

# Introduction à la robotique

## Partie 1: Définitions et terminologies

T. ALANI

Département Informatique-ESIEE-Paris

e-mail: [t.alani@esiee.fr](mailto:t.alani@esiee.fr)

<http://www.esiee.fr/~alanit>

# Sommaire

Historique, Automatisation et Robotique	2
Relation homme-tâche	4
Evolution de la relation Automaticité-Versatilité	10
Schémas fonctionnels des robots de 2ème et 3ème génération	12
Constituants mécaniques des robots	14
Définitions	25
Architecture des robots industriels – morphologie	38
Terminologies	53
Bibliographie	86

# Historique

- Étymologie : le mot tchèque *robota* (travail).
- Définition : *un robot est un système mécanique poly-articulé mû par des actionneurs et commandé par un ordinateur qui est destiné à effectuer une grande variété de tâches.*
- Historique :
  - 1947 : premier manipulateur électrique téléopéré.
  - 1954 : premier robot programmable.
  - 1961 : apparition d'un robot sur une chaîne de montage de General Motors.
  - 1961 : premier robot avec contrôle en effort.
  - 1963 : utilisation de la vision pour commander un robot.

[http://eavr.u-strasbg.fr/wiki/images/a/a4/Cours\\_rob\\_intro.pdf](http://eavr.u-strasbg.fr/wiki/images/a/a4/Cours_rob_intro.pdf)

# Automatisation et Robotique

Les concepts généraux de l'automatisation s'applique également en robotique.

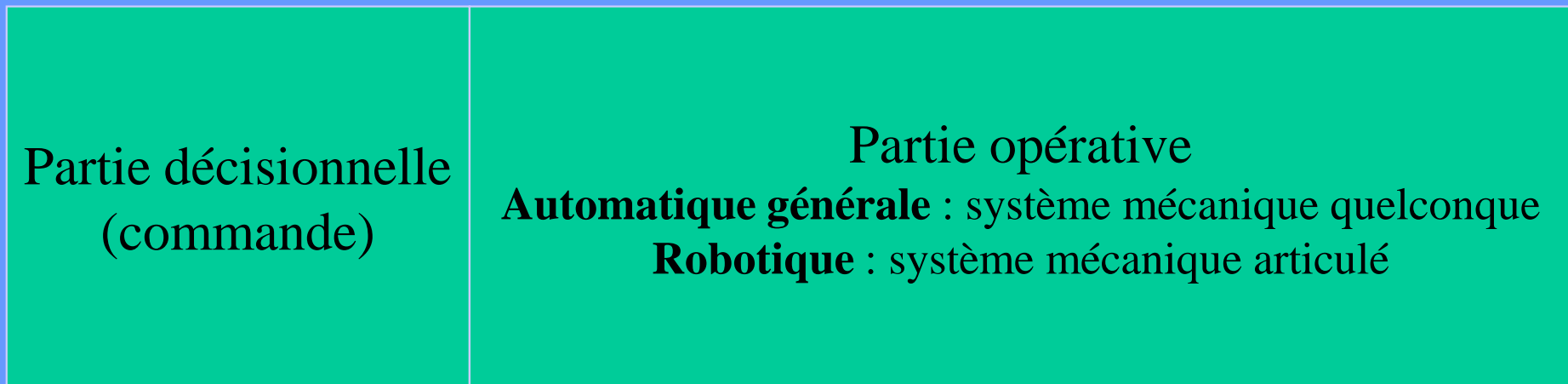


Figure 1. Un dispositif en général

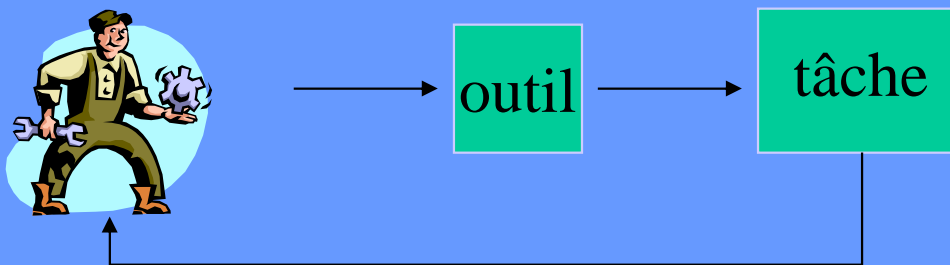
## Relation homme-tâche

Quelle est la façon dont l'homme agit sur l'outil et quelle est la façon de contrôler l'exécution de la tâche?

Il existe quatre modes de relations.

## Relation homme-tâche

Mode 1 : L'homme agit directement sur l'**outil** avec sa force musculaire. Le contrôle est réalisé directement et en permanence par l'homme par un processus de retour d'informations visuelle ou tactiles.



Exemple : travail artisanal manuel

## Relation homme-tâche

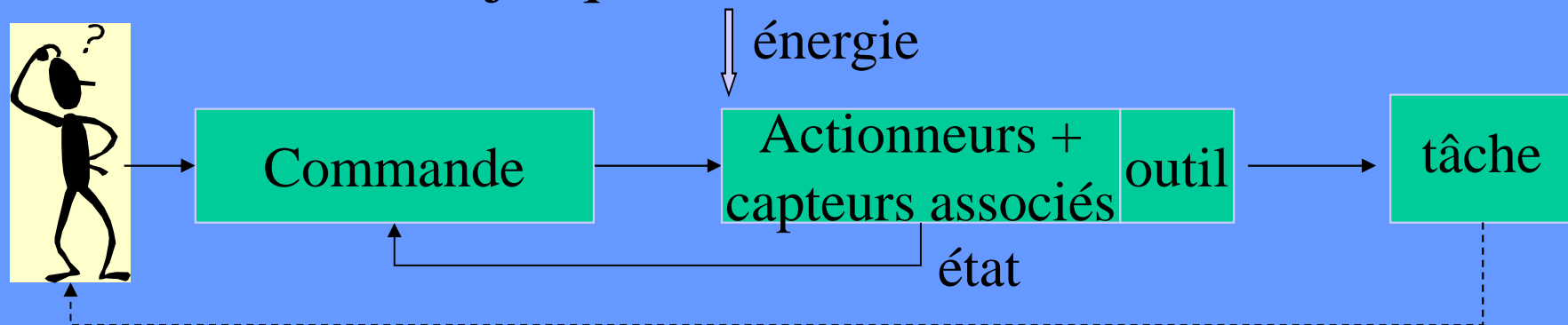
Mode 2 : L'outil n'est plus directement manipulé par l'homme, mais par un ou plusieurs **actionneurs** qui reçoivent de l'énergie de l'extérieur. Les actionneurs sont directement pilotés par l'homme qui agit sur des commandes manuelles.



Exemple : machines outils

## Relation homme-tâche

Mode 3 : Fonctionnement général des automatismes classiques : insertion d'un organe de commande entre l'homme et les actionneurs. La commande, après avoir reçu une série d'ordres (**consigne**) par une liaison plus ou moins permanente, se charge de gérer le fonctionnement des actionneurs jusqu'à l'exécution finale de la tâche.



Exemple : robots industriels de 2ème génération



## Relation homme-tâche

Mode 3 (suite) : Pour fonctionner de façon autonome, la commande doit être informée de l'**état** du système actionneurs-outils au moyen de capteurs internes (**proprioceptifs**).

Exemple :

- Cas de commande séquentielle : l'état est tout ou rien (fin de course),
- Cas de commande asservie : l'état est la position ou/et vitesse ou/et accélération, ...

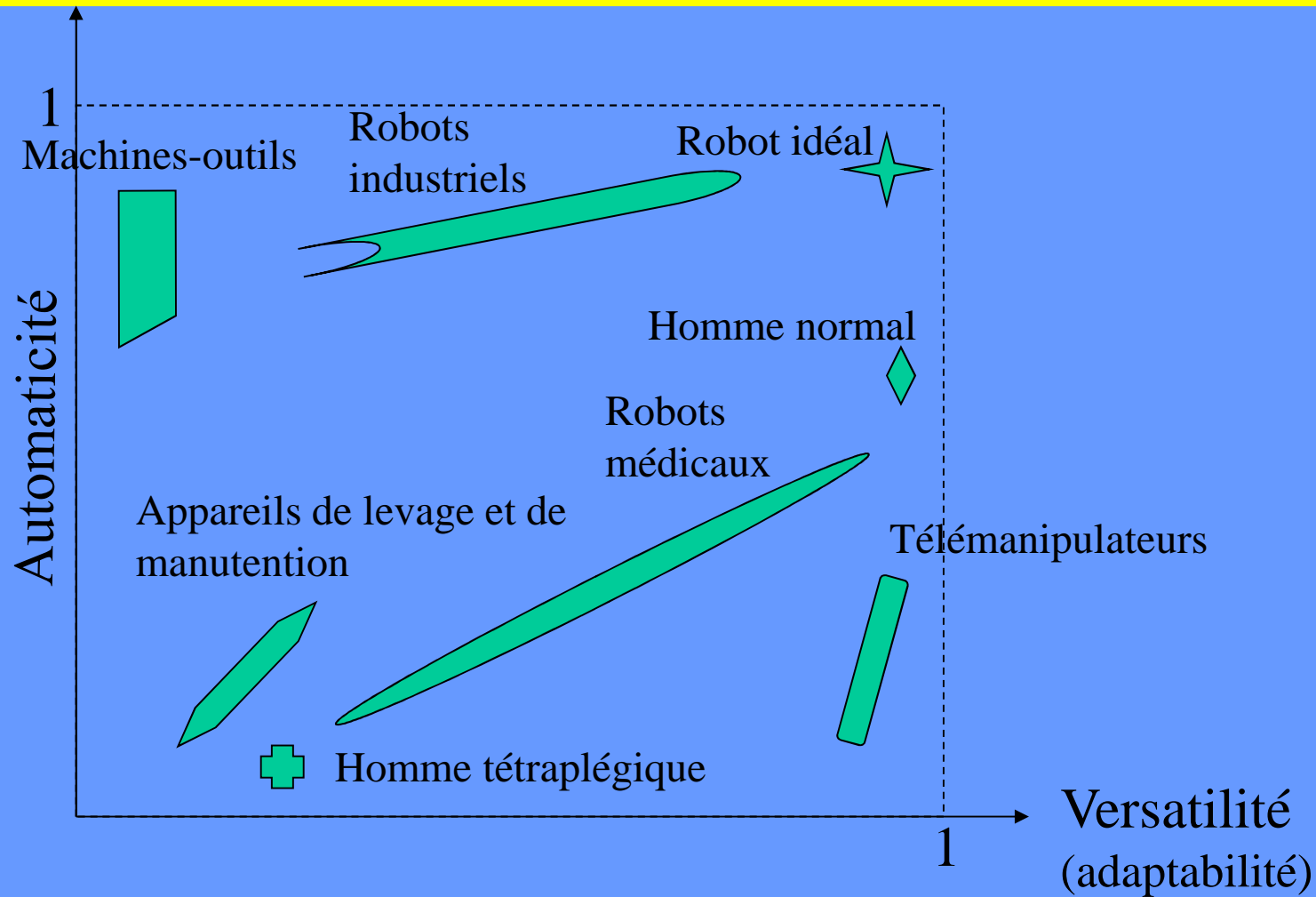
## Relation homme-tâche

Mode 4 : Perception de l'environnement au moyen de capteurs externes (**extéroceptifs**).

Dans ce cas l'homme ne donne qu'un ordre initial. La réalisation de la tâche et le contrôle de sa bonne exécution se font de manière autonome.

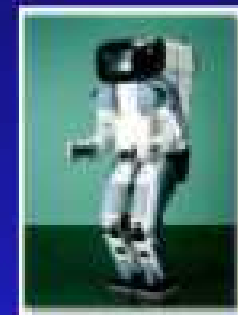
Exemple : un robot industriel de 3ème génération dit **intelligent** doté d'un capteur tactile et/ou capteur de vision.

# Evolution de la relation Automaticité-Versatilité



# Catégories de Robots

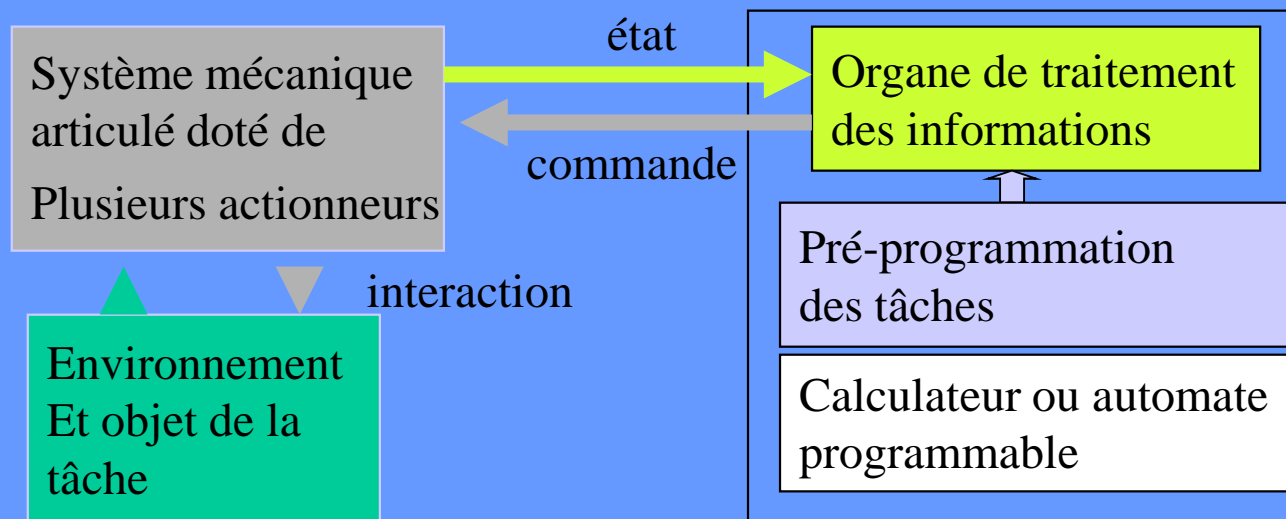
- Robots mobiles
- Robots sous-marins
- Robots volants
- Robots humanoïdes
- Robots manipulateurs : objet de ce cours.



# Schémas fonctionnels des robots de 2ème et 3ème génération

## Schéma fonctionnel des robots de 2ème génération: aucune adaptation à l'environnement

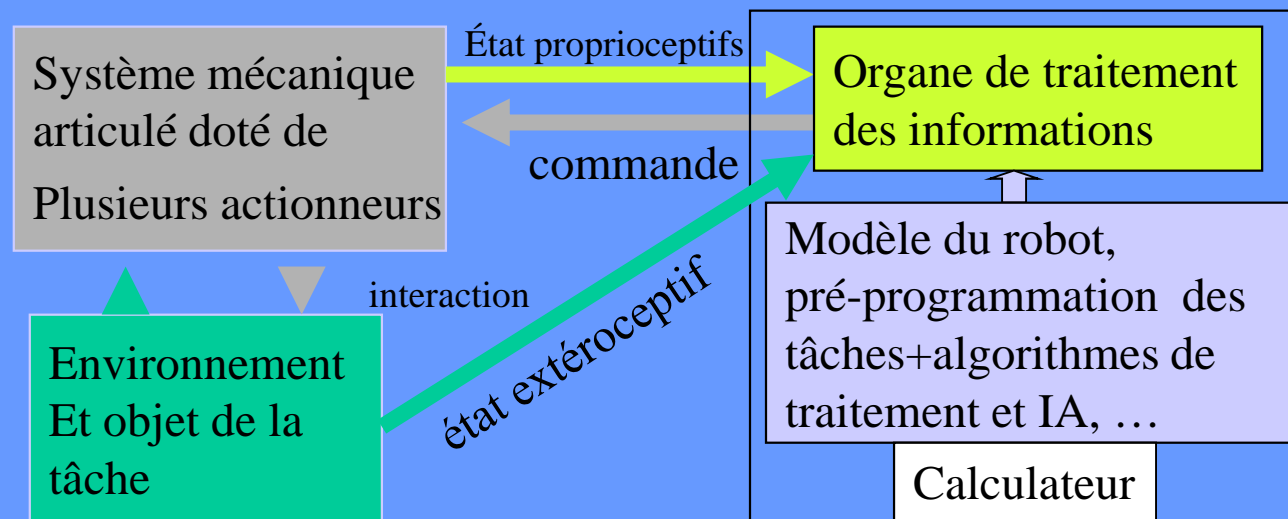
Hypothèse : Environnement statique ou stable



# Schémas fonctionnels des robots de 2ème et 3ème génération

## Schéma fonctionnel des robots de 3ème génération: adaptation à l'environnement

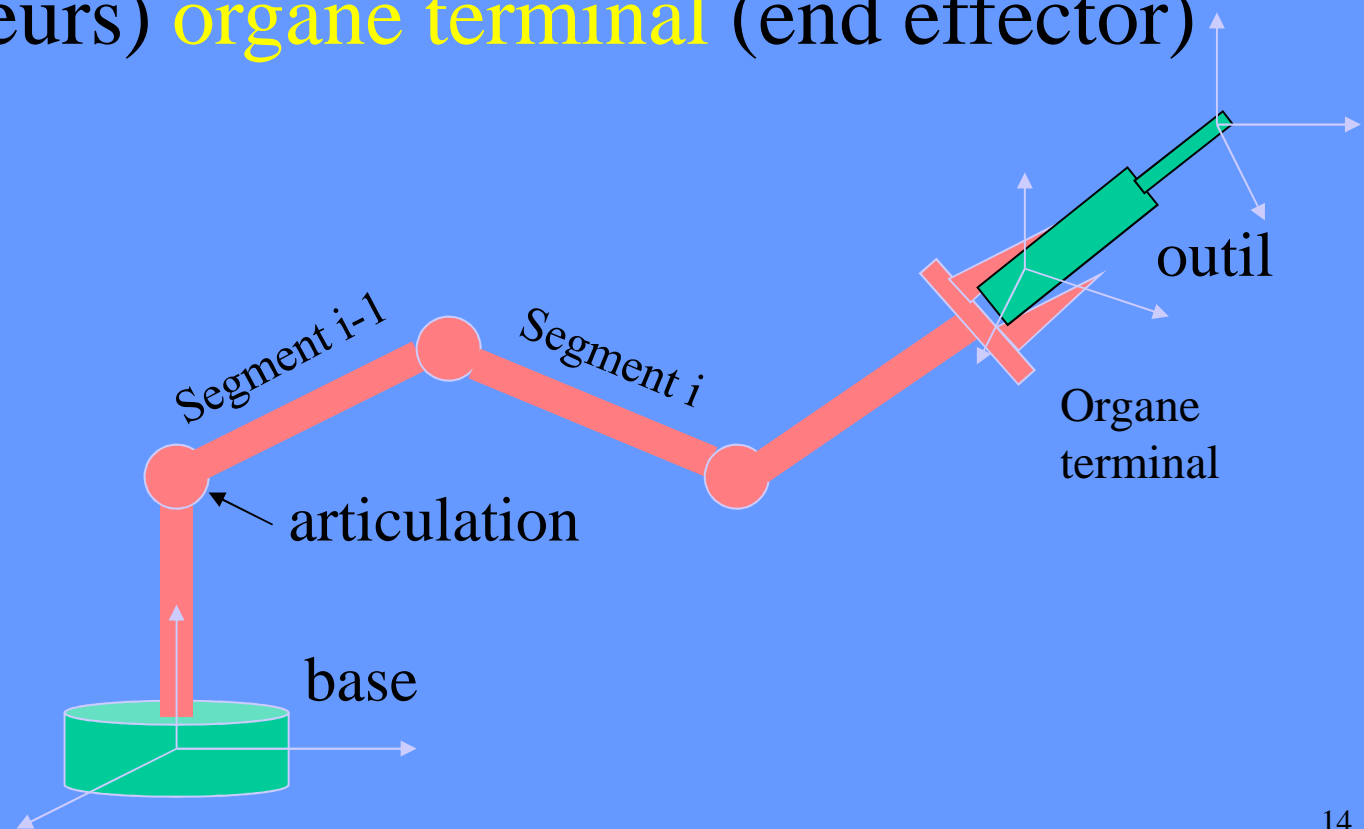
Hypothèse : Environnement dynamique ou instable



# Constituants mécaniques des robots

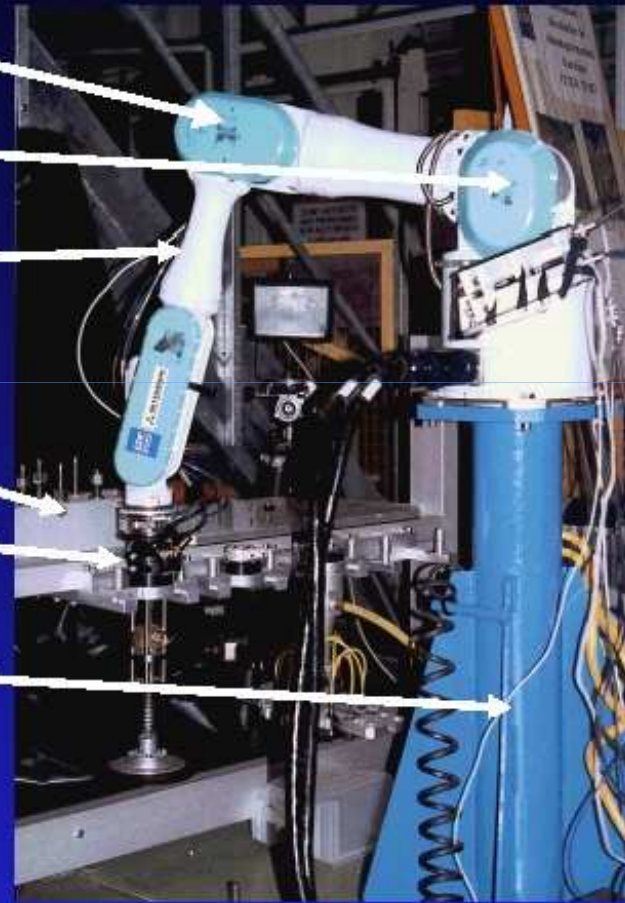
Deux sous-ensembles distincts :

- Une structure mécanique articulée.
- Un (ou plusieurs) **organe terminal** (end effector)



## Constituants mécaniques des robots

- Actionneur = moteur
- Axe = articulation
- Corps = segment
- Organe terminal
- Effecteur = outil
- Base





## Organe terminal

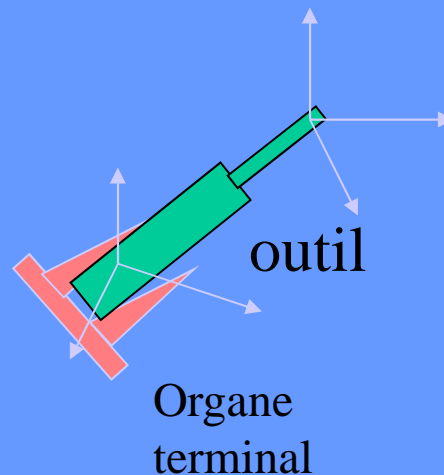
Rôle : manipuler et/ou transformer des objets.

Deux types :

- Mono-fonctionnel
- Multi-fonctionnel

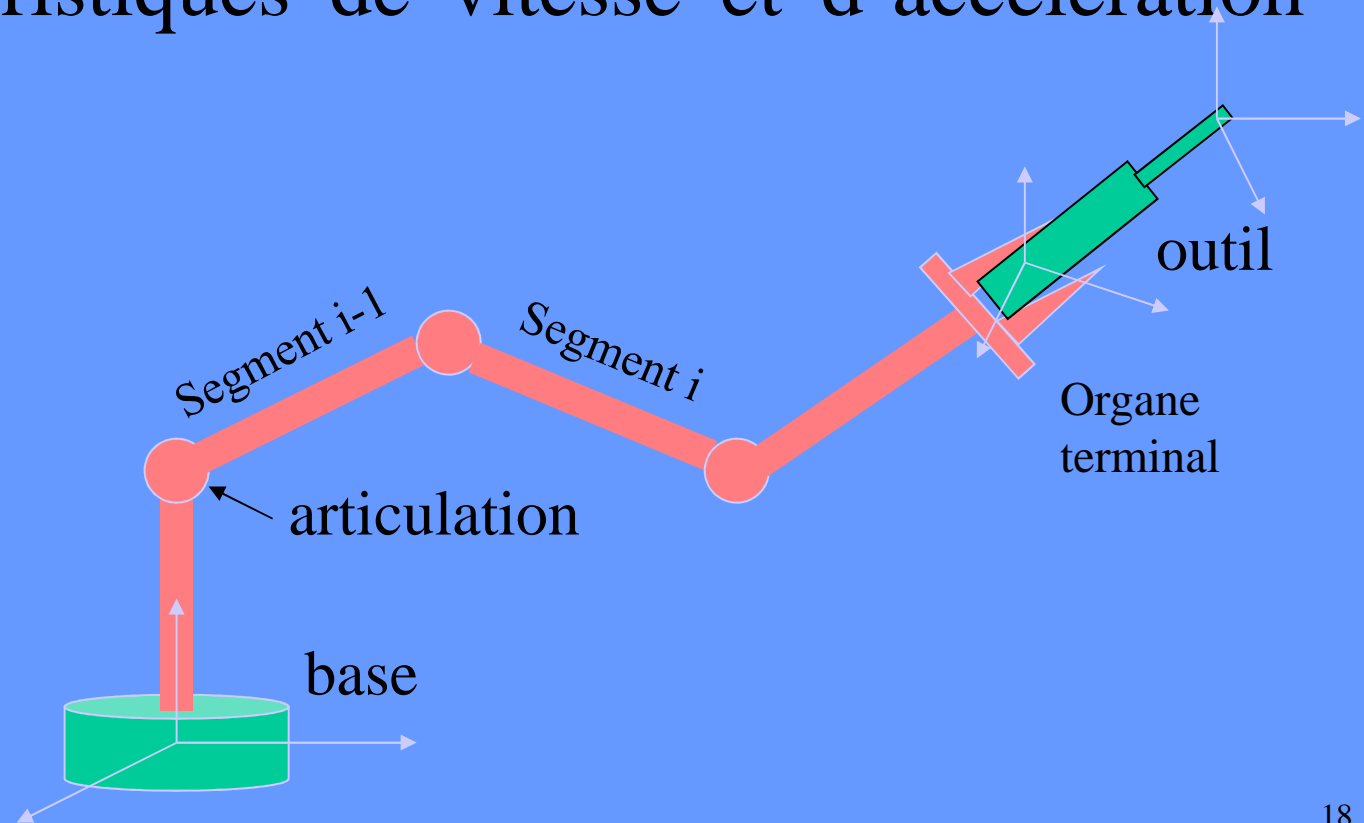
## Organe terminal

La position et l'orientation d'un manipulateur est décrite par le système de coordonnées de l'**outil terminal** (tool frame) attaché à l'organe terminal. Ce système est décrit par rapport au système de coordonnées de la **base du manipulateur** (base frame).



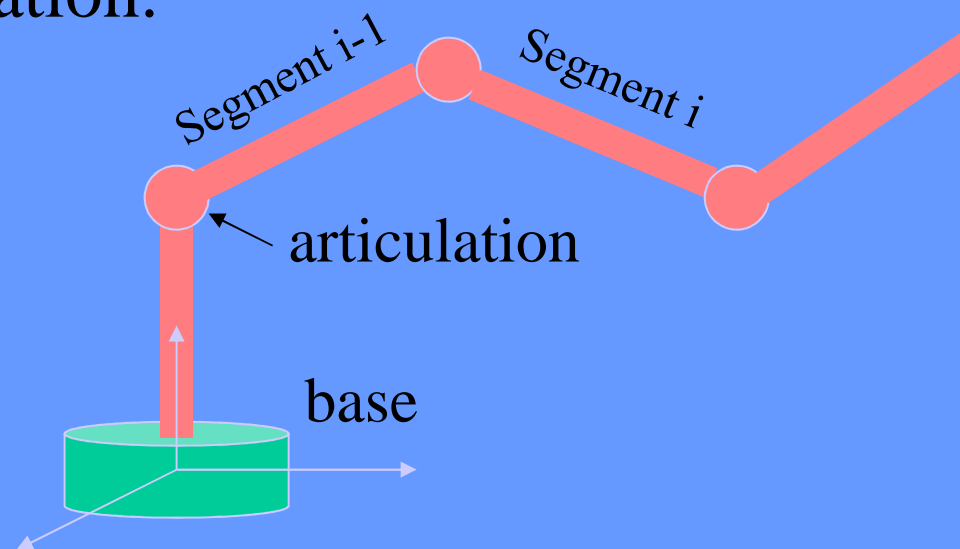
## Structure mécanique articulée

Rôle : amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données.



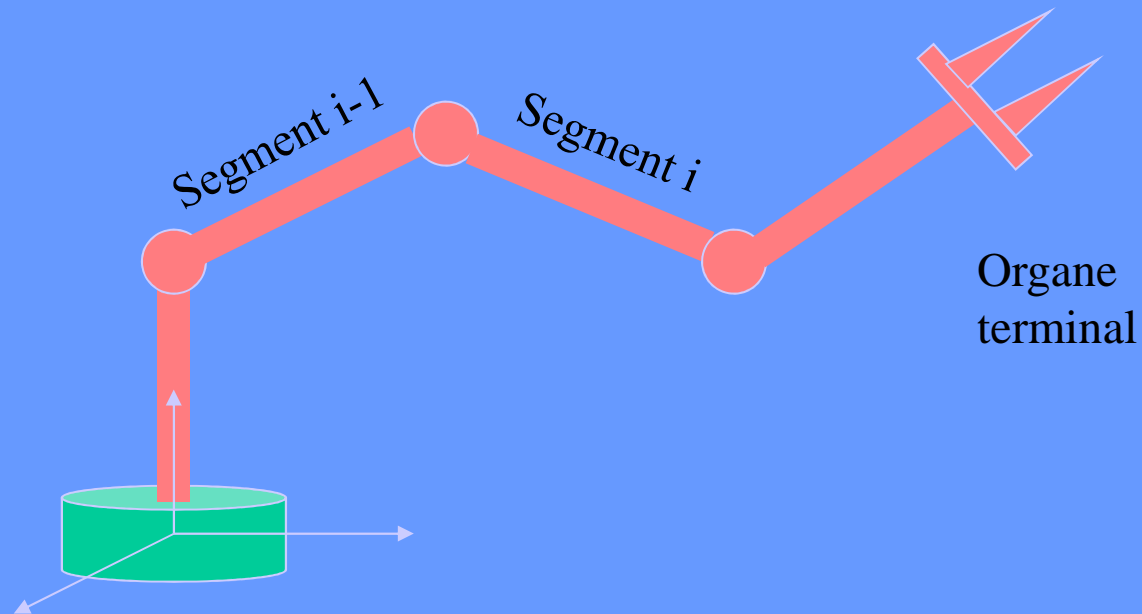
## Structure mécanique articulée

Architecture : Une chaîne cinématique de **segments** (links) généralement rigides assemblés par des liaisons appelées **articulation** (joints) pour obtenir un mouvement relatif de segments voisins. Les positions relatives des segments voisins sont mesurées par des capteurs de position attachés à chaque articulation.

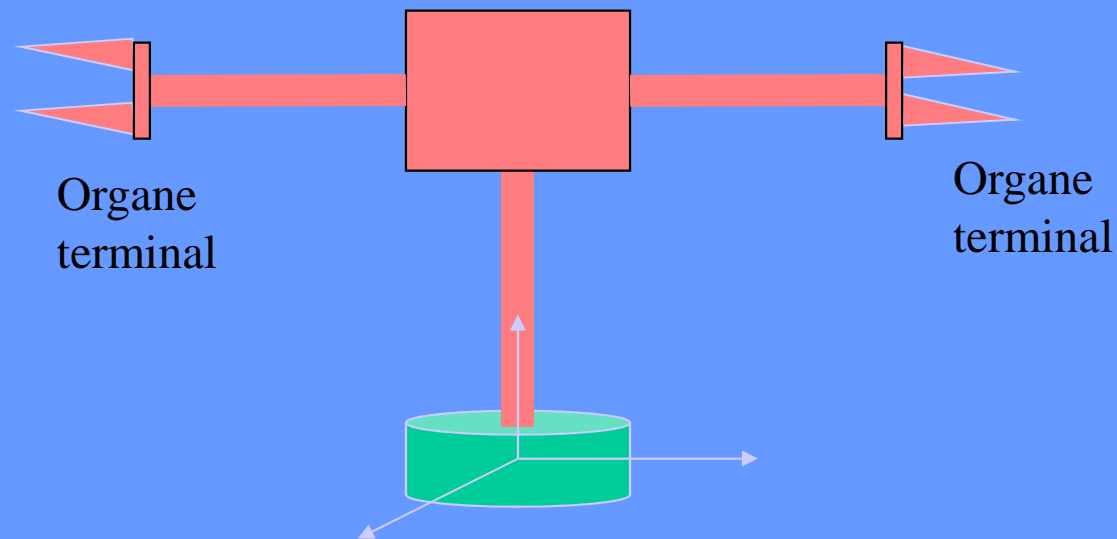


## Quatre types de chaînes :

- Chaînes **ouvertes simples** (aucune retour mécanique d'un segment à un autre dans la chaîne).

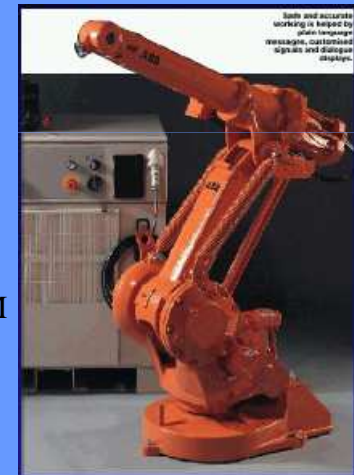
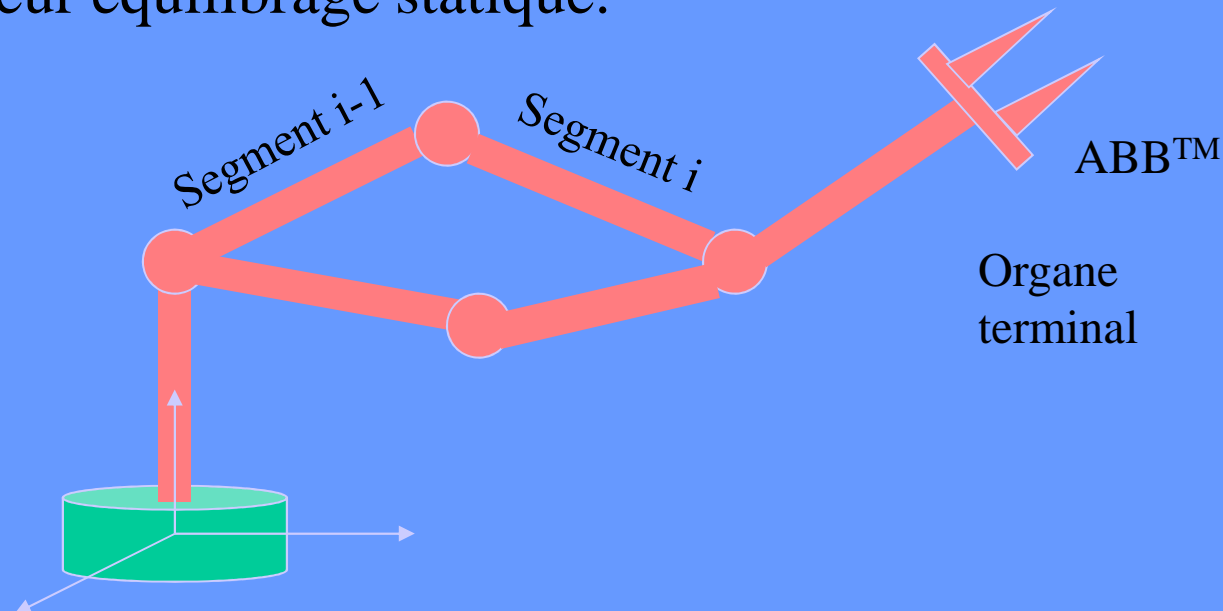


- Chaînes **arborescentes** (il existe plusieurs organes terminales qui agissent en parallèle)



● Chaînes **fermées** (il existe un retour mécanique d'un ou plusieurs segments à un autre dans la chaîne)

- rigidité élevée,
- une grande précision
- meilleur équilibrage statique.

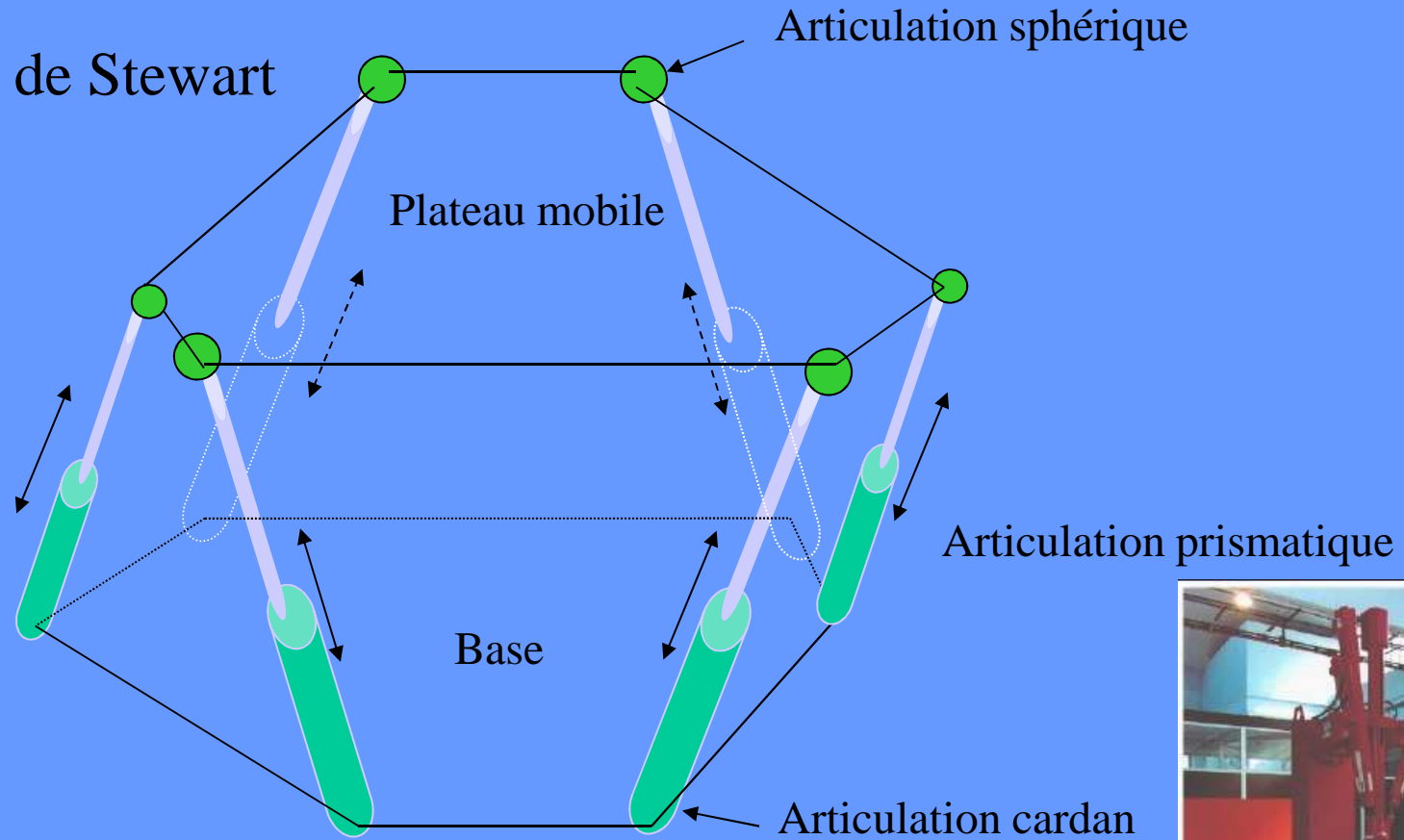


## Nouvelles générations de robots

- Les robots parallèles (basés sur la structure de stewart) : L'organe terminal est relié à une base mécanique fixe par plusieurs chaîne parallèles.
  - Une plus grande rigidité,
  - Plus grande précision
  - Capacité de charge élevée
  - Modification rapide de la situation de l'organe terminale dans l'espace en fonction des obstacles.



# Structure de Stewart



$$F = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n f_i$$
  
où  $F$  : le nombre total des degrés de liberté  
 $l$  : le nombre des liens mécaniques (la base est incluse)  
 $n$  : le nombre total d'articulations  
 $f_i$  : le nombre de degrés de liberté associé à l'articulation  $i$   
Pour la structure ci - dessus,  $F = 6$ .

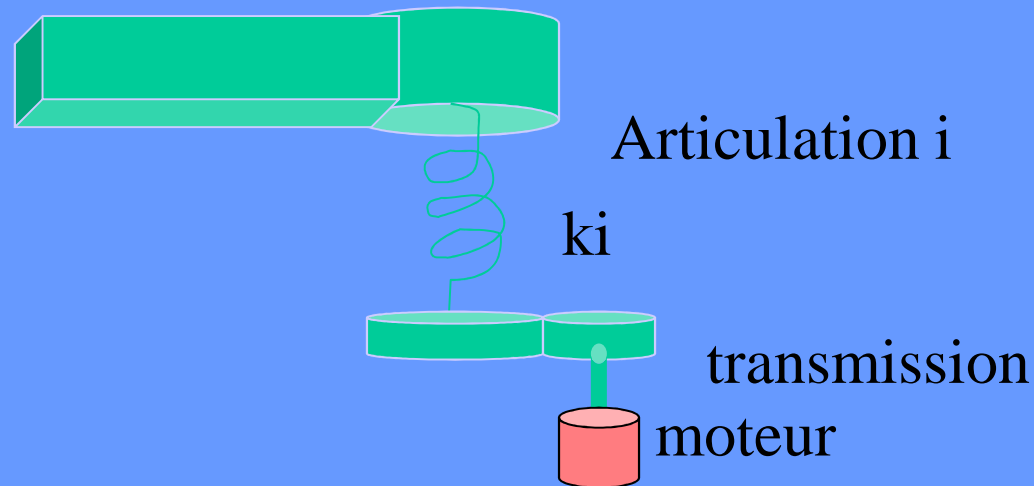


Comau™

- Les robots flexibles :

Exemple : bras de la navette spatiale

- Structure légère et rapide
- Structure de grande dimension



- difficile à modéliser

## Définitions

1. Articulation

2. Nombre de degrés de liberté (NDL) d'un manipulateur.

3. Configuration articulaire

4. Espace articulaire (espace de configuration)

5. Espace opérationnel

6. Redondance

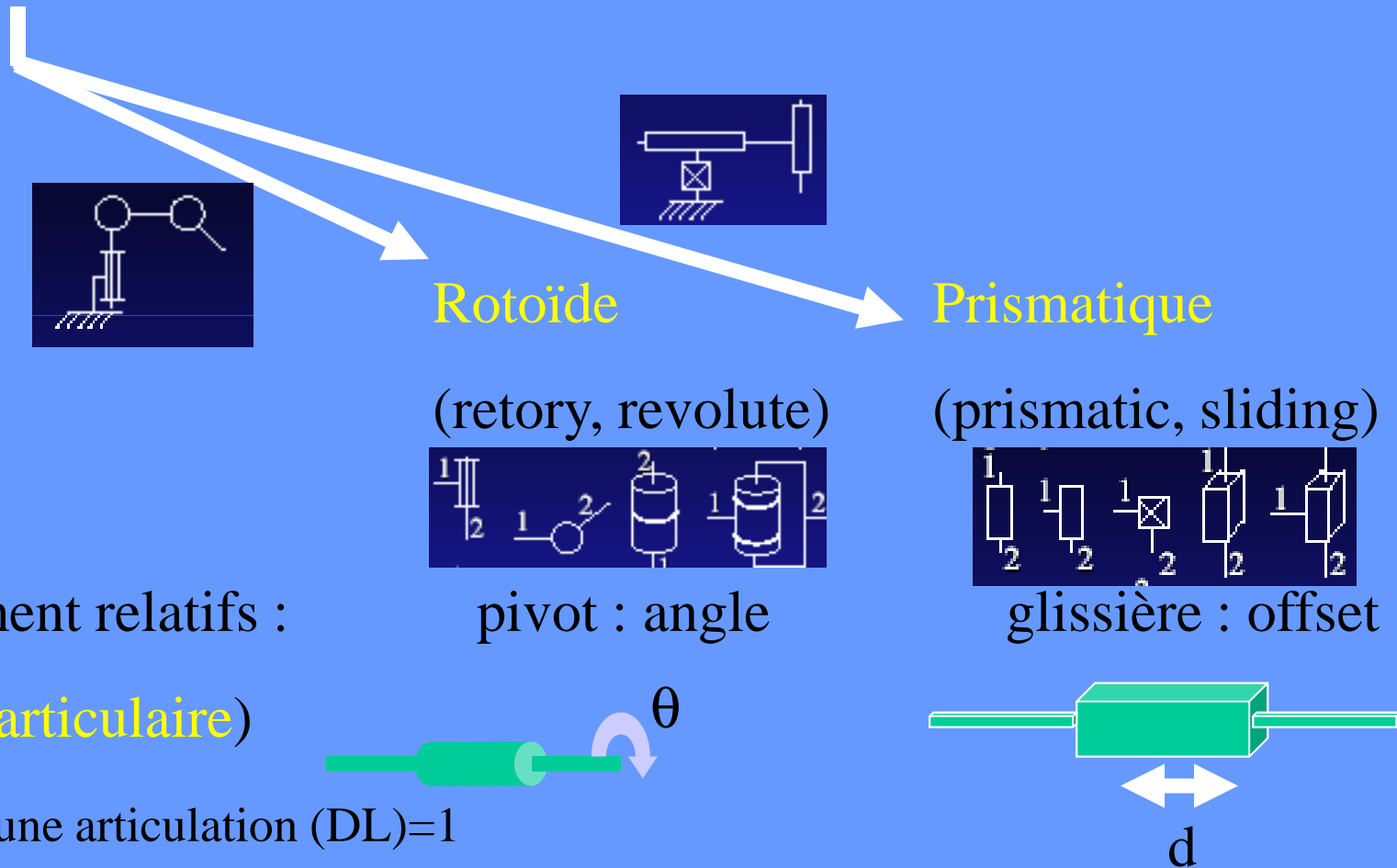
7. Configurations singulières

8. Précision/Répétabilité

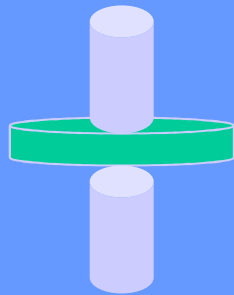
9. Performances dynamiques

10. Charge utile

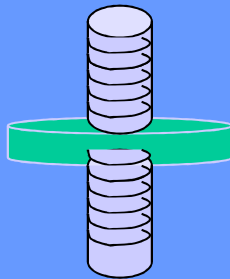
1. **Articulation (joint)** Lier deux segments consécutifs en limitant le nombre de DL de l'un par rapport à l'autre.



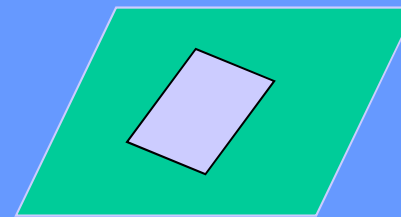
## Autres types d'articulation



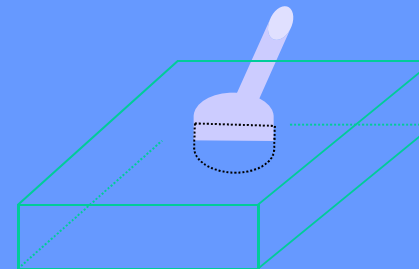
cylindrique



visse



planaire

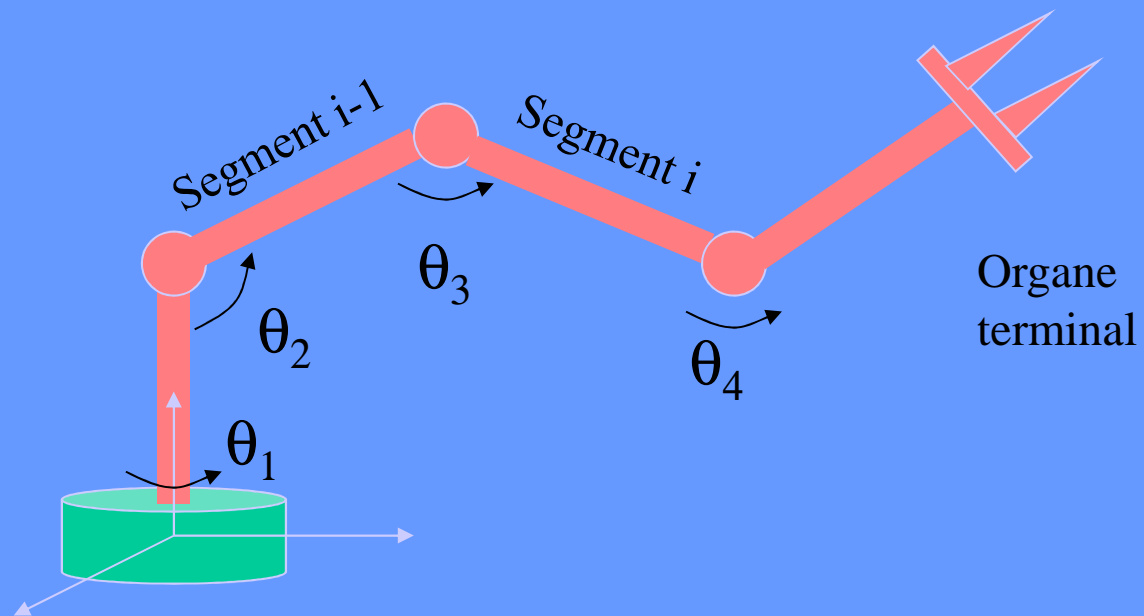


sphérique

## 2. Nombre de degrés de liberté (NDL) (degree of freedom) d'un manipulateur.

Le nombre de paramètres indépendant nécessaires pour décrire la situation de l'organe terminal dans l'espace cartésien.

Cas d'un robot industriel à chaîne ouverte : chaque position de chaque articulation est définie par un seul paramètre, le nombre d'articulations dans ce cas est toujours égale au NDL.



Chaîne ouverte simple avec quatre articulations rotoïdes :  $NDL=4$ .

### 3. Configuration articulaire d'un robot (joints state)

Cette configuration représente l'état des différents segments du robot.

L'état est décrit par des variables articulaires.



#### 4. Espace articulaire (espace de configuration) d'un robot (joint space)

Cet espace représente l'espace des variables articulaires.

Dans le cas d'une chaîne ouverte simple :

Le nombre de variables articulaires indépendants  
(dimension  $n$ ) = NDL.

## 5. Espace opérationnel (operational space)

$(\mathbb{R}^m, 1 \leq m \leq 6)$

L'espace dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal : les systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques, sphériques.

Le nombre de variables articulaire indépendants nécessaires pour spécifier la situation d'un corps dans l'espace tridimensionnel = 6.

## 6. Redondance

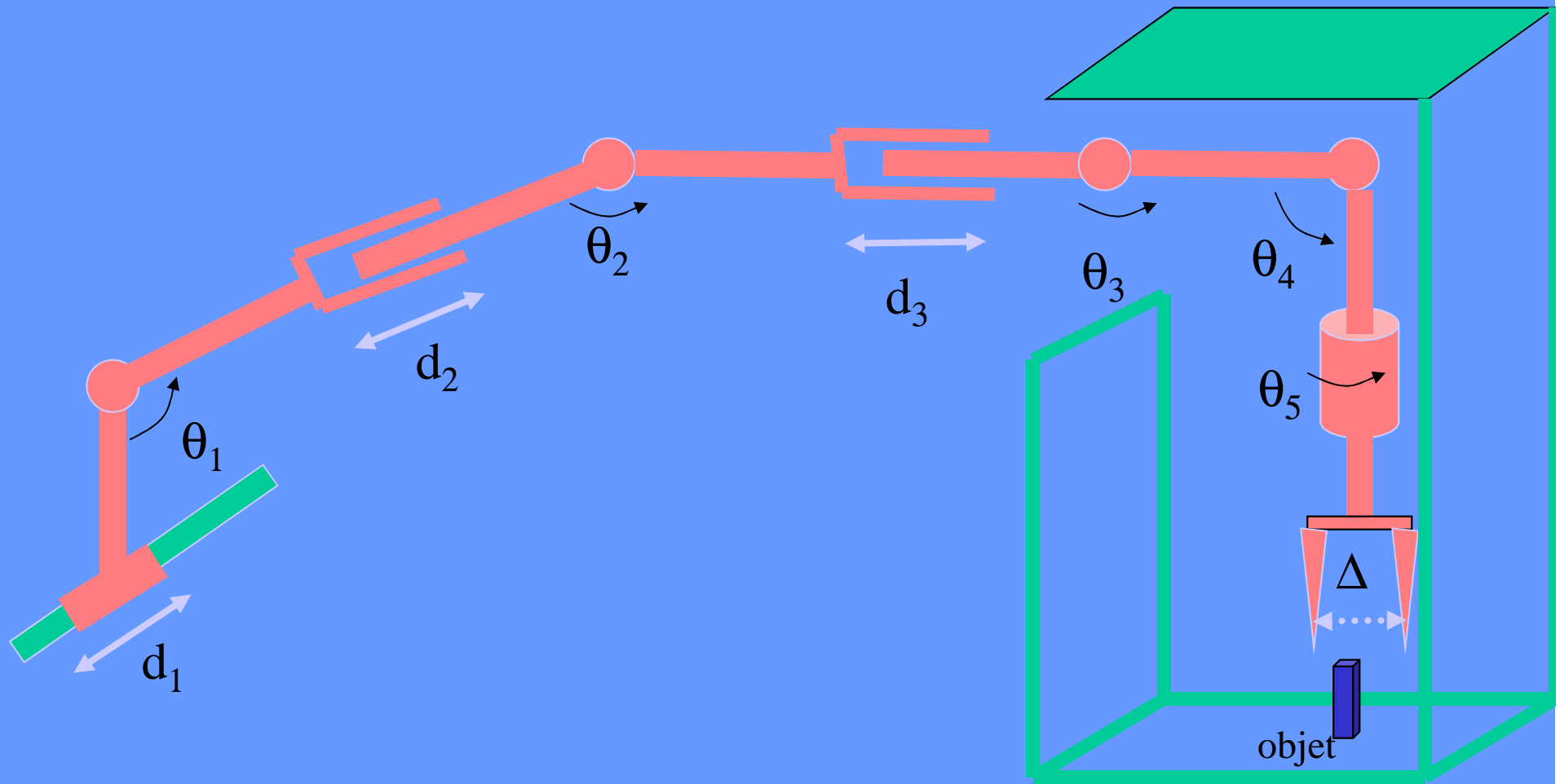
C'est une situation dans laquelle le NDL de l'organe terminal est inférieur au nombre d'articulation motorisés.

Avantage :

- Augmentation de la domaine accessible
- Déplacement en présence d'obstacles.

Situation d'une structure redondante dans le cas des chaînes ouvertes simples :

- Nombre d'articulations motorisées  $> 6$ ;
- Nombre d'articulations rotides d'axes concourants  $> 3$ ;
- Nombre d'articulations rotides d'axes parallèles  $> 3$ ;
- Nombre d'axes d'articulations prismatiques  $> 3$ ;
- Nombre d'axes d'articulations prismatiques parallèles  $= 2$ ;
- Nombre d'axes d'articulations rotoïdes confondus  $= 2$ .



Exemple d'un robot redondant

## Exemples des tâches redondantes :

- meulage;
- soudage par arc ou par point;
- collage;
- cirage;
- Assemblage électronique sur des cartes;

## 7. Configurations singulières

Une situation dans laquelle le NDL de l'organe terminal est inférieur à la dimension de l'espace opérationnel. C'est une situation de redondance locale.

Exemples :

- Deux axes d'articulations prismatiques se trouvent parallèles;
- Deux axes d'articulations rotoïdes se trouvent confondus

En fonction de la tâche à réaliser, la compatibilité robot/tâche :  $(NDL)_{organe\ terminal} \geq (NDL)_{tâche}$

## 8. Précision / Répétabilité

- Positionnement absolu imprécis ( $>1$  mm):
  - Erreurs de modèle géométrique,
  - Erreurs de quantification de la mesure de position,
  - Flexibilités.
- Répétabilité : *la répétabilité d'un robot est l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail.*
- En général, la répétabilité  $< 0.1$  mm.



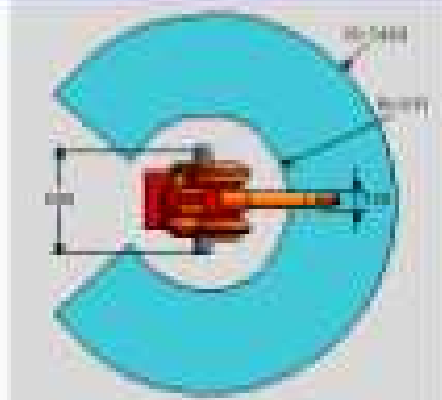
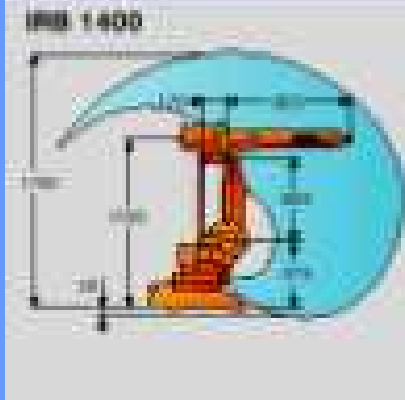
## 9. Performances dynamiques

- Vitesse maximale :
  - Vitesse maximale de translation ou de rotation de chaque axe.
  - Les constructeurs donnent souvent une vitesse de translation maximale de l'organe terminal.
- Accélération maximale :
  - Est donnée pour chaque axe dans la configuration la plus défavorable (inertie maximale, charge maximale).
  - Dépend fortement de l'inertie donc de la position du robot.

## 10. Charge utile

- C'est la charge maximale que peut porter le robot sans dégrader la répétabilité et les performances dynamiques.
- La charge utile est nettement inférieure à la charge maximale que peut porter le robot qui est directement dépendante des actionneurs.

ABB™



# Technical data

## IRB 1400 industrial robot

### SPECIFICATION

Robot version	Handling capacity	Reach of 5 <sup>th</sup> axis	Remarks
IRB 1400	5 kg	1,44 m	
IRB 1400H	5 kg	1,26 m	Hanging
Supplementary load			
on axis 3		10 kg	
on axis 1		10 kg	
Number of axes			
Robot manipulator		6	
External devices		0	
Integrated signal supply		12 signals on upper arm	
Integrated air supply		Max. 8 bar on upper arm	

### PERFORMANCE

Positional repeatability	IRB 1400	IRB 1400H
	±0.05 mm	
Movements		
Max. TCP velocity	2.1 m/s	1.3 m/s
Max. TCP acceleration	15 m/s <sup>2</sup>	13 m/s <sup>2</sup>
Acceleration time 0-1 m/s	0.16 sec.	0.15 sec.
Continuous rotation of axis 6		

### ELECTRICAL CONNECTIONS

Supply voltage	200-600 V, 50/60 Hz
Rated power	
Transformer rating	4 kVA

## Architecture des robots industriels - morphologie

Afin de dénombrer les différentes architectures possibles, on considère que deux paramètres :

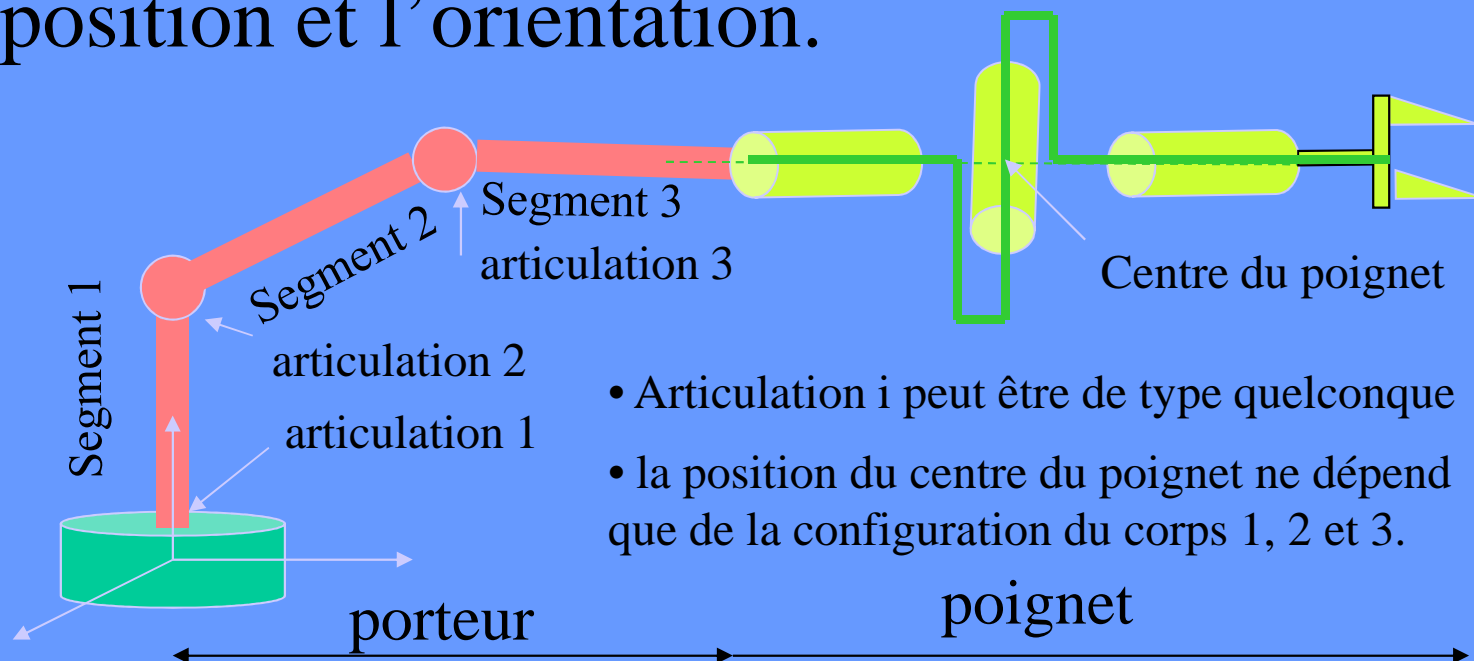
- Le type d'articulation (ar):
  - Rotoïde
  - Prismatique
- L'angle ( $\theta$ ) que font deux axes articulaires consécutifs :  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ .

On convient d'appeler les trois premiers DL d'un robot (à partir de la base du robot) le **porteur du robot**.

Les DL résiduels forment le **poignet**, caractérisé par des dimensions beaucoup plus petites et une plus faible masse.

Dans la pratique, le poignet de type **rotule** est très répandu.

Le robot obtenu en lui associant un porteur à 3 DL est la structure la plus classique à 6 DL. Elle permet d'assurer un découplage entre la position et l'orientation.



## Porteur du robot :

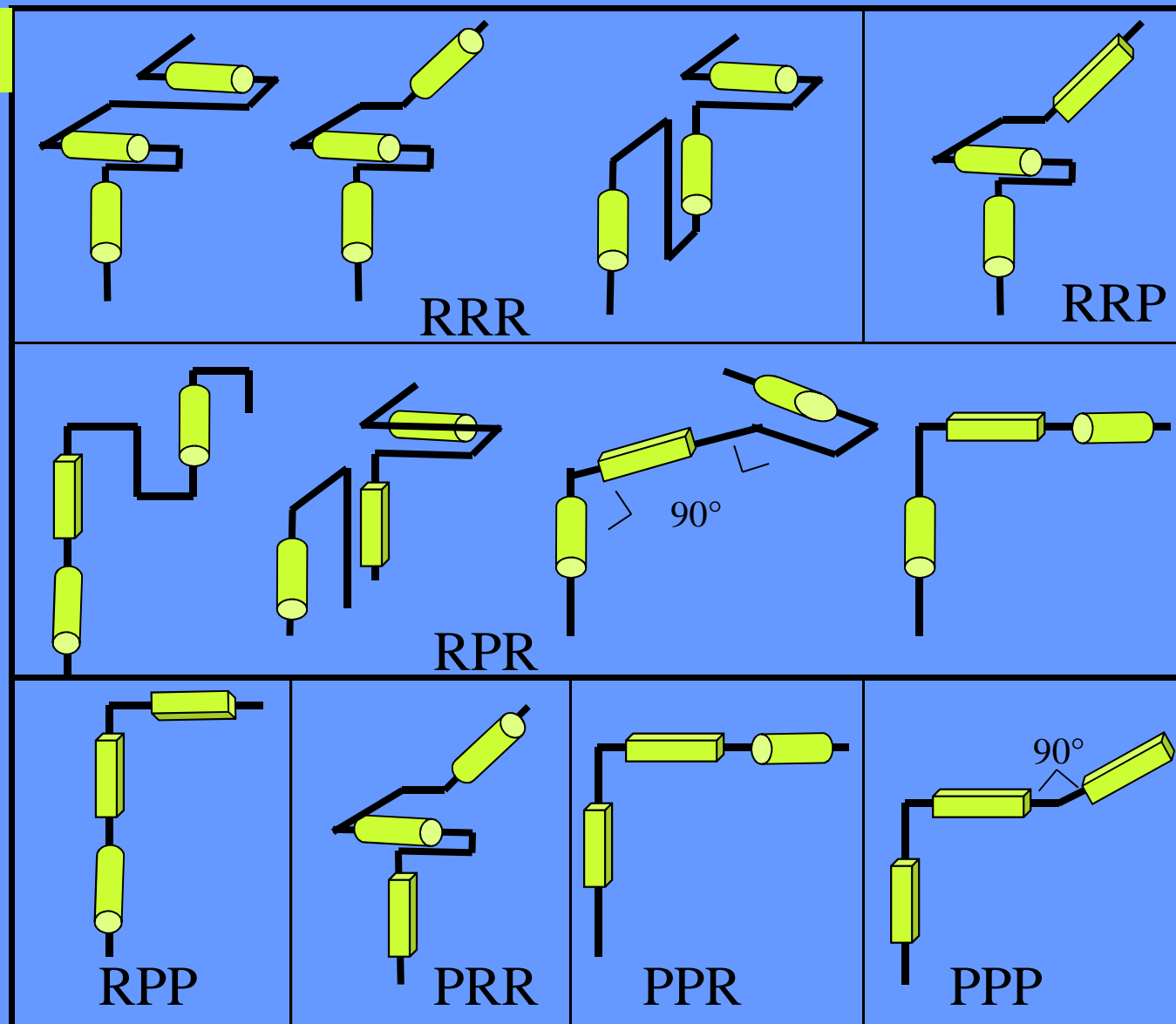
Généralement, sauf exceptions, les axes consécutifs sont soit parallèles, soit perpendiculaires. Le nombre de morphologies possibles en fonction du nombre d'articulations se déduit alors de la combinaison des quatre valeurs que peuvent prendre les paramètres  $a_r$  et  $\theta$ .

NDL	Nombre de structures
2	8
3	36
4	168
5	776
6	3508

Parmi ces architectures 12 seulement sont mathématiquement différentes et non redondantes.



Porteur du robot



Les critères principaux pour choisir une structure en vue d'une application donnée sont :

- Ses performances géométriques : forme et dimensions de son volume de travail,
- Les caractéristiques de la tâche à réaliser.

1. Anthropomorphes (RRR)

2. Sphériques (RRP)

3. Toriques (RRP)

4. Cylindriques (RPP)

5. Cartésiens (PPP)

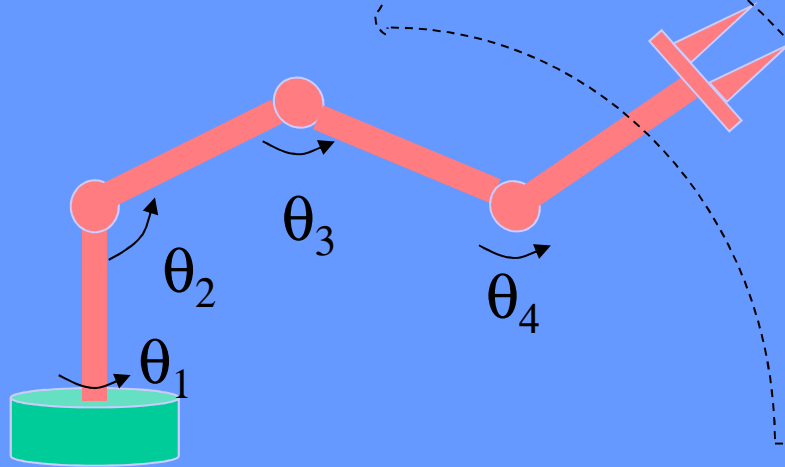
# 1. Anthropomorphe (RRR)



= => Bras humain



Espace du travail

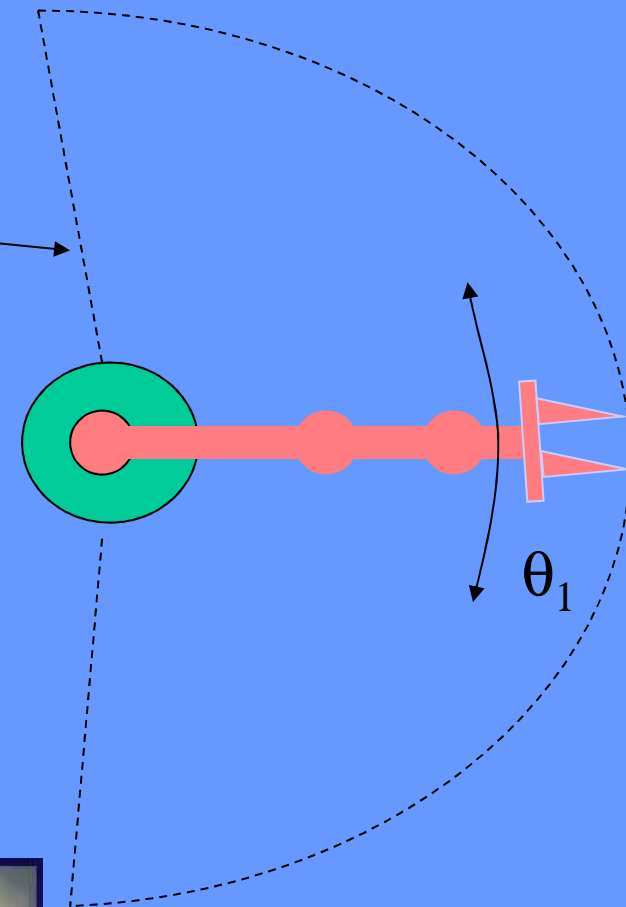


Vue latérale

Exemple  
Kawasaki™

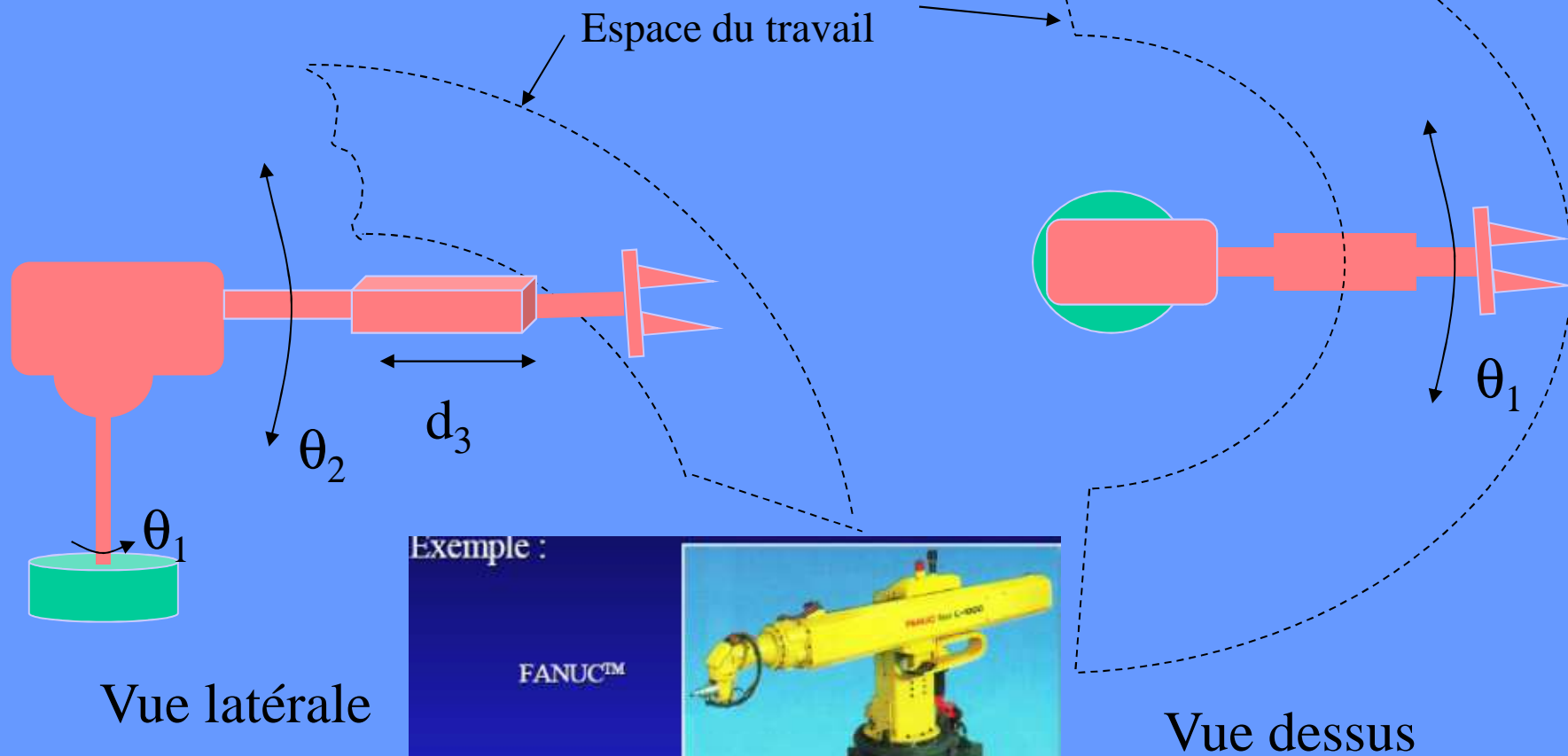
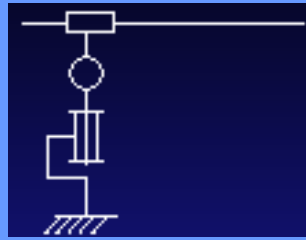


ABB™

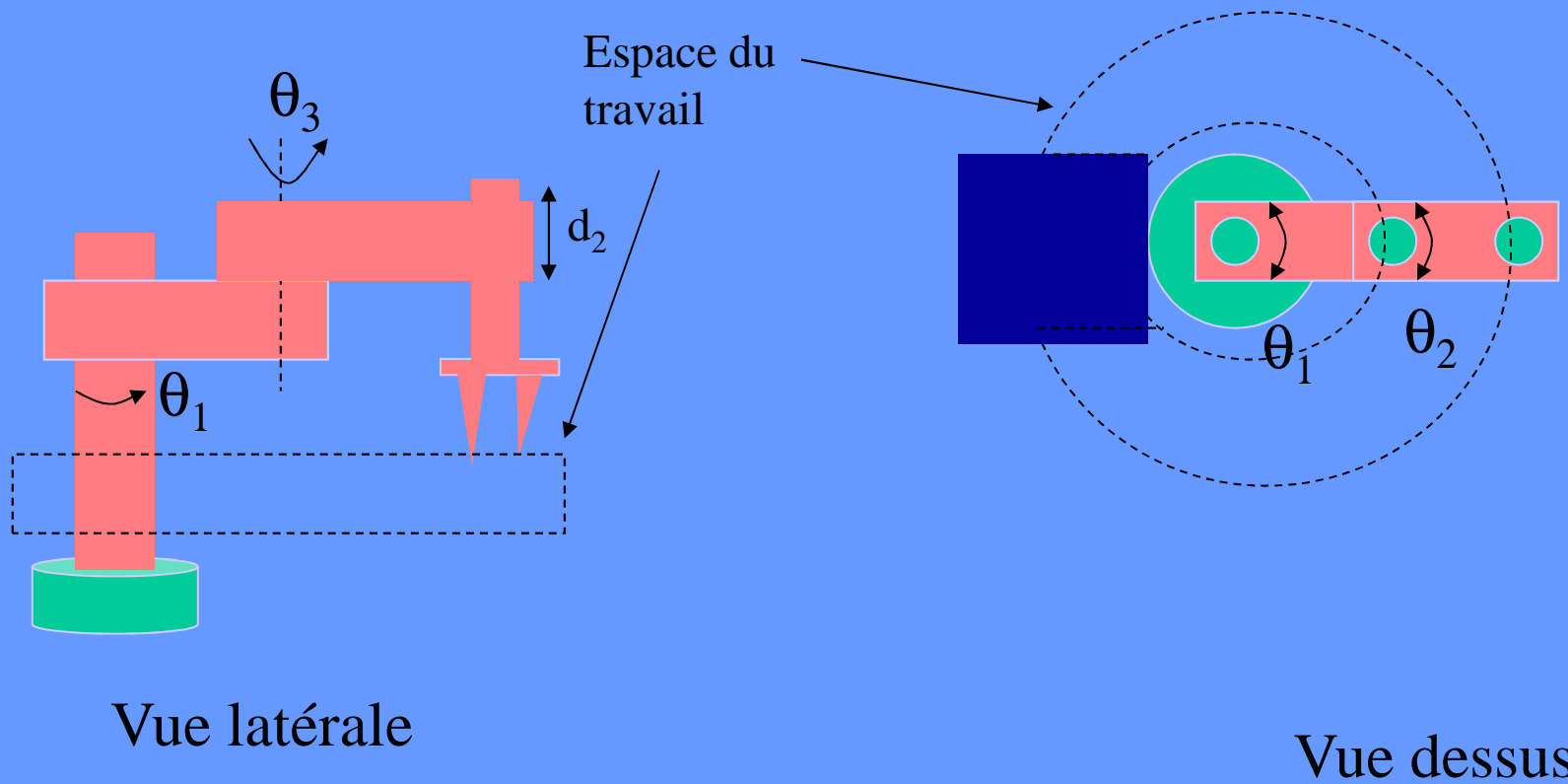
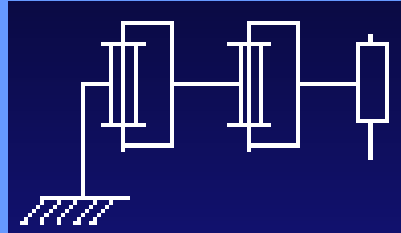


Vue dessus

## 2. Sphérique (RRP)



### 3. Torique (RRP)

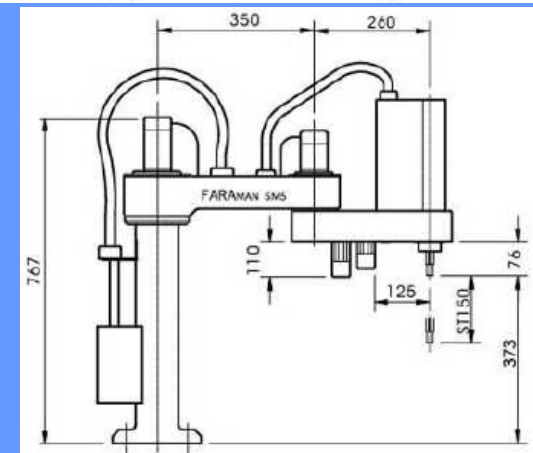


### 3. Torique (RRP) (suite) Exemple

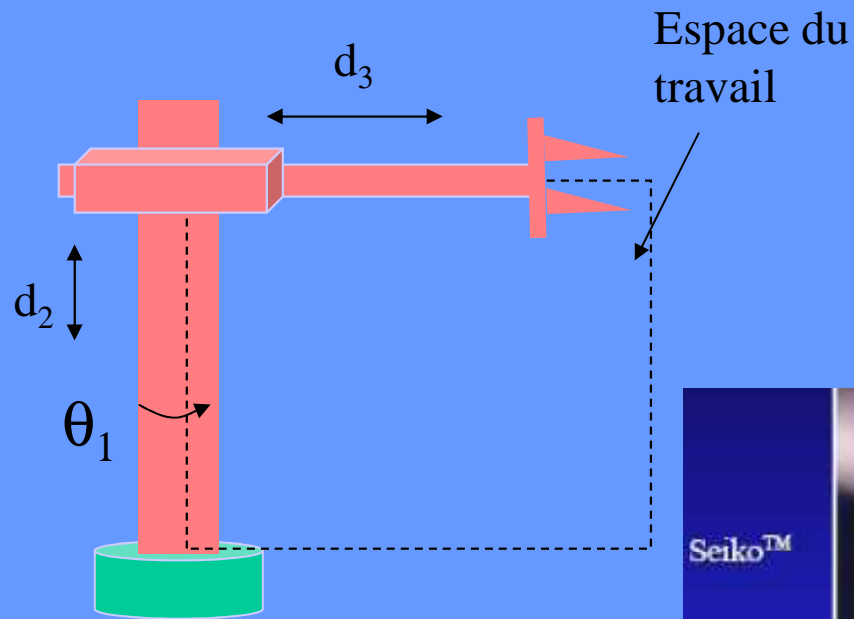
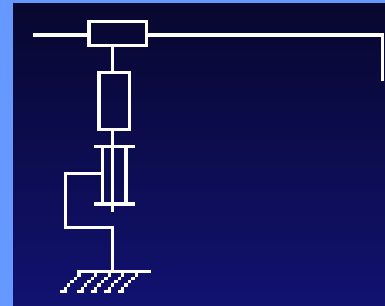


(a) Robot EPSON EL-653M

(b) Robot Samsung RSM-5



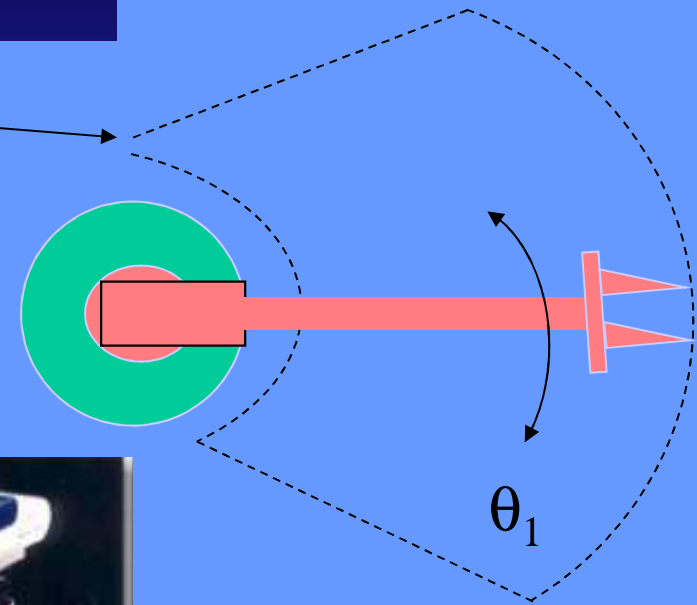
# 4. Cylindrique (RPP)



Vue latérale



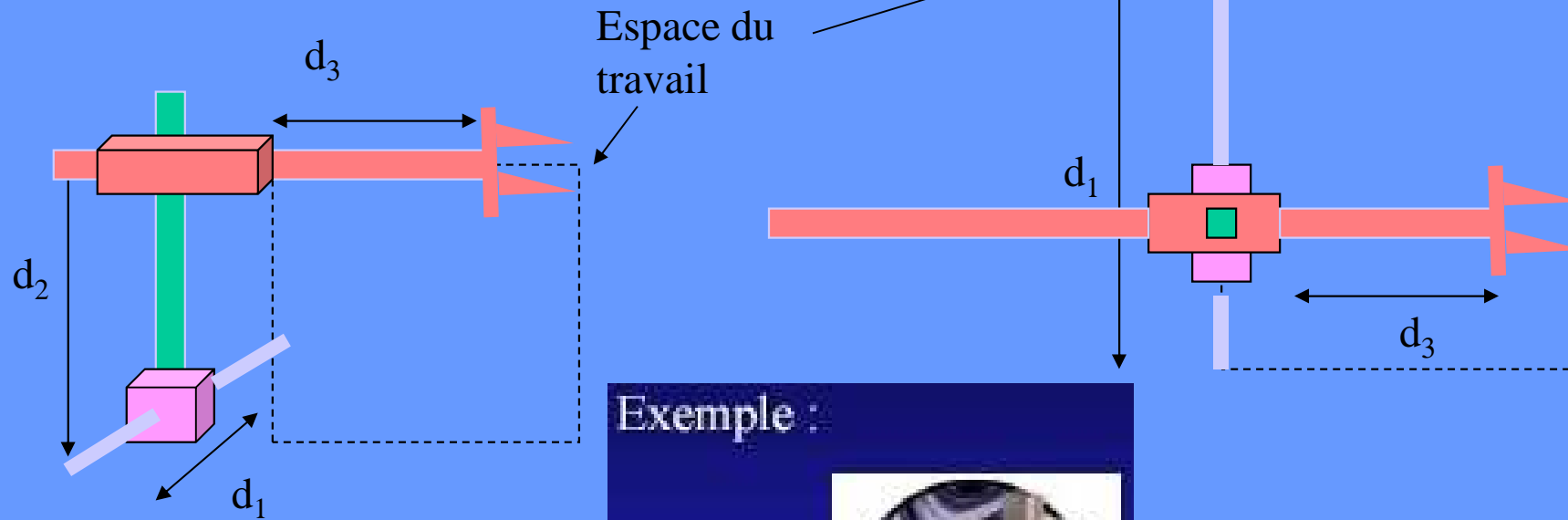
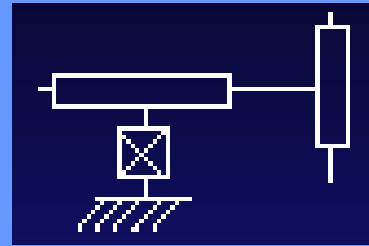
Seiko™



Vue dessus



# 5. Cartésien (PPP)



Vue latérale

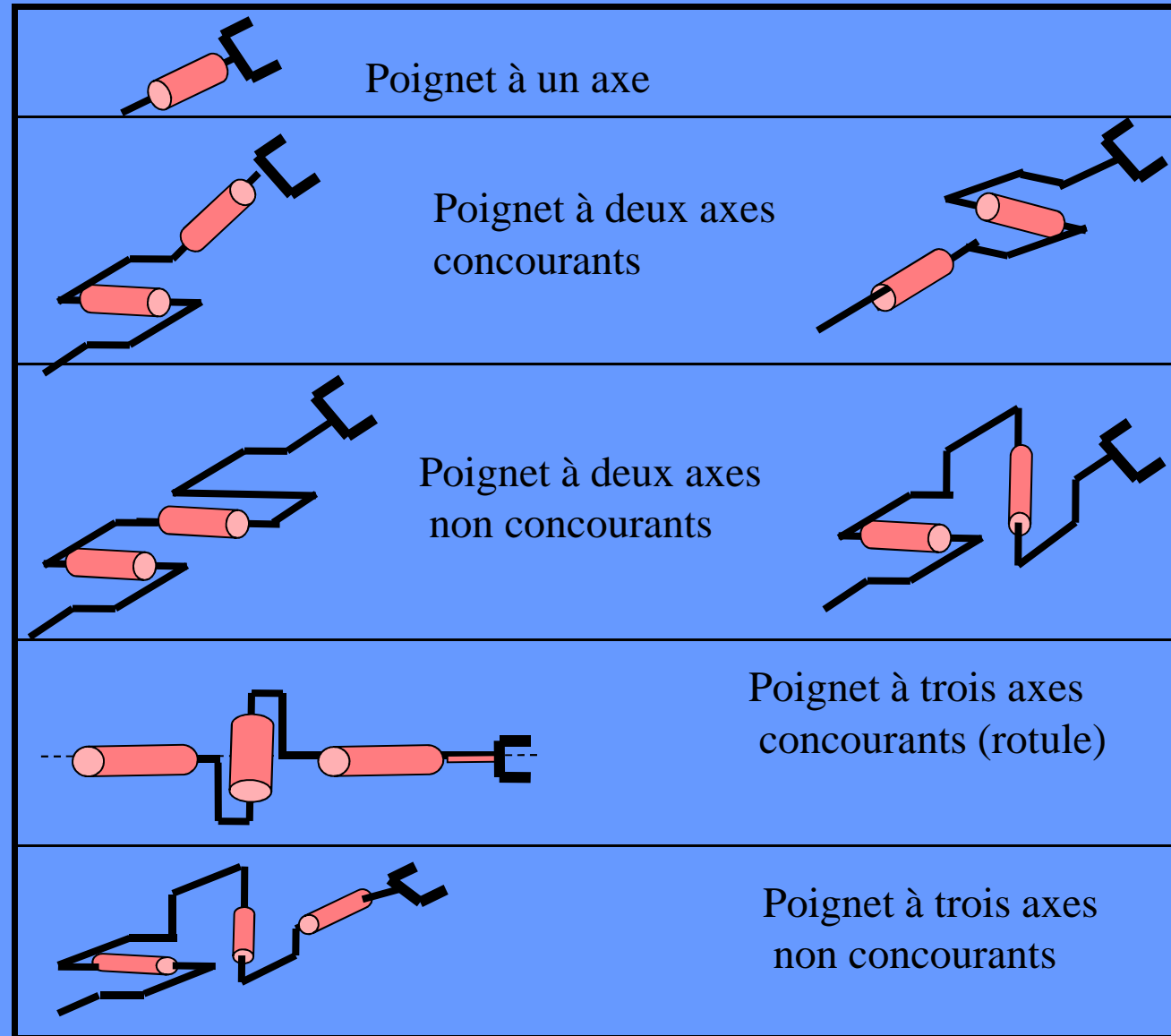
Exemple :

Toshiba™



Vue dessus

## Poignet du robot



# Terminologies

Voici les différents thèmes de domaine qui contribuent à la robotique :

1. Description des différents repères dans l'espace, transformation des repères.
2. Modèle Géométrique Direct (MGD)
3. Modèle Géométrique Inverse (MGI)
4. Modèle Cinématique Direct (MCD)
5. Modèle Cinématique Inverse (MCI)
6. Modèle Dynamique (MD)
7. Génération des trajectoires
8. Commande linéaire et non linéaire en position, vitesse et accélération
9. Commande en effort
10. Programmation des robots
11. Programmation hors-ligne et simulation
12. Conception de la mécanique, des actionneurs et des capteurs
13. Intégration et maîtrise de l'environnement de la tâche.

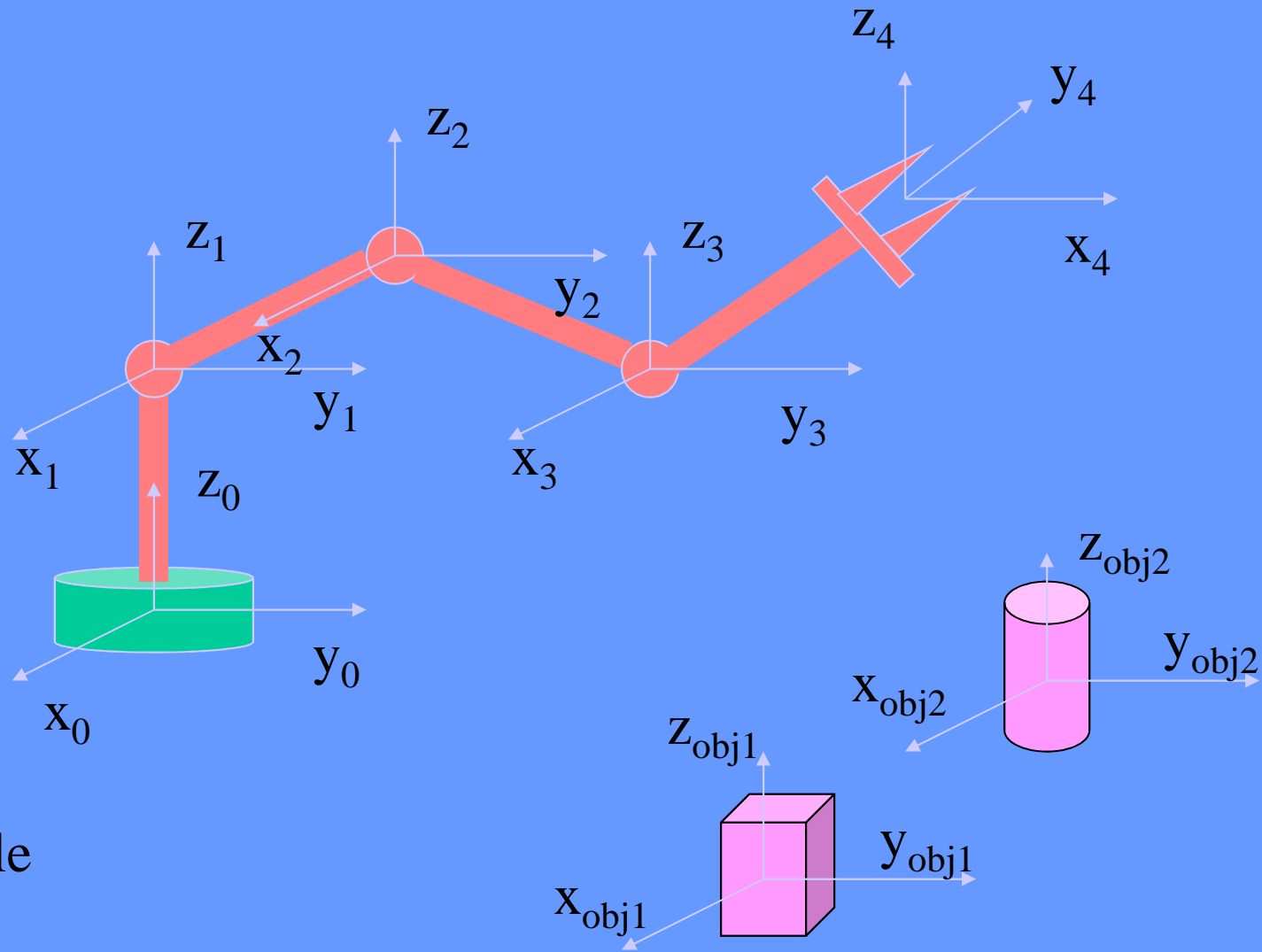
## Terminologies

1. Description des différents repères dans l'espace, transformation des repères.

L'objectif de ce thème est de déterminer la situation statique (vecteur de position ( $\mathbf{P}$ ) et matrice de orientation ( $\mathbf{R}$ )) des différents objets (objet de la tâche, outil de la tâche, articulations et segments, ...) dans l'espace tridimensionnel.

Pour décrire  $\mathbf{P}$  et  $\mathbf{R}$  d'un objet, il faut

- Attacher un système rigide de coordonnées (repère (frame)) à chaque objet.
- Décrire  $\mathbf{P}$  et  $\mathbf{R}$  de ce repère par rapport à une référence quelconque (généralement la base du robot).



Exemple

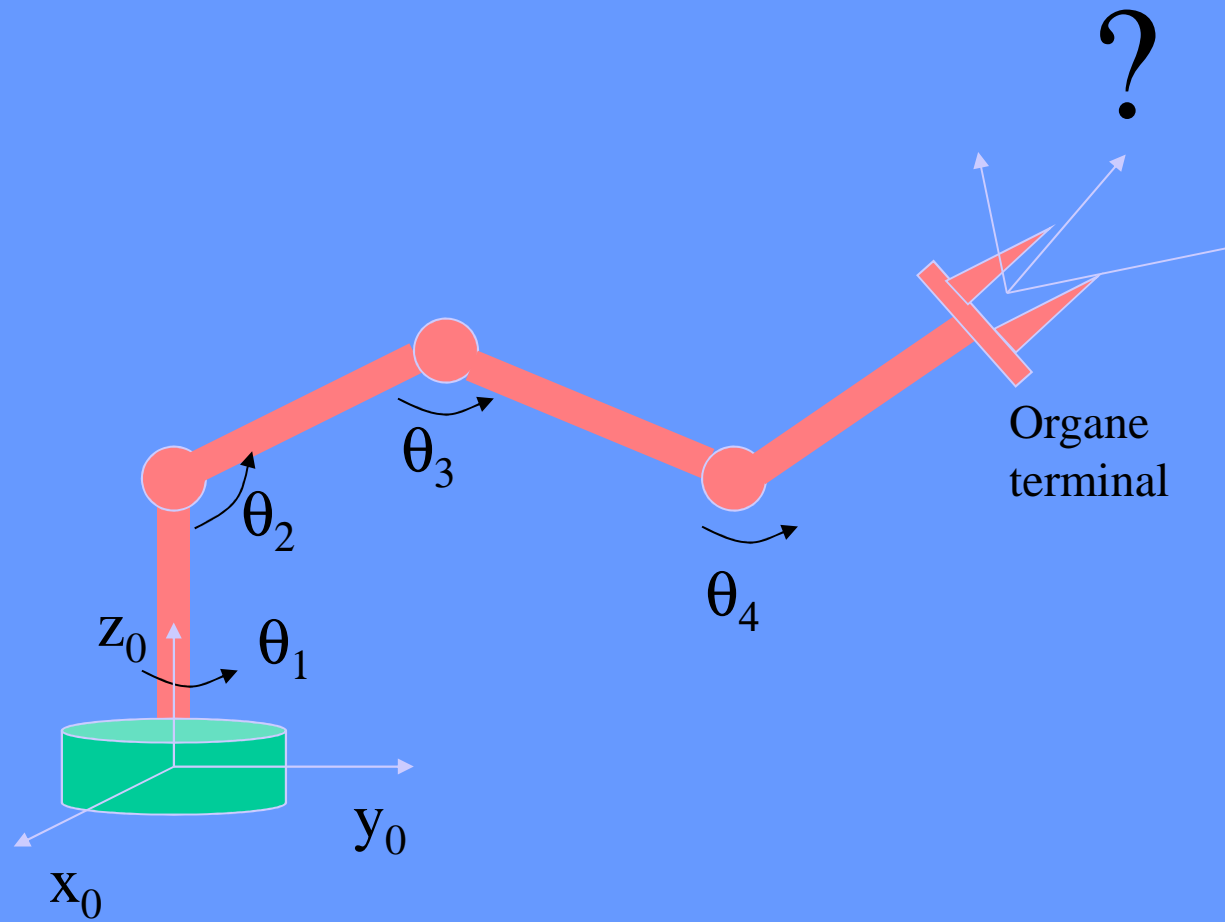
## 2. Modèle Géométrique Direct du robot.

Etant donné un **vecteur d'état  $\mathbf{q}$**  : vecteur ( $n \times 1$ ) de valeurs articulaires ( $\theta$  ou  $d$ ), comment peut-on calculer la **situation statique** (**vecteur de position  $\mathbf{P}$** ) et **matrice de orientation  $\mathbf{R}$** ) de l'organe terminal du robot par rapport au repère de la base du robot?

Description dans l'espace d'état (espace articulaire) de la valeur de la position Articulaires.

transformation

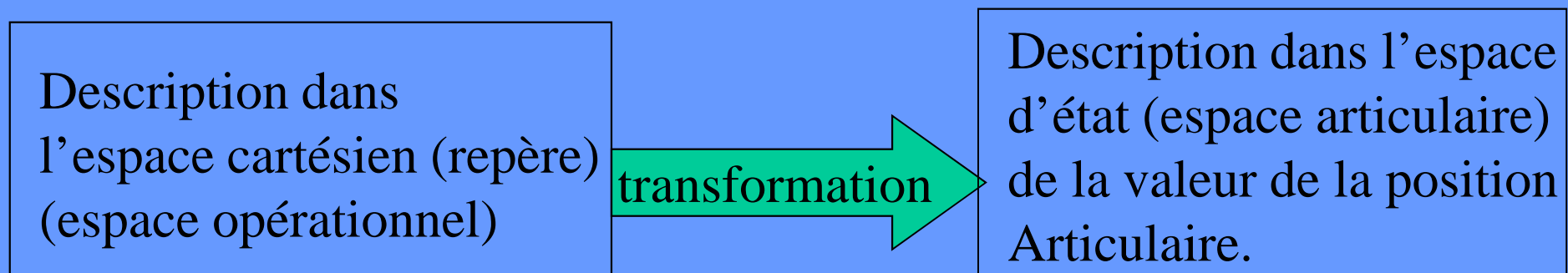
Description dans l'espace cartésien (repère) (espace opérationnel)



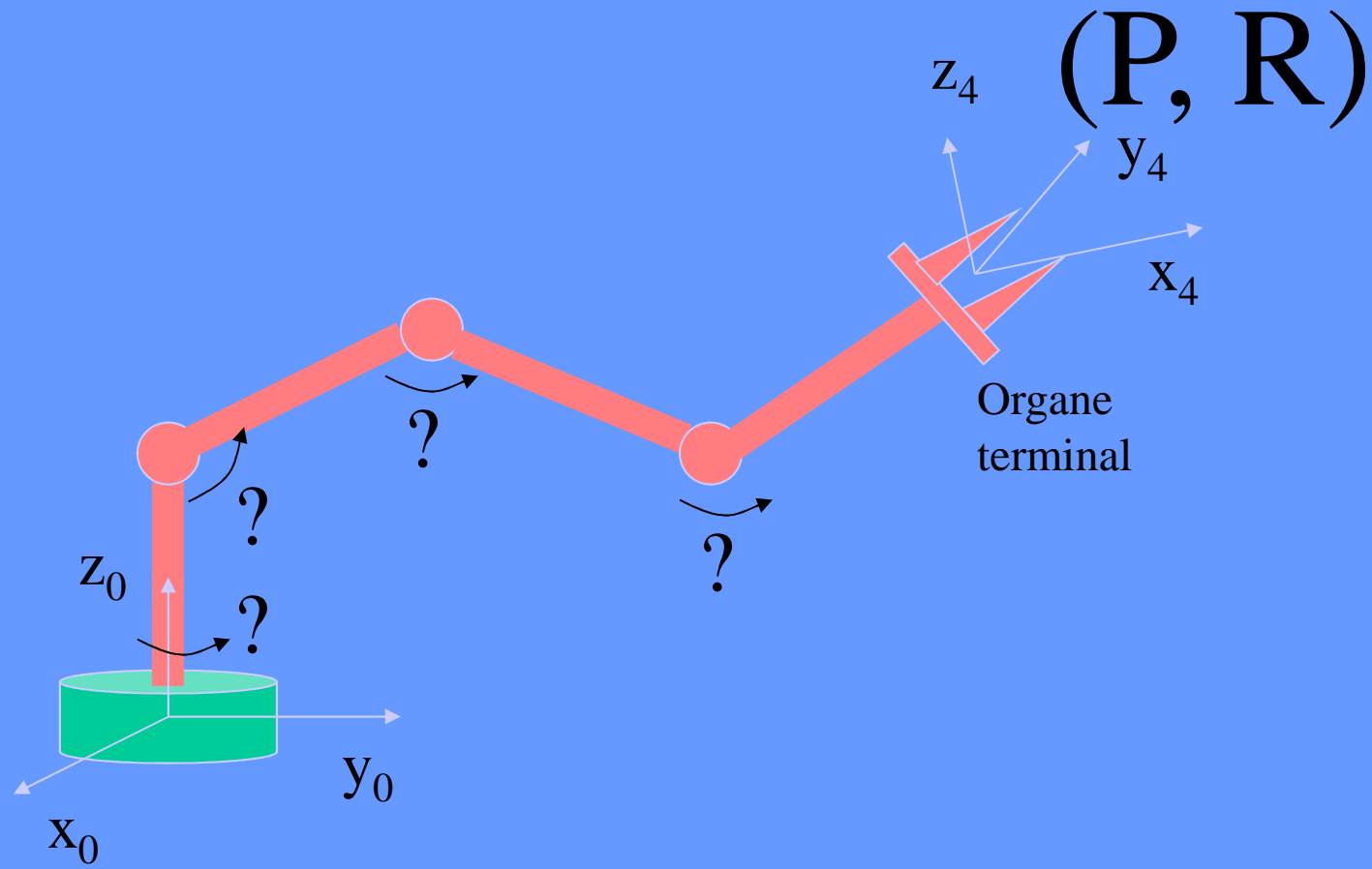
## Exemple MGD

### 3. Modèle Géométrique Inverse du robot.

Etant donné une situation statique du repère (vecteur de position ( $\mathbf{P}$ ) et matrice de orientation ( $\mathbf{R}$ )) de l'organe terminal du robot par rapport au repère de la base du robot comment peut-on calculer le vecteur d'état  $\mathbf{q}$  : vecteur ( $n \times 1$ ) de valeurs articulaires ( $\theta$  ou  $d$ ),?







## Exemple MGI

- Lorsqu'elle existe, la forme explicite qui donne toutes les solutions possibles au problème inverse (il y a rarement unicité de solution) constitue le MGI.
- Il n'existe pas une méthode analytique générale pour trouver le MGI, mais un certain nombre de méthodes, adaptées à des classes de cinématiques particulières.

## Problèmes

Les équations de MGI sont non linéaires

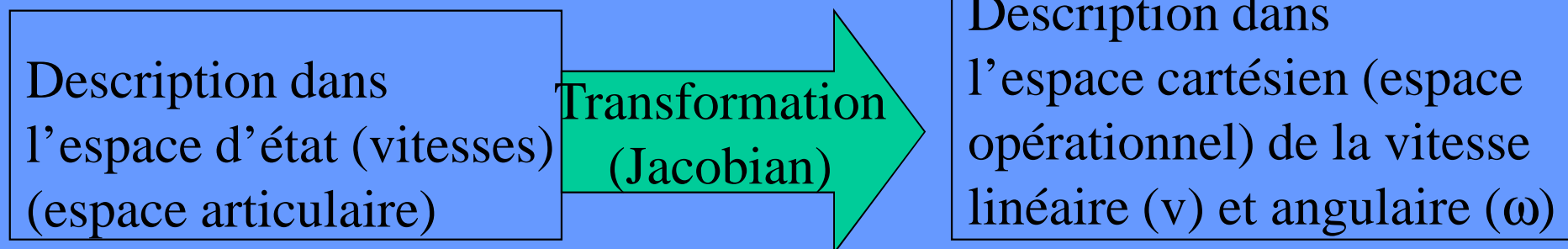
- Leurs solutions ne sont pas simples voir quelques fois impossibles !
- Problème d'existence d'une solution,
- Problème d'unicité de solution.

L'existence ou la non existence d'une solution inverse définit l'**espace de travail** du robot. La manque d'une solution signifie que le robot ne peut atteindre certaines situations car elles se trouvent à l'extérieure de l'espace de travail du robot.

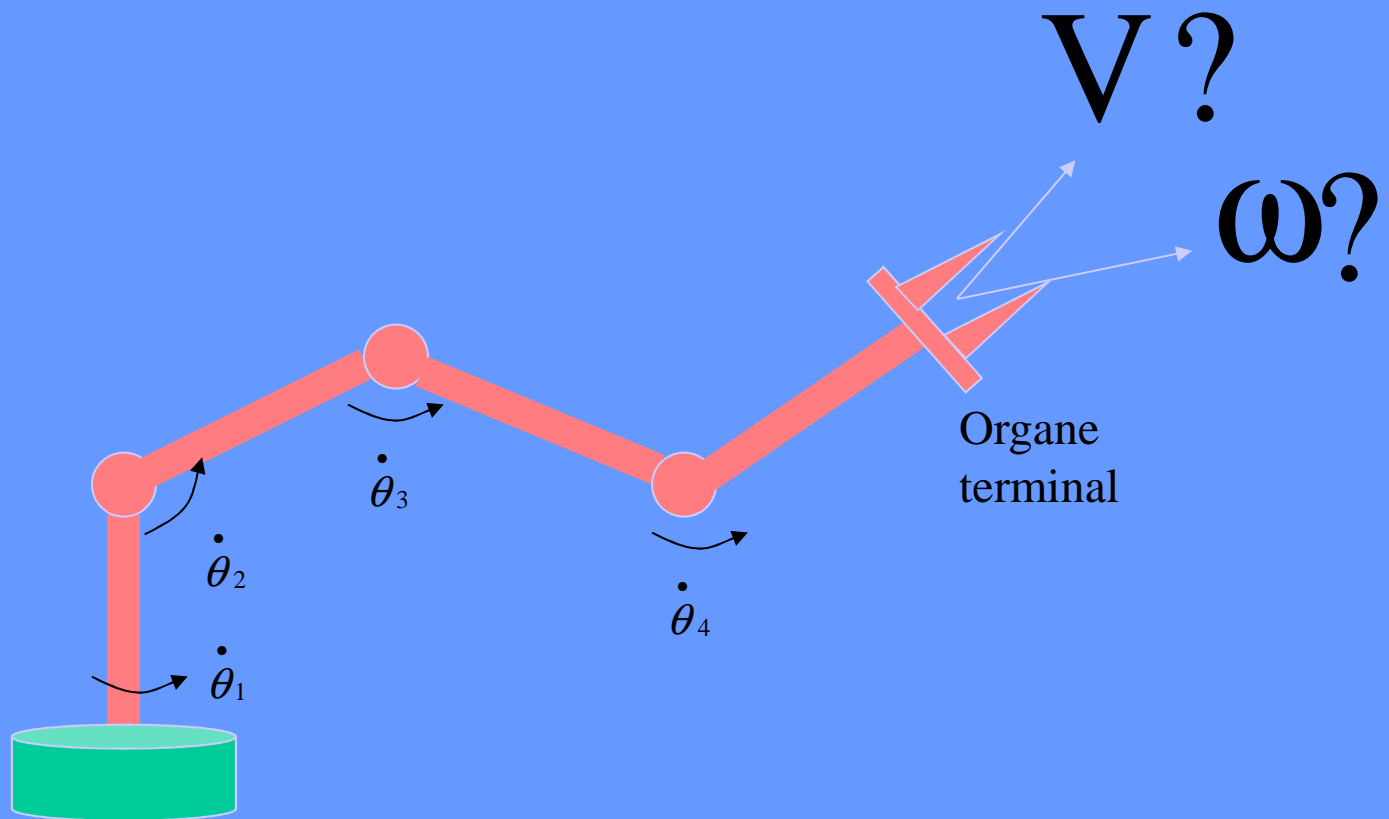
## 4. Le **Modèle Cinématique Direct** du robot

Analyser les robots en mouvement (vitesse et accélération).

Etant donné un **vecteur d'état**  $\dot{q}$  : vecteur ( $n \times 1$ ) de vitesses articulaires ( $\dot{\theta}$  ou  $\dot{d}$ ), comment peut-on calculer la **situation cinématique** (vecteurs de vitesse linéaires et articulaires ( $\mathbf{v}$ ,  $\boldsymbol{\omega}$ )) de l'organe terminal du robot?



La nature de la transformation dépend de la configuration du robot.



Exemple MCD

## 5. Le **Modèle Cinématique Inverse** du robot

Analyser les robots en mouvement (vitesse et accélération).

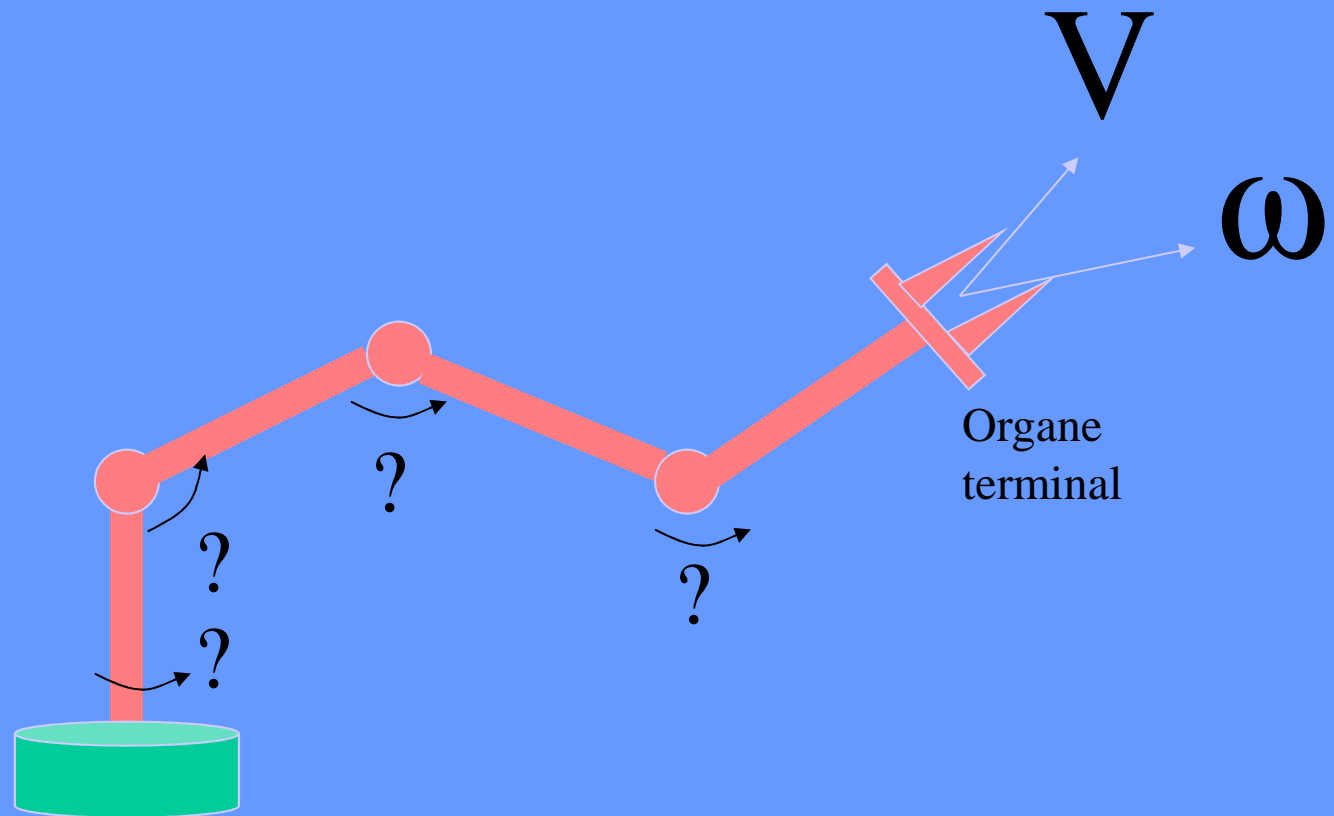
Etant donné une **situation cinématique** (**vecteurs de vitesse linéaires et articulaires**  $(\mathbf{v}, \boldsymbol{\omega})$ ) de l'organe terminal du robot, comment peut-on calculer un **vecteur d'état**  $\dot{\mathbf{q}}$  : vecteur  $(n \times 1)$  de vitesses articulaires  $(\dot{\theta}$  ou  $\dot{d})$ ?

Description dans l'espace cartésien (espace opérationnel) de la vitesse linéaire  $(\mathbf{v})$  et angulaire  $(\boldsymbol{\omega})$

**Transformation  
(Jacobian)**

Description dans l'espace d'état (vitesses) (espace articulaire)

La transformation n'est pas possible sur certains points appelés **points de Singularité** (singularities).



Exemple MCI

## 6. Le **Modèle Dynamique** du robot

Étudier les forces nécessaires pour provoquer le mouvement.

Un ensemble de fonctions de **couples** (**torques**) doit être appliqué par les organes de puissances agissants sur les articulations : moteurs électriques, hydrauliques et pneumatiques (**actionneurs** (**joint actuators**)) pour :

- Accélérer le robot à partir du repos;
- Glisser l'organe terminal avec une vitesse constante;
- Décélérer jusqu'à l'arrêt du robot.



Le modèle dynamique exprime les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples (forces exercés par les actionneurs) et les situations des articulations.

La forme exacte des fonctions de couples des actionneurs dépend :

- des attributs spatiales et temporels de la trajectoire prise par l'organe terminal;
- des masses des segments du robot;
- des frottements au niveau des articulations;
- ...

En général, le modèle dynamique peut être représenté par l'équation suivante :

$$M(q_d)\ddot{q}_d + V(q_d, \dot{q}_d) + G(q_d) = \tau$$

où  $M(q_d)$  matrice d'inertie (dimension nxn)

$V(q_d, \dot{q}_d)$  vecteur des frottements (dimension nx1)

$G(q_d)$  vecteur des forces de gravité (dimension nx1)

$q_d$  vecteur des variables articulaires (dimension nx1)

$\dot{q}_d$  vecteur des vitesses articulaires (dimension nx1)

$\ddot{q}_d$  vecteur des accélérations articulaires (dimension nx1)

$\tau$  vecteur des couples fournis aux actionneurs. (dimension nx1)

$n$  nombre d'articulations

(,..) signifie que le paramètre est une fonction des (,..)

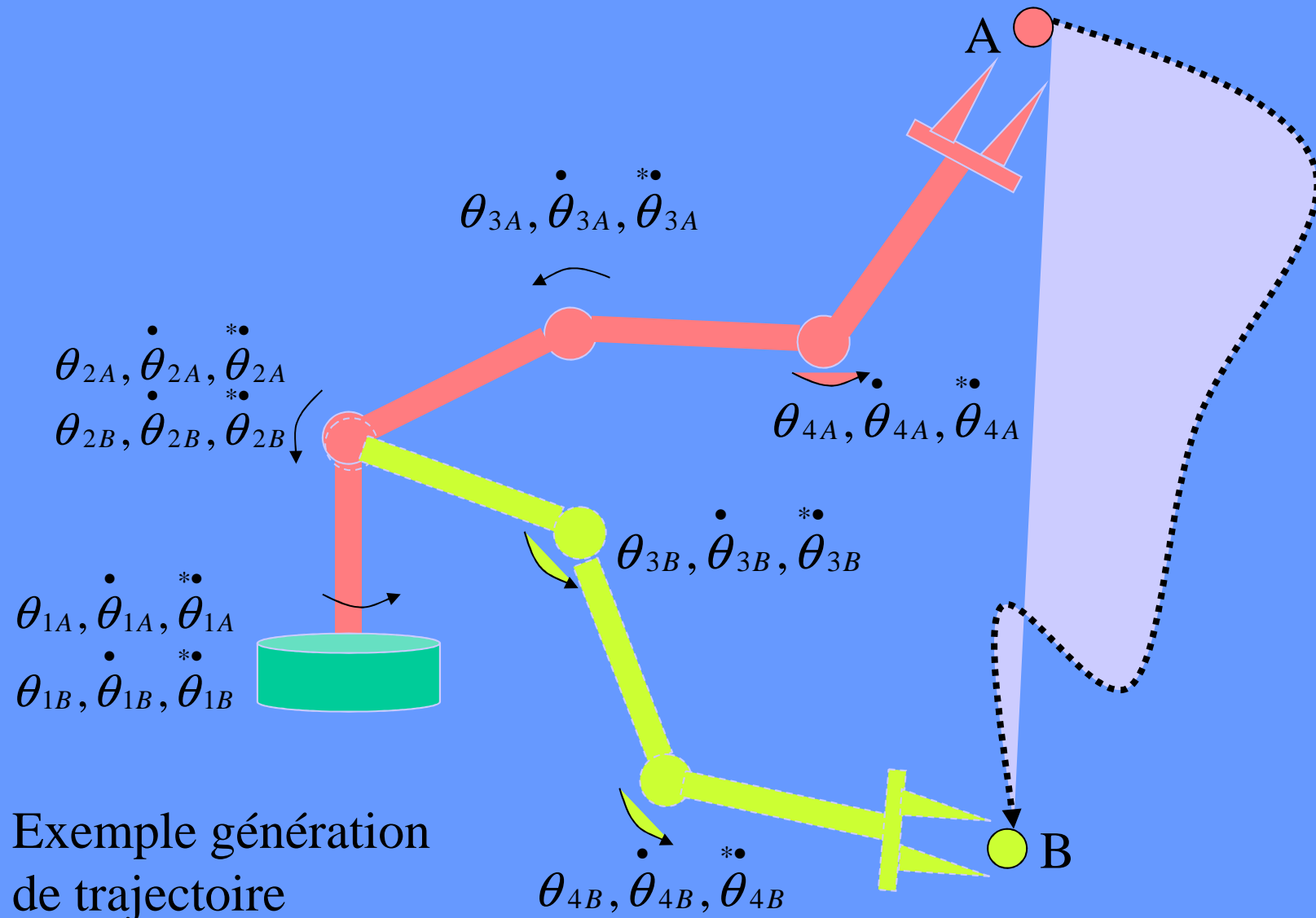
Le modèle dynamique peut être utilisé pour :

1. la **commande** en position, vitesse et accélération du robot en suivant une trajectoire donnée (**consigne**).
2. la **simulation** sur un ordinateur du mouvement du robot en fonction des couples fournis.

## 7. Génération de trajectoires

Calculer des fonctions permettant de contrôler d'une façon lisse le mouvement du robot en suivant une trajectoire donnée?

Ces fonctions sont appliquées aux articulations de telle façon que chacune de ces articulations commence et termine le mouvement en même temps.



Exemple génération  
de trajectoire

Pour forcer l'organe terminal à suivre une trajectoire quelconque dans l'espace opérationnel, le mouvement désiré dans cet espace doit être converti en ensemble équivalent des mouvements articulaires.

Un exemple d'une fonction pouvant générer une trajectoire lisse est la **fonction spline** qui passe par un ensemble de points intermédiaires (via points) liant le début et la fin d'une trajectoire.

## 8. Commande linéaire (linear control) et non linéaire (nonlinear control) en position et vitesse

Dans le cas où les robots sont équipés des actionneurs pas à pas, ces robots peuvent alors exécuter directement une trajectoire désirée.

La vaste majorité des robots son, par contre, équipés d'actionneurs qui exercent un couple pour générer le mouvement des segments.

Dans ce cas, un algorithme de commande en position et vitesse est nécessaire pour générer le mouvement désiré. Cet algorithme fait appel au modèle dynamique pour générer les couples.

Il existe deux approches principales pour la commande :

- **linéaire** : compenser les erreurs en supposant que les paramètres du système sont connus et supprimer les perturbations sur la trajectoire désirée.
- **non linéaire** : le modèle dynamique non linéaire est directement utilisé dans l'algorithme. C'est une approche plus difficile à mettre en œuvre mais elle est plus efficace.



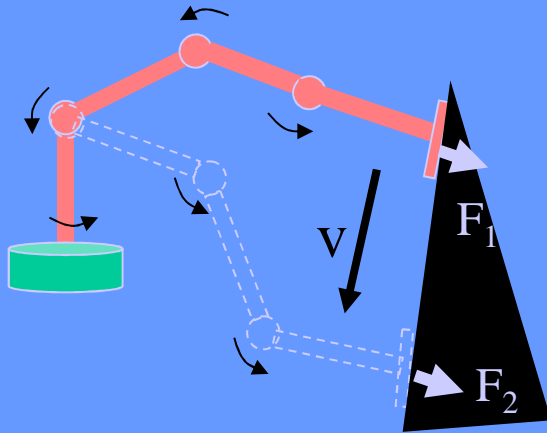
## 9. Commande en effort (force control)

Contrôler les forces et les couples de contact au cours des tâches impliquant des interactions entre le robot et son environnement. Cette commande est complémentaire à la commande en position et vitesse.

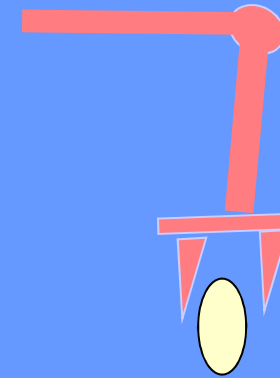
Grâce à des capteurs d'effort, des mesures sont effectuées pour modifier le mouvement de référence en fonction des efforts de contact. Cette procédure définit ce que l'on appelle **compliance**.

Les robots sont rarement soumis simultanément à des réactions de surfaces dans toutes les directions. Dans ce cas, il est justifié d'utiliser un **algorithme hybride** de commande où certaines directions sont contrôlées par une loi de commande en position ou vitesse et les restes de directions sont contrôlées par une loi de commande en effort.

## Exemples



Suivi de surfaces  
ou d'arêtes.



Manipuler un œuf sans  
le casser.

Autres exemples : assemblage, usinage (ébarbage, ébavurage, ...)

Afin de maîtriser les efforts de contacts, il existe plusieurs solutions :

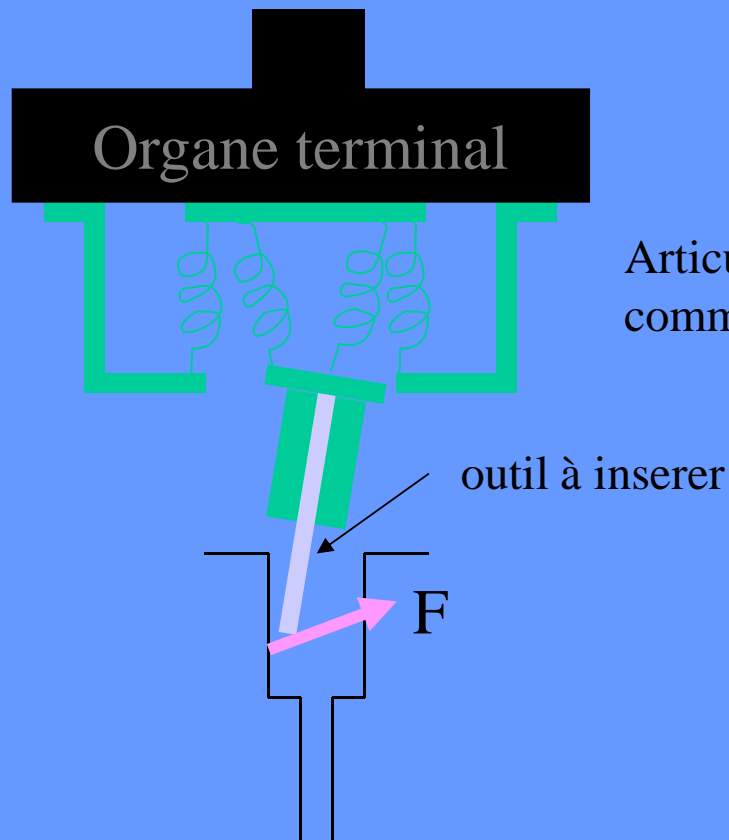
- Compliance passive
- Compliance active

**Compliance passive** : elle consiste à interposer entre l'organe terminal et l'effecteur un dispositif présentant une certaine élasticité.

**Compliance active** : dans ce cas le système de commande agit sur les efforts.

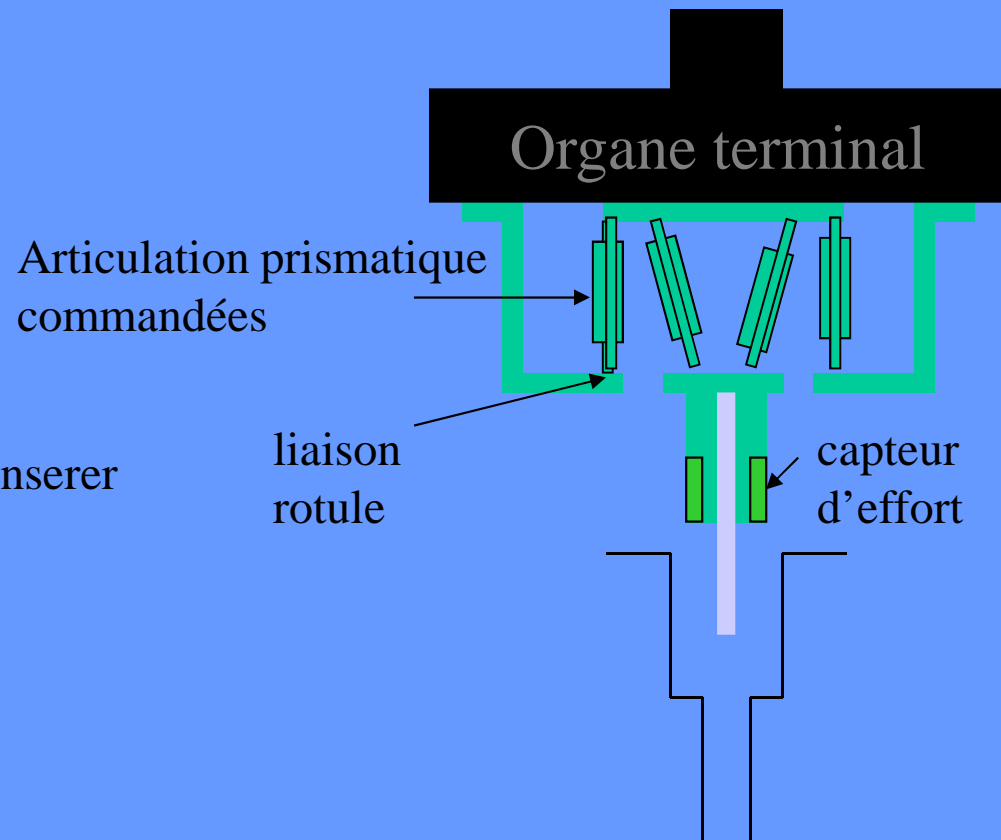
## Compliance active (suite):

- Solution 1 (**déplacement gardé**) : doter le robot d'un capteur d'effort qui détecte les contacts, et d'une commande qui analyse les efforts et contrôle la trajectoire en conséquence. Par itérations successives, on obtient un mouvement compliant en ce sens qu'il minimise les efforts de contact.
- Solution 2 (**contrôle continue**) : concevoir une commande en effort qui puisse maîtriser les efforts de contact de façon continue.



a. Compliance passive : le système peut se déformer convenablement pour pivoter l'outil sous l'action de la force  $F$ .

Exemple (cet exemple n'est pas tiré d'une situation pratique réelle, il a uniquement pour objectif d'illustrer la différence entre les deux méthodes.



b. Compliance active : Les actionneurs (articulations prismatiques) sont commandés pour pivoter en translation et rotation de l'outil.

## 10. Langages de programmation des robots-Interface homme/robot (robot language)

Ce thème répond aux questions suivantes :

- Comment peut-on décrire facilement le mouvement dans l'espace pour un programmeur?
- Comment peut-on décrire les actions basées sur des capteurs par un langage?
- Comment peut-on programmer plusieurs robots pour qu'ils fonctionnent en parallèle?

## 11. Programmation hors ligne des robots-simulation (Off line programming - simulation)

Ce thème répond à la question suivante :

- Comment peut-on développer des programmes pour manipuler le robot sans avoir besoin d'accéder physiquement au robot ?

Dans ce cadre, les outils de simulation associés au modèle dynamique du robot permettent de répondre à cette question.



## 12. Conception des mécaniques, des actionneurs et des capteurs proprioceptifs des robots

Un robot industriel peut exécuter une tâche universelle?

Doit-on choisir un robot universel pour réaliser une tâche spécifique?

La réponse, bien sûr, est non puisque par des obligations économiques et technologiques la conception du robot doit être en fonction de l'application.

Plusieurs considérations doivent être pris en compte:

- Volume;
- Vitesse;
- Capacité de la charge;
- Nombre d'articulations;
- La conception géométrique des articulations;

Ces considérations influencent :

- L'espace du travail du robot;
- La qualité de la structure du robot;
- La rigidité du robot;
- Etc....

Autres considérations :

- Emplacement des actionneurs;
- Emplacement des systèmes de transmission mécaniques;
- Position interne des capteurs de position et éventuellement de l'effort.

## 13. Environnement

Dans l'environnement de la tâche, il faut prévoir par exemple :

- Unité de commande manuel et automatique du robot avec un système de sécurité;
- Des systèmes pour l'aménagement et l'évacuation des pièces ou des objets assemblés par le robot;
- Dispositif d'orientation et de séparation des pièces;
- Un effecteur adapté à la saisie des pièces;
- Dispositifs de transfert;
- Dispositif de chargement;
- Système de vision ou/et capteurs tactiles pour un robot de 3ème génération;
- Etc ...

## Bibliographie

1. John J. Craig. Introduction to robotics mechanics and control, 2nd Ed. Addison Wesley Publishing Company, 1989.
2. John J. Craig. Adaptive control of mechanical Manipulators. Addison Wesley Publishing Company, 1988.
3. Etienne Dombre, Wisama Khalil. Modélisation et commande des robots. Addition HRMES, Paris, 1988.
4. [http://eavr.u-strasbg.fr/wiki/images/a/a4/Cours\\_rob\\_intro.pdf](http://eavr.u-strasbg.fr/wiki/images/a/a4/Cours_rob_intro.pdf)