

Robotique Industrielle

UPJV, Département EEA

M1 3EA, Parcours RoVA, EC15

Fabio MORBIDI

Laboratoire MIS

Équipe Perception Robotique

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

**Lundi 13h30-16h30 (CM ou TD, salle CURI 304)
(TP, salle TP204)**

Année Universitaire 2023-2024



Cours de robotique : Parcours RoVA

- *Vision pour la robotique* (M1, Kachi)
- *Perception avancée et robotique mobile* (M2, Morbidi)
- *Localisation et navigation de robots* (M2, Morbidi)
- *Systèmes robotiques hétérogènes et coopératifs* (M2, Morbidi)
- *Asservissement visuel* (M2, Mouaddib/Caron)
- *Commande des robots* (M2, Rabhi)
- *Surveillance distribuée de systèmes multi-agents* (M2, Kachi)
- *Projet transversal* (M2, Caracotte/Kachi/Morbidi)



Plan du cours

Chapitre 1 : Introduction

- 1.1 Définitions
- 1.2 Classification des robots
- 1.3 Constituants d'un robot
- 1.4 Caractéristiques d'un robot
- 1.5 Générations de robots
- 1.6 Programmation des robots
- 1.7 Utilisation des robots



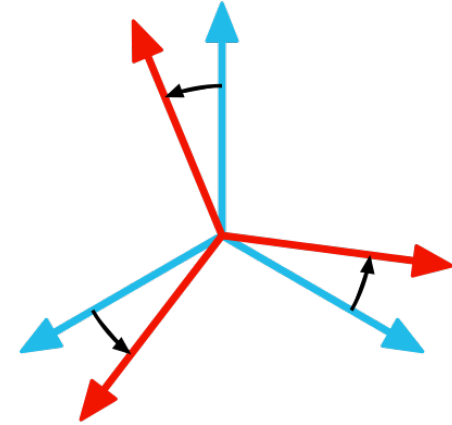
Chapitre 2 : Fondements Théoriques

- 2.1 Pose d'un corps rigide
 - Matrices de rotation et autres représentations de l'orientation
 - Transformations homogènes

Plan du cours

2.2 Cinématique

- Dérivée d'une matrice de rotation
- Vitesse angulaire d'un repère
- Mouvement de corps rigide
- Torseur cinématique



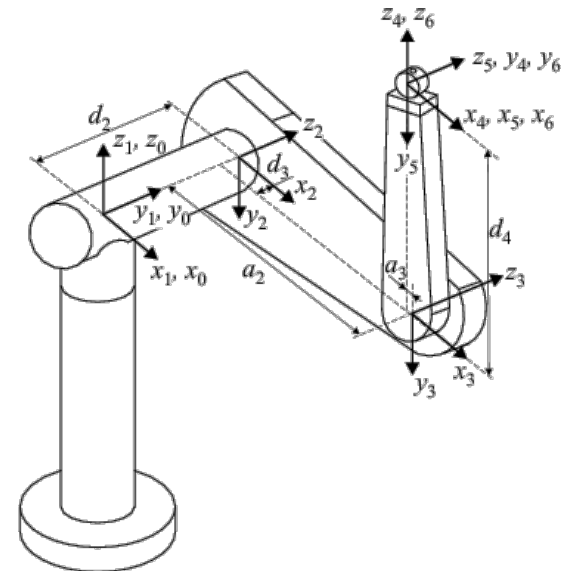
Chapitre 3 : Modélisation d'un Robot

3.1 Modèle géométrique

- Convention de Denavit-Hartenberg
- Modèle géométrique direct
- Modèle géométrique inverse

3.2 Modèle cinématique

- Modèle cinématique direct
- Modèle cinématique inverse

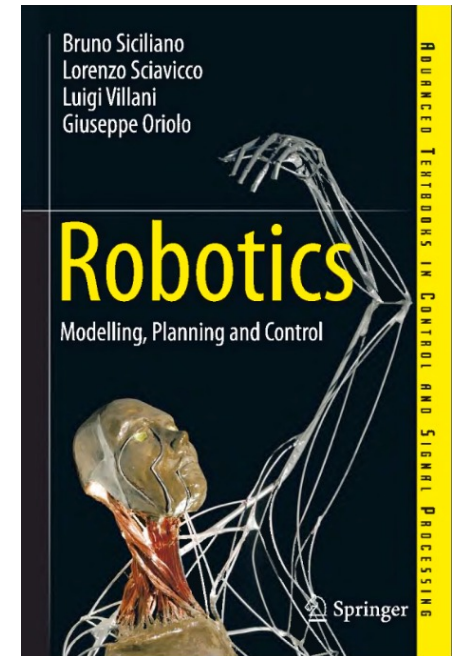


Bibliographie

- *Robotics: Modelling, Planning and Control*,
B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo,
Springer, 1^{re} éd., 2009, 632 pages (Ch. 1, 2, 3, 6)
 - *Theory of Robot Control*,
C. Canudas de Wit, B. Siciliano, G. Bastin (Eds),
Springer, 1996, 398 pages (Ch. 1)
 - *Robotique: Aspects Fondamentaux*,
J.-P. Lallemand, S. Zeghloul, Masson, 1994, 312 pages
 - *Robot Modeling and Control*,
M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, Wiley, 1^{re} éd., 2006, 496 pages
 - *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*,
K.M. Lynch, F.C. Park, Cambridge University Press, 2017, 618 pages (Ch. 2)
- Disponible à l'adresse :
http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Modern_Robotics

Matériel de cours :

http://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Teaching_RI23-24.html



Connaissances préalables

On suppose que vous avez de bonnes connaissances de :

- *Algèbre linéaire* (transposée, inverse, déterminant et rang d'une matrice, produit matriciel, etc.)
- *Calcul différentiel* (gradient, matrice jacobienne, etc.)

et que vous avez des notions de base de *programmation* (Matlab, langage C)

... à réviser dans les prochains jours !!!

Structure du cours : CM (3 chapitres), 3 TD

Contrôle : 1 DS (exercices, questions sur le cours), 3 TP

$$\text{Note finale} = \frac{1}{2} \left[\text{DS} + \left(\frac{\text{TP1} + \text{TP2} + \text{TP3}}{3} \right) \right]$$



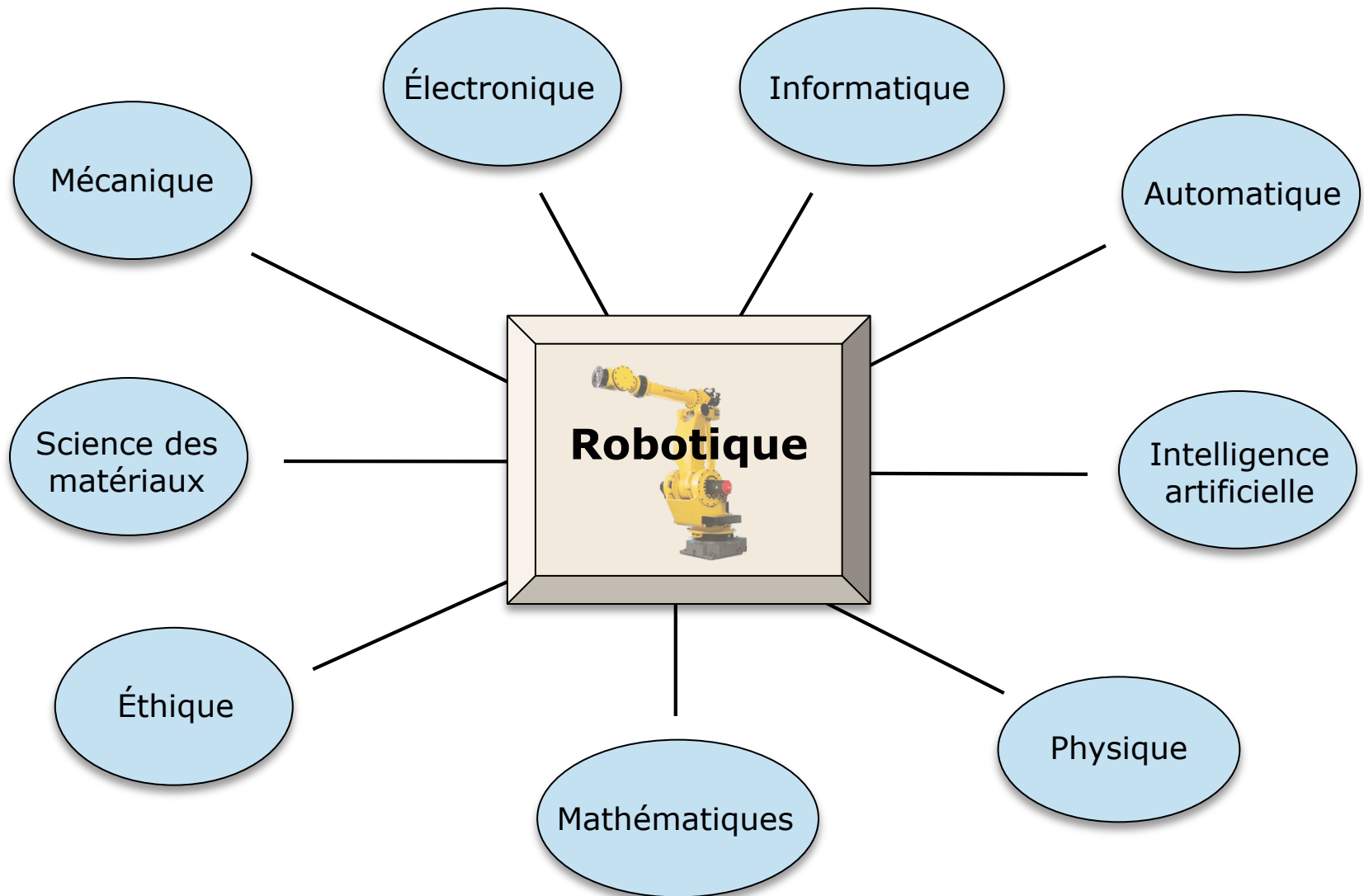
(avec Daniel Rodrigues da Costa)

Plan du cours

Chapitre 1 : Introduction

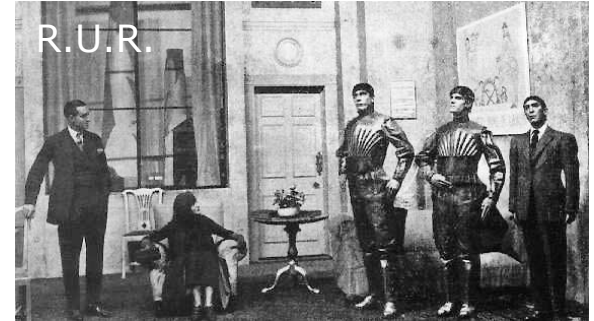
- 1.1 Définitions
- 1.2 Classification des robots
- 1.3 Constituants d'un robot
- 1.4 Caractéristiques d'un robot
- 1.5 Générations de robots
- 1.6 Programmation des robots
- 1.7 Utilisation des robots

Robotique : un domaine pluridisciplinaire !

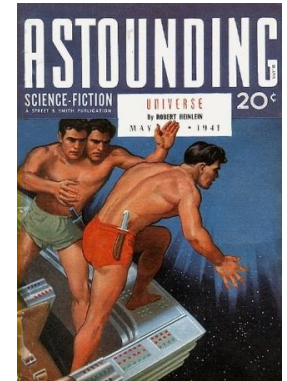


1.1 Définitions

Étymologie : mot tchèque *robota* (travail forcé), dans la pièce de théâtre "*Rossum's Universal Robots*" de Karel Capek, 1920



Robotique : mot utilisé pour la 1^{re} fois par l'écrivain Isaac Asimov dans le récit de SF "Liar !" (*Astounding Science Fiction*, mai 1941)



Définition 1 (Larousse): "*Un robot est un appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable*"

Définition 2: "*Un robot est un système mécanique polyarticulé mû par des actionneurs et commandé par un calculateur qui est destiné à effectuer une grande variété de tâches*"

“Un robot est un système mécanique polyarticulé mû par des actionneurs et commandé par un **calculateur** qui est destiné à effectuer une **grande variété de tâches**”

1



7

6



2

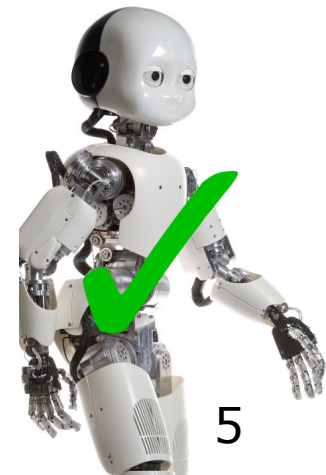


Robots ?!

3



4



5

Un **robot** est la combinaison de *composants matériels* (mécanique, hardware) et *immatériels* (logiciels)

Petit historique :

- 1947 : premier manipulateur électrique téléopéré
- 1954 : premier robot programmable de George C. Devol
- Fin des années 1950 : Joseph Engleberger achète le brevet de Devol et le transforme en un robot industriel sous la marque *Unimate*. En 1962, Engleberger co-fonde avec Devol, *Unimation*, la 1^{re} entreprise de robotique. Pour cette raison, Engleberger est connu comme le "père de la robotique industrielle"
- 1961 : apparition d'un robot sur une chaîne de montage de General Motors à Trenton, New Jersey
- 1961 : premier robot avec contrôle en effort
- 1963 : utilisation de la vision pour commander un robot (asservissement visuel)



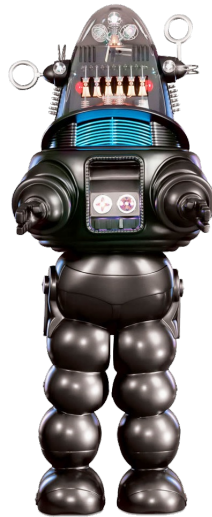
J. Engleberger
(1925-2015)



... au cinéma



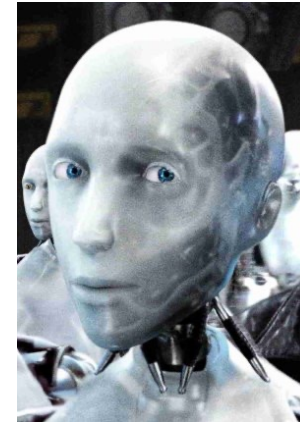
Robot Chappie
(*Chappie*, 2015)



Robby the Robot
(*Forbidden Planet*, 1956)



Robot T-800
(*Terminator*, 1984)



Robot Sonny
(*I, Robot*, 2004)



Robots K2-SO et BB-8
(*Star Wars* ép. VII-IX, 2015-17-19 et *Rogue One*, 2016)



Robot Baymax
(*Big Hero 6*, Walt Disney, 2014)



Alita (*Alita: Battle Angel*, 2019)

1.2 Classification des robots

Les robots mobiles



Robot à roues

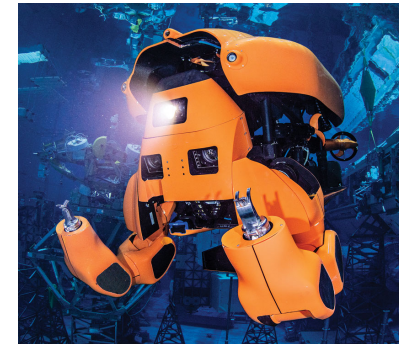


Robot à jambes

[Vidéo](#)



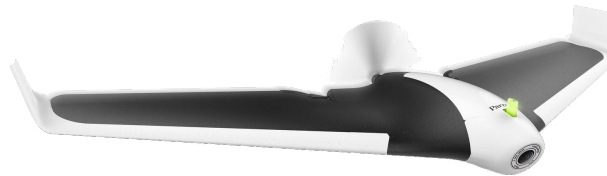
RASSOR (robot minier), NASA



Robot sous-marin



Robot volant
à voile tournante



Robot volant à
voilure fixe



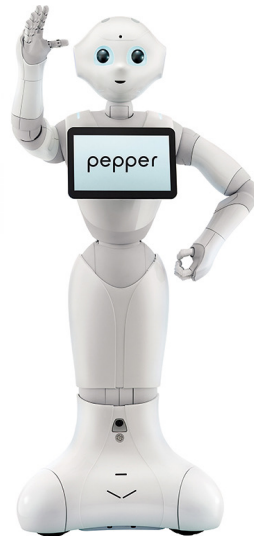
Robot serpent (bio-inspiré)

1.2 Classification des robots

Les robots humanoïdes



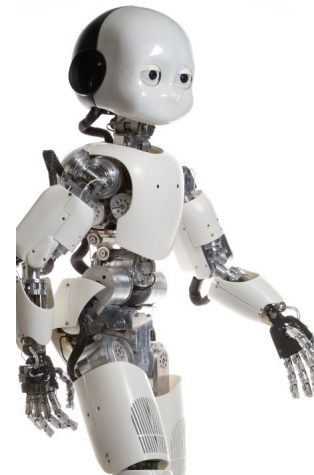
Nao et Pepper
www.aldebaran.com



TALOS
www.pal-robotics.com



Atlas
www.bostondynamics.com
[Vidéo](#)



ICub
www.icub.org

1.2 Classification des robots

Robotique de service

- Robots semi ou complètement autonomes
- Robots réalisant des tâches pour les humains ...
... hormis les *opérations de manufacture*
- Stock de **robots de service pour pros** : ×1.5 en 4 ans* (de 63k à 112k) - 1^{er} secteur: sécurité/défense
- Ventes de **robots domestiques** : ×2 en 4 ans* (de 4.4 millions d'unités à 9.2 millions)
- Ventes de **robots ludiques** : ×2.5 en 4 ans* (de 2.8 millions d'unités à 9.5 millions)

*Début 2008 - fin 2012 (source: IFR)

1.2 Classification des robots

Les robots de service



Aibo

<https://us.aibo.com>



Wakamaru



Furby

Robots ludiques



Whiz



Roomba



Agribot



HP RoboCop



Robomow



Little Oz

Nettoyage, manutention (tondeuse),
surveillance, aide à l'agriculture

1.2 Classification des robots

Les robots industriels (robots manipulateurs)

Robots série (ou sériels)



ABB



Comau



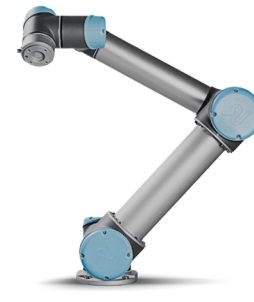
Fanuc



KUKA



Stäubli



Universal
Robots



Yaskawa

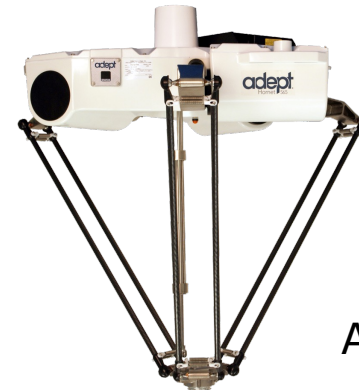
Robots parallèles (delta)



Fanuc

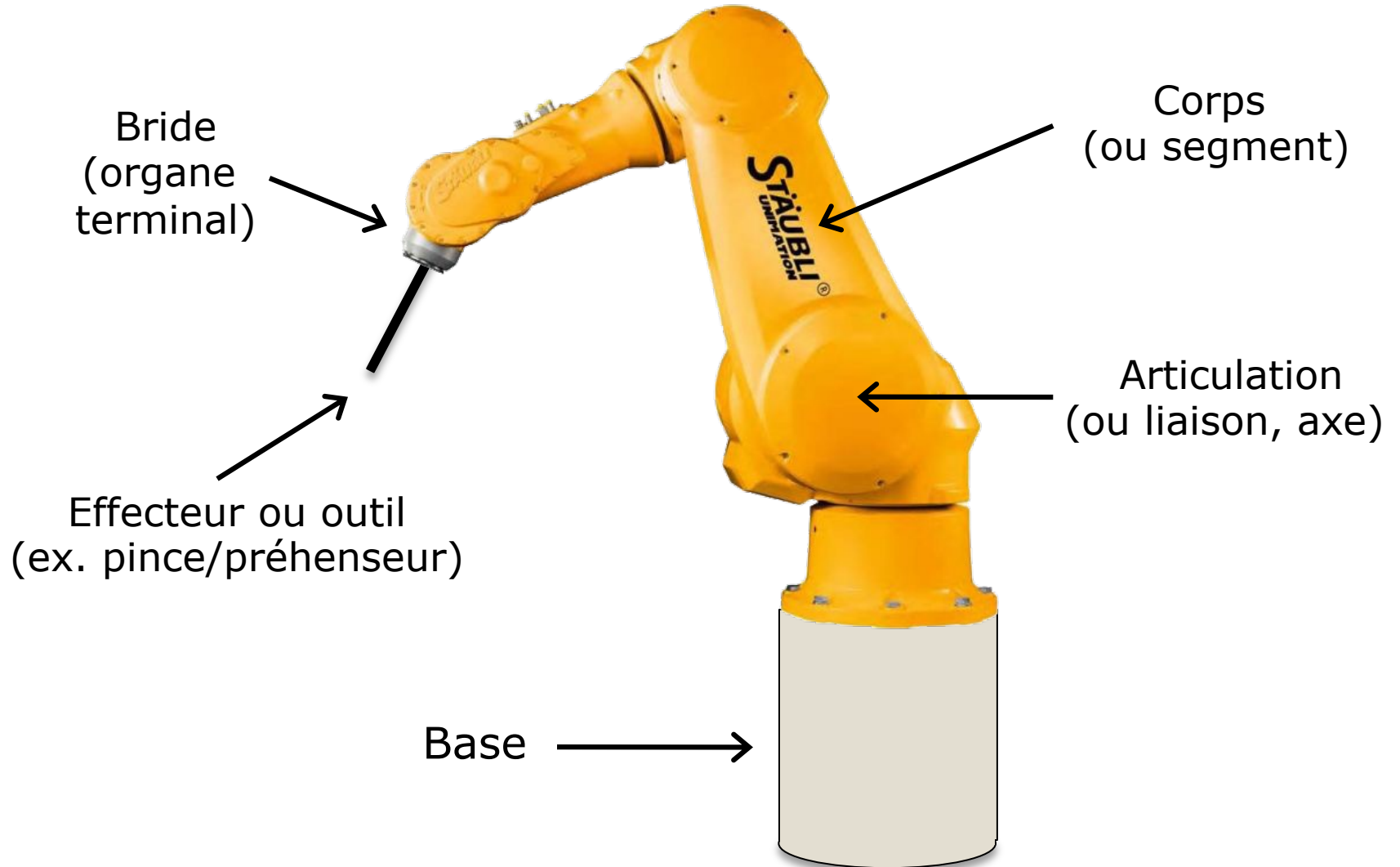


ABB

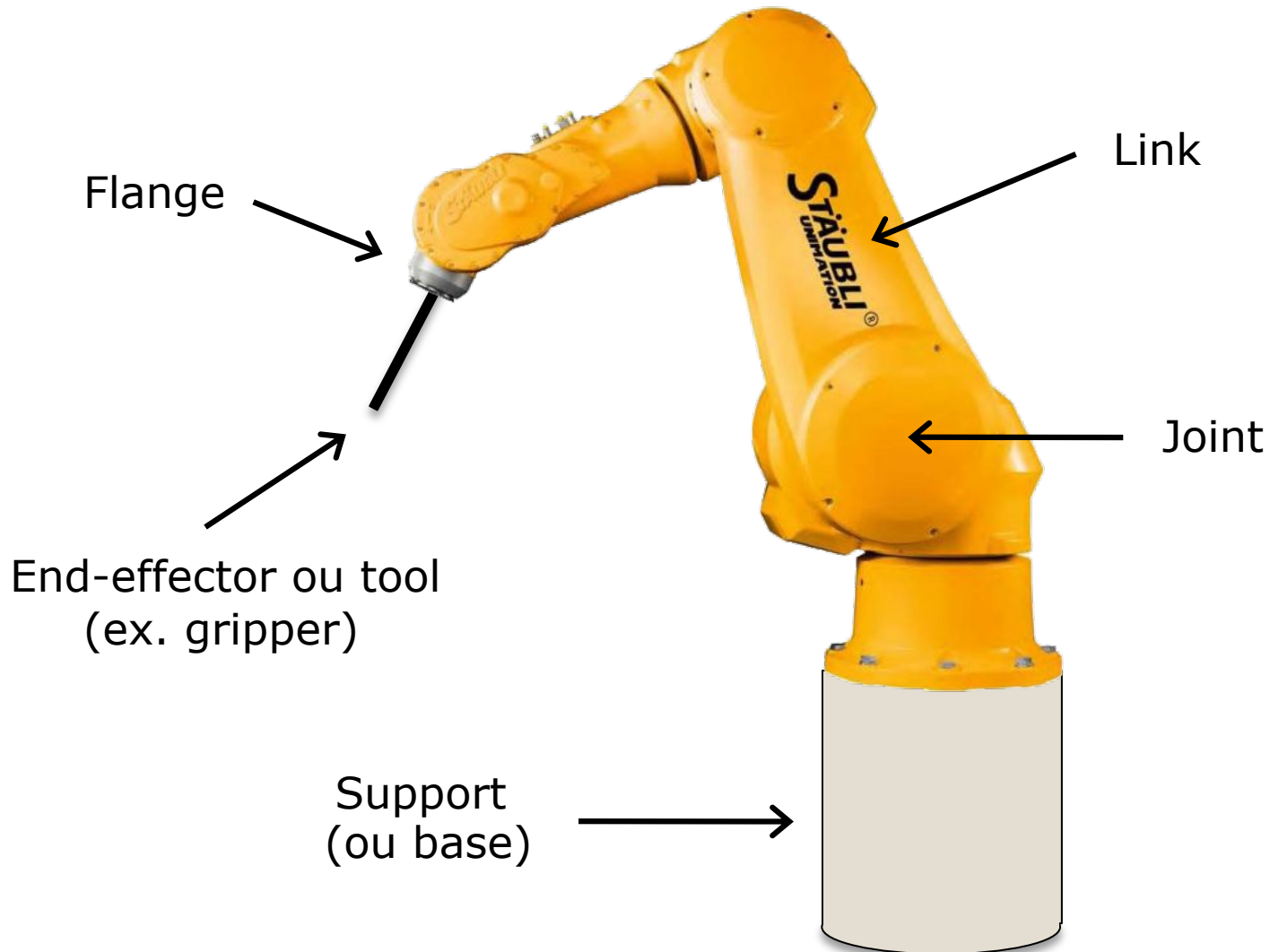


Adept

1.3 Constituants d'un robot

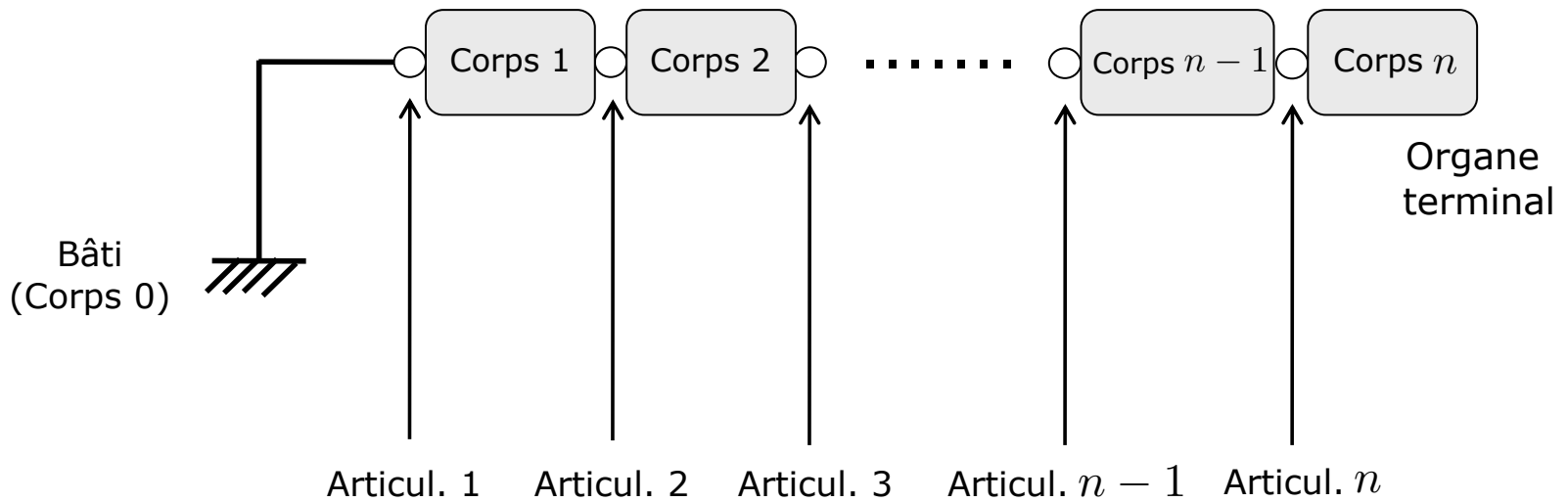


1.3 Constituants d'un robot (voc. anglophone)



1.3 Constituants d'un robot

Robot manipulateur "standard" = n corps mobiles rigides reliés par n articulations



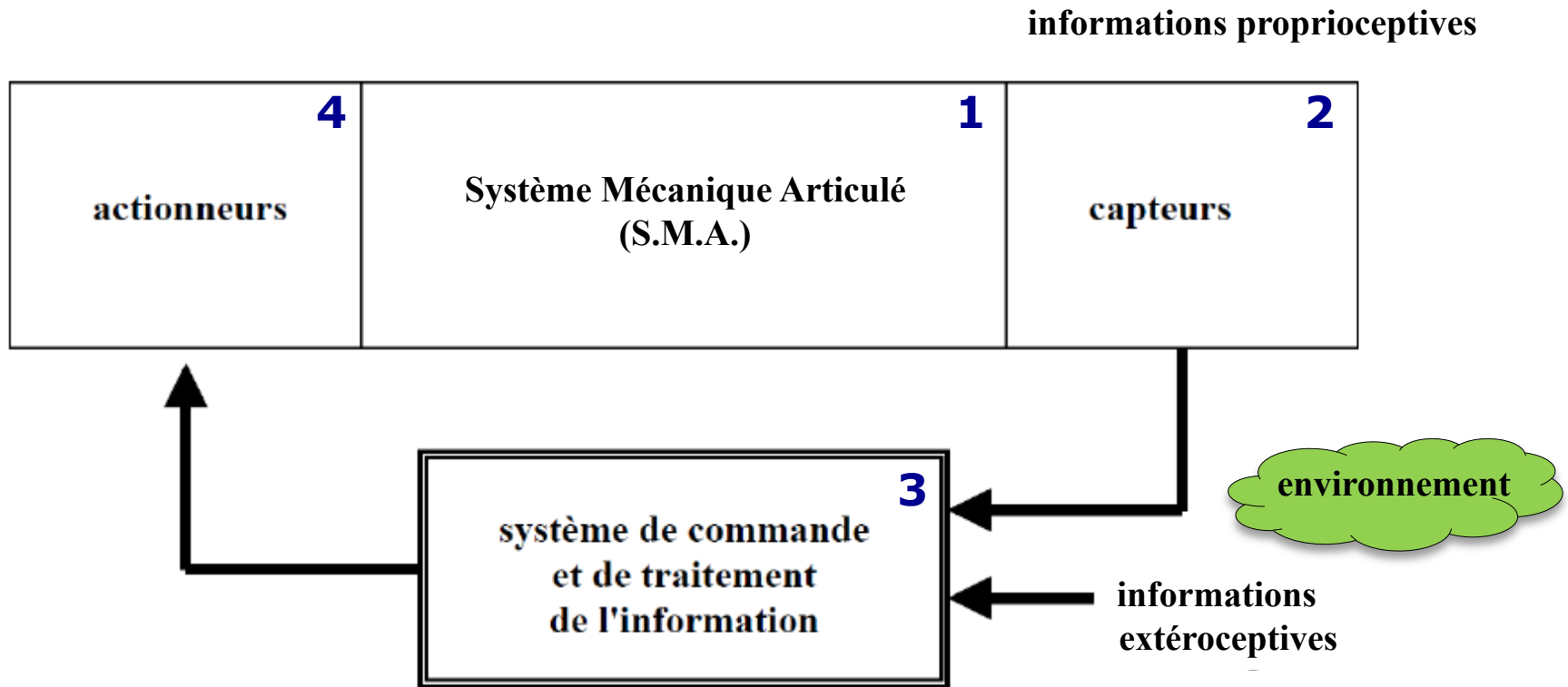
1.3 Constituants d'un robot

Systeme Mécanique Articulé (S.M.A.)

- Un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du *bras humain*. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action
- Son *rôle* est d'amener l'organe terminal dans une pose (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données
- Son *architecture* est une chaîne cinématique de corps, (généralement rigides) assemblés par des articulations
- Sa *motorisation* est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des dispositifs appropriés

1.3 Constituants d'un robot

On distingue classiquement **quatre éléments** principaux dans un robot manipulateur

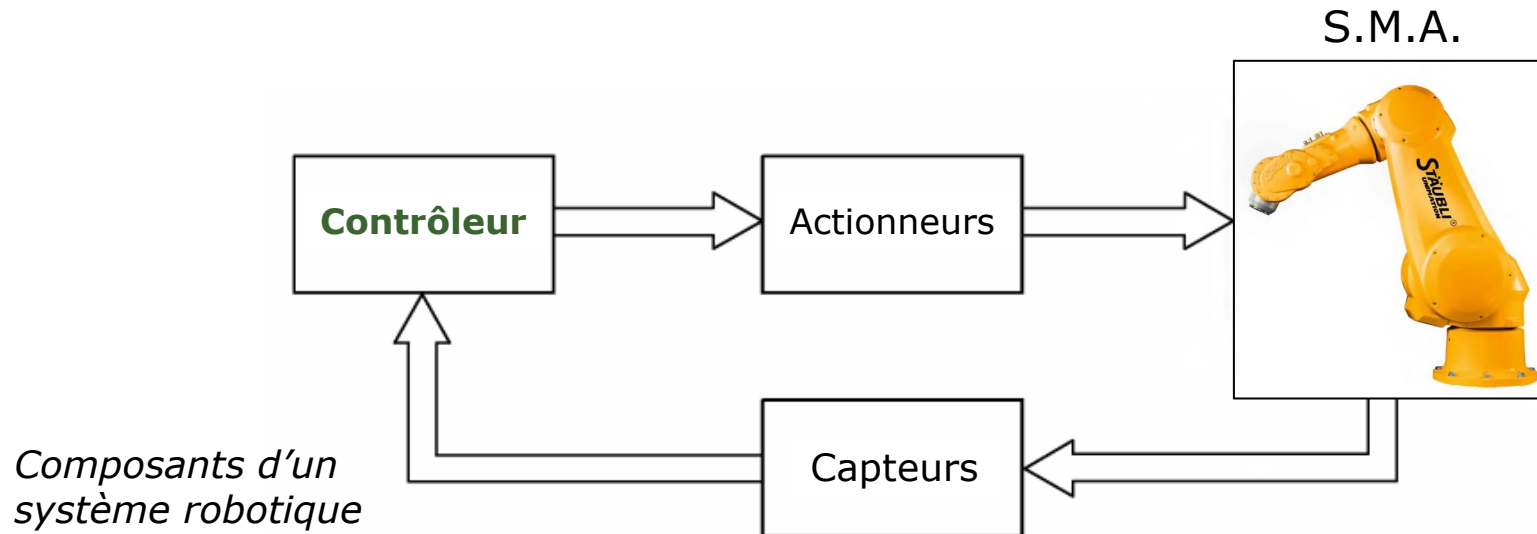


Modélisation d'un robot

La modélisation est possible à plusieurs niveaux

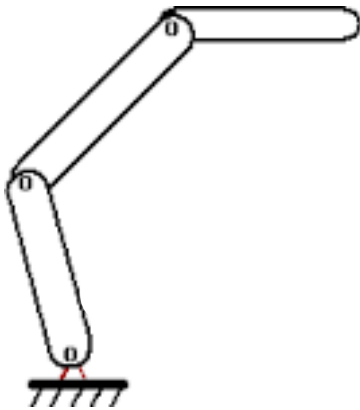
Elle dépend des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée. Il en découle des:

- **Modèles géométriques, cinématiques** et **dynamiques** à partir desquels peuvent être engendrés les mouvements du robot
- **Modèles statiques** qui décrivent les interactions (forces/couples) du robot avec son environnement

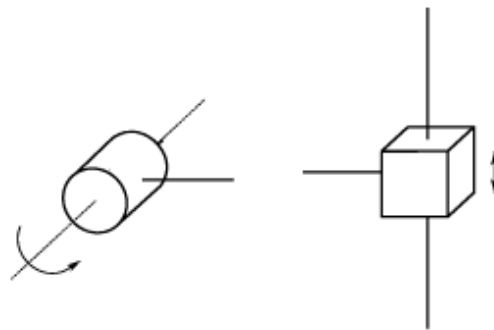


Modélisation d'un robot

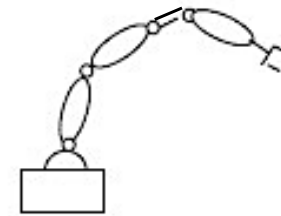
- L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée
- La difficulté varie selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée
- En particulier, entrent en ligne de compte :
 - Nombre de degrés de liberté (DDL) (par ex. 3, 4, 6, 7)
 - Type des articulations (rotoïde, prismatique, sphérique, etc.)
 - Type de chaîne: ouverte ou fermée



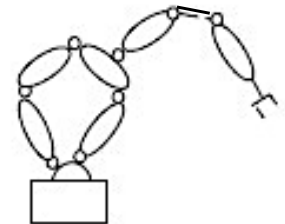
Robot à 3 DDL



Articulation rotoïde (à gauche)
et prismatique (à droite)



Chaîne ouverte



Chaîne fermée

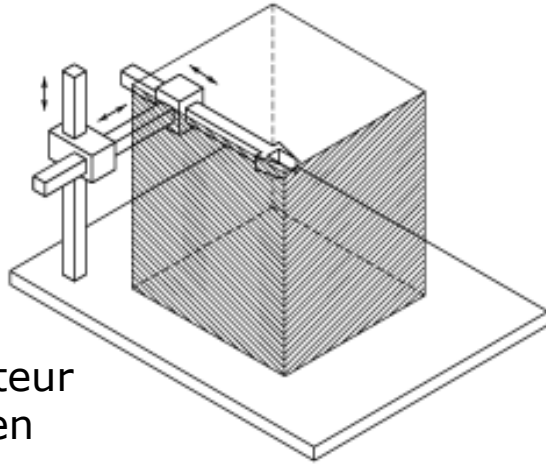
1.4 Caractéristiques d'un robot

Un robot doit être choisi en *fonction de l'application* qu'on lui réserve

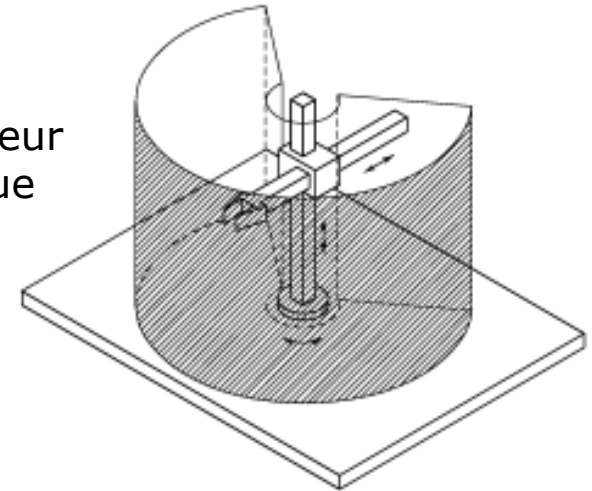
Voici quelques paramètres à prendre en compte:

- La **charge maximale transportable** (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (c'est-à-dire, en élongation maximale)
- L'**architecture du S.M.A.** : le choix est guidé par la tâche à réaliser. Par exemple, robots à structure rigide vs robots avec articulations flexibles
- L'**espace** ou **volume de travail** ("*workspace*" en anglais), est défini comme l'ensemble des points atteignables par l'organe terminal du robot. L'**espace de travail dextre** est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec *toutes les orientations possibles* de l'organe terminal : il est un sous-ensemble de l'espace de travail

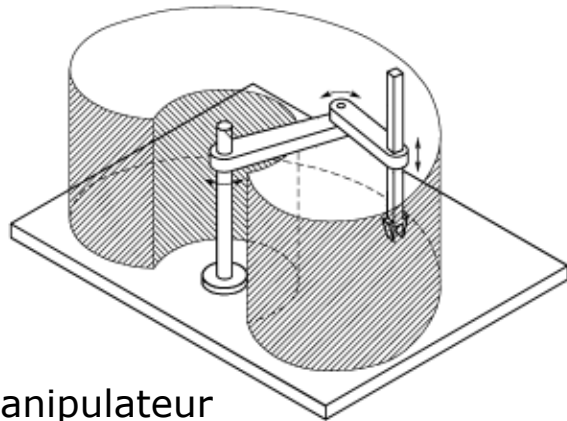
Exemples d'espace de travail



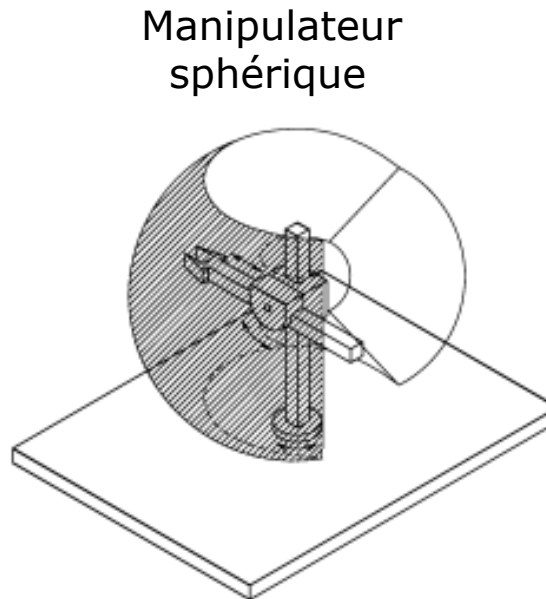
Manipulateur
cartésien



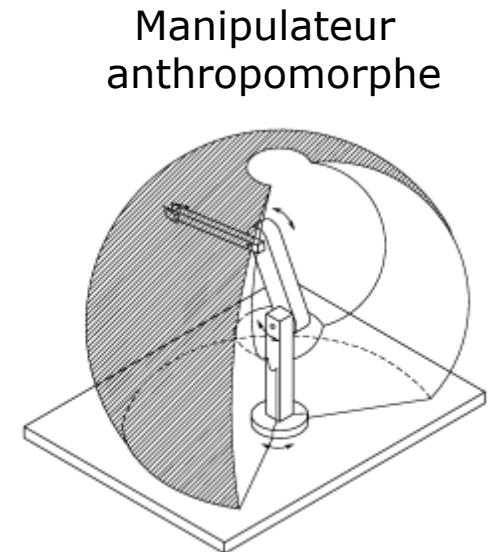
Manipulateur
cylindrique



Manipulateur
SCARA



Manipulateur
sphérique

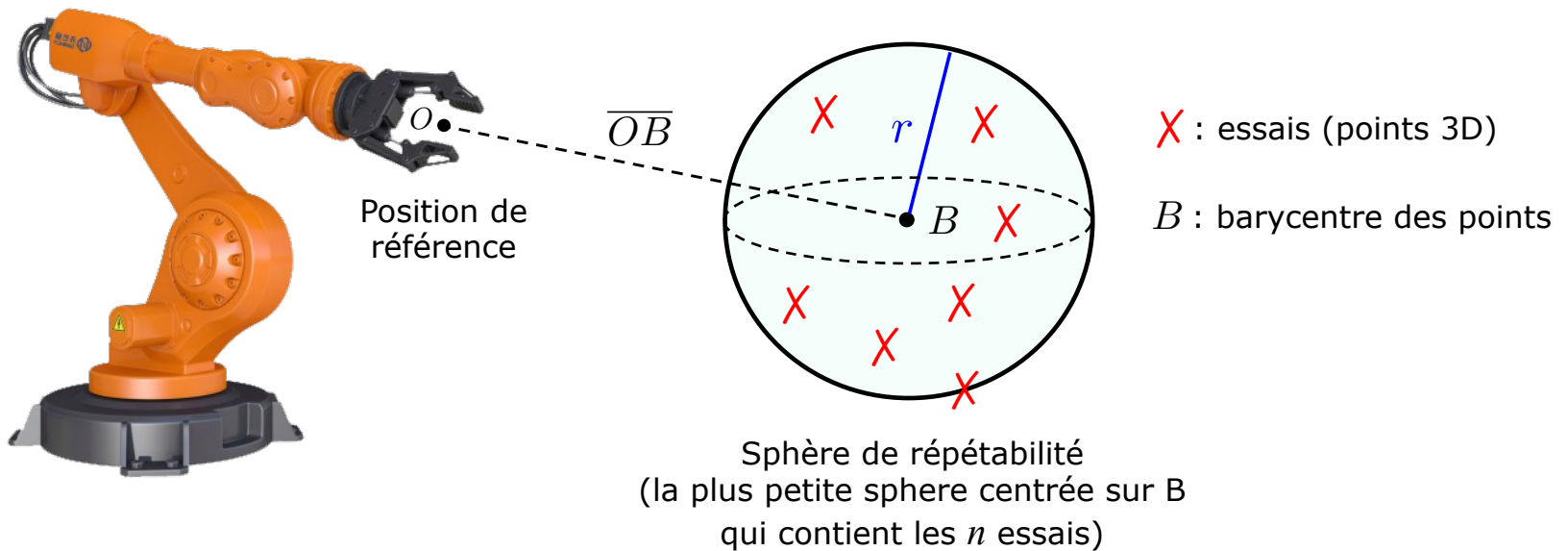


Manipulateur
anthropomorphe

1.4 Caractéristiques d'un robot

- La **répétabilité** caractérise la capacité que le robot a à retourner vers un point (position, orientation) donné

La répétabilité en positionnement est de l'ordre de 0.05 mm



- Rayon r de la sphère: *répétabilité* (en positionnement)
- \overline{OB} : *précision de positionnement*

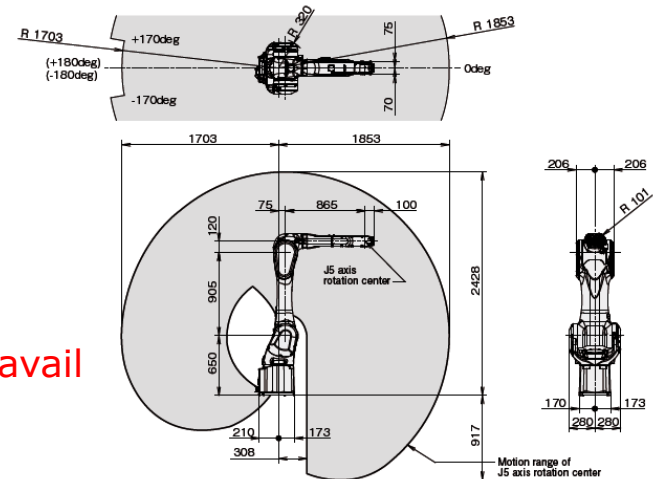
1.4 Caractéristiques d'un robot

Autres paramètres à prendre en compte:

- La **vitesse** de déplacement (vitesse maximale en élongation maximale) et l'**accélération**
- La **masse** du robot
- Le **coût** du robot (pour des petits robots ~ 15-20 k€)
- La **maintenance** du robot (critique si le robot travaille, par exemple, dans une chambre froide ou sterile ou à proximité d'un four de fonderie)

Exemple (Fiche technique du robot M-20iB/25 de FANUC)

Volume de travail



Model		M-20iB/25
Type		Articulated Type
Controlled axes		6 axes (J1, J2, J3, J4, J5, J6)
Reach		1853 mm
Installation		Floor, Upside-down, Angle
Motion range (Maximum speed) (Note1,2)	J1 axis rotation	340°/360°(option) (205°/s) 5.93 rad / 6.28 rad (option) (3.58 rad/s)
	J2 axis rotation	240° (205°/s) 4.19 rad (3.58 rad/s)
	J3 axis rotation	303° (260°/s) 5.29 rad (4.54 rad/s)
	J4 axis wrist rotation	400° (415°/s) 6.98 rad (7.24 rad/s)
	J5 axis wrist swing	290° (415°/s) 5.06 rad (7.24 rad/s)
	J6 axis wrist rotation	540° (880°/s) 9.42 rad (15.36 rad/s)
Max. load capacity at wrist		25 kg
Allowable load moment at wrist	J4 axis	51.0 N·m
	J5 axis	51.0 N·m
	J6 axis	31.0 N·m
Allowable load inertia at wrist	J4 axis	2.20 kg·m ²
	J5 axis	2.20 kg·m ²
	J6 axis	1.20 kg·m ²
Repeatability		±0.06 mm
Mass (Note 3)		210 kg
Installation environment		Ambient temperature : 0 to 45°C
		Ambient humidity : Normally 75 %RH or less (No dew nor frost allowed) Short term Max.95 %RH or less (within one month)
		Vibration acceleration : 4.9 m/s ² (0.5G) or less

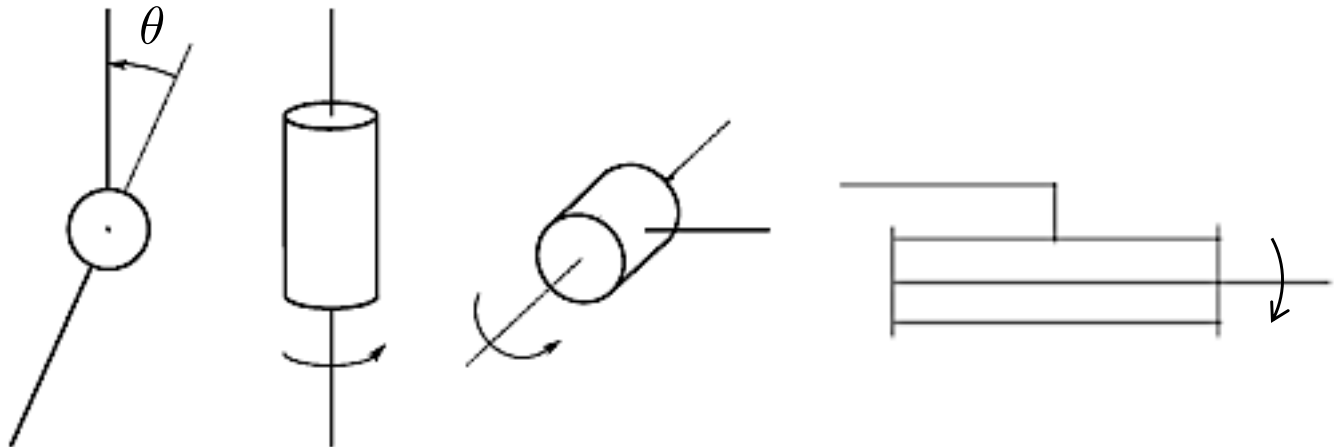
Butées mécaniques

1.4 Caractéristiques d'un robot

Articulation rotoïde

Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée "R", réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun

La situation relative entre les deux corps est donnée par l'*angle* θ autour de cet axe



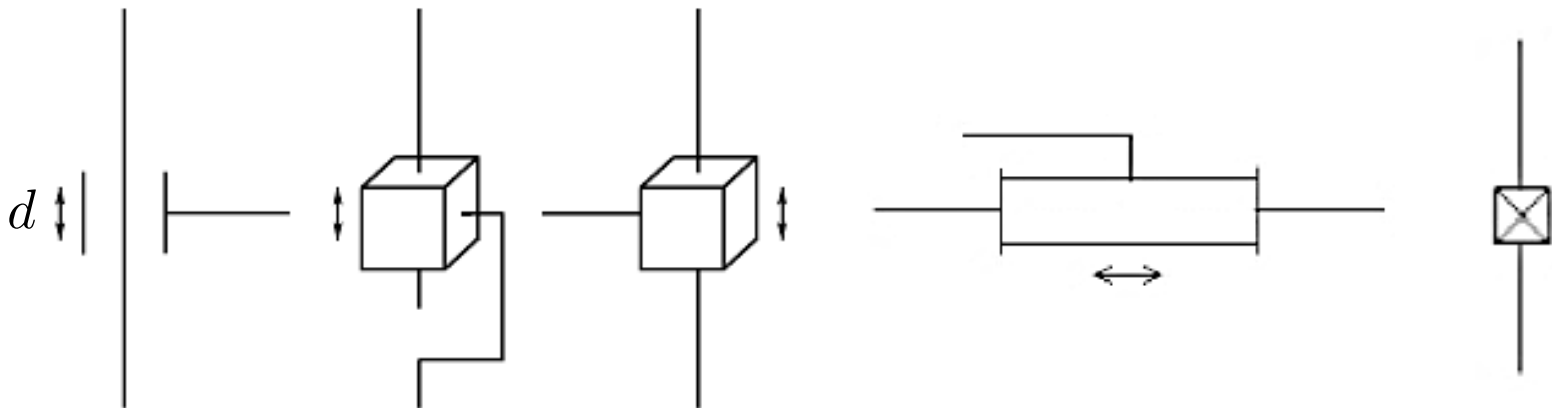
Symboles utilisés pour une *articulation rotoïde*

1.4 Caractéristiques d'un robot

Articulation prismatique

Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée "P", réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun

La situation relative entre les deux corps est mesurée par la *distance* d le long de cet axe



Symboles utilisés pour une *articulation prismatique*

1.4 Caractéristiques d'un robot

Remarque

Une articulation complexe (c'est-à-dire avec une mobilité supérieure à 1), peut toujours se ramener à une *combinaison* d'articulations rotoïdes ou prismatiques

Définition (Degré de liberté, DDL):

En général, le nombre de DDL d'un mécanisme est le *nombre de paramètres indépendants* qui permettent de définir la position du mécanisme à un instant donné du mouvement

Un robot se compose de n corps mobiles rigides, donc:

Nombre de DDL du robot = somme des libertés des corps – nombre de contraintes *indépendantes* imposées par les articulations

1.4 Caractéristiques d'un robot

Le nombre de DDL d'un robot peut être calculé par la **formule de Grübler**, qui est une expression de la formule précédente.

Étant donné un robot qui se compose de n corps (N.B. le sol est considéré aussi comme un corps), soit J le nombre d'articulations, m le nombre de DDL d'un corps rigide ($m = 3$ pour les mécanismes 2D et $m = 6$ pour les mécanismes 3D), f_i le nombre de libertés fournies par l'articulation i , et c_i le nombre de contraintes imposées par l'articulation i , avec $f_i + c_i = m, \forall i \in \{1, \dots, J\}$.

La *formule de Grübler* pour les DDL du robot est :

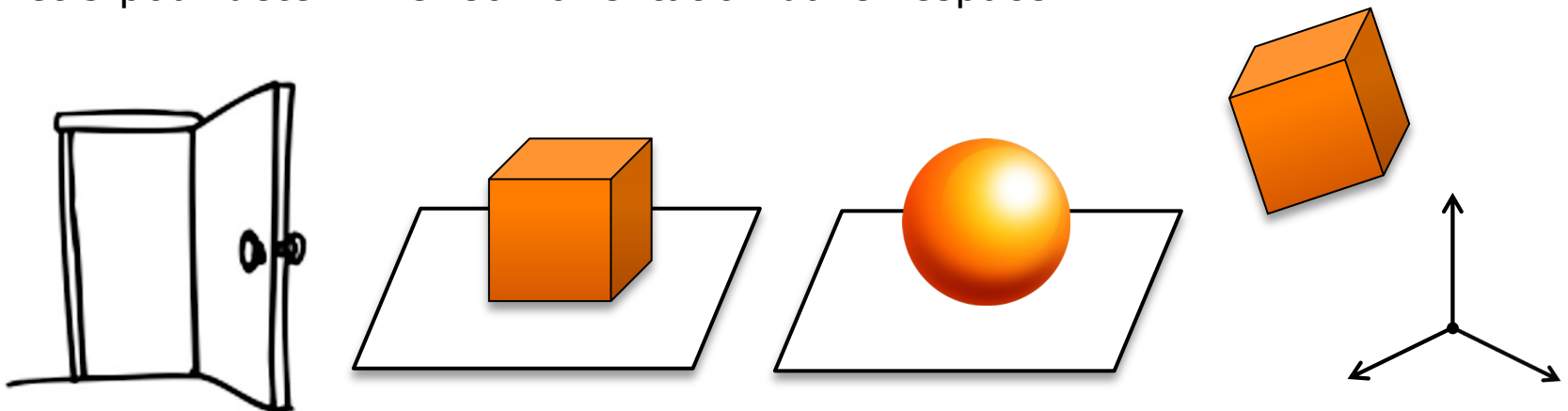
$$\text{Nombre de DDL} = \underbrace{m(n-1)}_{\substack{\text{Libertés des} \\ \text{corps rigides}}} - \underbrace{\sum_{i=1}^J c_i}_{\substack{\text{Contraintes} \\ \text{des articulations}}} = m(n-1-J) + \sum_{i=1}^J f_i$$

Attention: La formule n'est valide que si toutes les contraintes des articulations sont *indépendantes*. Sinon elle donne une *borne inférieure* sur le nombre de DDL

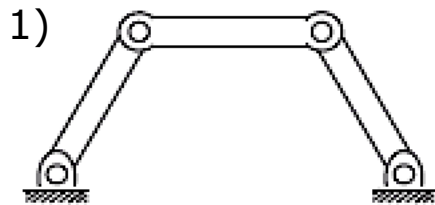
1.4 Caractéristiques d'un robot

Exemples élémentaires :

- Une porte à charnières a 1 DDL
- Un cube sur un plan a 3 DDL : 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan et 1 pour déterminer son orientation dans le plan
- Une sphère sur un plan a 5 DDL : 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan et 3 pour déterminer son orientation dans le plan
- Un cube dans l'espace 3D a 6 DDL : 3 pour fixer sa position et 3 pour déterminer son orientation dans l'espace

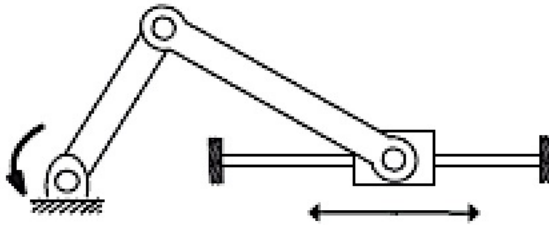


1.4 Caractéristiques d'un robot



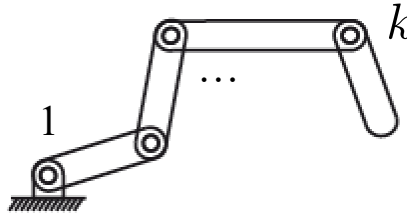
1) 4 corps (y compris le sol), 4 articulations rotoïdes
 $n = 4, m = 3, J = 4, f_i = 1, i \in \{1, \dots, 4\}$
 Nombre de DDL = $3(3 - 4) + 4 = 1$

2) Mécanisme bielle-manivelle



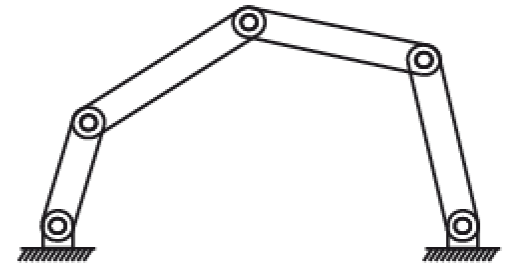
Nombre de DDL = 1

3) Chaîne planaire à k articulations



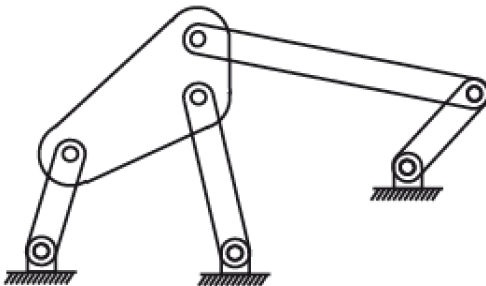
Nombre de DDL = k

4) Chaîne fermée

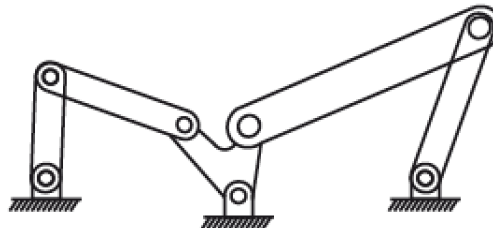


Nombre de DDL = 2

5) Mécanisme de Stephenson (6 corps)



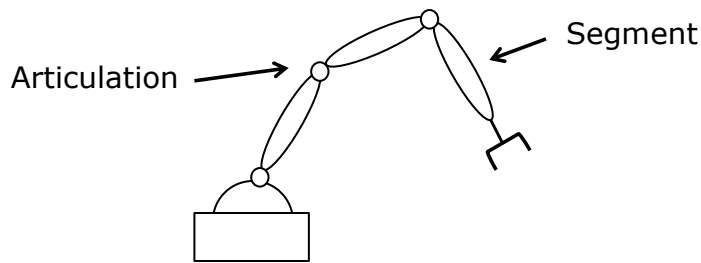
6) Mécanisme de Watt (6 corps)



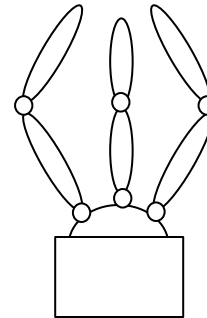
Nombre de DDL = $3(6 - 1 - 7) + 7 = 1$

1.4 Caractéristiques d'un robot

- Une *chaîne cinématique simple* est appelée *ouverte* (ou *série*) lorsqu'il n'existe qu'une seule séquence de segments reliant les deux extrémités de la chaîne



Chaîne ouverte simple

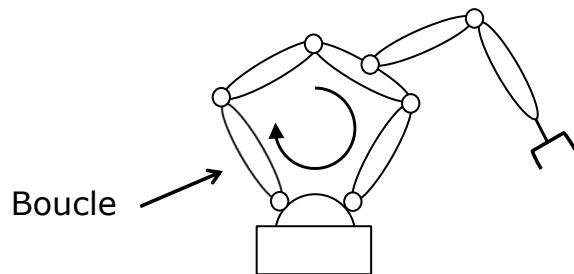


Chaîne ouverte arborescente

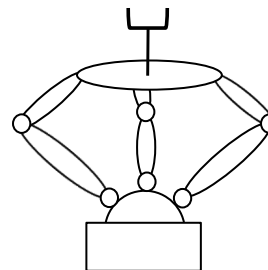


Ex. main robotique

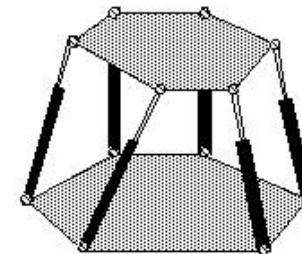
- Un robot contient une *chaîne cinématique fermée* lorsqu'une séquence de segments forme une boucle



Chaîne fermée



Chaîne fermée (géométrie parallèle)



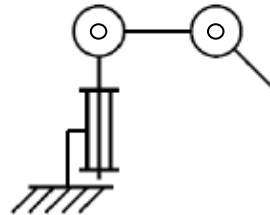
Ex. plate-forme de Stewart-Gough

1.4 Caractéristiques d'un robot

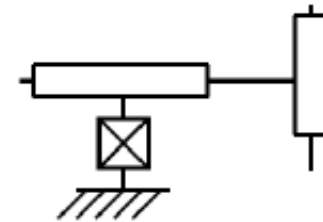
Les *articulations rotoïdes* sont généralement préférés aux articulations prismatiques en vue de leur *compacité* et *fiabilité*

- Dans une *chaîne cinématique ouverte*, chaque articulation rotoïde ou prismatique, donne au système *un seul DDL*

3 axes, RRR,
3 DDL

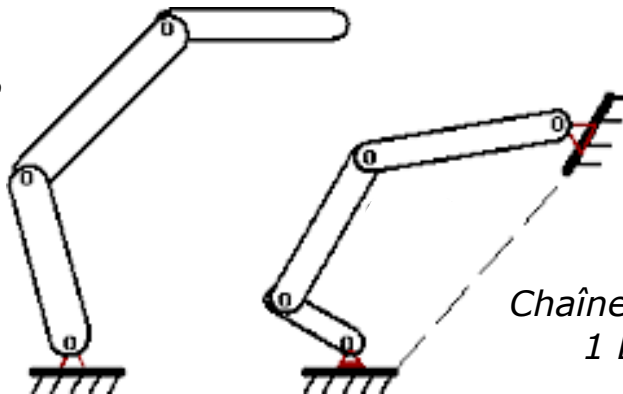


3 axes, PPP,
3 DDL

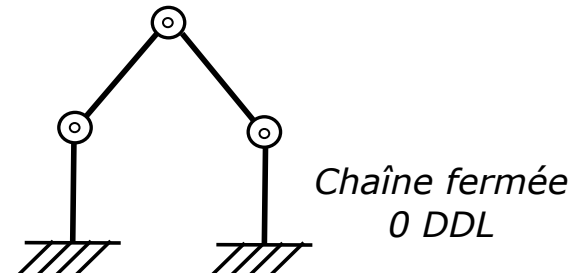


- Dans une *chaîne cinématique fermée*, le nombre de DDL est *inférieur* au nombre d'articulations, compte tenu des contraintes imposées par la boucle (cf. la formule de Grübler)

Chaîne ouverte
3 DDL



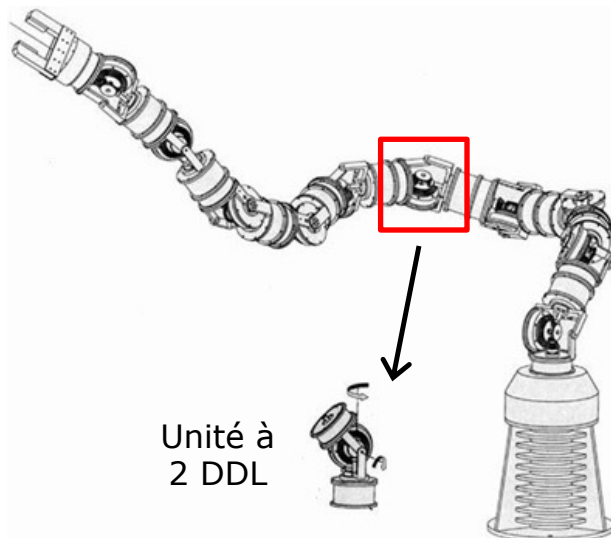
Chaîne fermée
1 DDL



Chaîne fermée
0 DDL

1.4 Caractéristiques d'un robot

- Les DDL d'un robot doivent être *convenablement distribués* le long de la structure mécanique afin d'en avoir un nombre suffisant pour exécuter une tâche donnée
- Dans le cas d'une tâche consistant à positionner et orienter *de façon arbitraire* un objet dans l'espace tridimensionnel, **6 DDL** sont suffisants:
 - **3 DDL** pour le positionnement d'un point de l'objet
 - **3 DDL** pour orienter l'objet par rapport à un repère de référence
- Si le nombre de DDL disponibles est *supérieur* aux variables de la tâche, le robot est dit **redondant** du point de vue cinématique (ou intrinsèquement redondant)

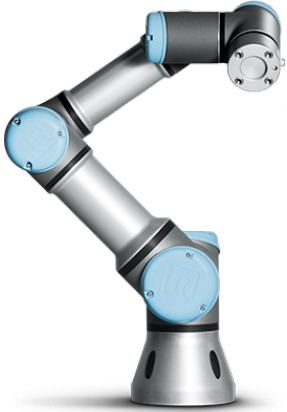


Exemple (Georgia Tech, États-Unis):

Manipulateur "hyper redondant"

- 20 DDL
- 10 unités avec 2 DDL

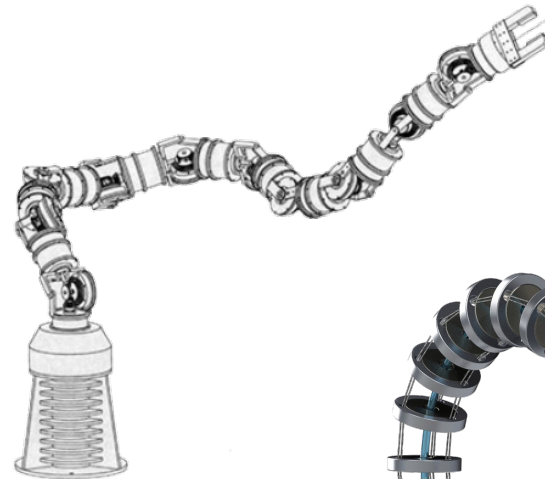
1.4 Caractéristiques d'un robot



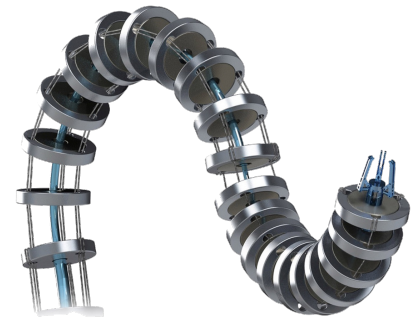
Robot non redondant
(UR3, 6 DDL)



Robot redondant
(DLR SARA, 7 DDL)



Robot hyper redondant
(20 DDL)

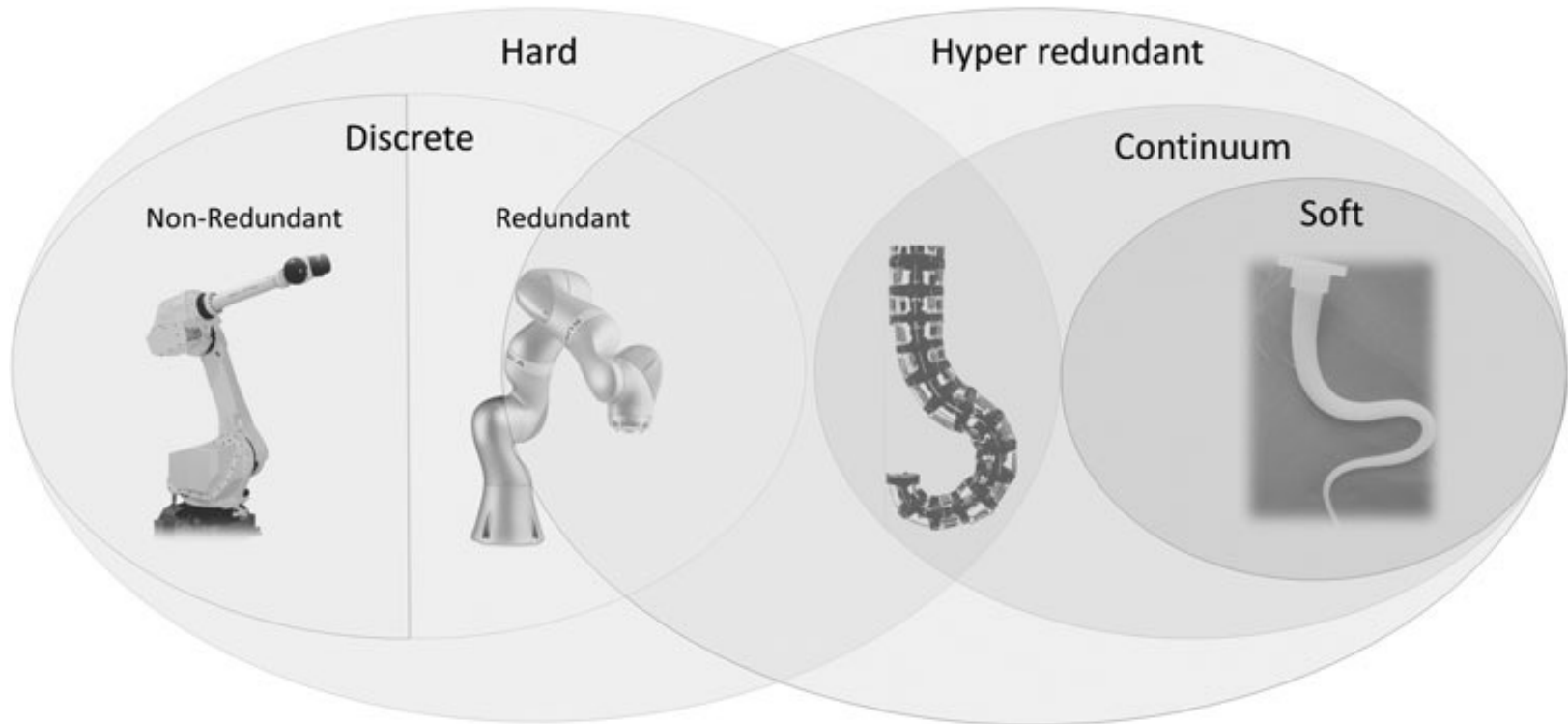


Robot continuum
(nombre infini de DDL)



Nombre croissant de DDL

1.4 Caractéristiques d'un robot



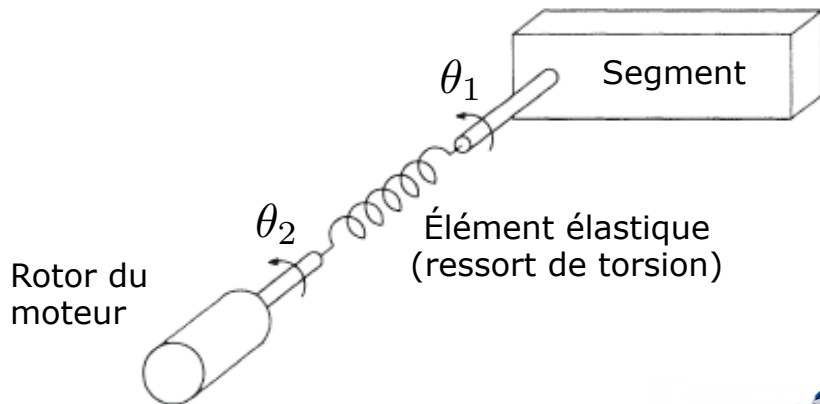
Évolution des manipulateurs : de robots avec segments rigides basés sur mécanismes discrets à des robots bio-inspirés basés sur structures flexibles

« *Control strategies for soft robotic manipulators: A survey* », T.G. Thuruthel, Y. Ansari, E. Falotico, C. Laschi, *Soft Robotics*, vol. 5, n. 2, pp. 149-163, 2018 (Figure 1)

1.4 Caractéristiques d'un robot

- Récemment, on a vu aussi l'apparition de robots avec articulations **flexibles** (voir par ex. les ch. 5 et 6 du livre *Theory of Robot Control*, C. Canudas de Wit, B. Siciliano, G. Bastin, Eds. Springer, 1996)
- Ils sont plus coûteux et plus difficiles à contrôler que les robots « classiques » à articulations *rigides*

Articulation flexible

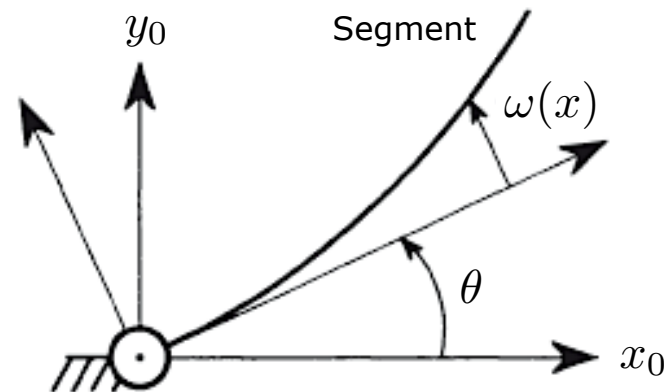


Exemples:

- Robot LBR iiwa de KUKA (7 axes)
- Robot Motoman HC10 de Yaskawa (6 axes)



Segment flexible



- Encore au stade d'études et de recherche