Comment sont programmés les robots ?

Pratiques actuelles et tendances en recherche

Robin Passama
Ingénieur de recherche CNRS
LIRMM, Université de Montpellier
Département Robotique

Plan

- **Introduction**
- Principes de base
- Architecture logicielle
- Nouvelles tendances
- Conclusion

Contexte

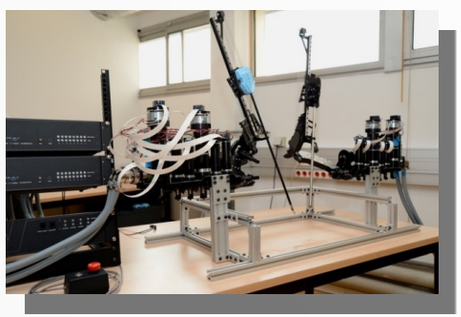
- Qu'est-ce qu'un robot ?

  Machine capable d'interagir avec l'environnement physique, disposant d'un niveau d'autonomie donné lui permettant d'exécuter automatiquement des opérations.

- Niveau d'autonomie= capacités **décisionnelles** + ou - grandes
- Interaction : exercer des **forces** sur l'environnement

Contexte

- Quelques exemples de robots



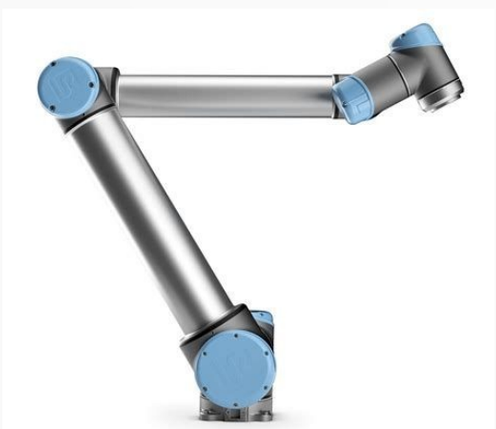
chirurgical

cobot

humanoïde

sous-marin

Mobile terrestre



Bras série

bras parallèles

Grand robot à câbles

Au niveau matériel

- Des actionneurs

Credits : axesindustries.com

Moteurs électriques

Credits : humarobotics.com

Pompes à vide

- Des capteurs

Credits : directindustry.fr

Encodeurs

Credits : e-motionsupply.com

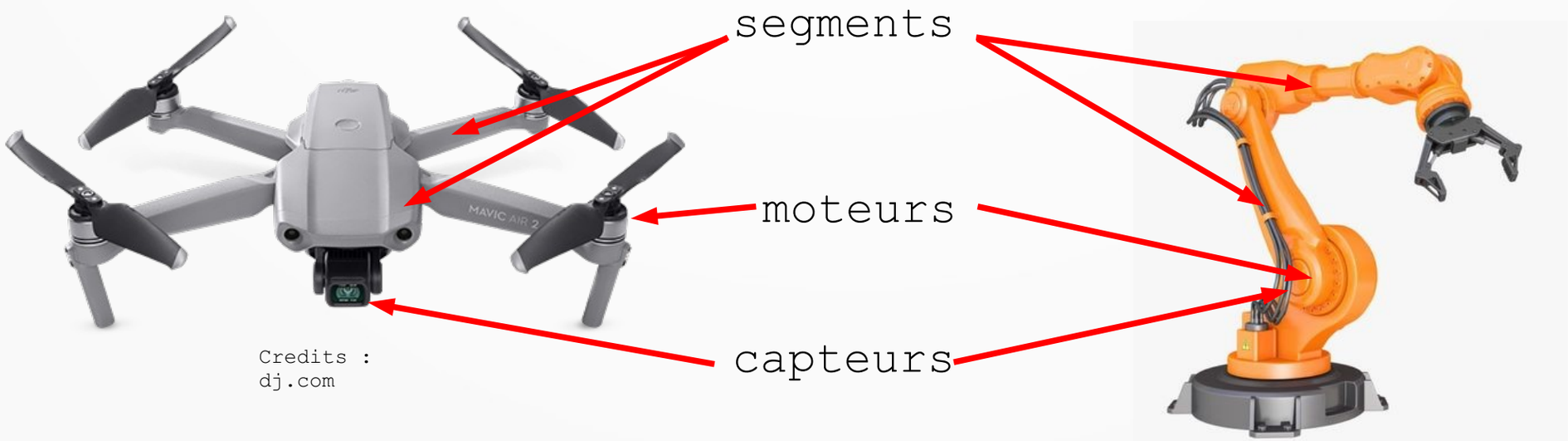
Capteurs d’efforts

Credits : usinenouvelle.com

Caméras

Au niveau matériel

- Une structure mécatronique :
  - Mécanique : segments, capteurs, actionneurs
  - Electronique : alimentation et communication avec les actionneurs et capteurs ; unités de calcul

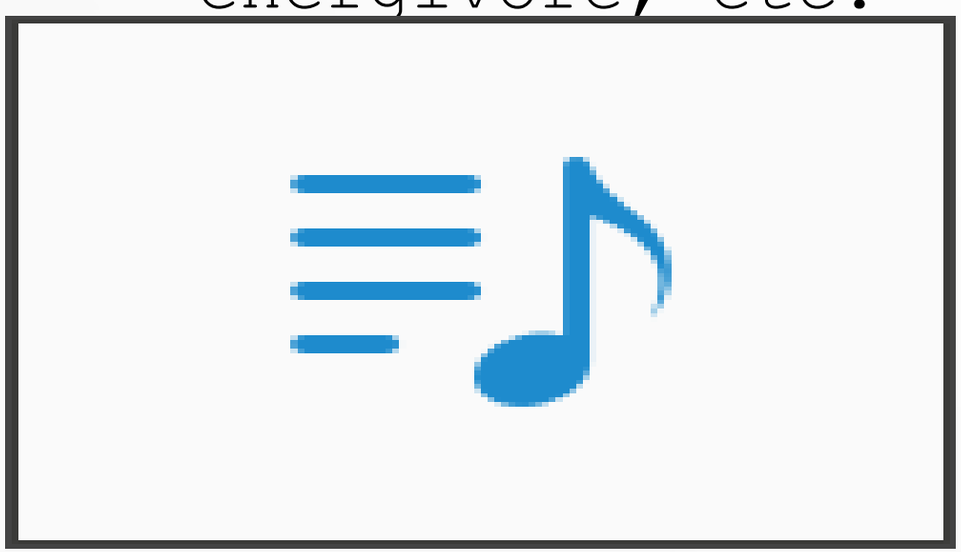


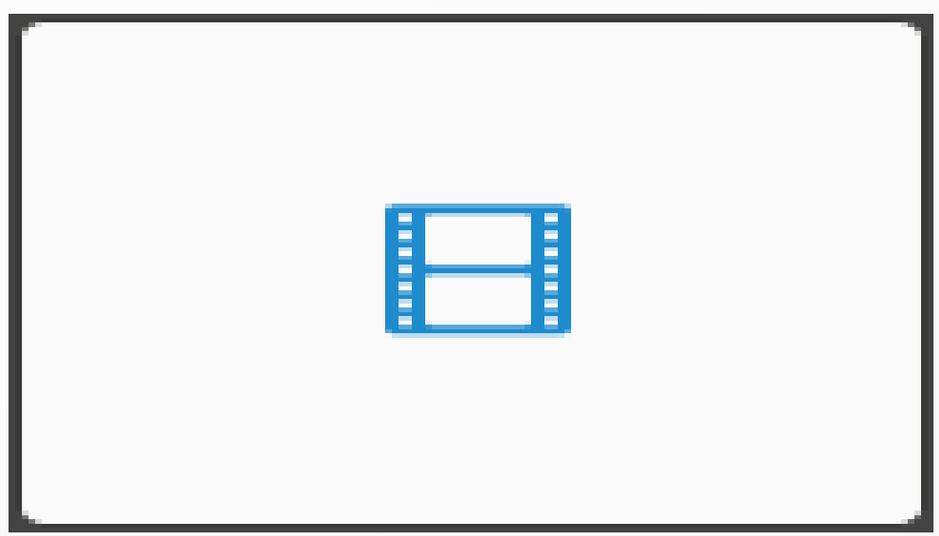
Credits :
dj.com

Credits :
fr.depositphotos.com

En recherche

- Mécanique / Électronique :
  - meilleures performances « physiques » : charrier plus de poids, plus rapide, plus robuste, plus agile, plus précis, moins énergivore, etc.

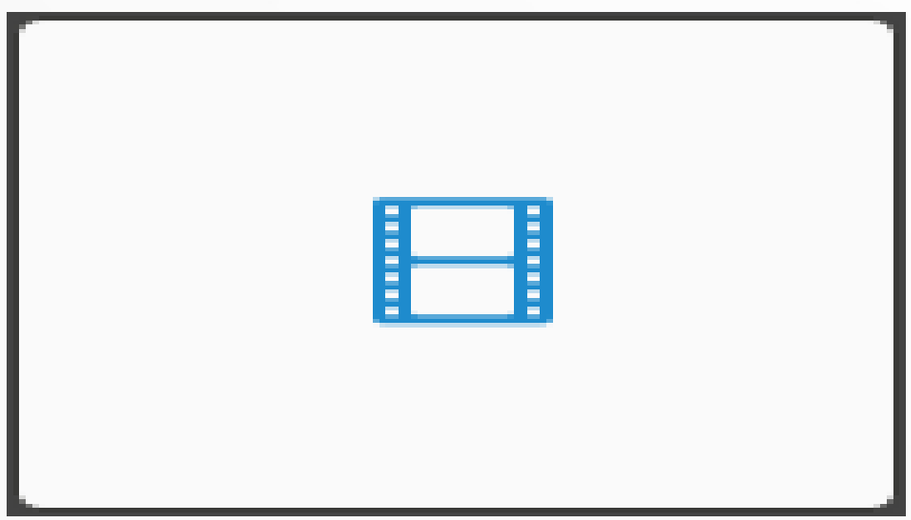




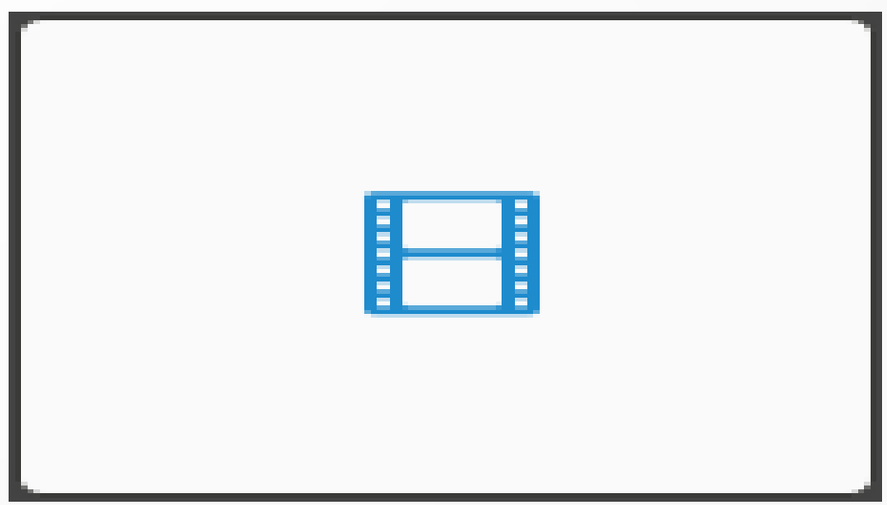
Credits : boston dynamics, youtube

En recherche

- Informatique / Automatique :
  - plus grande autonomie, meilleures performances décisionnelles



Credits : KIA, youtube



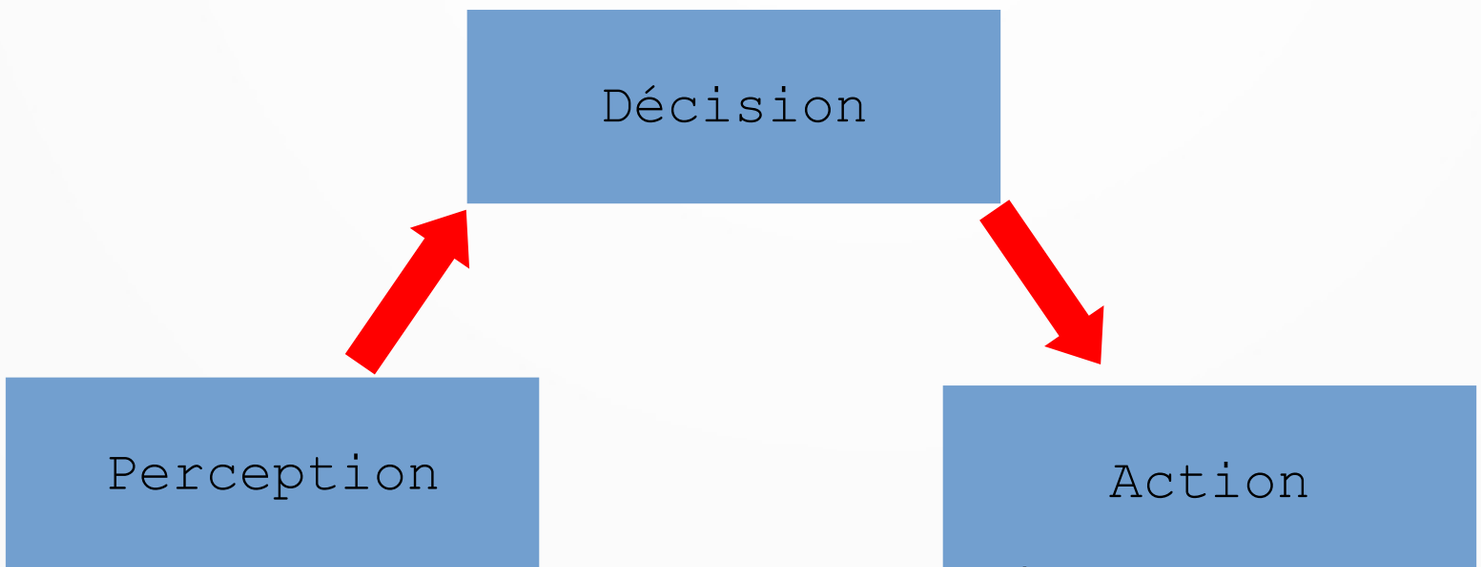
Credits : boston dynamics, youtube

Plan

- Introduction
- **Principes de base**
- Architecture logicielle
- Nouvelles tendances
- Conclusion

Principes de base

- La boucle ***Perception-Décision-Action***



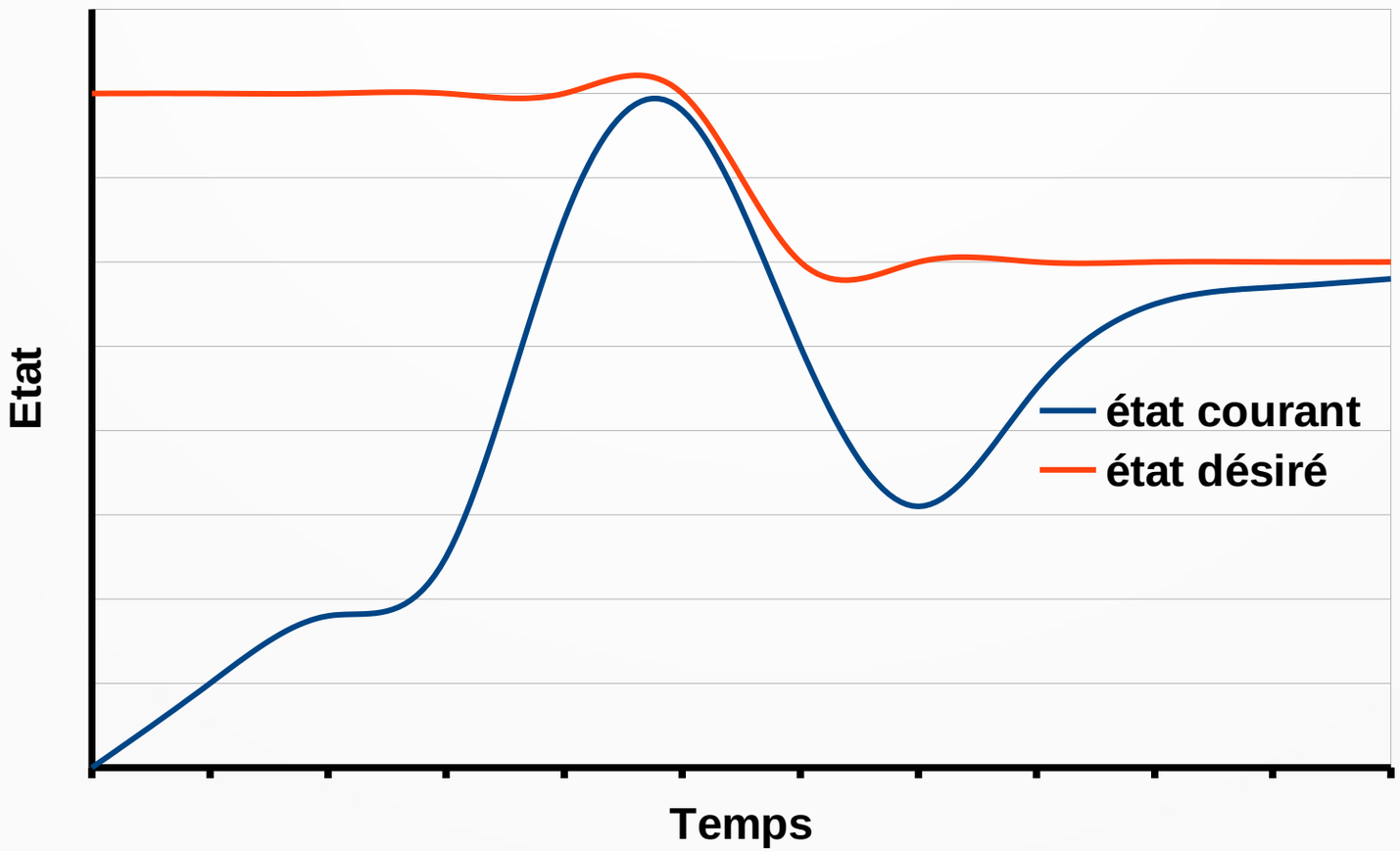



Principes de base

- Programmation **récurrente**
  - Boucle de rétroaction : en fonction de l'**état courant/passé/prédit** piloter les actionneurs de manière à atteindre l'**état désiré.**
  - Exécution **cyclique** et **temps-réel**
    - Contrôler le robot **en continu** pour qu'il réagisse en **temps voulu** aux phénomènes

Principes de base

- Comportement général



Principes de base

- En pratique : structures en **couches**

Vision environnement

Décision

Gestion efforts externes

Décision

Contrôle moteurs

Décision

Principes de base

- Plusieurs couches :
  - Décomposer la prise de décision
    - tout prendre en compte en même temps = difficile
  - Gérer les différentes fréquences d'acquisition :
    - fréquence caméra << fréquence encodeur
  - Gérer la dynamique des phénomènes
    - Dynamique de la variation des efforts >> dynamique de la variation des vitesses

Principes de base

- Au plus près du matériel
  - Exécution **périodique**
  - contraintes **temps-réel fortes**

```
Period p(1ms) ;
for(;;){
    auto state = read_sensors();
    auto cmd = decide(state);
    control_actuators(cmd);
    Period.sleep();
}
```

Principes de base

- Aux plus haut niveaux
  - Exécution **événementielle ou périodique**
  - contraintes **temps-réel** plus faibles

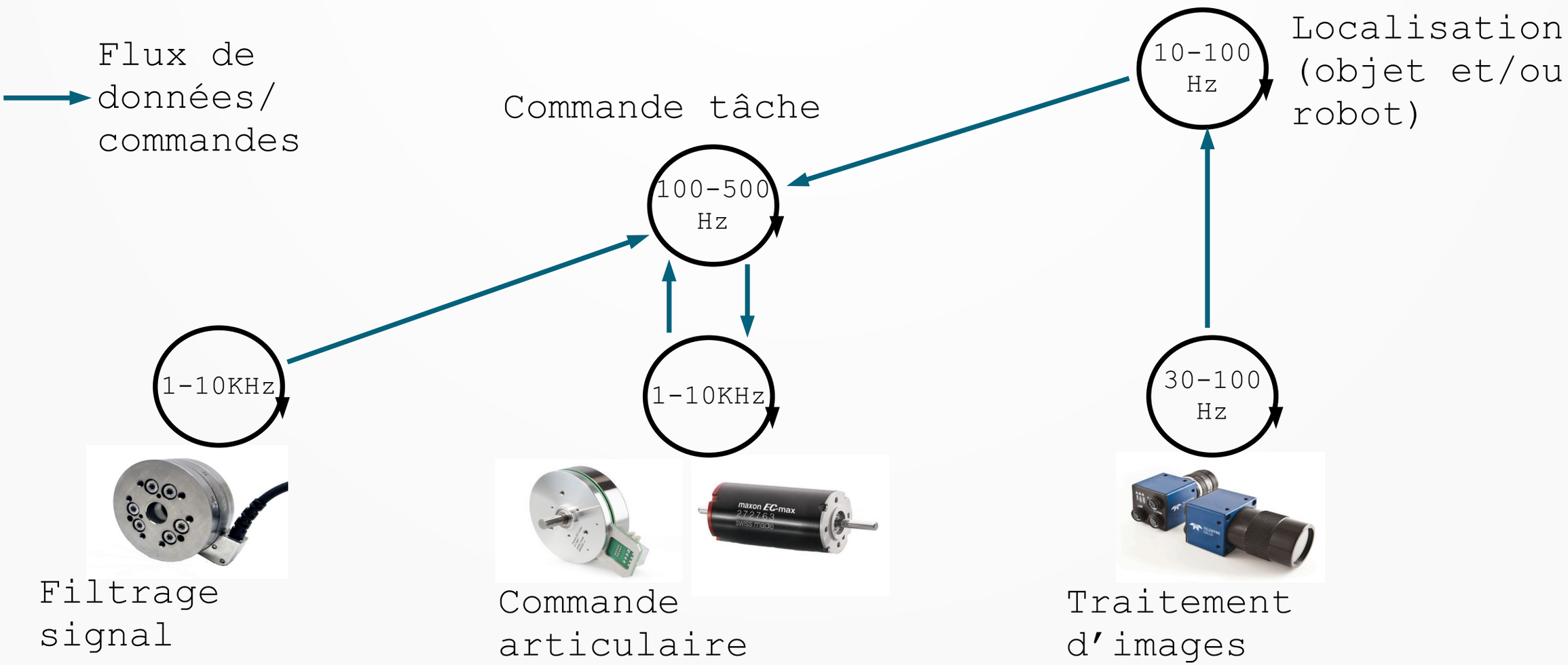
```
Plan plan;

for(auto& action : plan){
   execute_action(action);
   while(auto evt=wait_event()){
      if(action_done(evt)){
         break;
      }
   }
}
```

Plan

- Introduction
- Principes de base
- **Architecture logicielle**
- Nouvelles tendances
- Conclusion

Architecture logicielle

- Vision générale : programmation concurrente

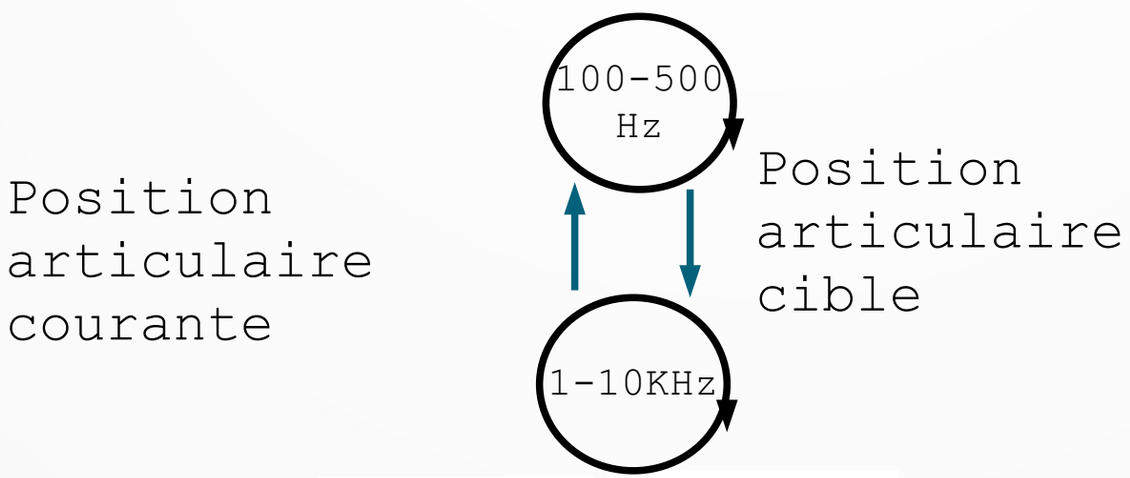


Architecture logicielle

- Langages de programmation :
  - C/C++ : temps-réel, multitâches, drivers, algorithmes efficaces
  - Matlab/Python : prototypage algos, outils « haut niveau » non TR
- Middlware : ROS/ROS2 (https://www.ros.org/)
  - Composition « late binding »: Publish/Subscribe (données), RPC (flux de contrôle synchrone/asynchrone)
  - Multi processus / Multi threads
  - Communication « transparente » : DDS (ROS2)
  - Nombreux outils: visualisation, simulation, logging, enregistrement /rejeu, etc.

Architecture logicielle

- Commande dans l'espace articulaire



Commande dans l'espace articulaire

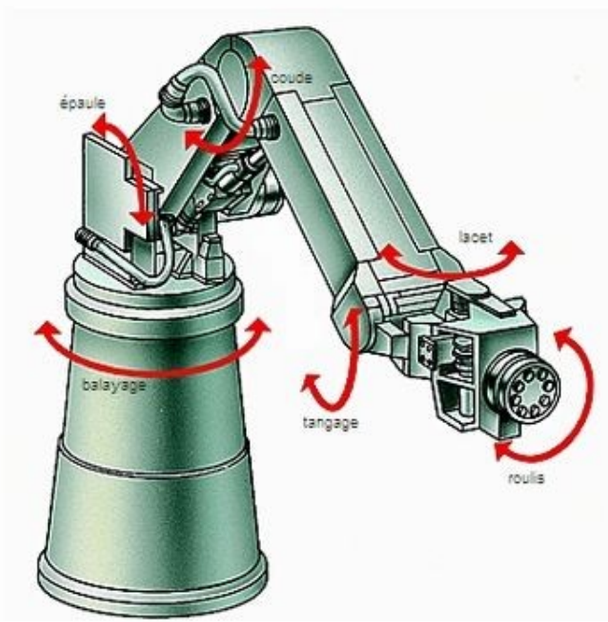
- Contrôler toutes les articulations/moteurs **en même temps**
- Pas de notion géométrique

Change au cours du temps

$$q_d(t) = [q1_d(t), \ldots, qn_d(t)]$$

Position désirée dans l'espace articulaire

Vecteur des positions désirées pour chaque articulation



Crédits : larousse.fr

Commande dans l'espace articulaire

- Commande moteur : exemple du correcteur PID

$q_d(t)$ Position angulaire désirée

Fréquence = 1KHz

$dt = 1\,ms$

Erreur de position

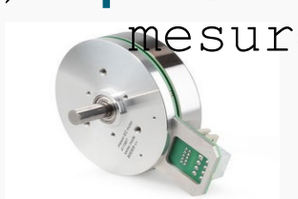
$dq(t)$

$$u(t) = K_p\,dq(t) + K_i \int_0^t dq(t)\,dt + K_d \frac{\partial\, dq(t)}{dt}$$

$u(t)$

Courant

$q(t)$ Position angulaire mesurée



Commande dans l'espace articulaire

- Commande moteur : exemple du correcteur PID
  - Enjeu : régler les gains Kp, Ki, Kd

Gain du terme proportionnel

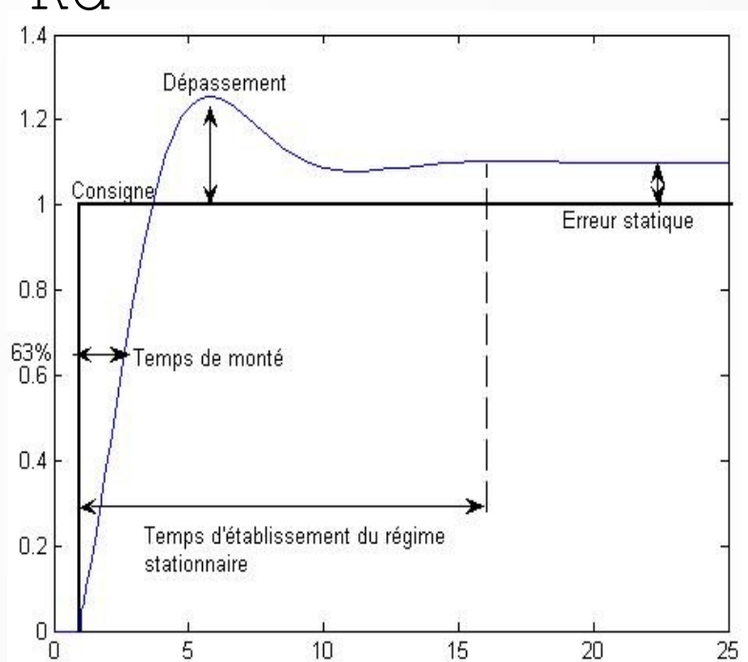
Gain du terme dérivé

$$u(t) = K_p\, dq(t) + K_i \int_0^t dq(t)\, dt + K_d \frac{\partial\, dq(t)}{dt}$$

Gain du terme intégral

Accumulation de l'erreur

Vitesse d'accroissement de l'erreur



Crédits : wikipedia.org

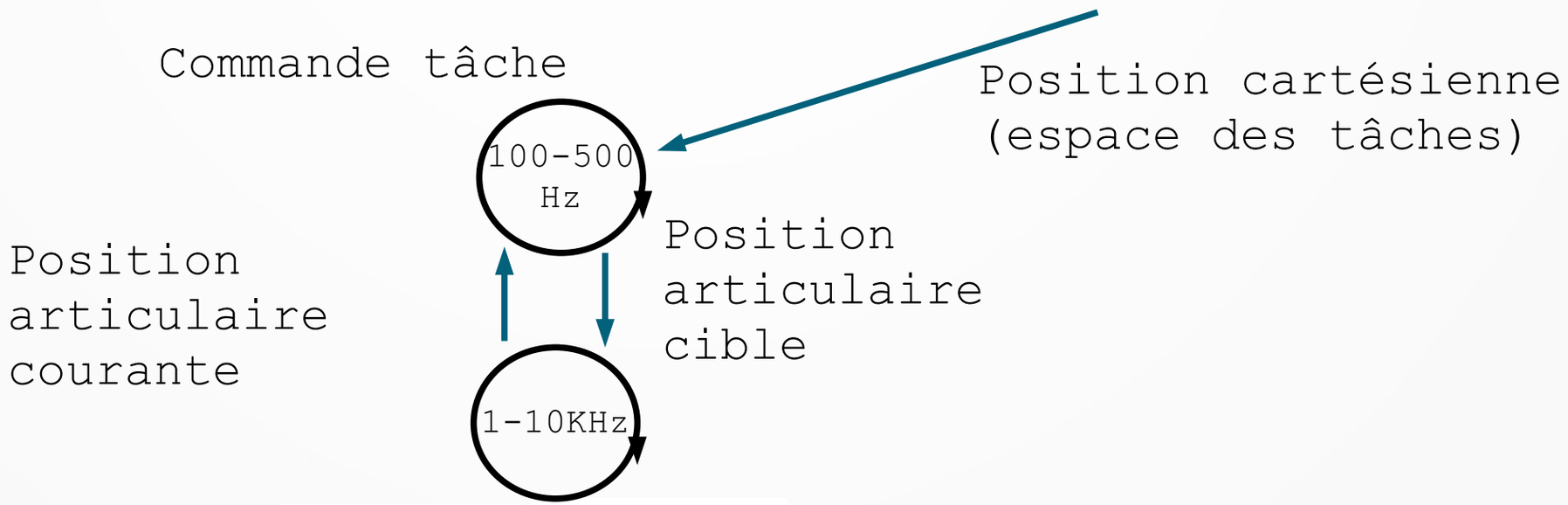
Commande dans l'espace articulaire

- Commande moteur : exemple du correcteur PID

```
Period p(1ms);
double prev_error[NB_MOTORS];
double acc_error[NB_MOTORS];
double cmd_motors[NB_MOTORS];
for(;;){
   auto curr_state = read_sensors();
   auto des_state = read_desired();
   auto error = des_state - curr_state;//compute error vector
   prev_state_vector=curr_state_vector;
   acc_error += error;
   auto derived_error = error-prev_error;
   auto cmd = Kp*error+Ki*acc_error+Kd*derived_error;
   command_motors(cmd);
   prev_error=error ;
   p.sleep();
}
```

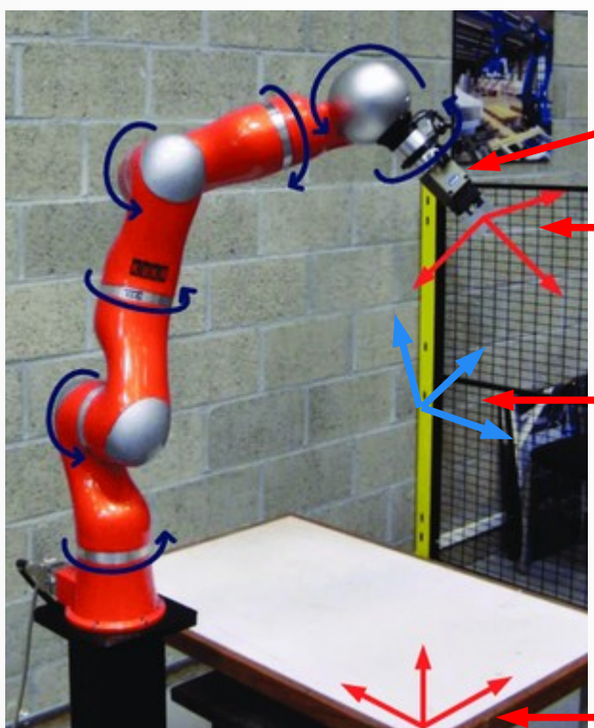
Architecture logicielle

- Commande dans l'espace des tâches



Commande dans l'espace des tâches

- Contrôler les segments du robot dans un (ou+) repère(s) donné(s)



Credits : researchgate.net

Effecteur terminal

Pose courante

Pose désirée

Exprimée dans

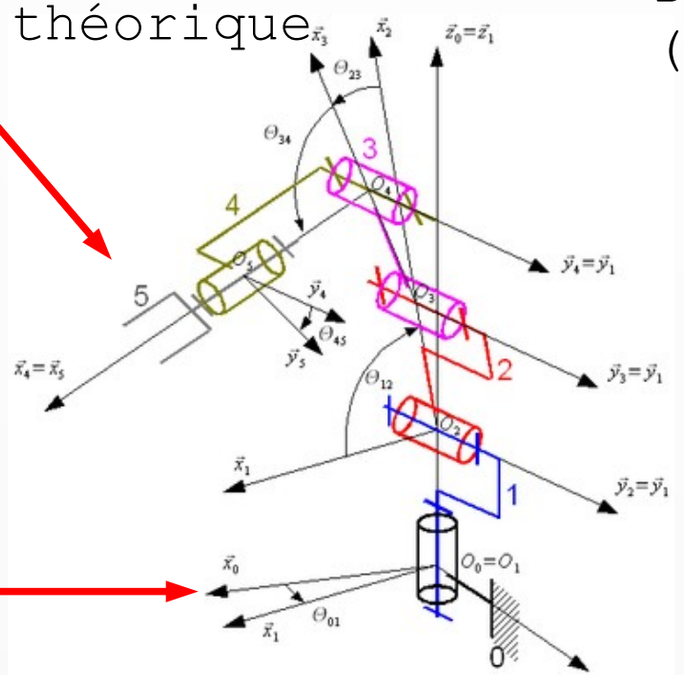
Repère de référence

Commande dans l'espace des tâches

- Prise en compte de la géométrie du robot
  - Besoin du modèle du robot

Effecteur terminal

Modèle théorique



Credits : wikimeca.org

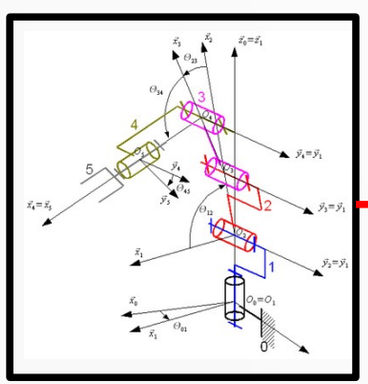
Repère de référence (base du robot)

Description (e.g. **URDF**)

Modèle informatique :
- segments
- articulations
- repères

Commande dans l'espace des tâches

- Exploiter le modèle à l'exécution
  - Modèle Géométrique Direct

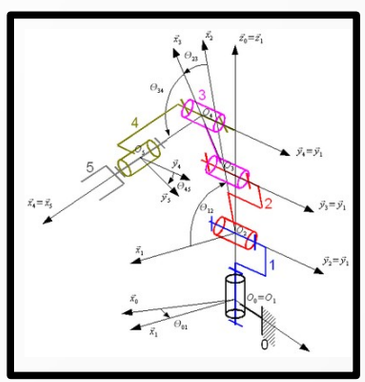


Modèle du robot

MAJ des repères des segments/articulations dans le **repère base**

MGD

Pose (6DDL) cartésienne courante



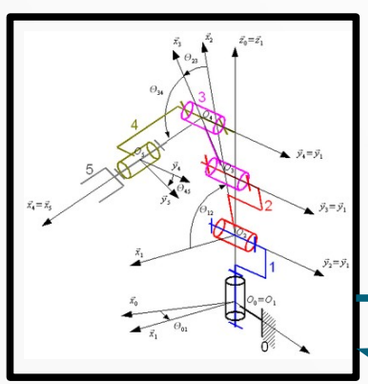
État courant du robot

Position articulaire courante

Commande dans l'espace des tâches

- Commande dans l'espace des tâches

$X_d(t)$ Pose (6DOF) cartésienne **désirée** d'un élément du robot(dans repère base) tâche



Pose (6DOF) courante $X(t)$

Erreur (6DOF) dans l'espace de la tâche $dX(t)$

Contrôleur

$q(t)$ Position articulaire courante

Position articulaire désirée $q_d(t)$

Commande dans l'espace des tâches

- Exploiter le modèle à l'exécution

Modèle Cinematique Direct

$$dX = J(q)\,dq$$

Matrice Jacobienne

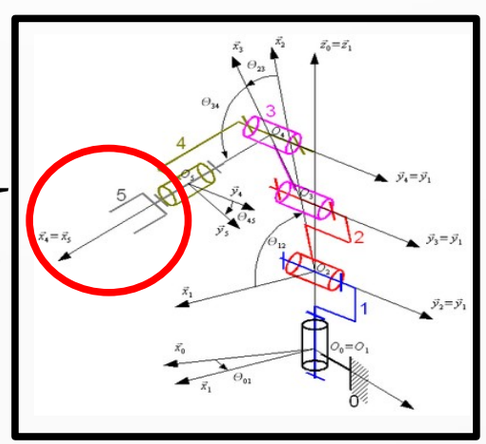
$$J(q) = \frac{\partial X}{\partial q}$$

Modèle Cinematique Inverse

$$dq = J^{-1}(q)\,dX$$

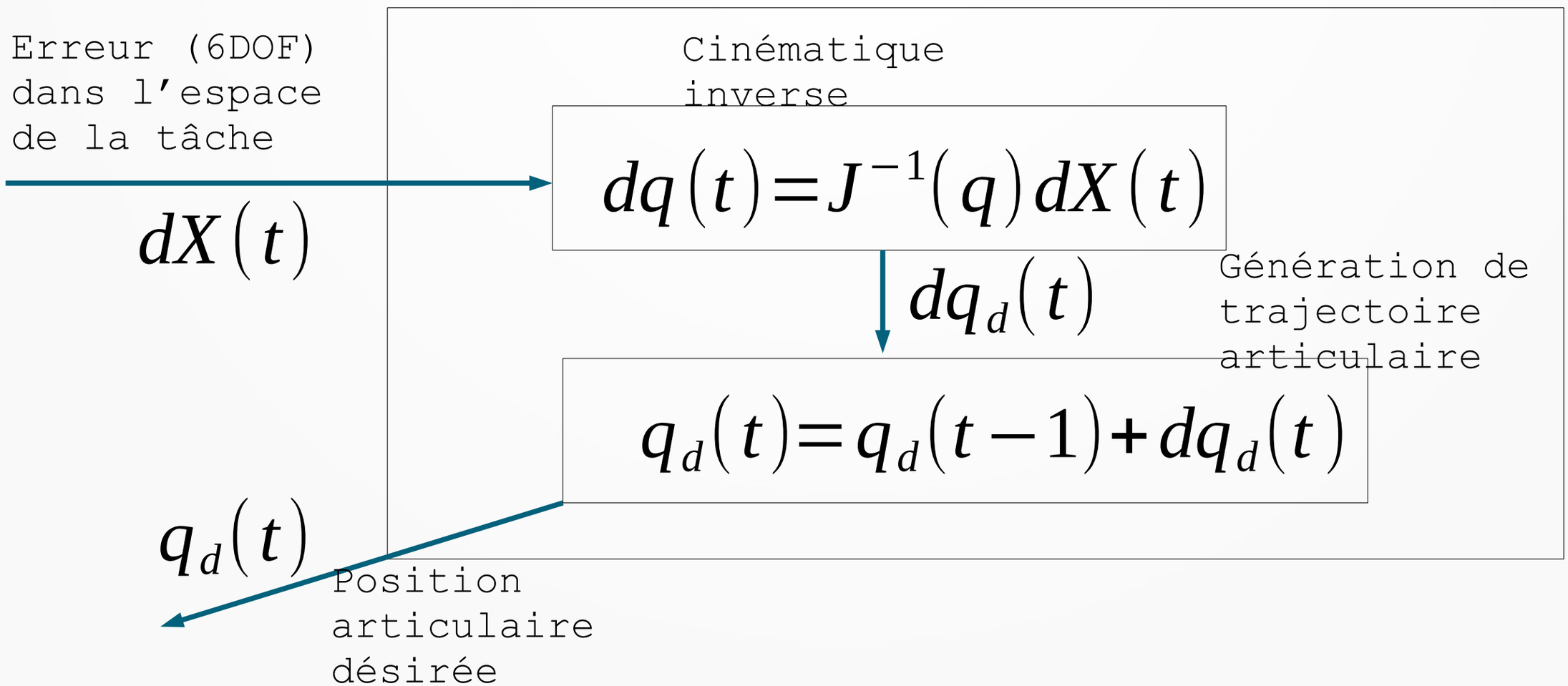
(pseudo) inverse de la matrice jacobienne

X



Commande dans l'espace des tâches

- Contrôleur basé sur la cinématique inverse

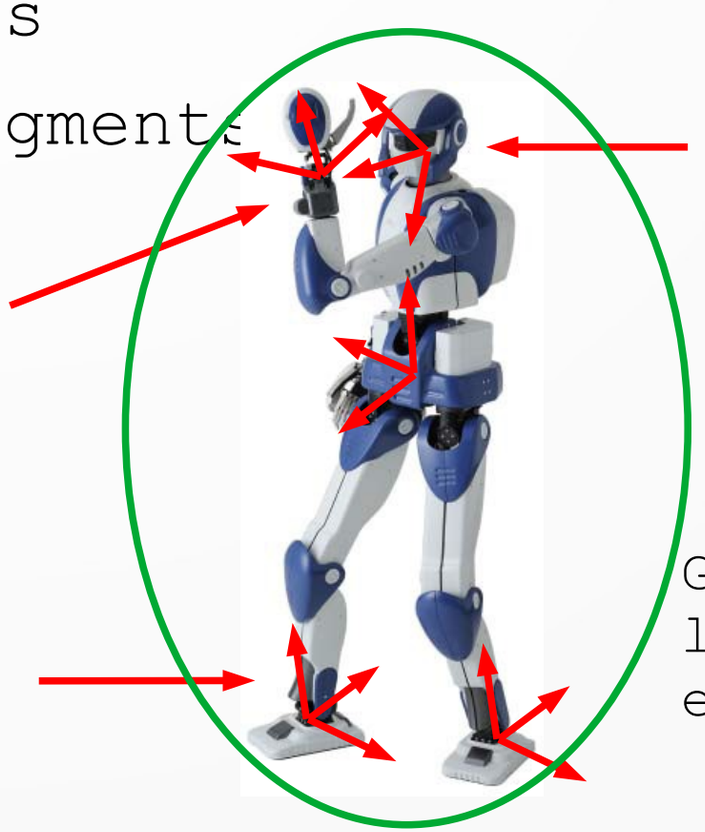


Commande dans l'espace des tâches

- Réification du modèle informatique du robot:
  - Calcul automatique des Jacobiennes
  - Calcul automatique du modèle géométrique direct
  - Extensible à la dynamique directe / inverse
- Limitation : manque de généricité
  - Une tâche (ou un ensemble de tâches) prédéfini par contrôleur
  - Multitâche difficile et spécifique au contrôleur
  - Prise en compte des contraintes (butés, auto-collisions) difficile et spécifique au contrôleur

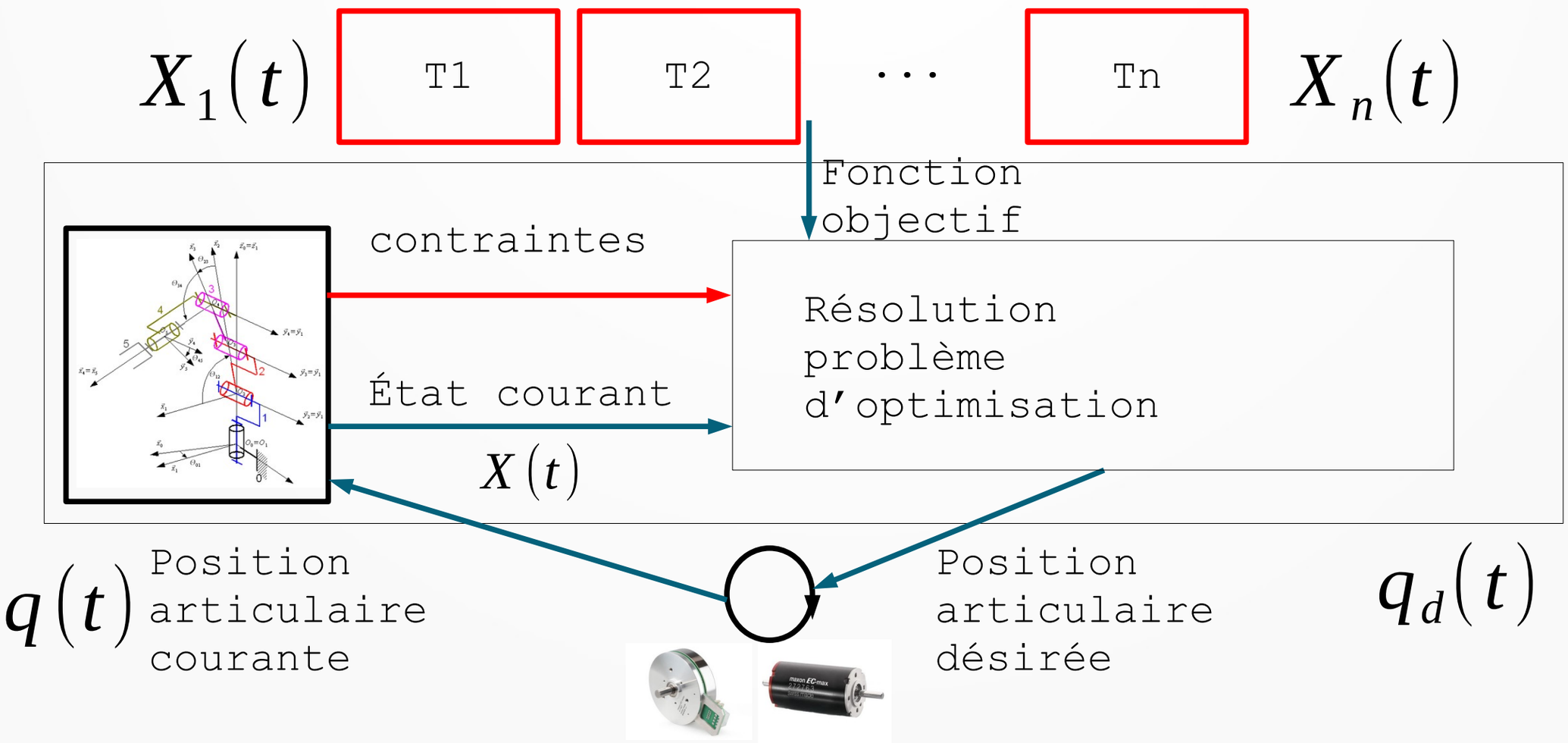
Commande dans l'espace des tâches

- Contrôleurs génériques
  - Permettre de facilement changer de tâche
  - « Combiner » les tâches
  - Contrôler plusieurs segments



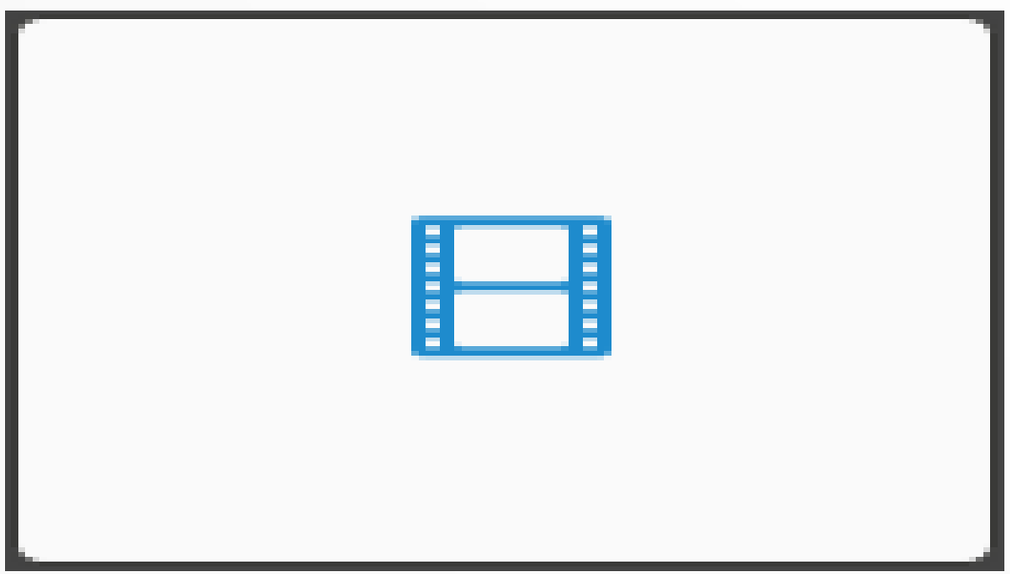
Commande dans l'espace des tâches

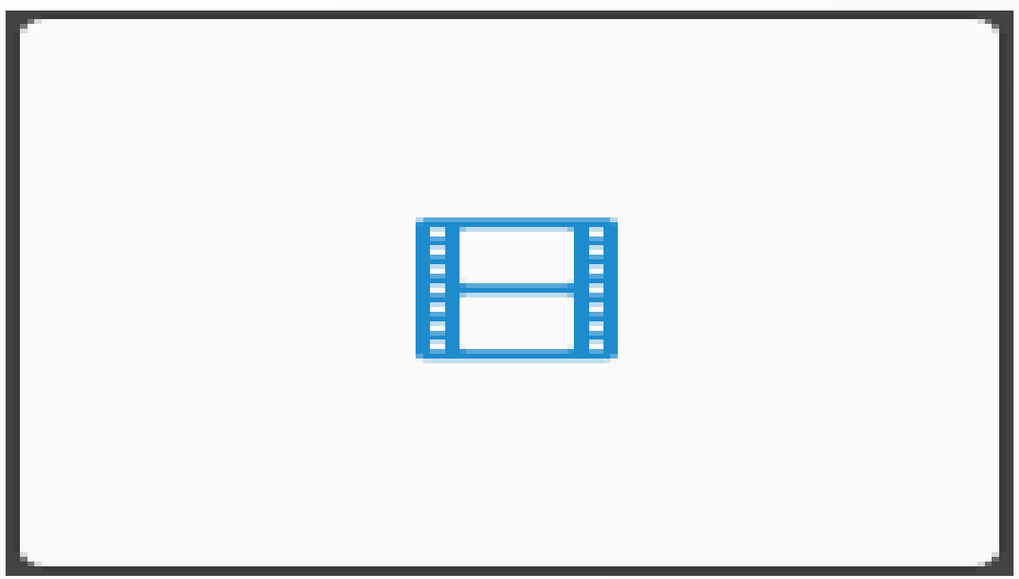
- Contrôleurs génériques



Commande dans l'espace des tâches

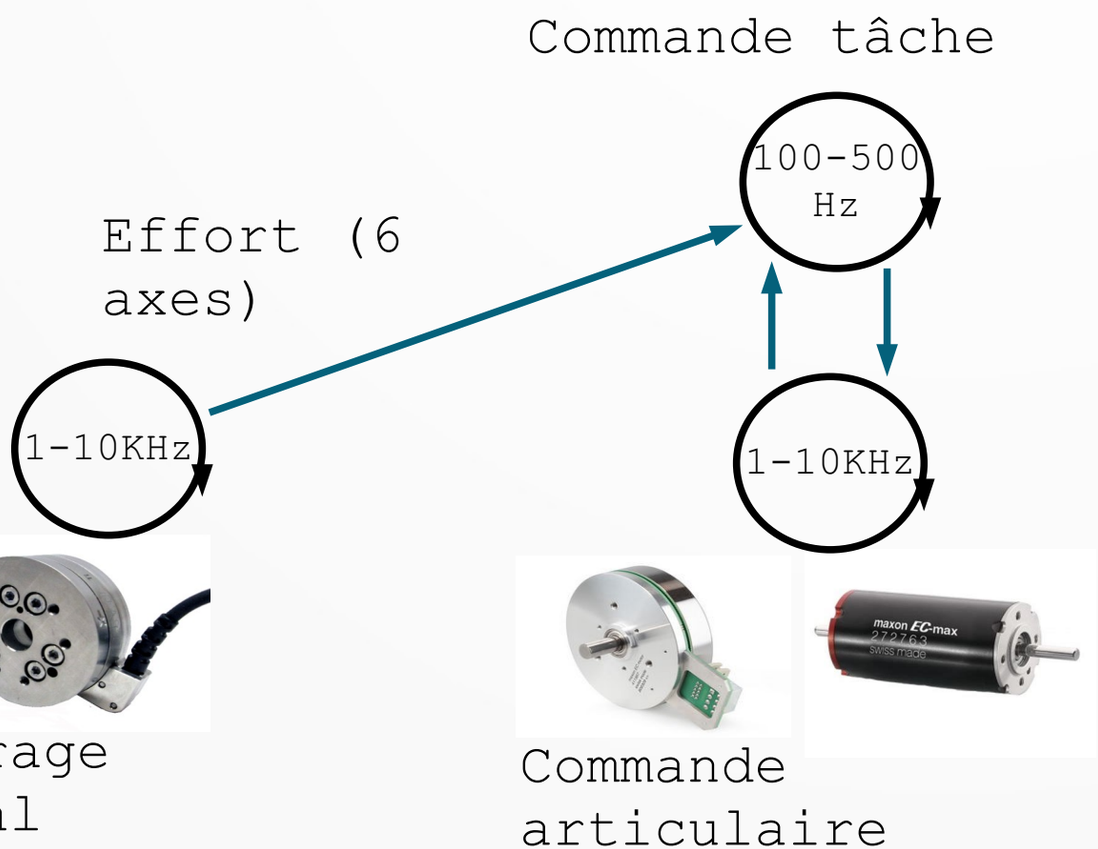
- Contrôleurs génériques





Architecture logicielle

- Filtrage de signaux

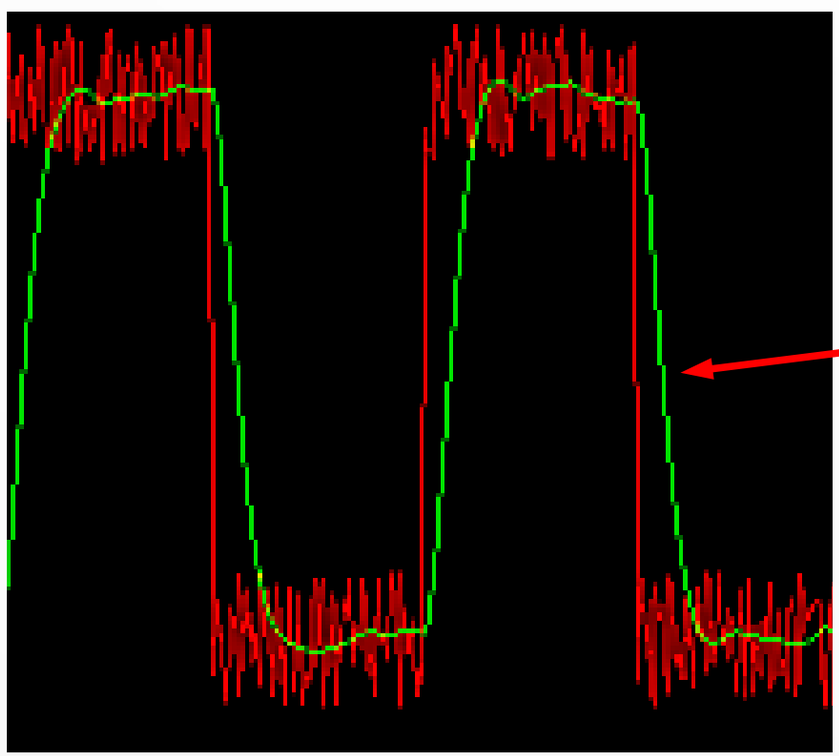


Traitement du signal

- Filtrer le bruit des signaux d'entrée
  - Exemple : filtre passe-bas (1 axe du capteur d'effort)

Signal filtré

Signal brut

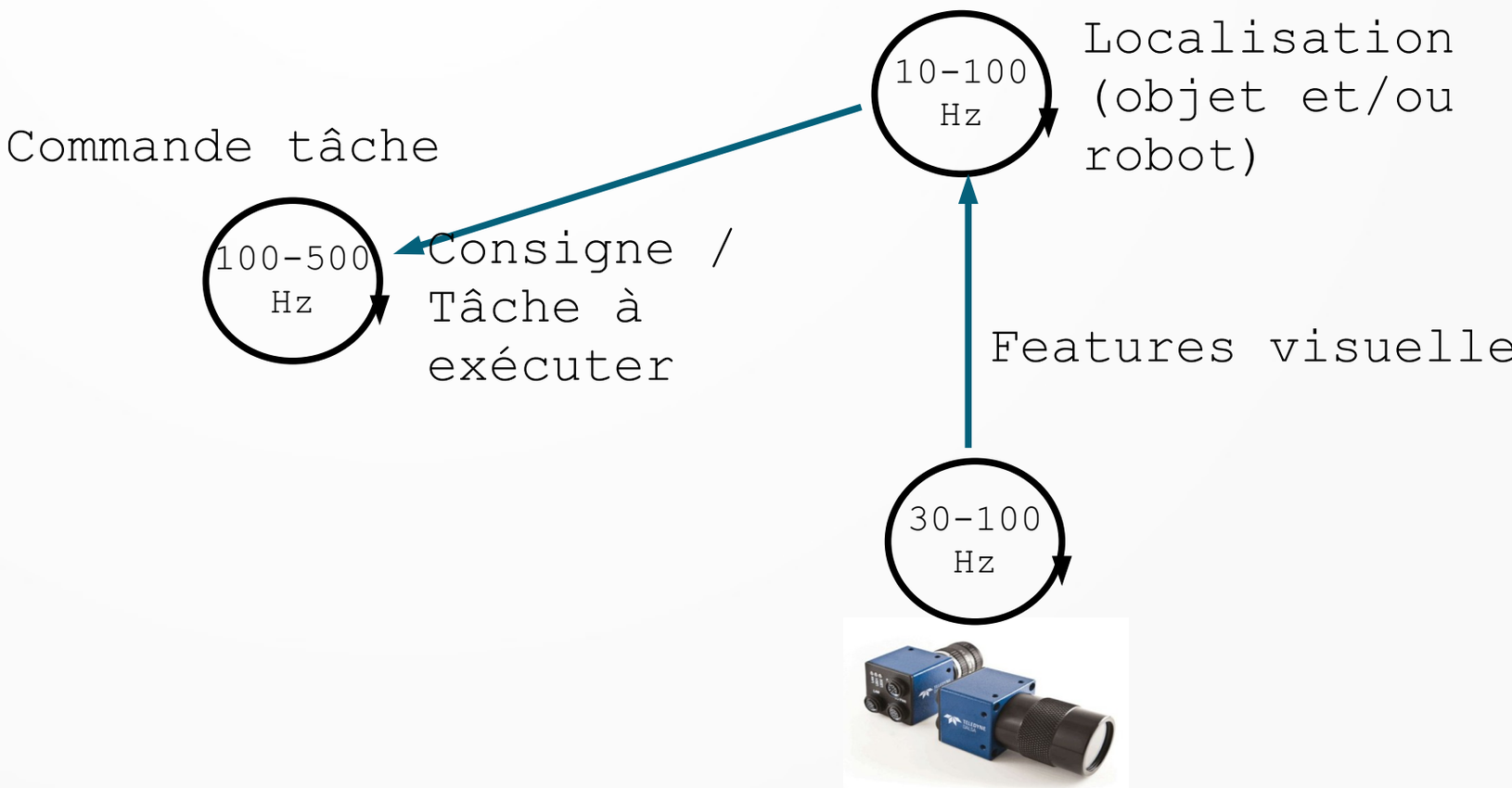


Mesure exploitable dans le contrôleur

Credits : developpez.net

Architecture logicielle

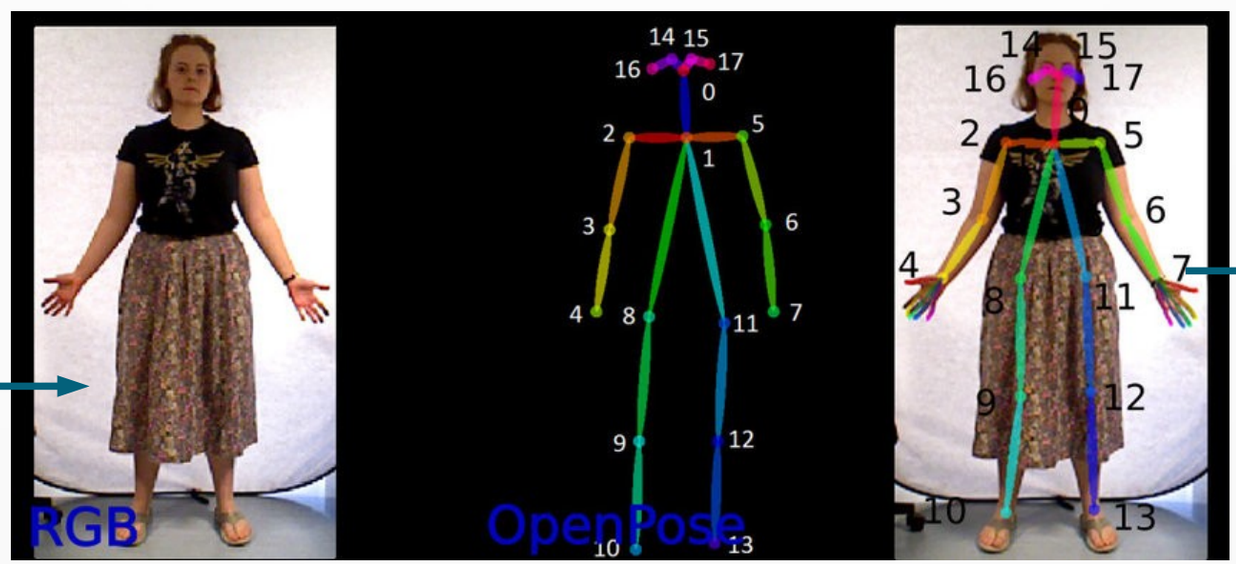
- Perception de l'environnement



Perception de l'environnement

- Traitement d'image
  - Détection d'objets, de personnes, de points d'intérets, etc.
  - Deep learning (CNN): de plus en plus utilisé

acquisition

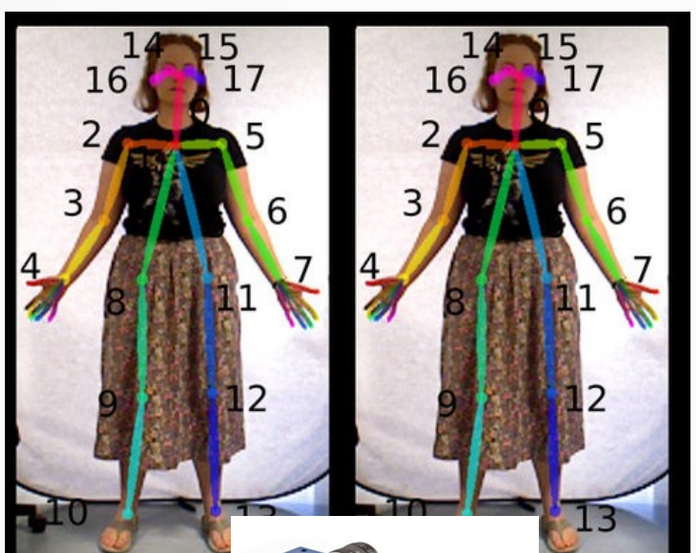


Position 2D des articulations

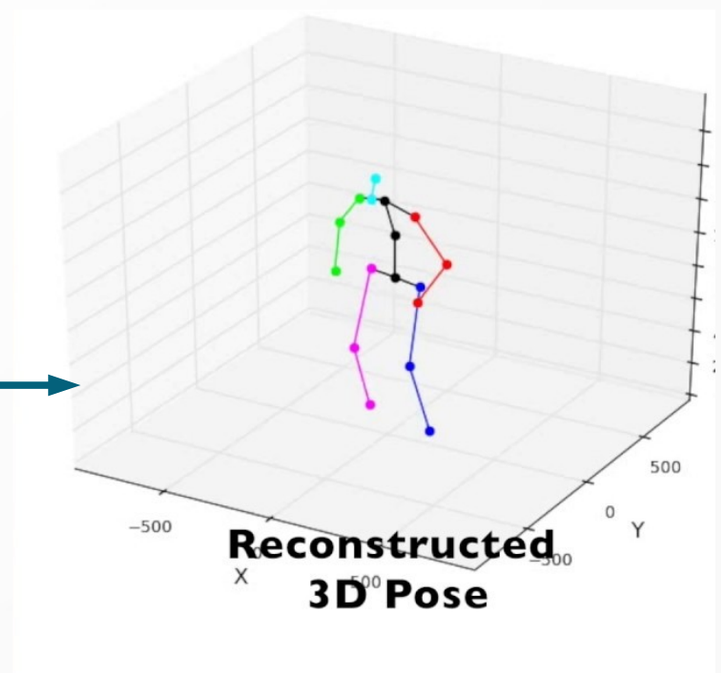
Credits : researchgate.net

Architecture logicielle

- Localisation 3D de la personne
  - repère image → repère robot

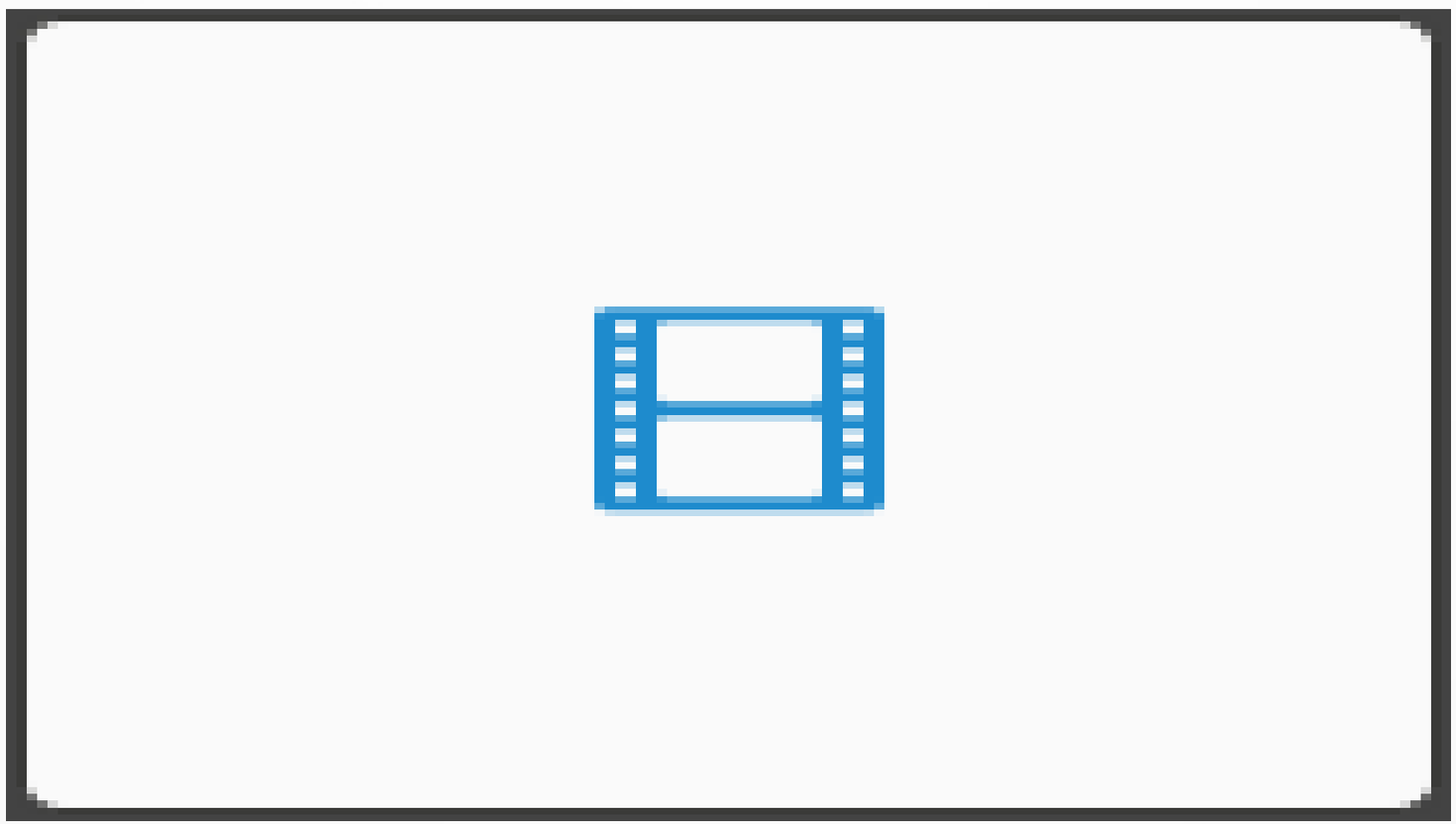


Stereo vision



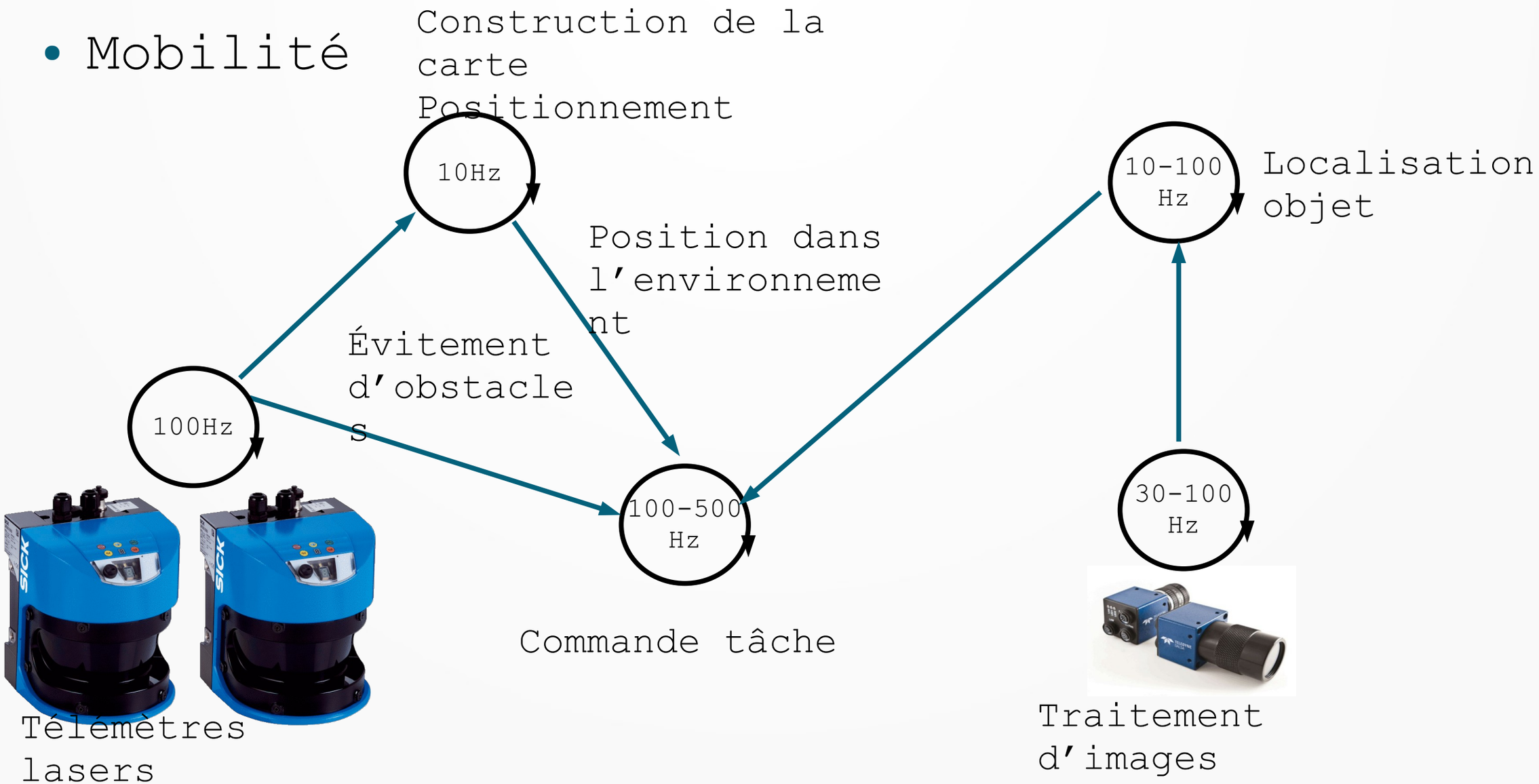
Architecture logicielle

- Localisation 3D de la personne



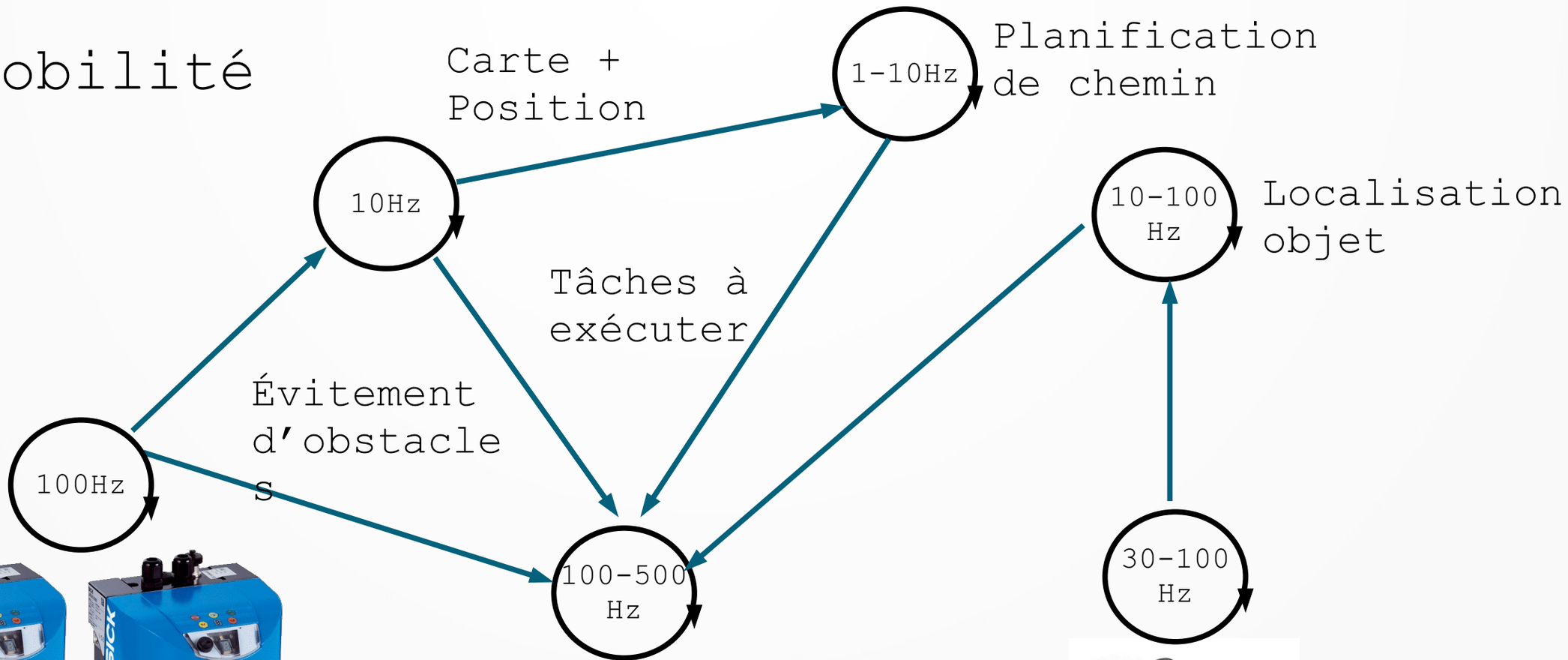
Architecture logicielle

- Mobilité



Architecture logicielle

- Mobilité



Télémètres lasers

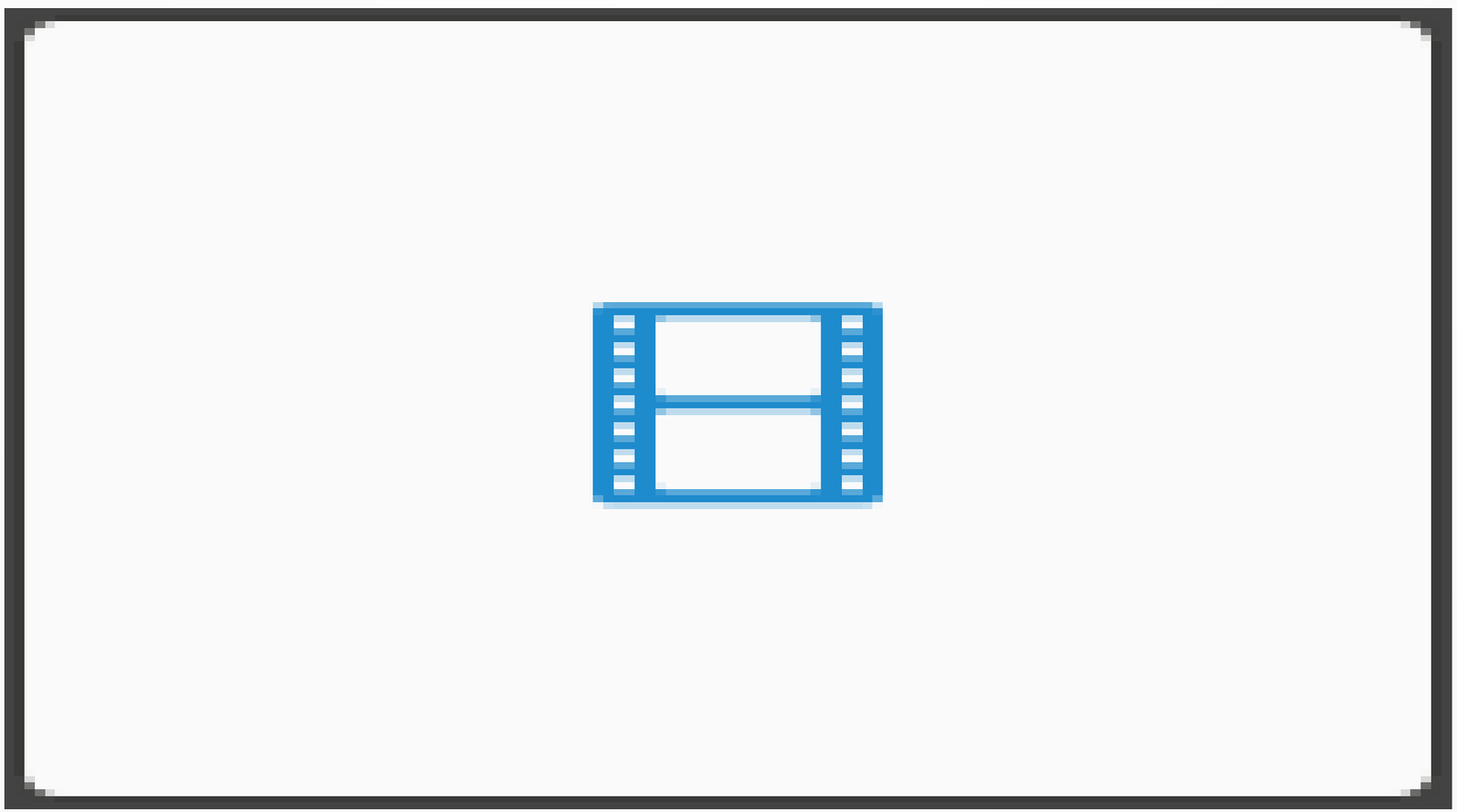
Traitement d'images

Perception de l'environnement

- Mobilité
  - SLAM : Localisation & Cartographie (e.g. algos ICP)
  - Évitement d'obstacles
  - Planification de chemin (e.g. algo A*)
  - Suivi de chemin

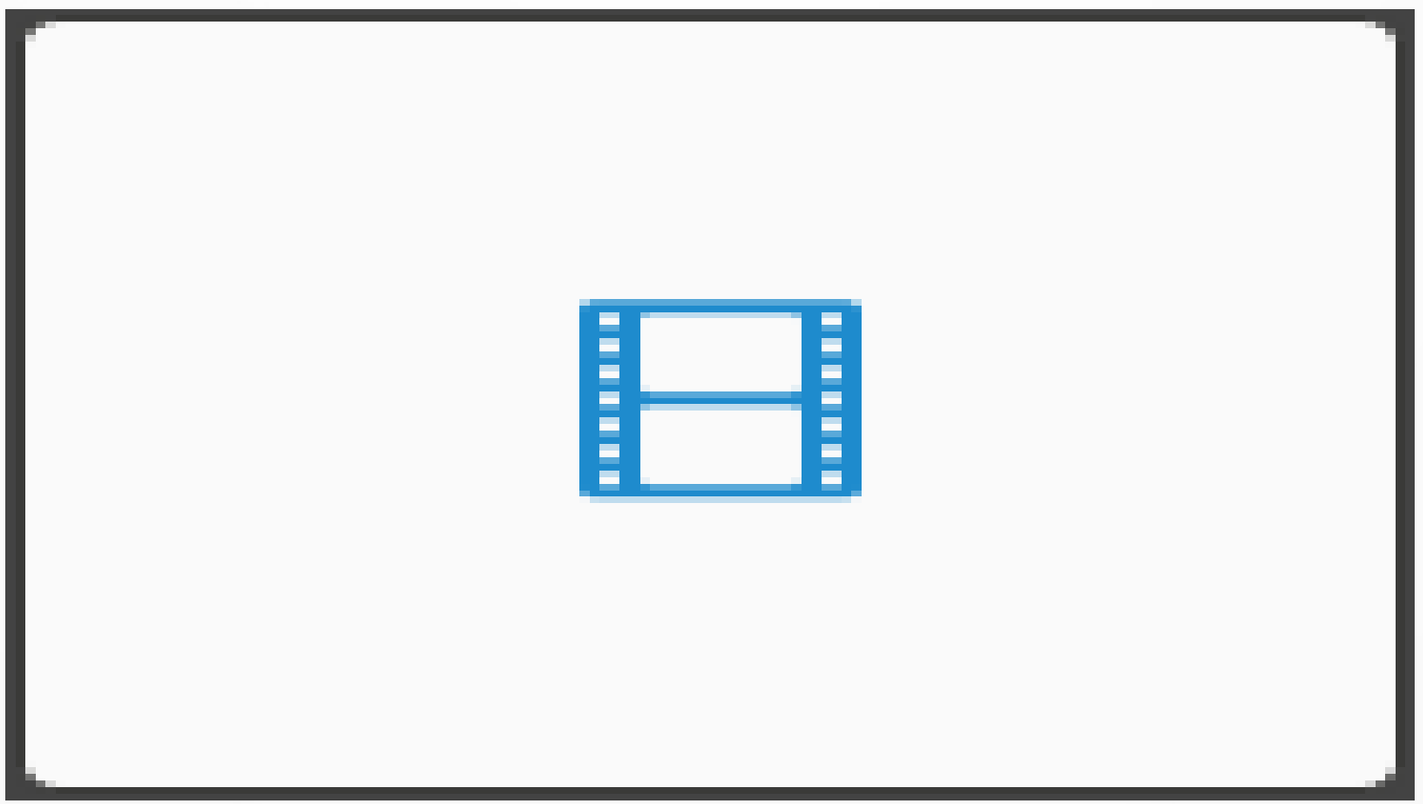
Architecture logicielle

- SLAM



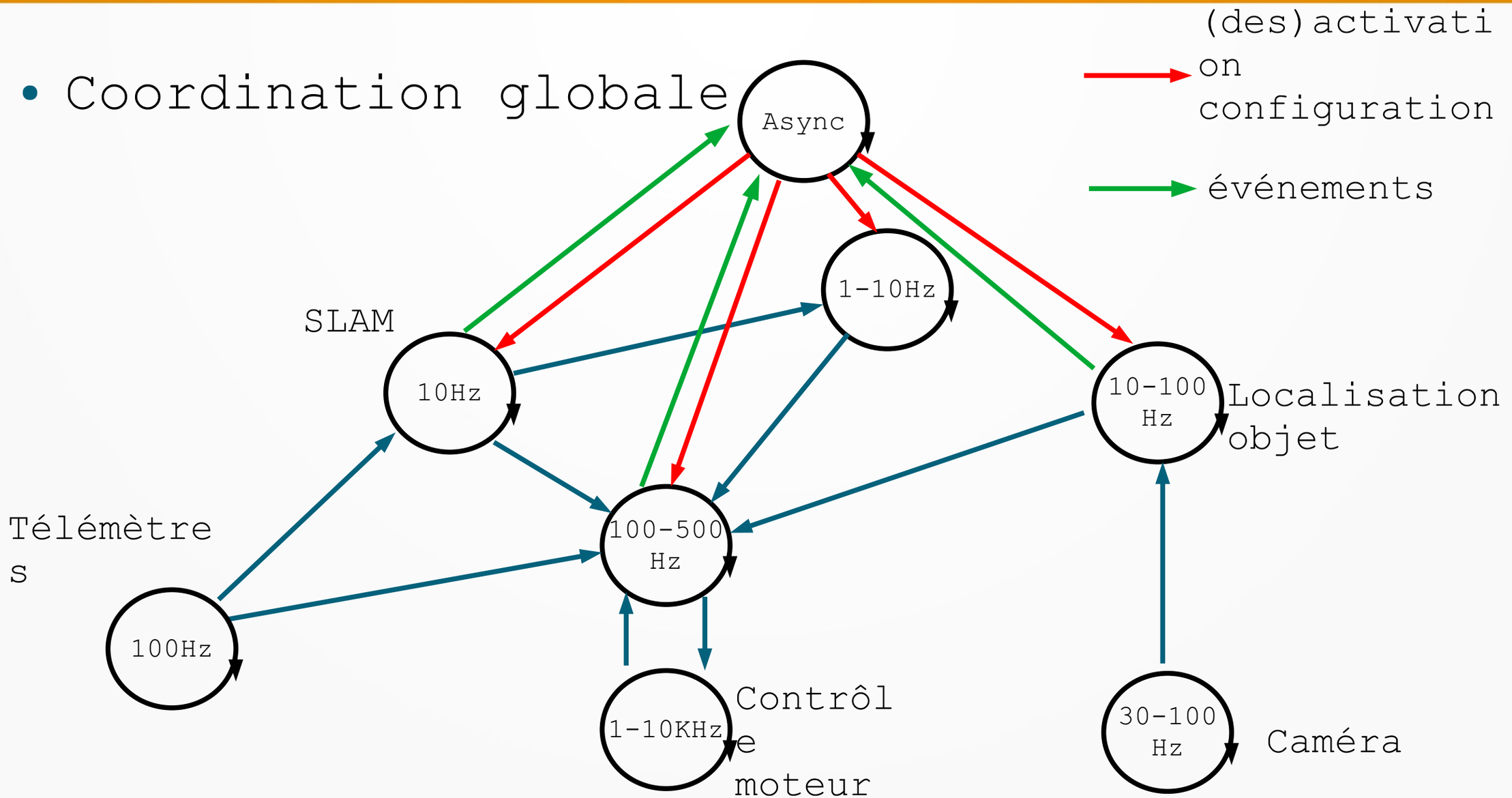
Architecture logicielle

- Anticipation et évitement d'obstacles



Architecture logicielle

- Coordination globale



Architecture logicielle

- Coordination globale
  - Modèle d'exécution asynchrone (FSM)
  - Configuration :
    - Définir les tâches à exécuter, les consignes associées aux tâches
    - Critères de détection
  - Événements
    - Objet/personne détectée
    - Tache terminée

Architecture logicielle

- État des lieux
  - Architecture logicielle des robots gagne en complexité
    - De nombreux types d'algorithmes
    - Variété de matériels
    - Des contraintes temps-réels à gérer
  - Des outils (ROS) existent pour gérer cette complexité
    - Facile d'utilisation
    - Pas de réflexion méthodologique poussée

Plan

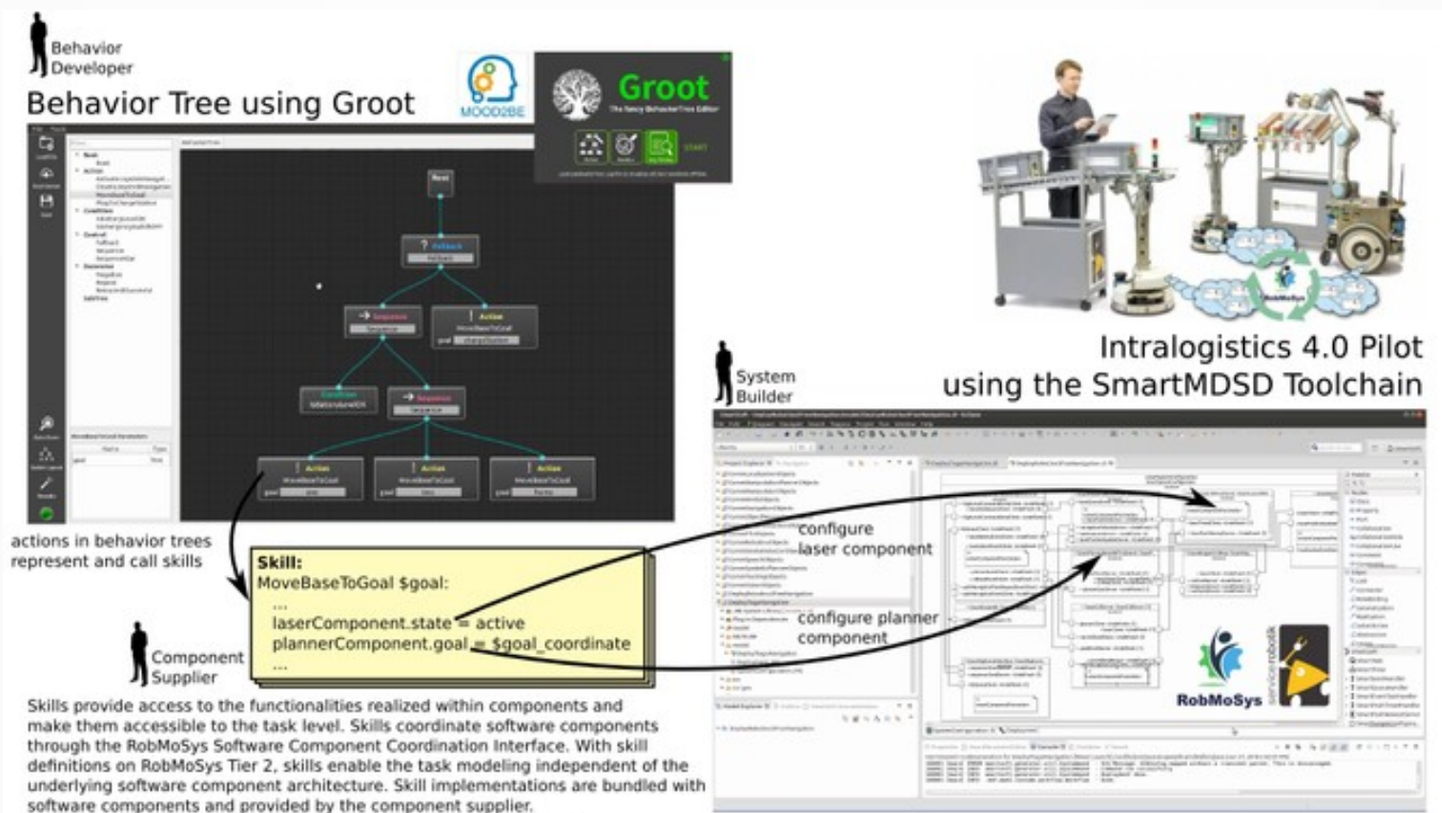
- Introduction
- Principes de base
- Architecture logicielle
- **Nouvelles tendances**
- Conclusion

Programmation de mission

- Objectifs : comportements autonomes complexes
- Programmation « simplifiée » de plus haut niveau
  - Déclaration des fonctionnalités et ressources disponibles
  - Définition de comportement de plus haut niveau (behaviors, skills)
  - Composition de comportements
  - Mission : Comportement de plus haut niveau
    - Peut être décrit par un non expert
    - Peut être (partiellement) planifié

Programmation de mission

- Exemple d'outil : les behavior trees
  - Issu du jeu vidéo



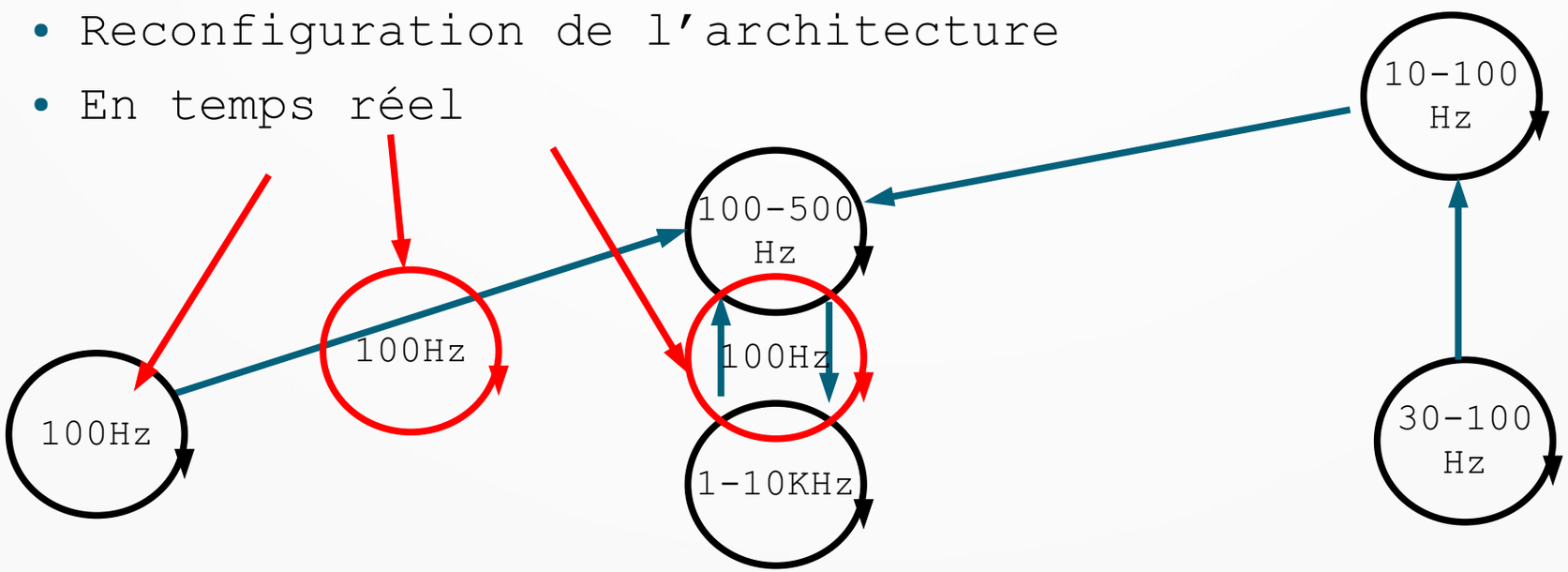
Credits : robmosys.eu

Programmation de mission

- Exécution de missions/comportements
  - Assurer la tolérance aux fautes
    - Détection et Diagnostic de fautes
    - Recouvrement automatique
  - Garantir le respect de critères de performance
    - Permet de faire des choix automatique pour le recouvrement de fautes
    - Automatique et contextuel
    - Exemple : le robot a assez d'énergie pour revenir à sa base

Programmation de mission

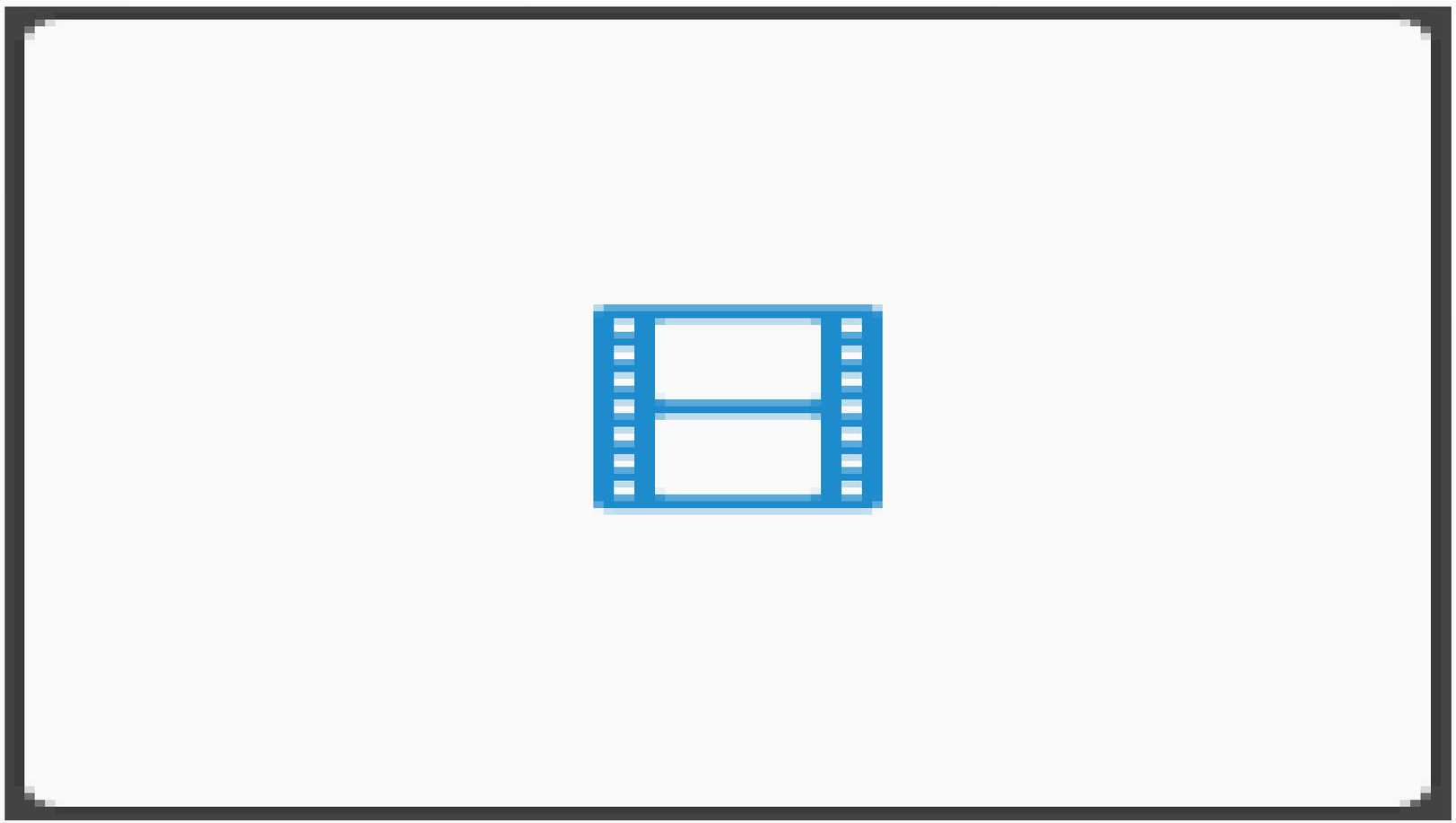
- Détection et Diagnostic
  - Permanent : matériel/drivers/aspects système
  - Contextuel : enf fonction de l'état de la mission/environnement
  - Problème : ajouter/enlever du code de détection d'erreur
    - Reconfiguration de l'architecture
    - En temps réel



Programmation de mission

- Recouvrement et respect de critères de performance
  - Calculer une manière d'exécuter le plan/comportement
  - Respectant des critères de performance
  - Prenant en compte l'état du robot (pannes)
  - Si pas de solution : recouvrement = re-planification de la mission

Programmation de mission

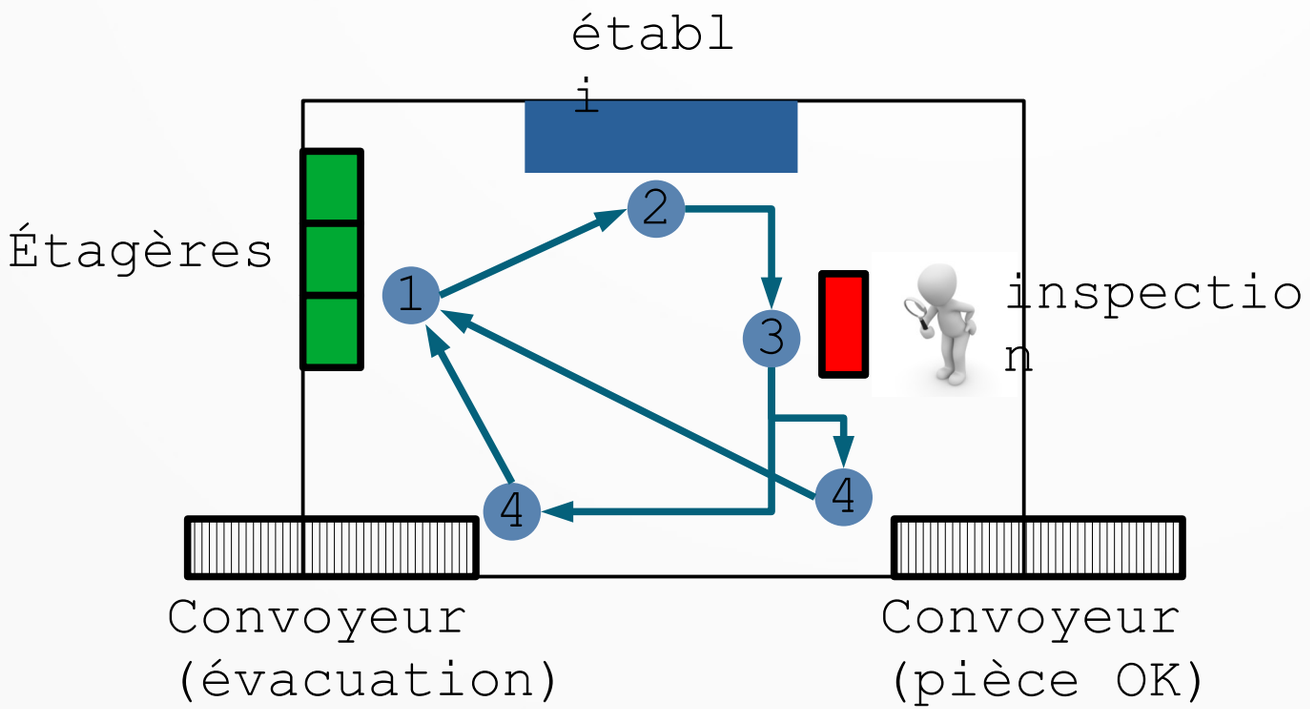


Programmation intuitive

- Principe : programmer le robot en utilisant ses capacités propres
  - Définir de nouveaux comportements/mission
    - téléopération
    - collaboration physique/visuelle/verbale
  - En utilisant :
    - ses comportements disponibles de base
  - Sans utiliser :
    - De langage de programmation…
    - Explicitement des descriptions de comportement

Programmation intuitive

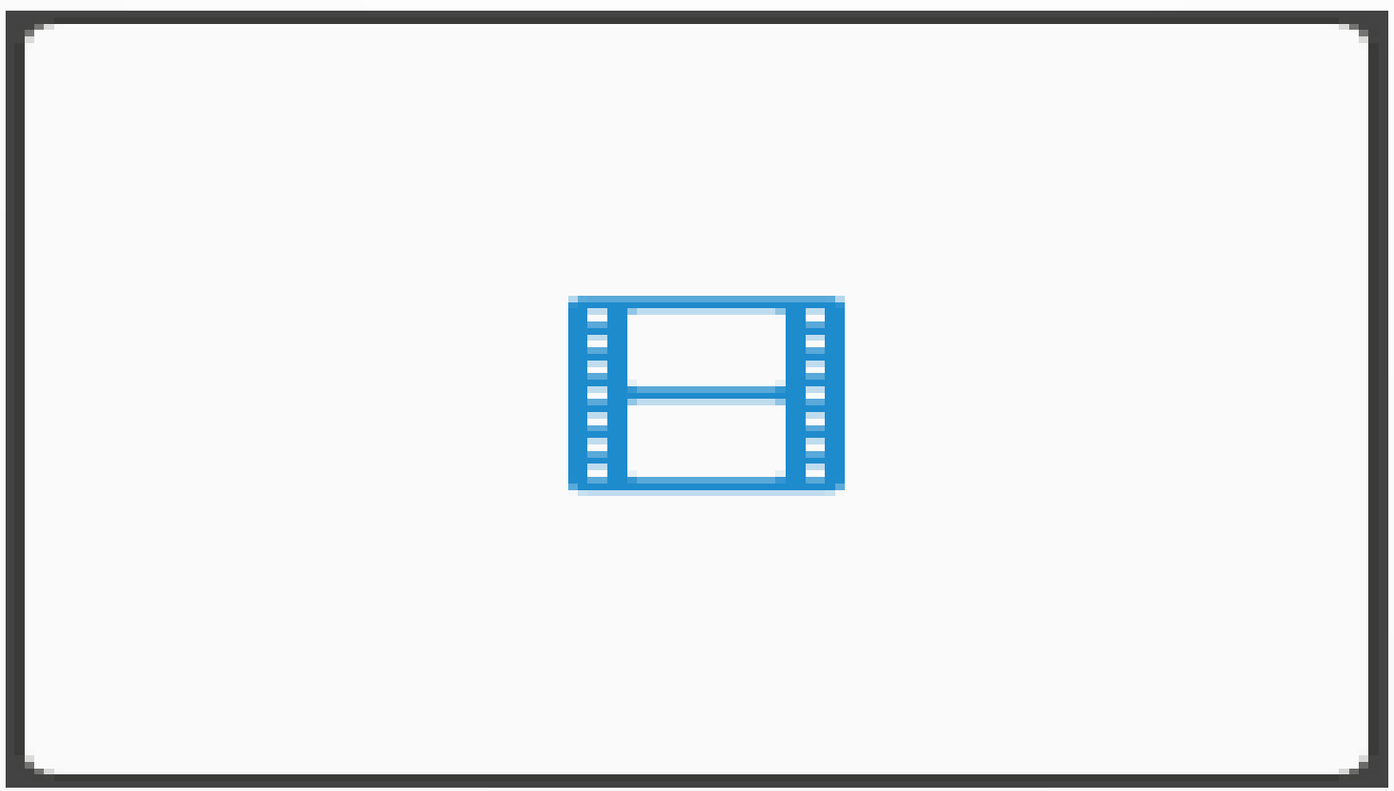
- Scénario « idéal » : cellule d'assemblage
  - Apprendre au robot à assembler une piè



1. Prendre les élément
2. Assembler les éléments
3. Attendre décision humain
4. Évacuer l'objet

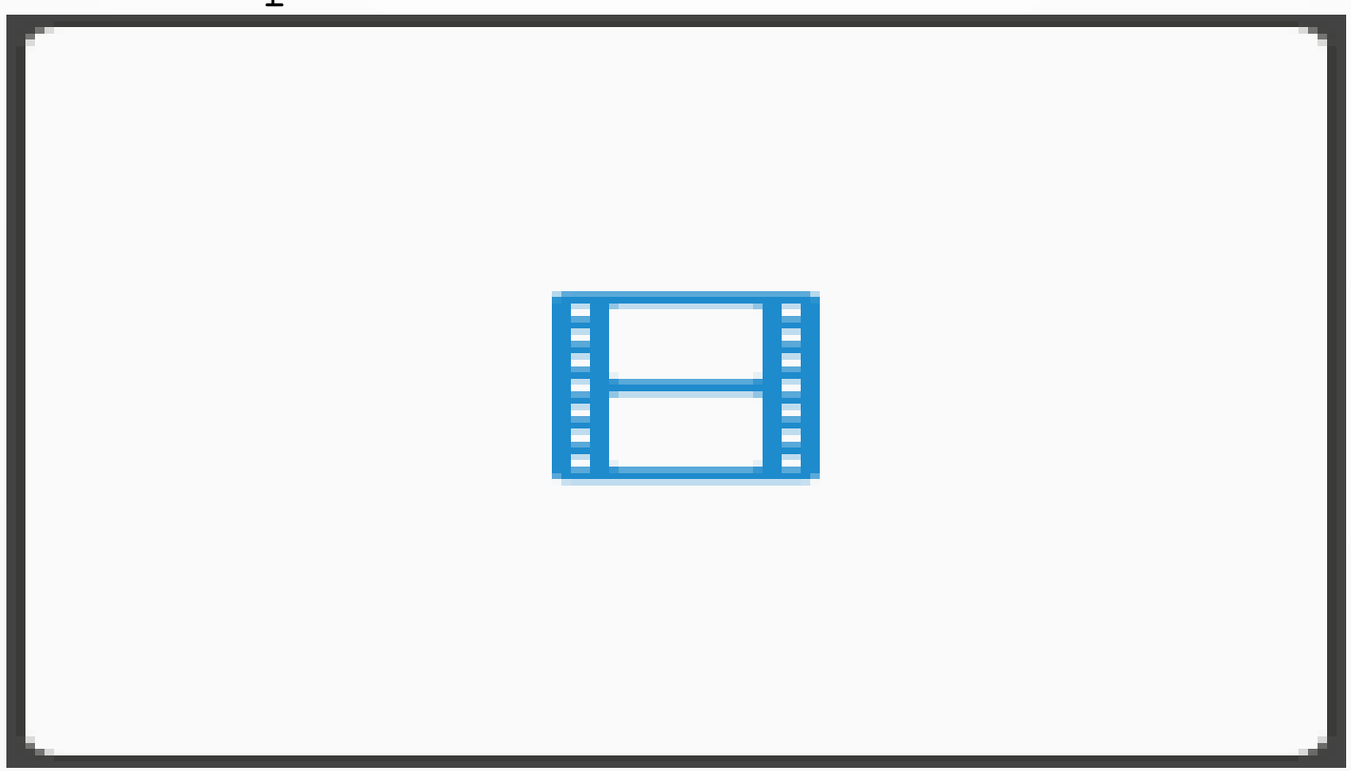
Programmation intuitive

- Exemple : utiliser la collaboration physique pour « montrer » les gestes à réaliser



Programmation intuitive

- Exemple : utiliser la collaboration :
  - Physique : pour définir les points les actions
  - Visuelle : pour donner des ordres directs



Programmation intuitive

- Problèmes ouverts :
  - Apprendre des gestes de manipulation complexe
    - Compréhension des actions à réaliser sur l'objet
    - Acquérir une connaissance minimale de l'objet (au moins sa géométrie)
  - Compréhension minimale de la scène
    - « Prendre tel type d'objet dans les étagères » et pas « Prendre tel objet à telle position »
    - Détection & positionnement des objets de la scène et leurs relations
  - Etc.

Programmation intuitive

- Utiliser des dispositifs de réalité virtuelle/augmentée
  - Visualiser ce que le robot apprend
    - nouveaux comportements
  - Définir des éléments virtuels
    - positions à atteindre dans l'espace
    - Zone d'exclusion
  - Généralement : définir via des interfaces ce que le robot ne sait pas apprendre
    - type d'objet à détecter, modèle de l'objet

Plan

- Introduction
- Principes de base
- Architecture logicielle
- Nouvelles tendances
- **Conclusion**

Conclusion

- Beaucoup de sujets « informatiques »
  - Ingénierie logicielle :
    - Amélioration des middleware (aspect temps réel)
    - Langages/modèles de composants et d'architecture
    - Langages/Modèles de programmation de comportements
  - Intelligence Artificielle :
    - Planification de mission/comportements
    - Apprentissage automatique (statistique ET symbolique)

Merci pour votre attention

Question ?