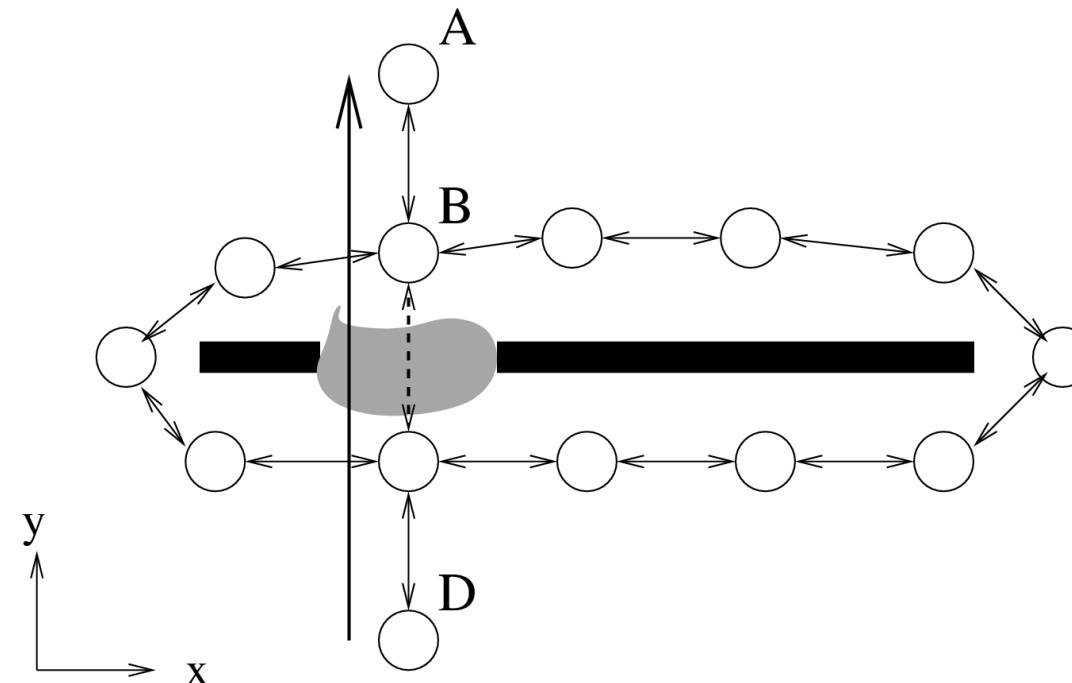
4. Navigation topologique

- Stratégie planifiée (mémorisation de chemins possibles)
- Stratégie globale
- Chemins empruntant les passages connus



5. Navigation métrique

- Stratégie planifiée (mémorisation de chemins possibles et de positions des lieux)
- Stratégie globale
- Chemins pouvant emprunter des chemins inconnus



Catégories 1,2,3 : Navigation réactive

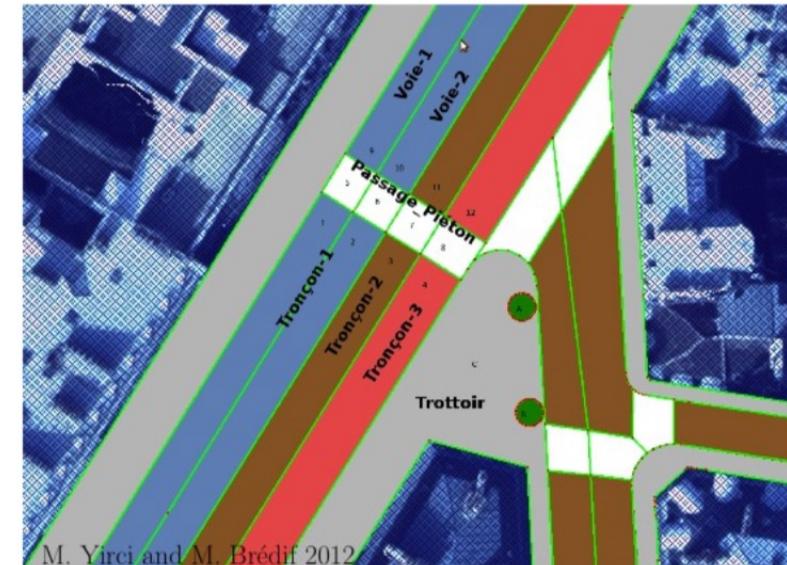
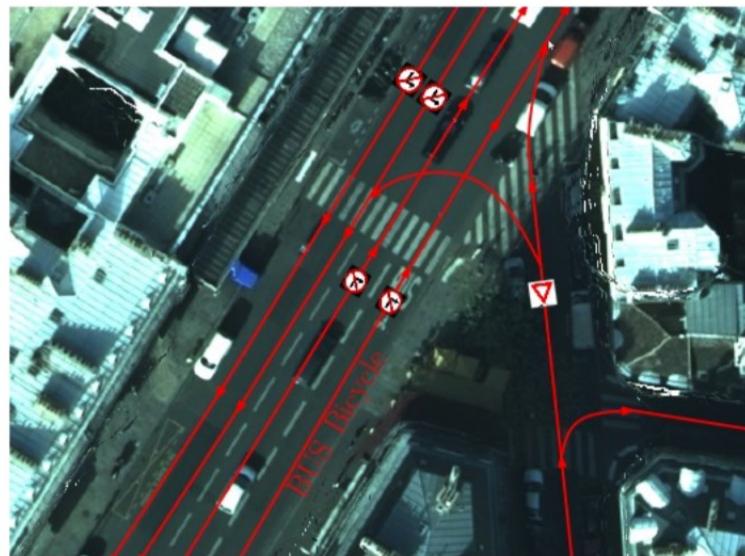
- Champ d'application restreint
- Très rapide
- Robuste (potentiellement ...)



Traffic Jam
Assist

Catégories 4,5 : Navigation utilisant une carte

- Déplacements à long terme
- Problème difficile
- Naturel pour l'homme qui utilise des processus cognitifs élaborés
- Utilisé aussi par des animaux (rats...)



Navigation utilisant une carte



Carte :

Modèle interne de l'environnement

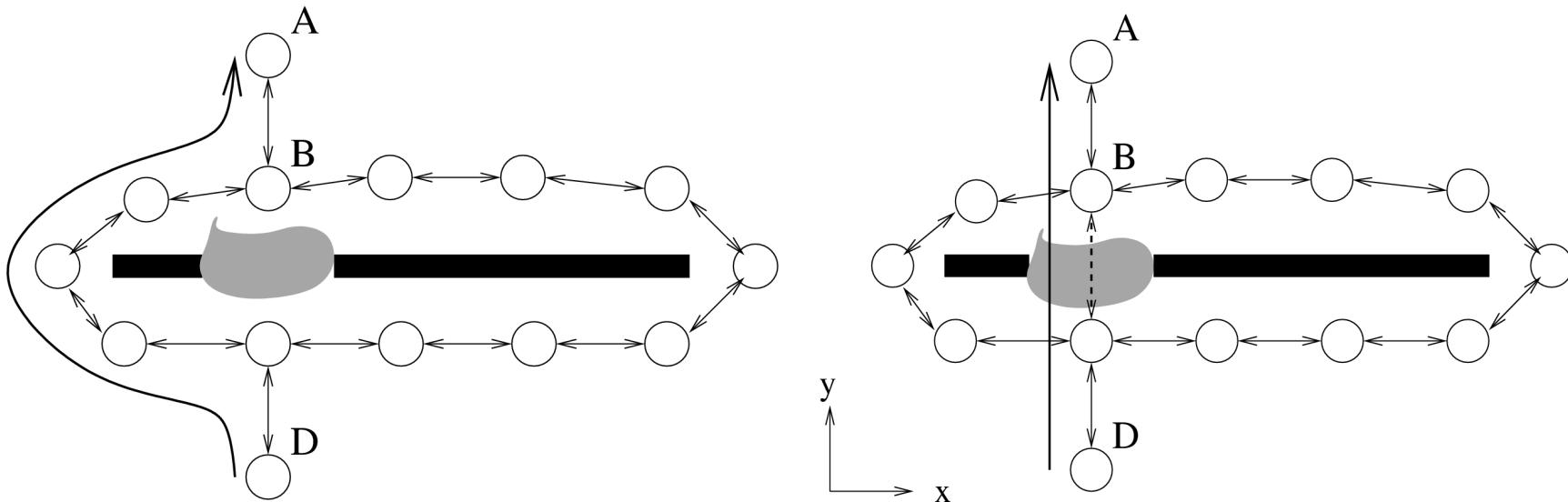
Mémorise *sous diverses formes* les informations proprioceptives et les perceptions

Permet de relier des perceptions à une position

- pour compenser la dérive de la proprioception
- pour résoudre le perceptual aliasing

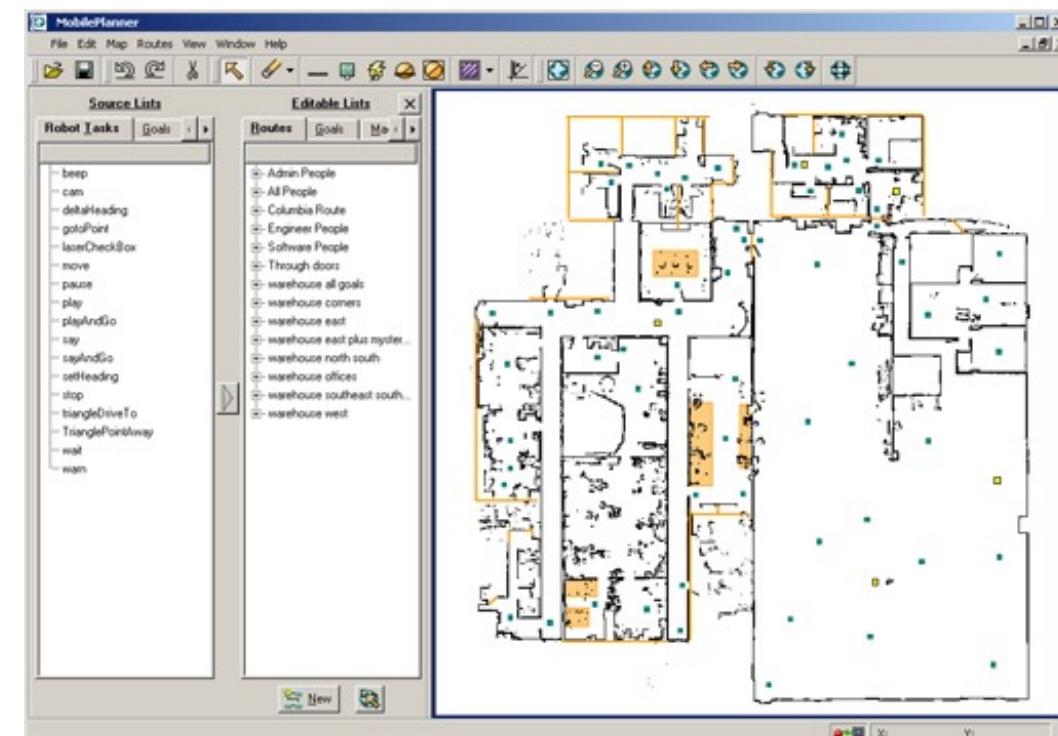
Catégories 4 et 5 de la classification de Trullier

1. Approche d'un objet
2. Guidage
3. Action associée à un lieu
- 4. Navigation topologique**
- 5. Navigation métrique**



Connaissance de l'environnement

- Pour repérer le robot
- Pour donner une vision globale à l'opérateur
- Pour la carte elle-même (relevé de plan d'architecte)



Connaissance de l'environnement

- Mobile Mapping Systems

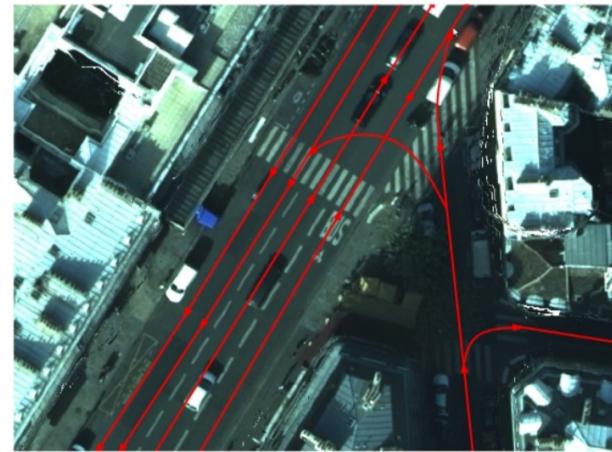
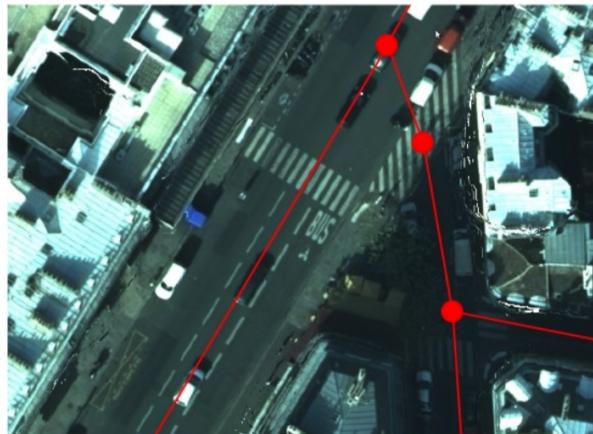


Planification d'actions à long terme

- buts hors de la vue directe
- optimisation globale de trajectoires

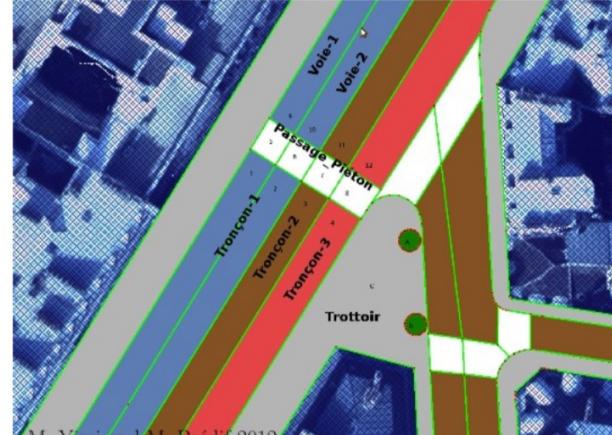
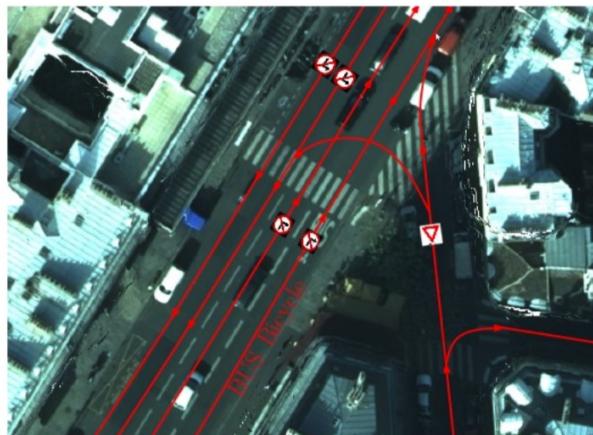
Cartes routières

- Adaptées au véhicule autonome



1) Linear graph (macro-scale topology / geometry)

2) Linear graph (micro-scale topology / geometry)



3) Niveau 2 +traffic rules

4) Graphe des surfaces (échelle micro + règles de trafic)

Cartographie

- Construction de la carte

Localisation

- Estimer la position du robot dans une carte connue

Planification

- Calculer un chemin de la position courante jusqu'au but
- Cours ROB316

Cartographie  Localisation



Robot autonome : Cartographie et localisation simultanée (**SLAM**)

Environnement plan (2D)

- plan de coupe d'un télémètre laser
- mobilité simplifiée

Environnement statique (mais bruité)

- pas de modélisation de portes ouvertes/fermés
- mais présence d'obstacles dynamiques possible (personnes, mobilier...) -> bruit

Estimation séparée de la position et de la direction

- notamment pour cartes topologiques (vision panoramique)
- pour des plates-formes holonomes
 - > boussole, gyroscopes, recalage

Représentations de l'environnement

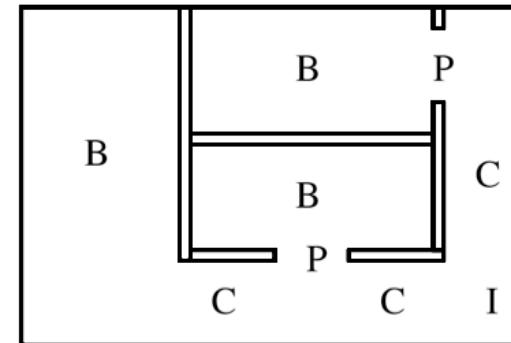


Cartes topologiques

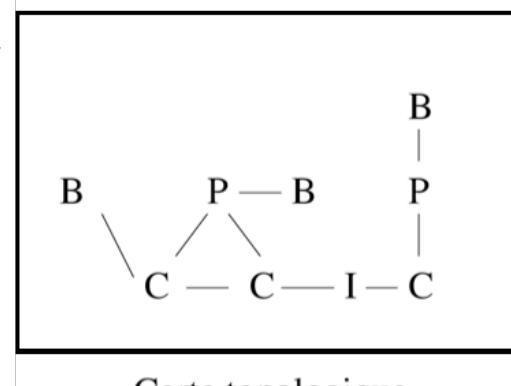
- Graphe de lieux et de transitions entre lieux
- perception sans modèle métrique

Cartes métriques

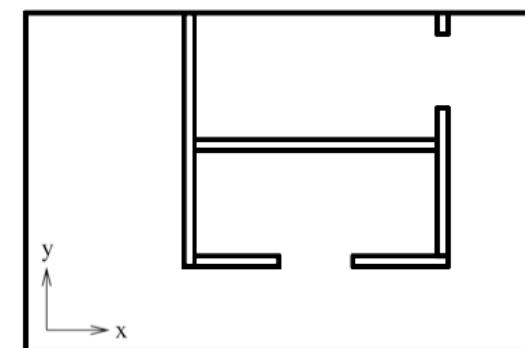
- Ensemble d'objets dans un espace commun
- perception avec modèle métrique



Environnement réel



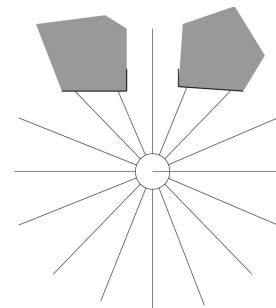
Carte topologique



Carte métrique

Nœuds définis par des perceptions

- Image panoramique
- Scan laser
- Configuration des murs



Nœuds placés selon différents critères .

- Correspondant à des perceptions données (porte, intersection...)
- Espacement régulier
- Classification non supervisée (ajout de nœud quand les perceptions ont assez changé)

Liens définissant un moyen de transition entre lieux

- Procédure à suivre (comportement, suivi de couloir...)
- Position relative
- Implicite par définition de la position des nœuds

Avantages :

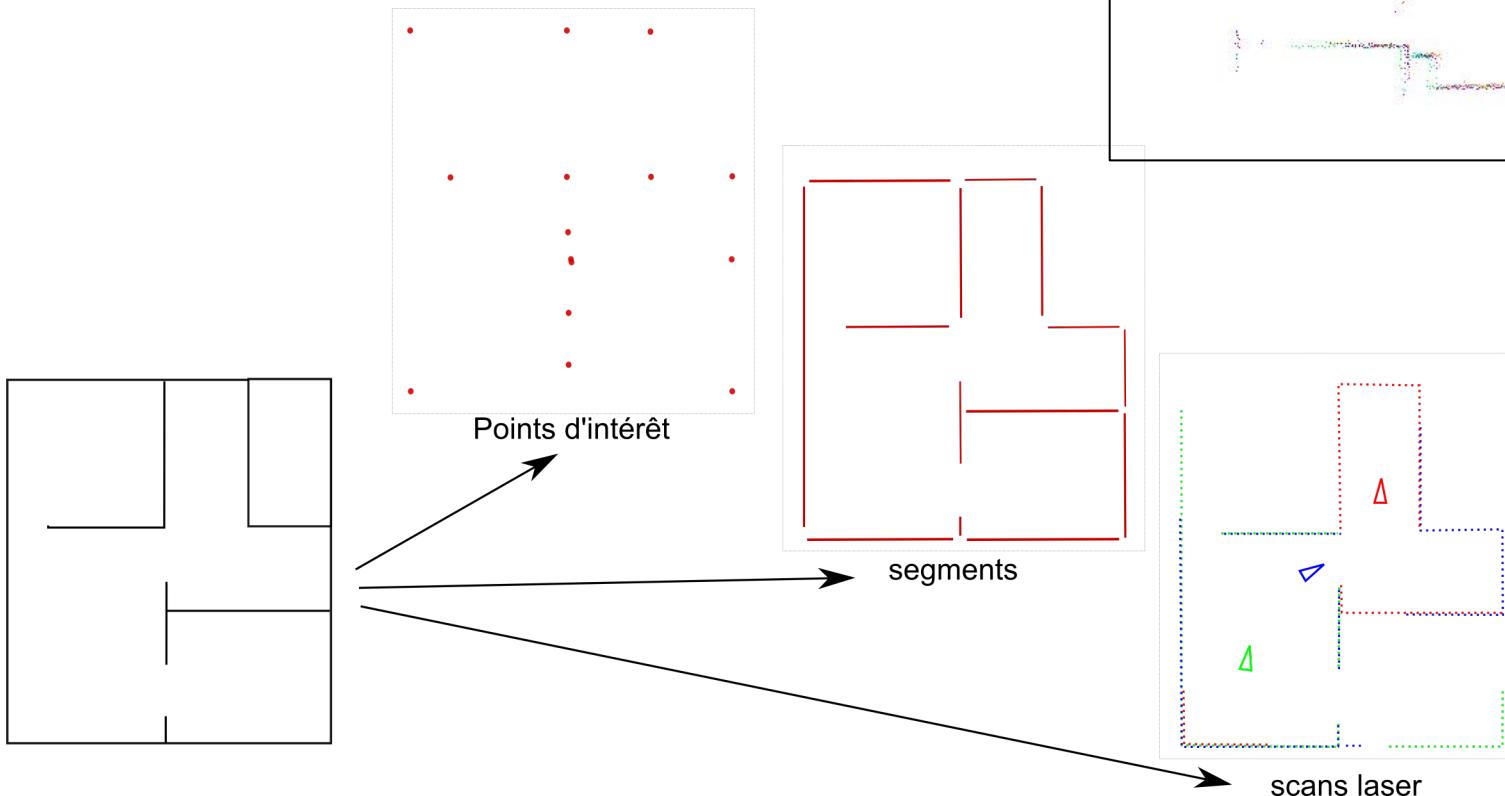
- Discrétisation pour la planification
- Proche des données capteurs
- Utilisation de capteurs sans modèles métriques
- Séparation des info proprioceptives et des perceptions (cartographie)
- Localisation grossière, mais rapide

Inconvénients :

- Séparation des info proprioceptives et des perceptions (localisation)
- Pas d'information sur les lieux non visités
- Pb de « perceptual aliasing » -> construction difficile
- Représentation très liée à un robot particulier

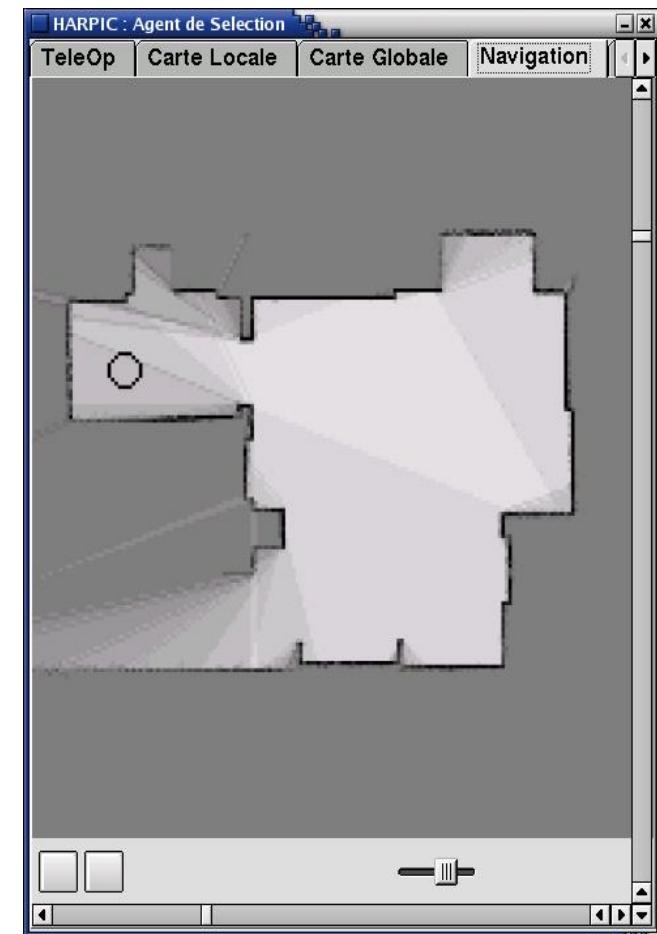
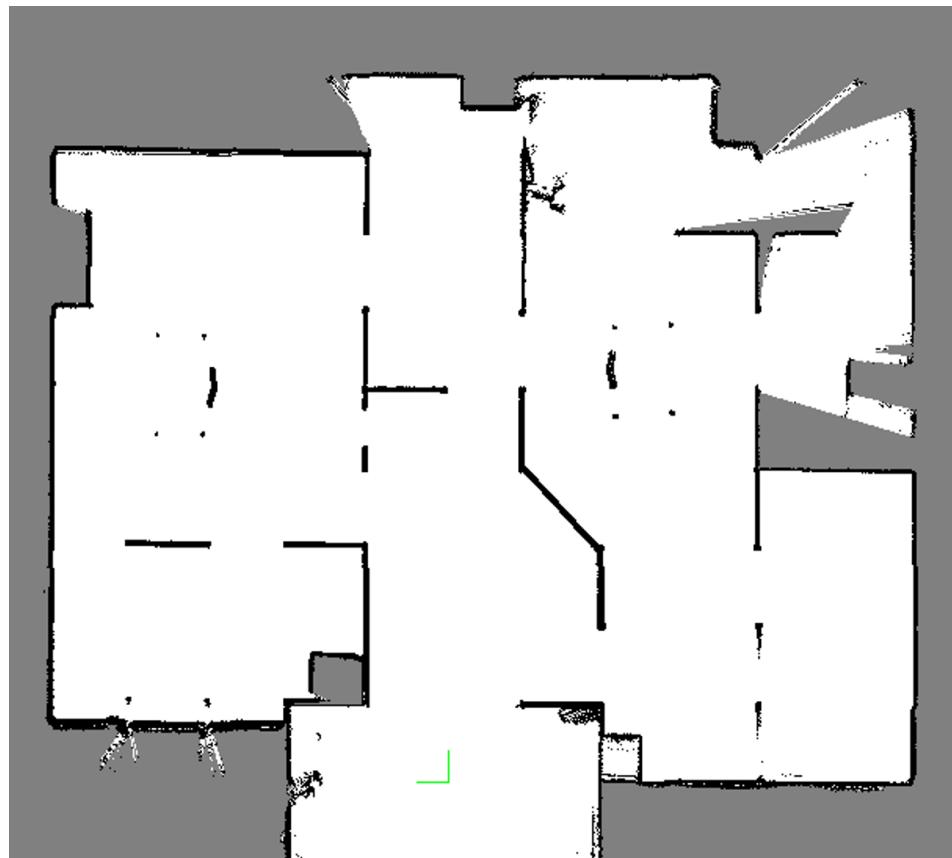
Ensemble d'objets dans un repère commun

- Points, segments, polygones
- Scans laser



Ensemble d'objets dans un repère commun

- Espace libre (grille d'occupation)



Avantages

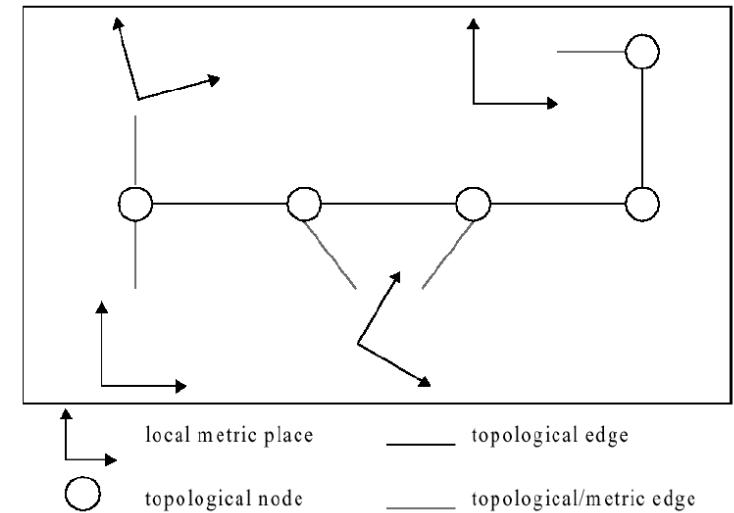
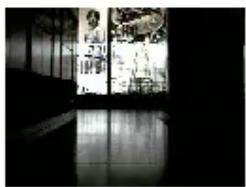
- Représentation de lieux non visités (mais « vus » de loin)
- Utilisation de la géométrie
- Localisation précise
- Représentation indépendante du robot (utilisation d'un modèle métrique)

Inconvénients

- Planification moins directe que pour les cartes topologiques
- Nécessite un modèle métrique
- Fusion au sein d'un même espace -> difficulté de modifications futures

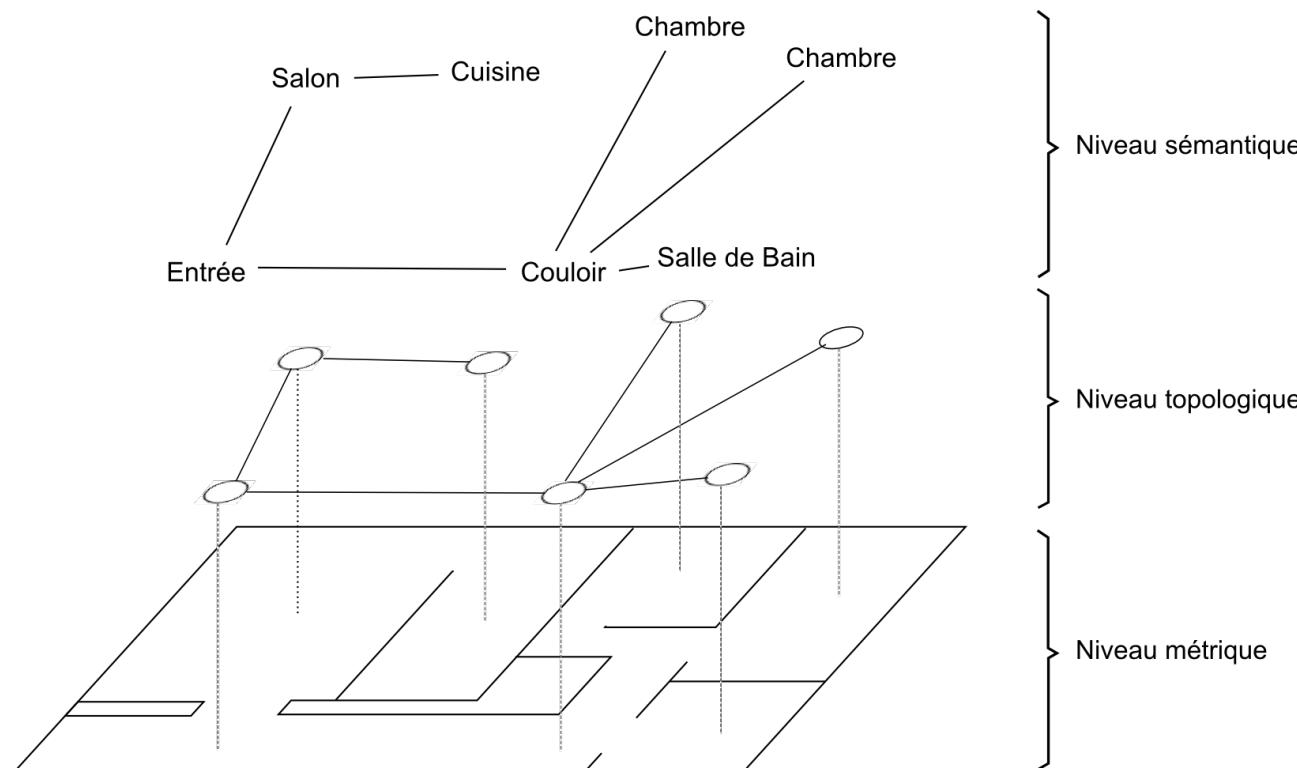
Représentations mixtes (topo-métrique)

- Nœuds (images) avec positions relatives métriques

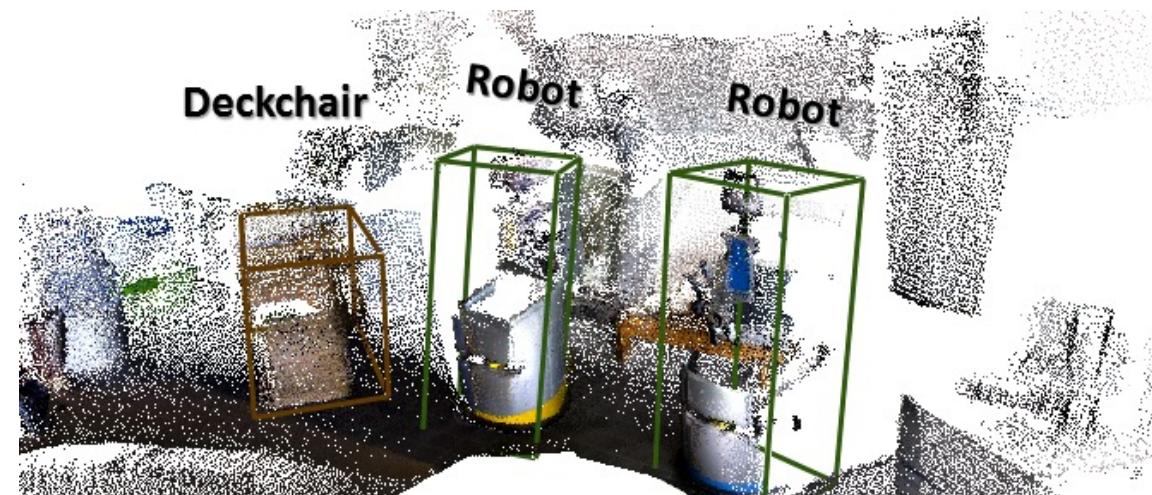
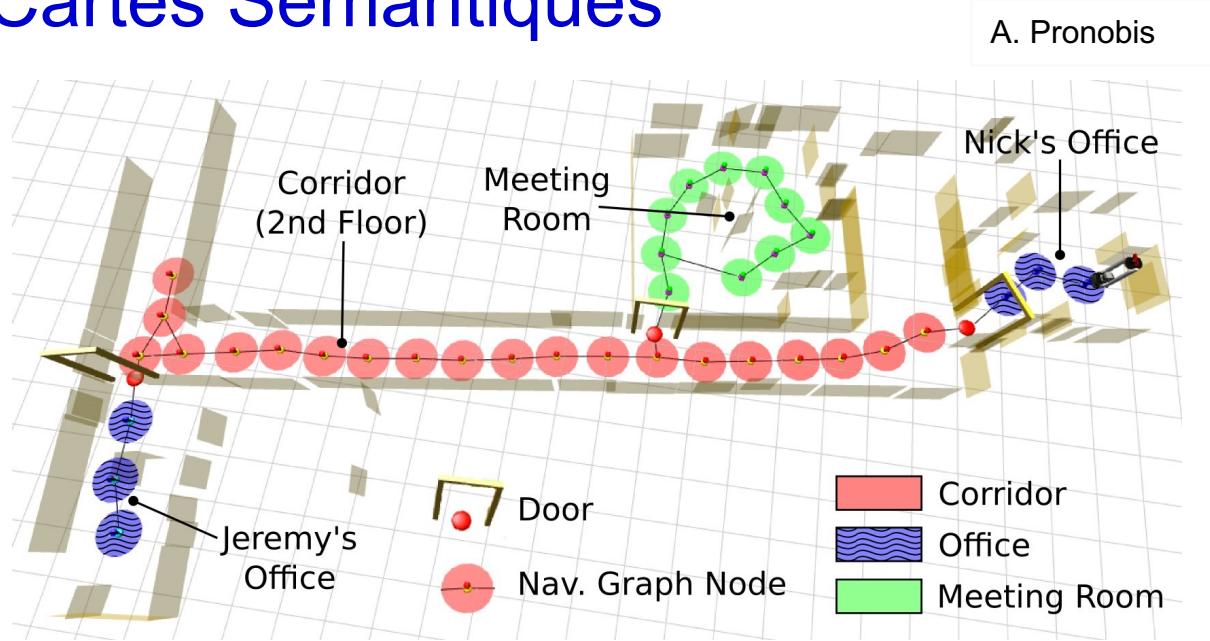


Hiérarchies de représentations

- Métrique
- Topologique
- Sémantique (type de lieux, objets ...)

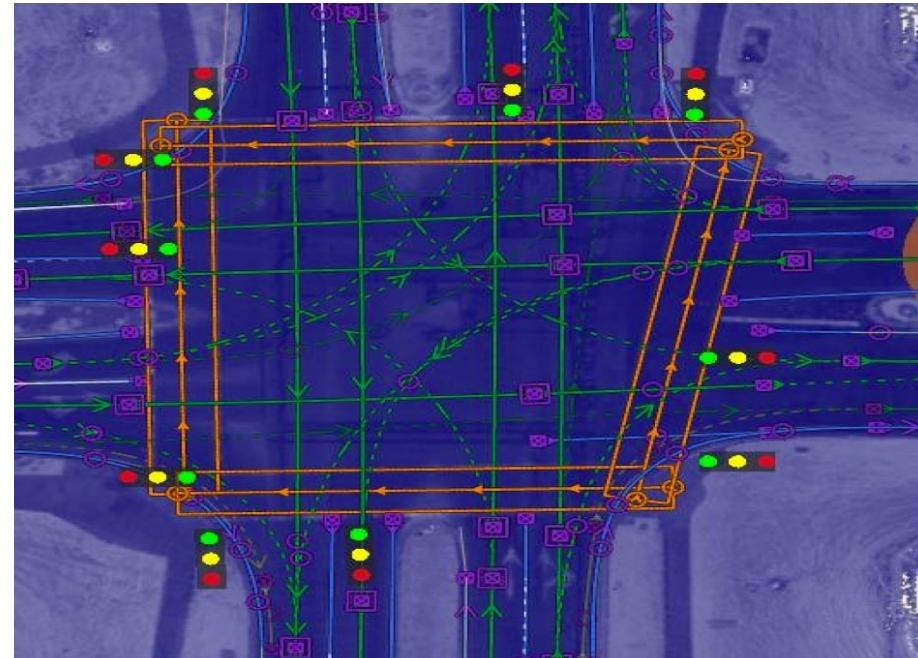
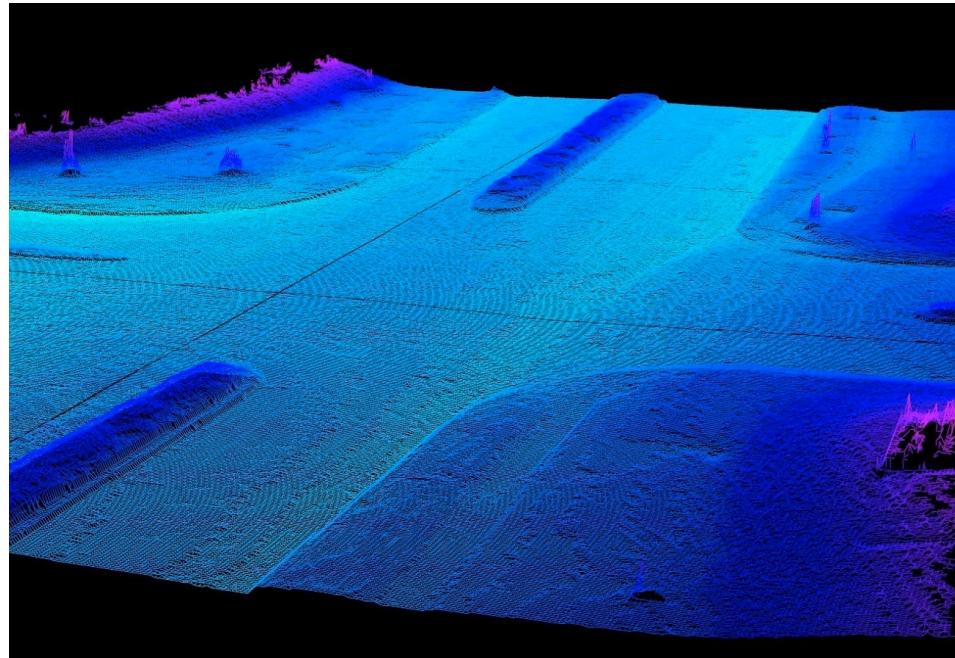


Cartes Sémantiques



Waymo HD map

- Nuage de points, doit permettre de se localiser à 10 centimètres
- Infos sur les routes, les intersections ...
- Permet de localiser les feux, panneaux, trottoirs, bouche d'incendie ...
- Aide à localiser les obstacles dynamiques (par différence)
- Construit semi-automatiquement à partir de véhicules non autonomes



Prochaine séance Classification et présentation des différentes méthodes de localisation. Méthodes de localisation directe.

TP : Localisation par ICP avec télémètre laser.