



## Introduction à la robotique & cobotique

**Gérard POISSON**  
Pr. émérite à PRISME

# Déroulé de la présentation

## Le laboratoire PRISME

La robotique à PRISME

Actions récentes et en cours

## Historique de la robotique

De Unimate-001 aux cobots de 2025

## Évolutions des performances des robots

Volume de travail, Charge, Vitesse, Précision...

Résolvabilité

## Robots et cobots

## Fabrication Additive Robotisée

# Le Laboratoire PRISME

2 Établissements

220 Personnes, 110 Prof. & MCF

① Énergie : Combustion, Explosion, Aérodynamique

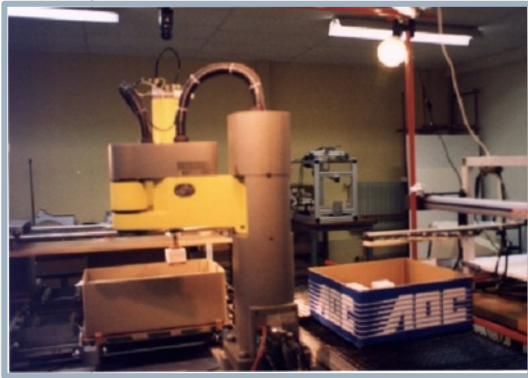
② Image-Vision, Signal, Automatique, Robotique



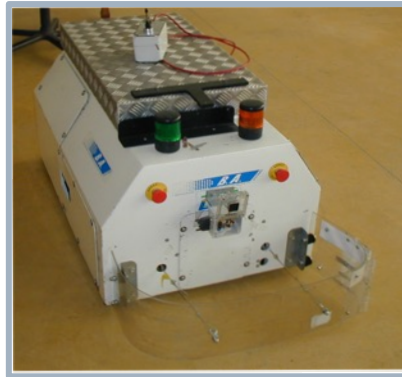
Bourges  
Chartres  
Châteauroux  
Orléans

# Thèmes Historiques à Prisme / Rob

## Perception, Robotique Mobile, Télé-Échographie



Préparation de  
commande par robot



Robotique mobile  
Lasero-guidée

Conception Mécatronique, Commande  
Autonomie / Téléopération /  
Comanipulation / Micro-Nano



Intégration de prototypes, TRL9

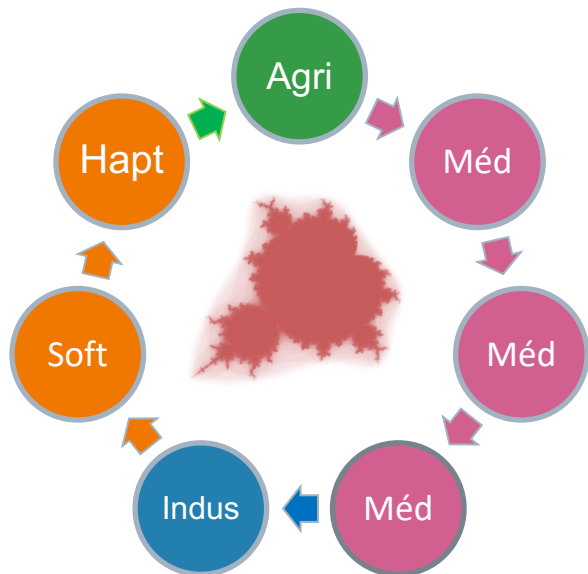


Télé-échographie

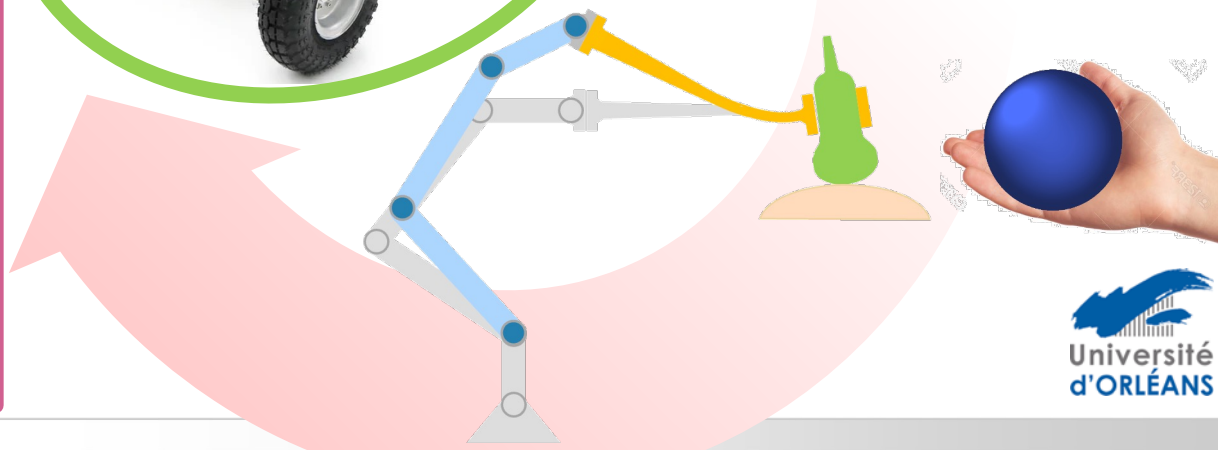
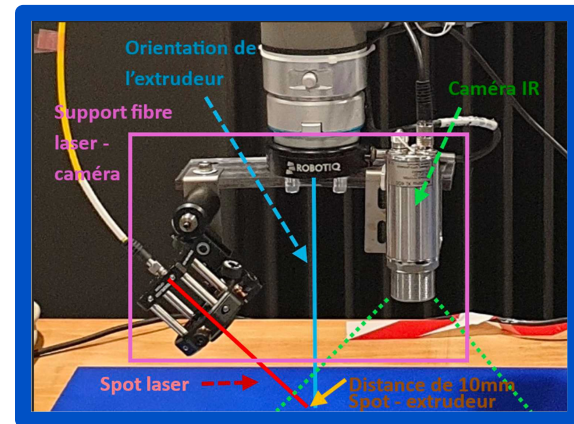
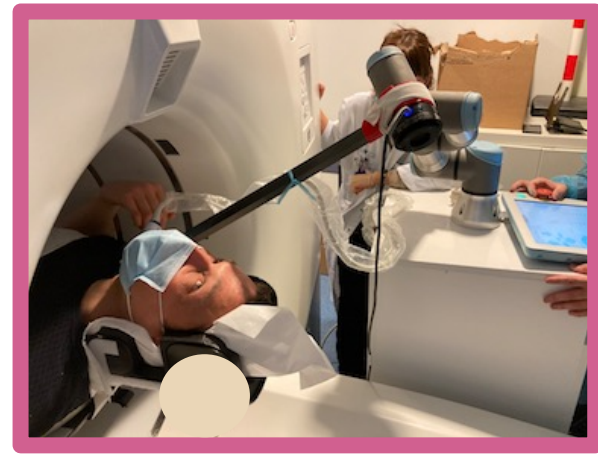


# Recherches récentes et en cours

## Trois Secteurs d'Application



- **Désherbage Robotisé**
- **Traitement robotisé de la Cochlée**
- **Corset Robotisé pour la Scoliose**
- **Détection, Suivi de cellules cancer.**
- **Fabrication Additive Robotisée**
- **Robotique Souple**
- **Haptique**



# Histoire...

...de la Robotique



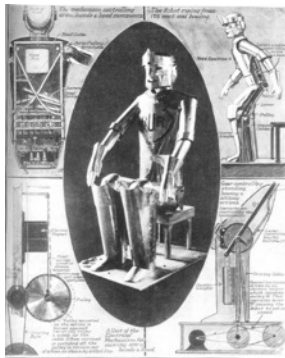
et de la Robotique Médicale

# Les dates clés en robotique du XX



Origine du mot  
"Robot"

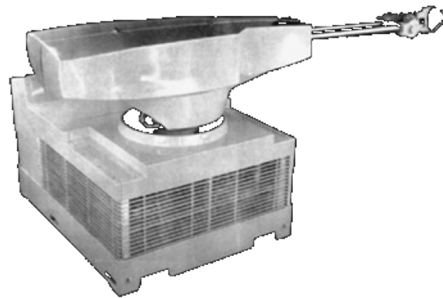
1921



*Unimate 001*

1<sup>er</sup> Robot Industriel

1961



Opération  
Lindbergh  
Zeus

1985

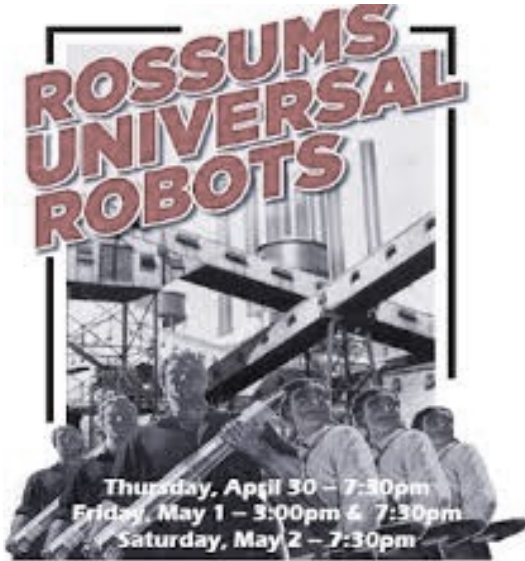
NeuroChirurgie

2001

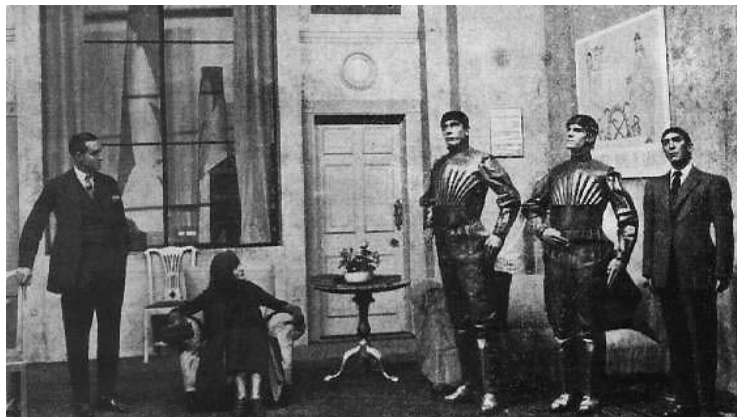
Chirurgie  
Mini  
Invasive



# 1921 : le concept de Robot



R.U.R. est  
Une pièce de  
Science Fiction  
par  
**Karel Čapek**



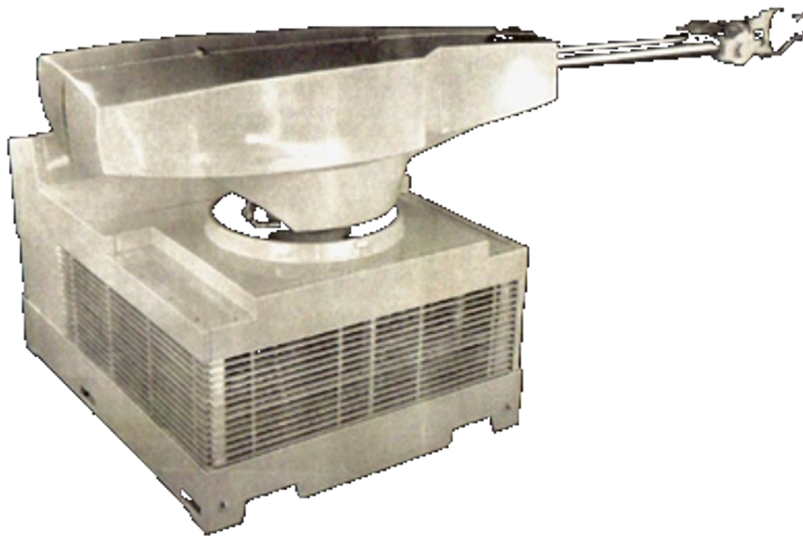
**“robota”** signifie  
travail

# 1961 : Robotique et Industrie



## Unimate 001 : le 1<sup>er</sup> Robot Programmable

Brevet de George Devol et Joseph Engelberger (USA)



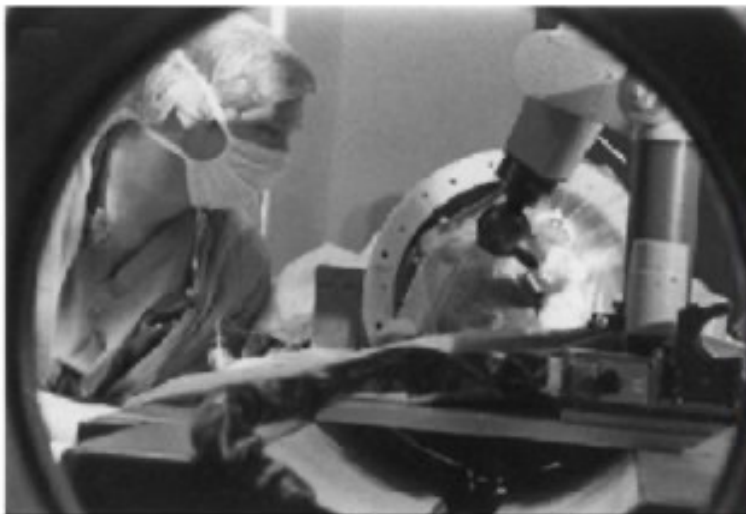
**Unimate a été inspiré par les manipulateurs nucléaires**

- Intégré sur une chaîne General Motors
- Commercialisé par la société Unimation

# 1985 : 1<sup>re</sup> intervention médicale



Pour des biopsies (ponction de tumeurs) dans le cerveau



Credit: Roger Ressmeyer/CORBIS

Le robot était un **PUMA 200** de chez Unimation  
Il portait un pointeur Laser pour assister le chirurgien qui pratiquait des biopsies

**L'utilisation s'est arrêtée après une série de 22 patients**  
**Le robot était considéré comme inadapté pour l'utilisation clinique, et générait des tremblements de la main**

# De robot *type-industriel* à solution dédiée



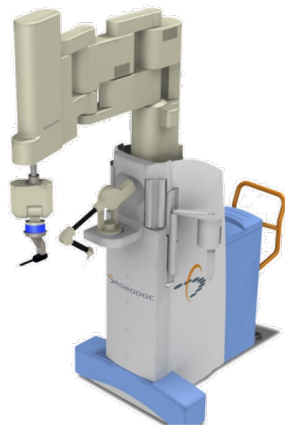
**Neuromate** (Robot **AID** en 1988)  
Commercialisé par Renishaw (GB)  
Milliers de patients



**ROSA Brain** (Stäubli, 2009)  
**ROSA Spine** (2014)



MedTech, Montpellier  
→ Zimmer Biomet USA



**Robodoc** (Robot **IBM** en 1992)



**Caspar** (Robot **Stäubli** en 1999)



OrthoMaquet  
Allemagne



**STÄUBLI**  
TX2-90

Poses de prothèses de genou et de Hanches



# Les robots médicaux

## 2 exemples de robots téléopérés



Da Vinci,  
robot de chirurgie Mini-invasive,  
*Intuitive Surgical, USA*



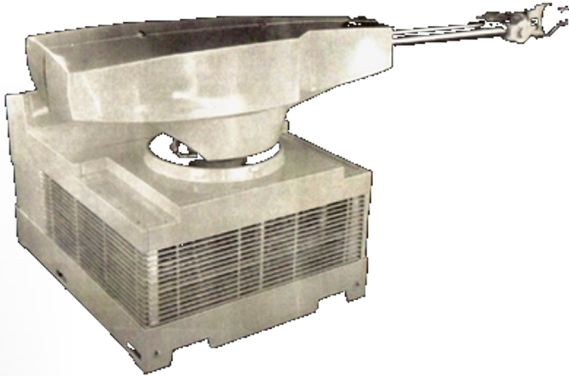
Melody,  
robot de Télé-échographie  
Développé à partir de recherches  
PRISME,  
à Bourges

# Évolution...



# ...des performances

# 64 années de robotique industrielle



1961  
Unimate 001



1973  
KUKA Famulus



1974  
ASEA IRB6



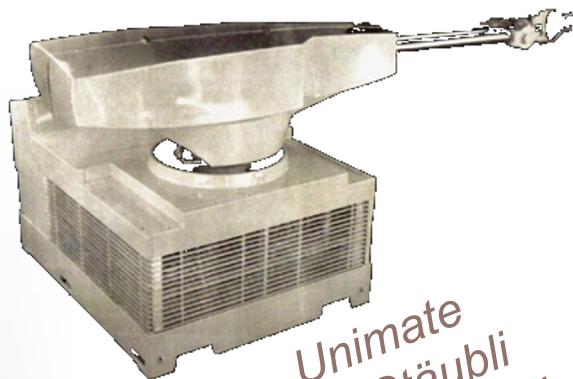
1978

RENAULT Acma

*« Une application est en service à Flins, où les opérations de finition de la carrosserie de la Renault 18 sont en partie réalisées par 21 robots, directement implantés dans la chaîne de montage. Pilotés par des minicalculateurs, ils effectuent automatiquement des opérations de soudage et de peinture sous la seule surveillance d'opérateurs »*

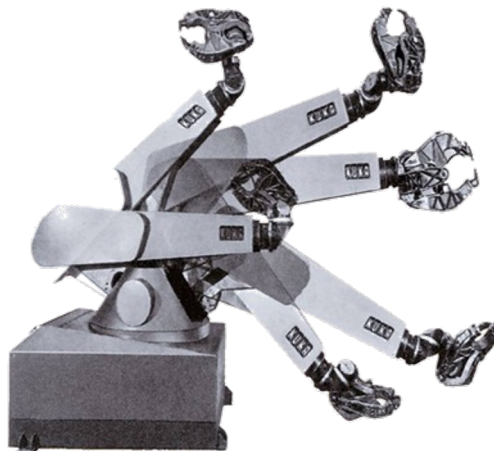
**Le Monde - 1979**

# 64 années de robotique industrielle



Unimate  
→ Stäubli  
→ en 2004

1961  
Unimate 001

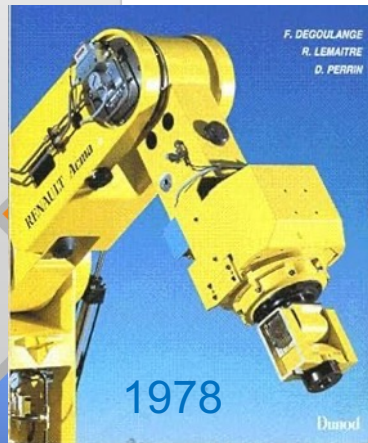


1973  
KUKA Famulus



ASEA  
→ ABB  
en 1988

1974  
ASEA IRB6



1978

RENAULT Acma



2008  
Universal Robots UR5



2021  
FANUC  
CRX-10iA



# 64 années de robotique industrielle



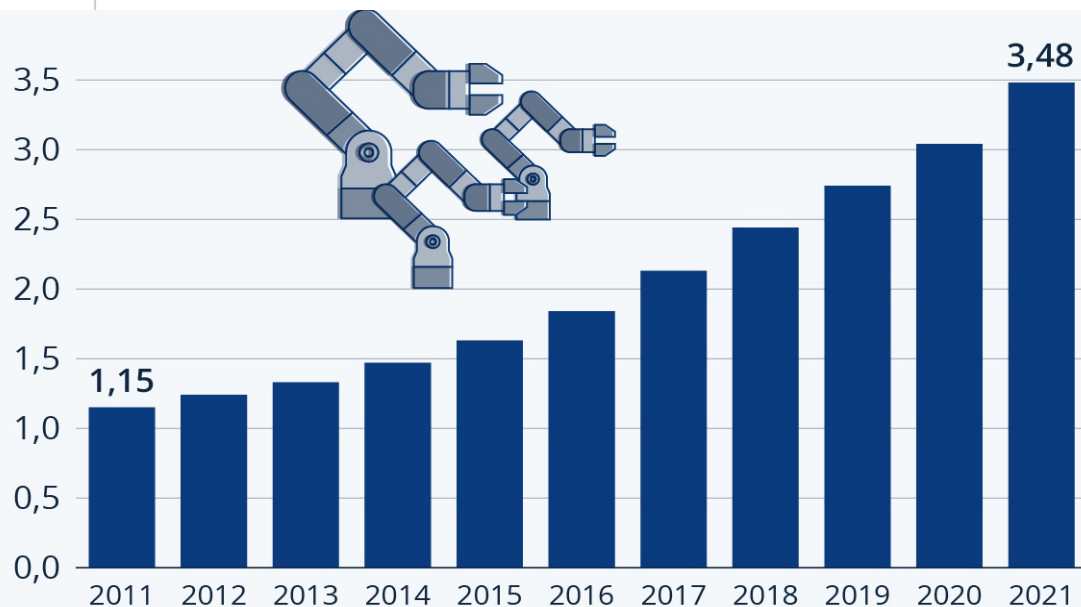
1974  
ASEA IRB 6



2024  
KUKA KR 160

Coût	100%	<div></div>	30%
Poids	100%	<div></div>	50%
Nombre de pièces	100%	<div></div>	30%
Heures de montage	100%	<div></div>	20%
Maintenance	100%	<div></div>	30%
Performance	100%	<div></div>	200%

# Observation des parcs de robots



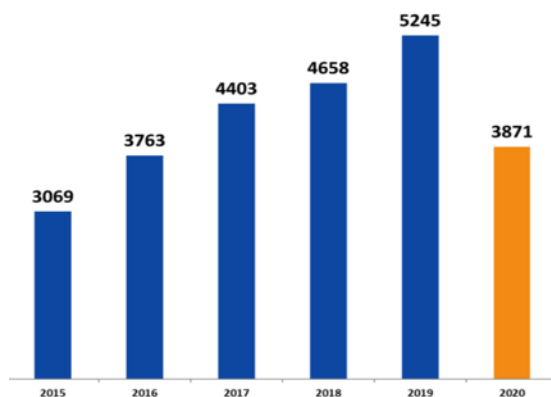
Parc Mondial :

1 million en 2010

3 millions en 2020

**5 millions en 2025**

*Devrait tripler d'ici 2030*



*Nombre de robots installés en France par année*

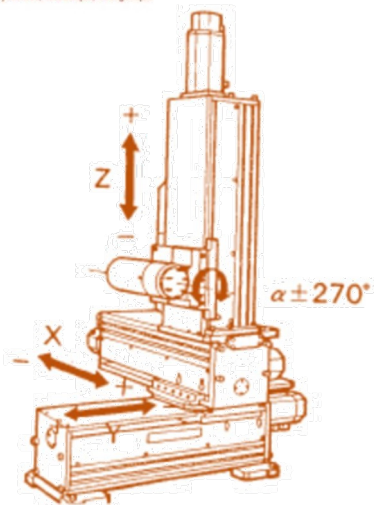
En France :

Parc d'environ **80 000**

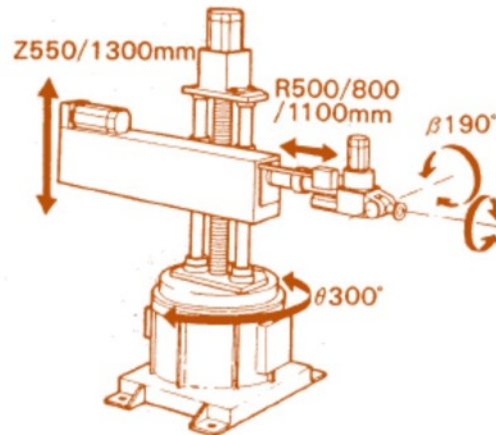
Environ **7 000**

installés par année

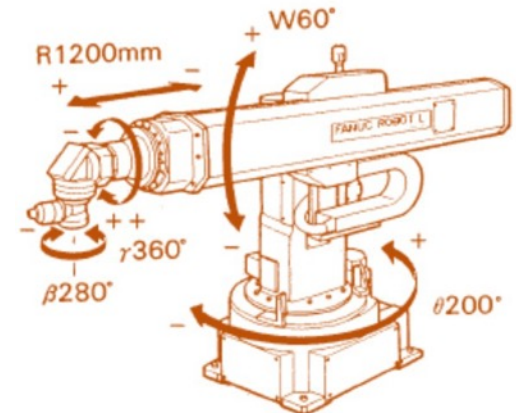
# Architectures des robots sériels



Robot Cartésien

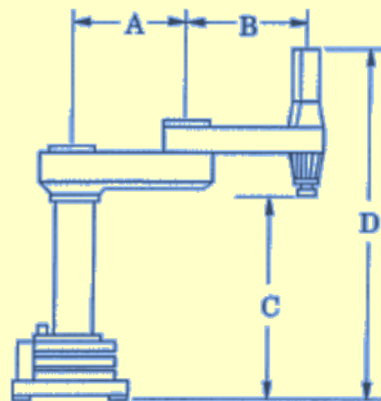


Robot Cylindrique

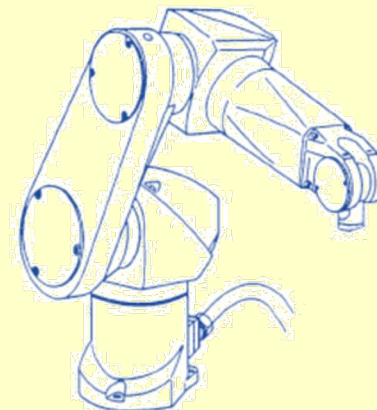


Robot Sphérique

2025 : cylindriques et sphériques ne sont plus dans les gammes des fournisseurs



Robot Scara



Robot 6R

# Les champions toutes catégories : Fanuc M 2000 iA

**Fanuc M 2000 iA**

**Version 2300**

Rayon d'action : 3,734 m

Charge : **2 300 kg**



**Fanuc M 2000 iA**

**Version 1700L**

Charge : 1 700 kg

Rayon d'action : 4,683 m

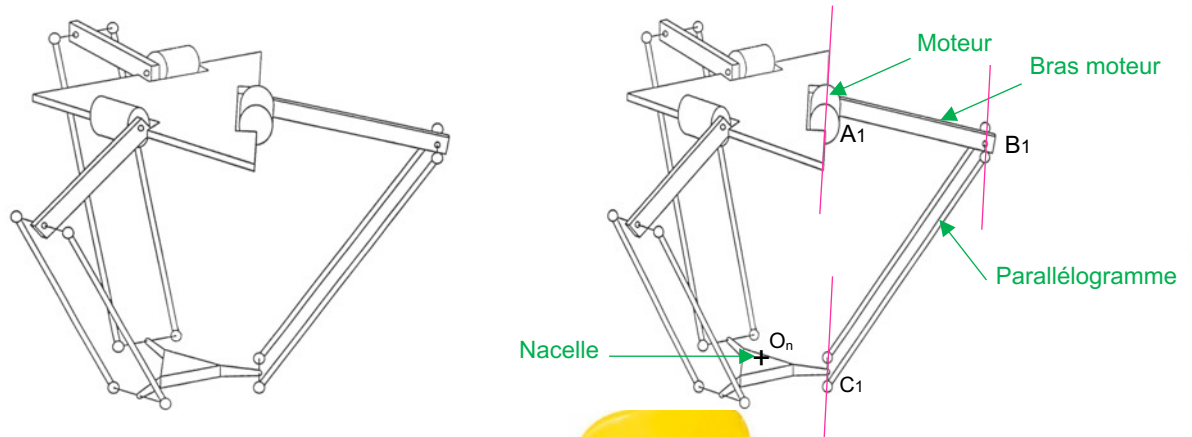




# Juin 2024 : le prix Engelberger est attribué à Reymond Clavel



Reymond Clavel  
EPFL de Lausanne  
PhD 1991  
et le schéma du  
Delta  
(Brevet 1985)



FANUC M-1iA/0.5AL

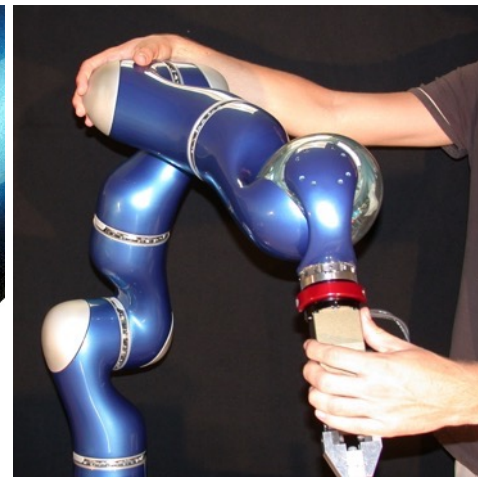


# Robots légers, compliants

Light-Weight Robot (Kuka), 7 ddl

Masse : 14 kg

Charge portée : 14 kg



LBR iiwa 14 R820  
Charge 14 kg  
Masse 30 kg



**Kuka**  
**LBR iiwa**

Capot léger en matériau composite

Matériaux des moteurs dits en « terres rares »

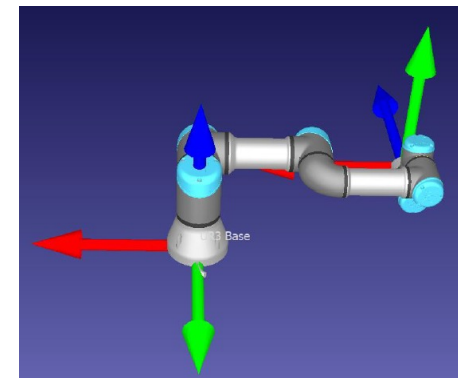
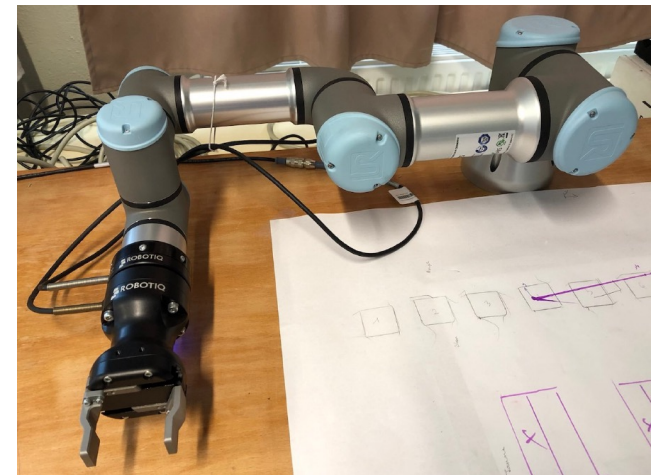
Commande compliante pour la collaboration (cobots)

# UR et l'arrivée des cobots en 2008

Le robot UR3 est représenté ci-dessous, à droite,  
dans sa configuration  
où les 6 variables articulaires sont à zéro



Poids :	11 kg
Charge :	3 kg
Portée :	500 mm
Plages d'articulation :	+/- 360° Rotation infinie sur l'axe 6
Vitesse :	3 axes du porteur : 180°/s 3 axes du poignet : 360°/s Outil : 1 m/s.
Répétabilité :	0,1 mm

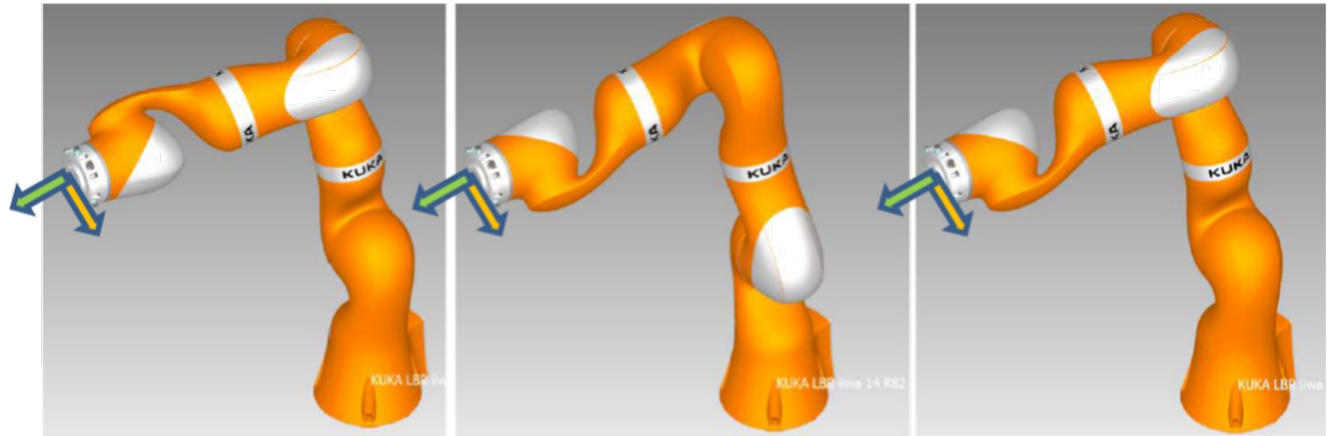


# Les configurations d'un robot redondant

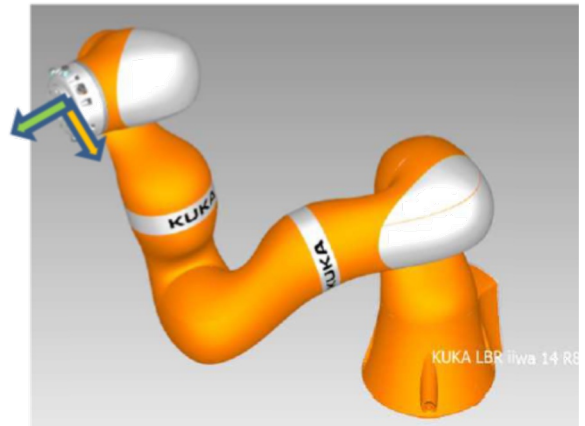
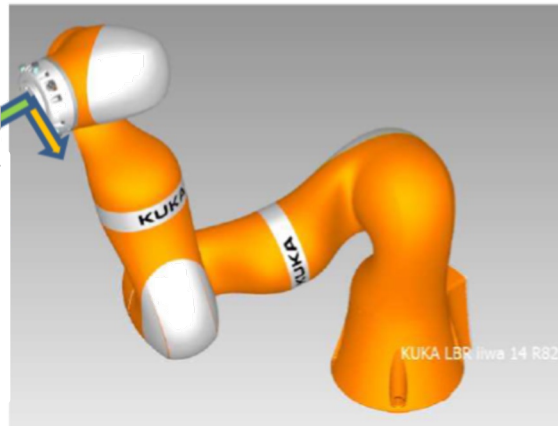
## Cas du Kuka LWR

Les 5 configurations possibles pour une même position demandée

Un robot redondant  
(ici 7 ddl)  
présente une  
**infinité de solutions**  
au problème du  
positionnement



q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7
-18,43	12,17	0	-93,13	-51,63	-23,79	49,13
-18,43	12,17	0	-93,13	128,37	23,79	-130,87
-18,43	102,35	0	93,13	18,66	81,26	-2,94
161,57	-102,35	0	-93,13	-161,34	81,26	-2,94
161,57	-12,17	0	93,13	-51,63	23,79	-130,87
161,57	-12,17	0	93,13	128,37	-23,79	49,13



Le tableau des 7 valeurs  
articulaires ( $q_i$ )  
correspondant à 6  
configurations possibles



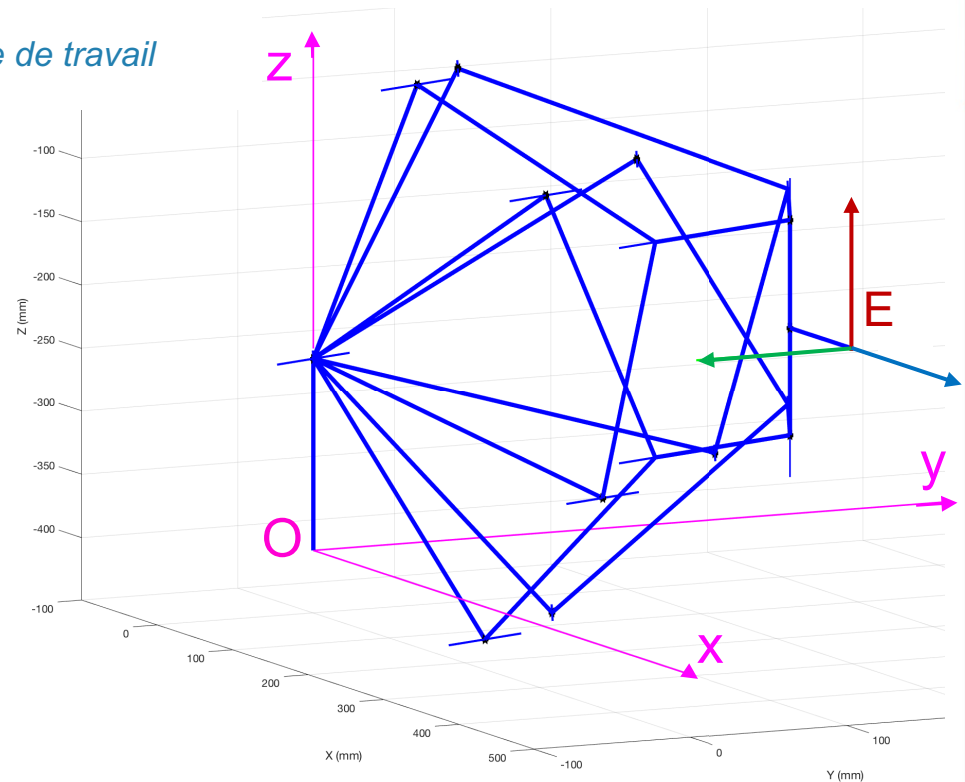
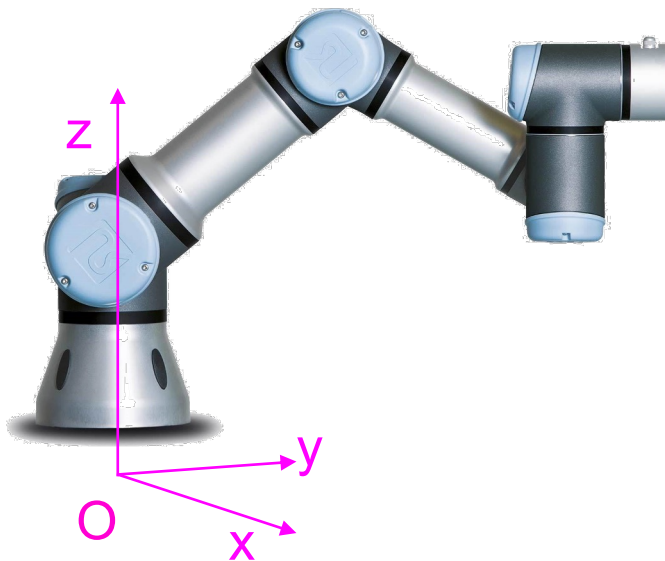
# Les 8 « aspects » du robot UR3

L'élaboration du **MGI** du robot **UR3** montre qu'en fonction des positions et orientations demandées de l'effecteur, on peut obtenir :

→ Soit 8 solutions (8 aspects), comme ci-contre

→ Soit seulement 4

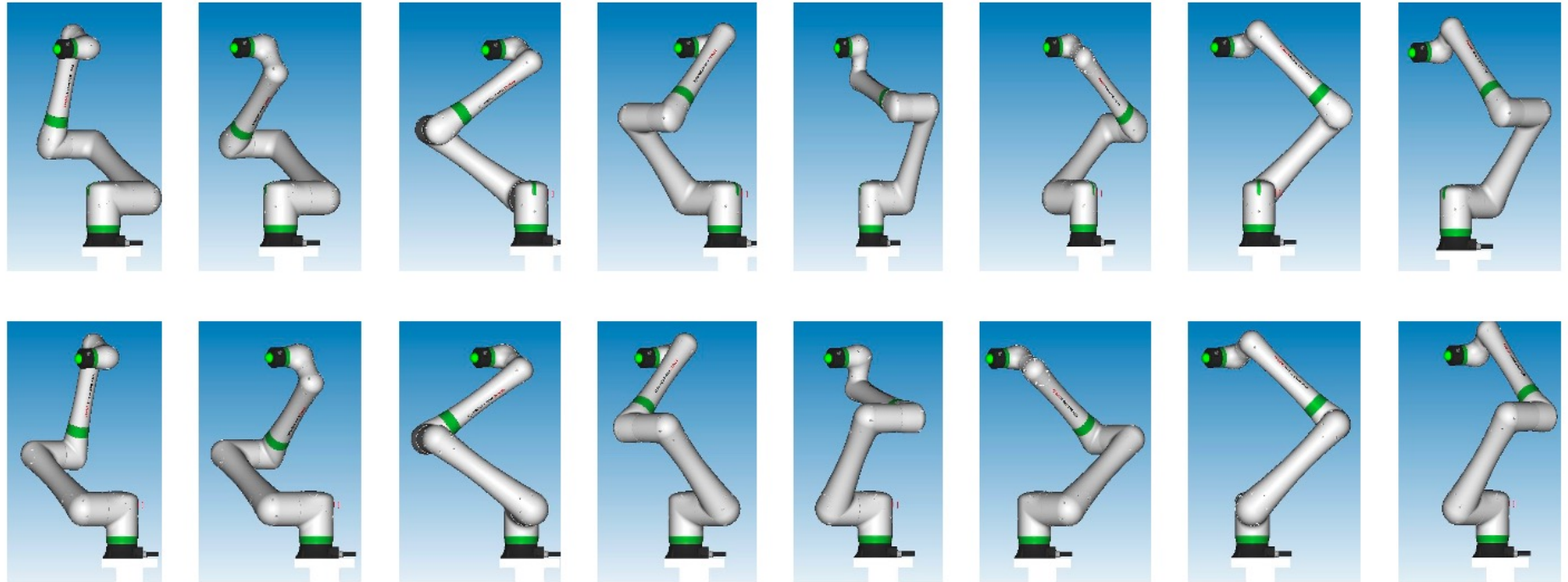
*vers le centre ou vers la frontière de l'espace de travail*



La position demandée sur cet exemple est :  $E = (300, 200, -250)$

*NB : le plan de base du robot est à la cote  $Z = -400$*

# Les 16 solutions du CRX-10iA



Il y a jusqu'à 16 solutions pour  
atteindre la même pose de l'effecteur

Pas d'expression littérale du résultat

FANUC n'en donne que 8

# Le cycle Pick and Place défini par Adept

Pour évaluer la performance de ses robots *Pick and Place*, le constructeur Adept (Omron à ce jour) a défini un cycle type

L'indicateur de performance du robot est le nombre de cycles Aller-Retour qu'il est capable d'assurer par minute



*Le cycle Adept, entre 2 points de départ et d'arrivée*

# Les robots Stäubli *Fast Picker* et série TS

**Stäubli aussi utilise le même cycle 25 / 305 / 25 mm**

**0,30 s de Tcy pour 800 mm**

**0,25 s pour 460 mm**

**Stäubli est parmi les plus rapides**



Avec charge  
de 2 kg



Avec charge  
de 2 kg

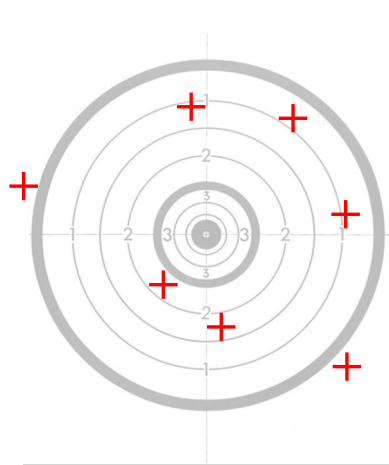
Stäubli a sorti le Fast Picker en 2012  
Avec **800 mm** de rayon d'action,  
Il reste parmi les Scara les plus rapides :  
170 cycles avec une charge de 1 kg  
**200 cycles** avec une charge de **0,1 kg**

Série	Rayon d'action	Cycles/min	Tcy
TS100	1000	170	0,35 s
TS80	800	200	0,30 s
TS60	620	220	0,27 s
TS40	460	240	0,25 s

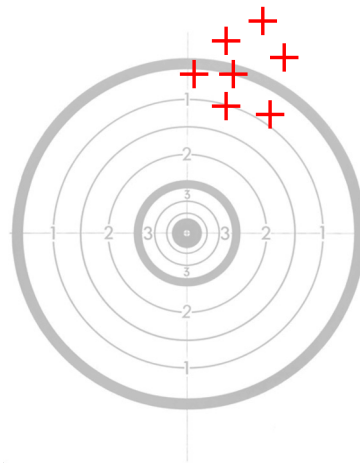


# Les robots sont-ils précis ?

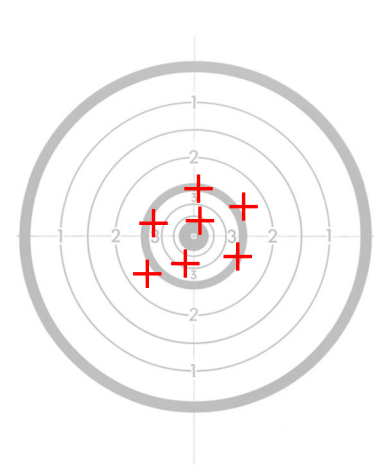
## Répétabilité et Exactitude



Mauvaise répétabilité



Bonne répétabilité



Bonne Exactitude

# La Répétabilité du robot ABB IRB 8700

## 0,05 mm

### IRB 8700

Ω axe 1 : 65°/s

Ω axe 6 : 115°/s

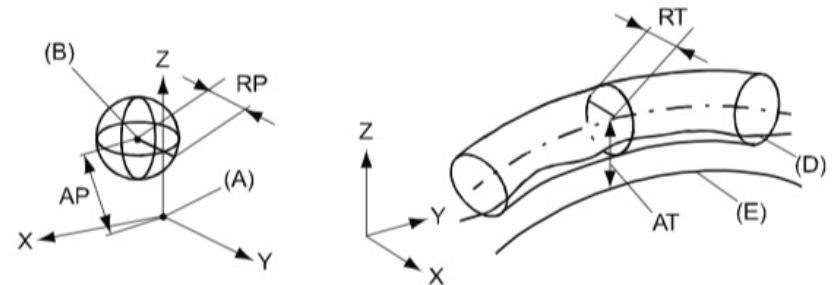
Rayon d'action : 3,5 à 4,2 m

Charge : 800 kg

Poids : 4500 kg



Ci-dessous, sont définies :  
**RP** et **AP** : les répétabilités et Exactitude de pose  
**RT** et **AT** : les répétabilités et Exactitude de Trajectoire

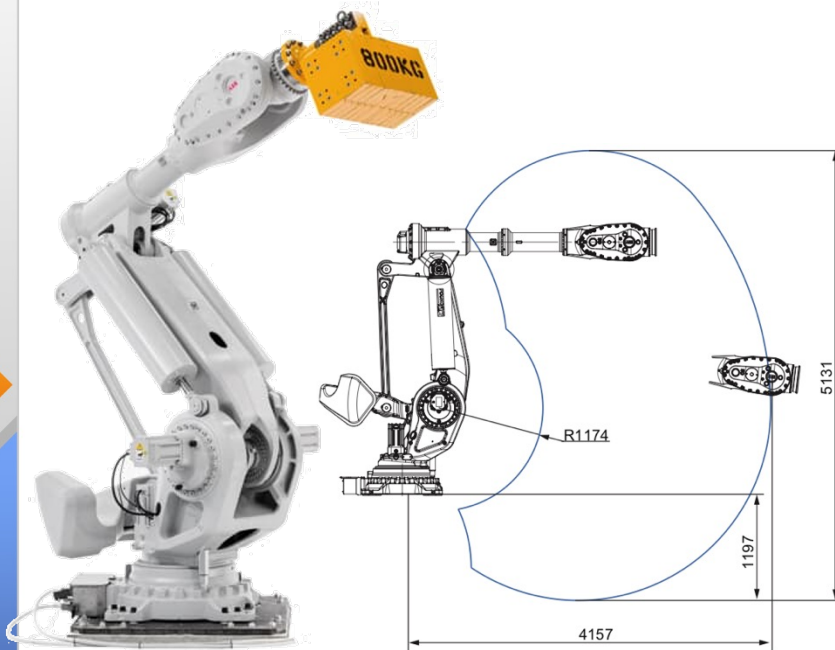


xx0800000424

Pos	Description	Pos	Description
A	Programmed position	E	Programmed path
B	Mean position at program execution	D	Actual path at program execution
AP	Mean distance from programmed position	AT	Max deviation from E to average path
RP	Tolerance of position B at repeated positioning	RT	Tolerance of the path at repeated program execution

IRB 8700	-550/4.20	-800/3.50
Pose accuracy, AP (mm) <sup>i</sup>	0.07	0.09
Pose repeatability, RP (mm)	0.08	0.05
Pose stabilization time, PSt (s) within 0.4 mm of the position	0.48	0.25
Path accuracy, AT (mm)	1.36	1.29
Path repeatability, RT (mm)	0.14	0.07

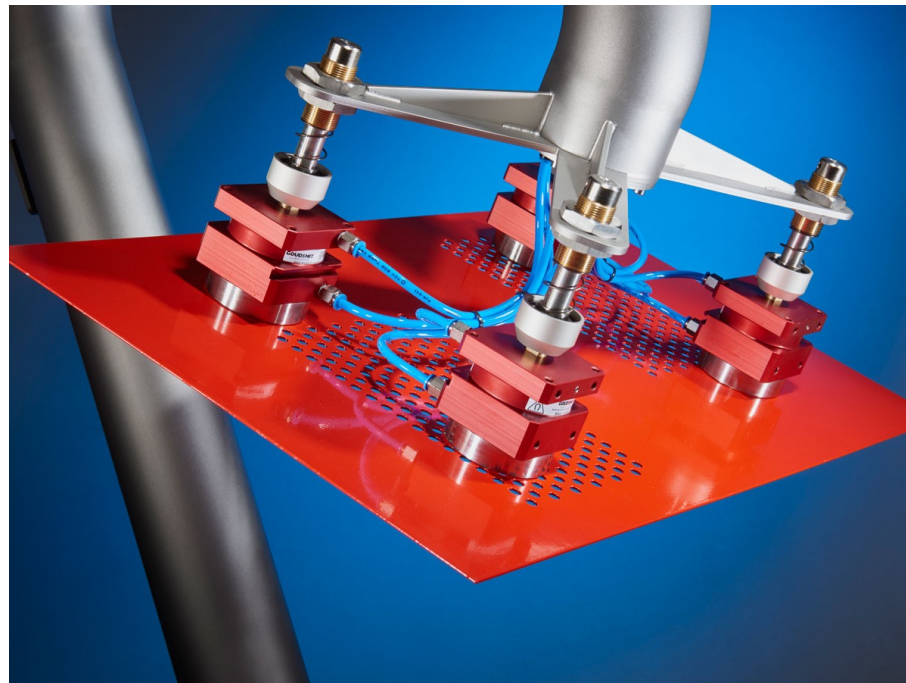
<sup>i</sup> AP according to the ISO test above, is the difference between the taught position (position manually modified in the cell) and the average position obtained during program execution.



# Robot Collaboratif ou Application Collaborative ?



# Cette application peut-elle être collaborative ?





# De robotique industrielle à robotique collaborative

En robotique industrielle on a besoin de **cadence**, de volume, de charges lourdes.

Les robots industriels sont très présents en automobile, aéronautique (grandes séries)  
Ils font l'objet de protections fortes (cages, systèmes de sécurités)

- Le besoin de flexibilité,  
de rapidité d'installation,  
de rapidité de programmation (ex. par apprentissage),  
de réalisation rapide de la maintenance.
  - **Le besoin de sécurité**, de réduire les TMS des opérateurs  
et la proximité de travail humain-robot ont amené au concept de robotique collaborative et au terme « COBOT »
- La robotique collaborative est une modalité facilement accessible aux PME et pour des petites séries
- Pour des secteurs plus nombreux et plus variés : le secteur transitaire de l'industrie, l'agro-alimentaire, l'agriculture, le médical, les services

Le nombre de cobots représente moins de 10%  
de l'ensemble des robots (environ 5 millions en 2025)

# Application collaborative directe, indirecte, coexistence

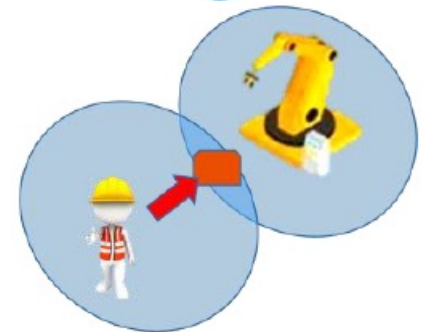
## Collaboration directe

Opérateur et robot agissent au même endroit et en même temps. Ce type encore très rare.



## Collaboration indirecte

Opérateur et robot agissent au même endroit mais pas en même temps.  
L'opérateur effectue une tâche puis se retire.  
Le robot intervient, puis il s'arrête.



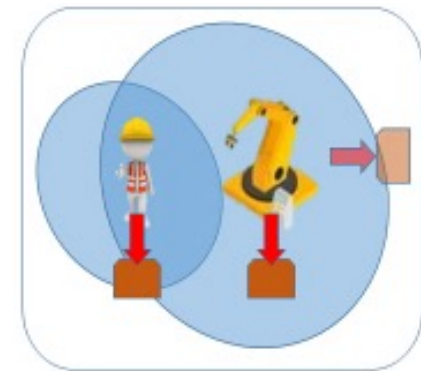
Application robotique en **coexistence** :

Si un robot sans cage opère dans un espace où intervient un opérateur.

Opérateur et robot n'interagissent pas.

C'est l'application la plus courante

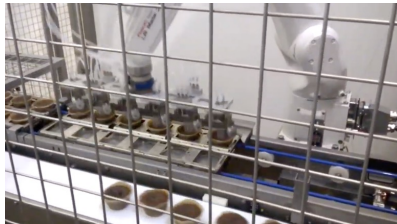
Ex. l'opérateur est impliqué par du rechargement de machine et pour traiter un dysfonctionnement.



# Du robot-cage au cobot



Cellule robotique standard :  
le robot est dans une cage.  
Pas de « collaboration »  
humain-robot

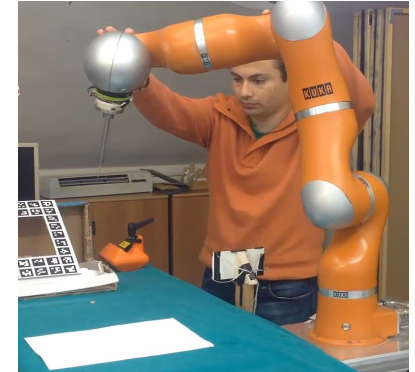


Cellule robotique collaborative  
en arrêt nominal de sécurité  
contrôlé.

En production, la collaboration  
humain-robot a lieu via une  
« fenêtre » d'échange.



Robot à limitation de puissance  
et de force  
Ex. chargement de machine



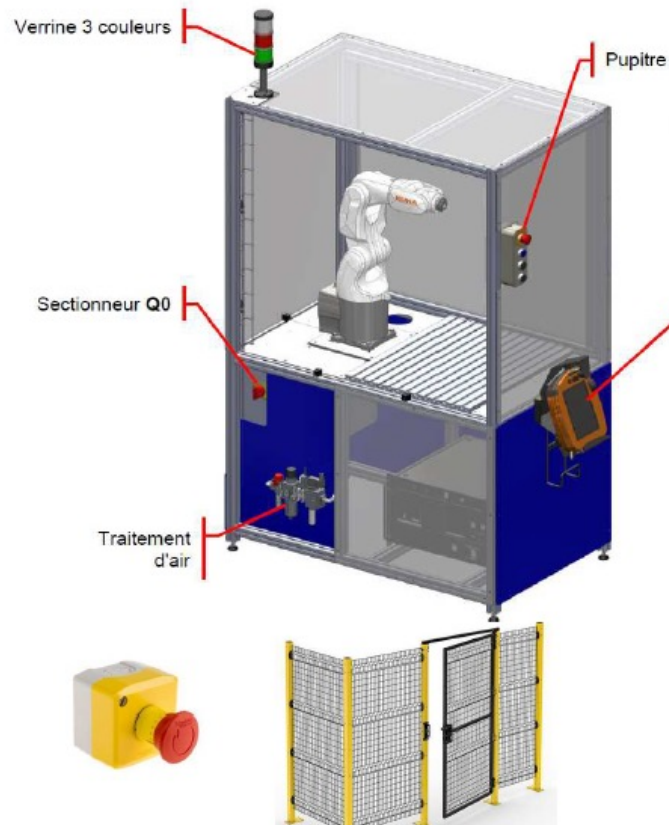
Humain et robot collaborent  
dans une même tâche de  
façon directe ou indirecte

# Les barrières de sécurité :

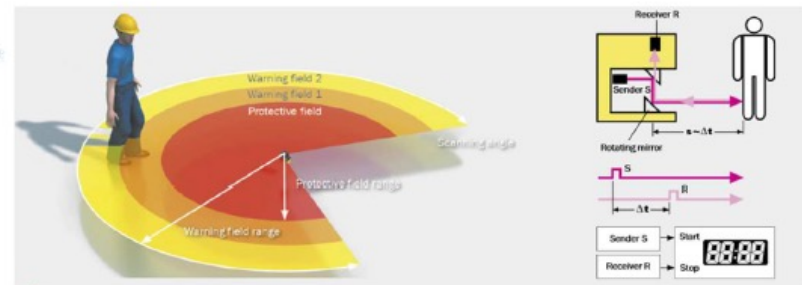
## *Matérielle ou immatérielle*

L'emploi de barrières matérielles de sécurité n'est pas destiné qu'aux robots industriels  
Les applications collaboratives peuvent faire l'objet  
de protection par barrière matérielle, mais le plus souvent immatérielle

### BARRIERE MATERIELLE



### BARRIERE IMMATERIELLE



### Laser de scrutation





# Pionnier et leader en robotique collaborative : Universal Robots

Universal Robots, première entreprise à proposer des robots collaboratifs

2008, 1<sup>er</sup> UR5  
commercialisé

Quatre robots e-Series  
3 à 16 kg ;  
500 à 1300 mm

Cinq robots UR Series  
(→35 kg ; 1750 mm)



*UR a été fondée en 2005 par trois étudiants de l'université du Danemark :  
Esben Ostergaard, Kasper Stoy et Kristian Kassow.*

*Ils ont apporté une autre orientation à la robotique.*

**100 000** cobots ont à ce jour été commercialisés par UR

# Robotique industrielle et robotique collaborative (1)

	Robotique industrielle	Robotique collaborative
Rapidité	+++	---
Rayon d'action	+++	---
Charge utile	+++	---
Précision	+++	-
Flexibilité	+	++
Encombrement	--	+
Installation	--	++
Programmation	-	++
Compliance	---	+++
Interaction	---	+++

# Robotique industrielle et robotique collaborative (2)

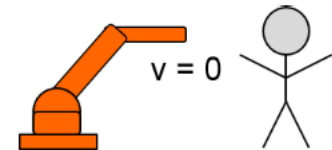
	Robotique industrielle	Robotique collaborative
Rapidité	8 à 10 m/s (Scara IAI IXA)	1 m/s max, en général 0,25 m/s
Rayon d'action	4,7 m (Fanuc M2000 iA)	Rarement > 1m
Charge utile	2300 kg (Fanuc M2000 iA)	Rarement > 10 kg
Précision	Quelques 1/100 <sup>e</sup> mm	Quelques 1/10 <sup>e</sup> à 1 mm Vision intégrée
Flexibilité	+	Plus vite changé d'application
Encombrement	Cage de protection	+
Installation	- -	Rapidement pris en main
Programmation	-	Assistants graphiques, apprentissage
Compliance	Destiné à des tâches imposant précision	Destiné à des tâches imposant souplesse
Interaction	Conçu pour la cadence	Sécurités intégrées
Investissement	De l'ordre de 100 K €	40 à 50 K €

# Normalisation dédiée aux applications collaboratives robotisées

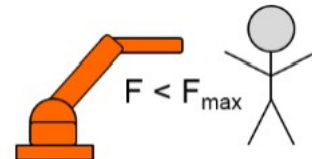
**Norme NF EN ISO 10218-2 : 2011 & Directive ISO TS 15066 : 2016**

Quatre types de mesures de prévention ou *éléments de sécurité* peuvent être implémentés par l'intégrateur

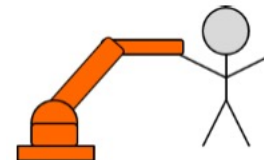
**N°1 : Arrêt contrôlé nominal de sécurité**



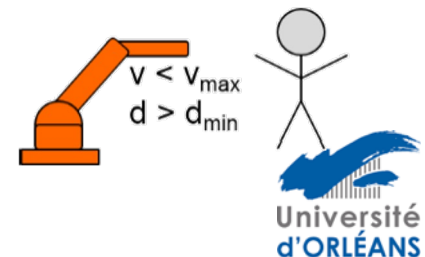
**N°2 : Guidage manuel**



**N°3 : Surveillance de la vitesse et de la séparation**



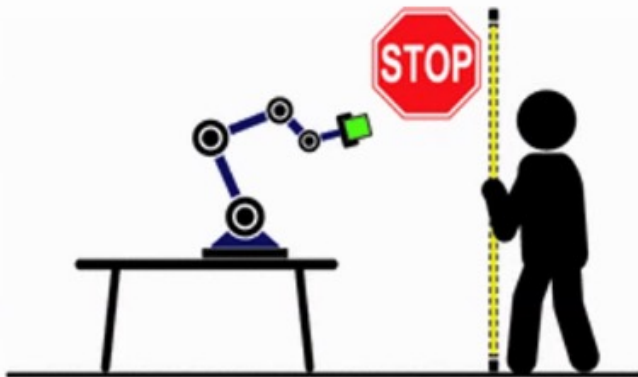
**N°4 : Limitation de la puissance et de la force  
par conception ou par commande**



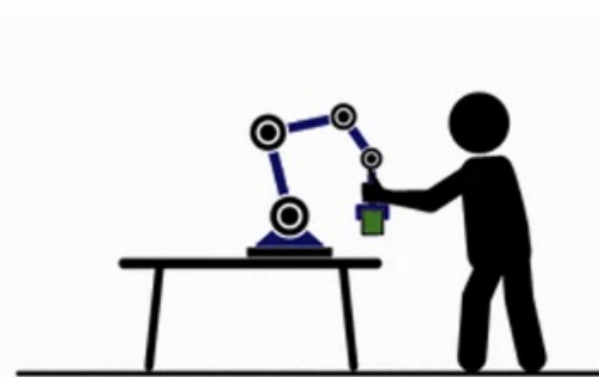


# Norme NF EN ISO 10218-2 : 2011 & Directive ISO TS 15066 : 2016

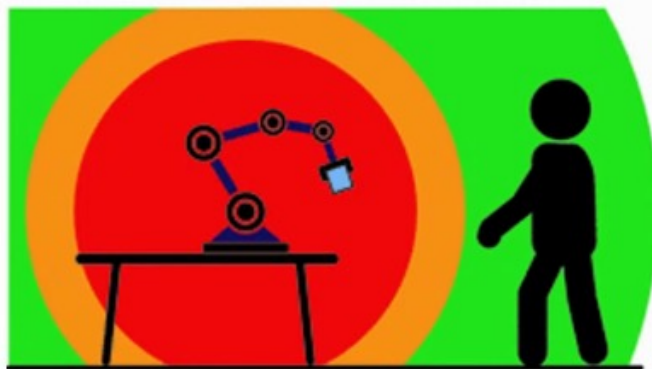
Quatre types de mesures de prévention ou *éléments de sécurité* peuvent être implémentés par l'intégrateur



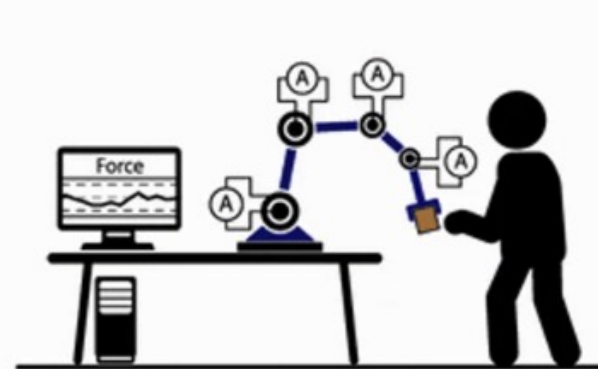
Arrêt contrôlé nominal de sécurité



Guidage manuel



Surveillance de la vitesse et de la séparation



Limitation de la puissance et de la force par conception ou par commande

# Espace partagé et espace réservé :

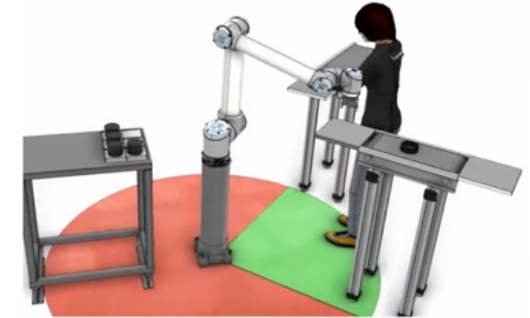
## *Surveillance de la vitesse et de l'espace accessible*



En vert : espace collaboratif  
(partagé humain-robot)



En rouge : espace de travail réservé au robot

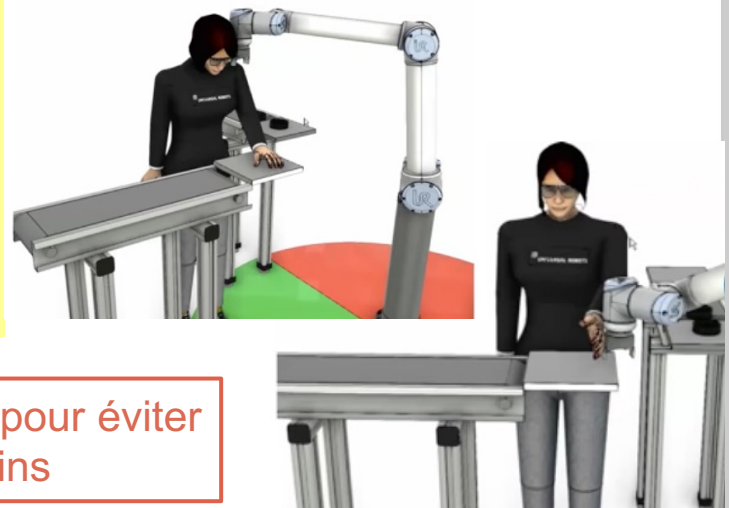


L'espace collaboratif est une zone où le robot doit réduire sa vitesse, limitant le risque de blessure en cas de collision avec l'opérateur

D'après la directive ISO / TS 15066 : 2016

*c'est une Technical Specification (TS) pas une Norme*

« L'exposition des zones sensibles du corps (crâne, front, larynx, yeux, oreilles et visage) au contact avec le robot doit être empêchée chaque fois que cela est raisonnablement possible »



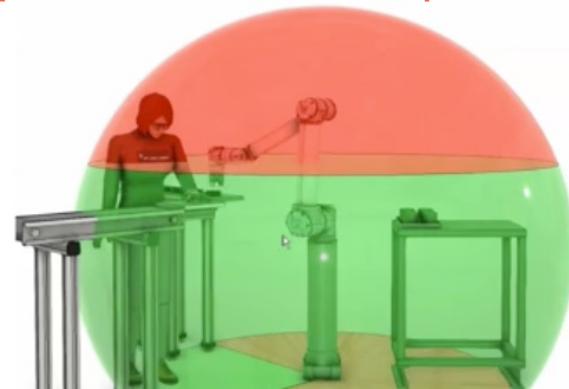
Il faut prendre des mesures de sécurité pour éviter que le robot ne touche la tête ou les mains

# Limitations des risques de collisions : cas de la tête

Il faut empêcher que l'outil du robot ne vienne en collision avec la tête.

Comme c'est une zone en dehors de la trajectoire de travail,

on va **empêcher le robot d'accéder à la partie haute** de la sphère de travail



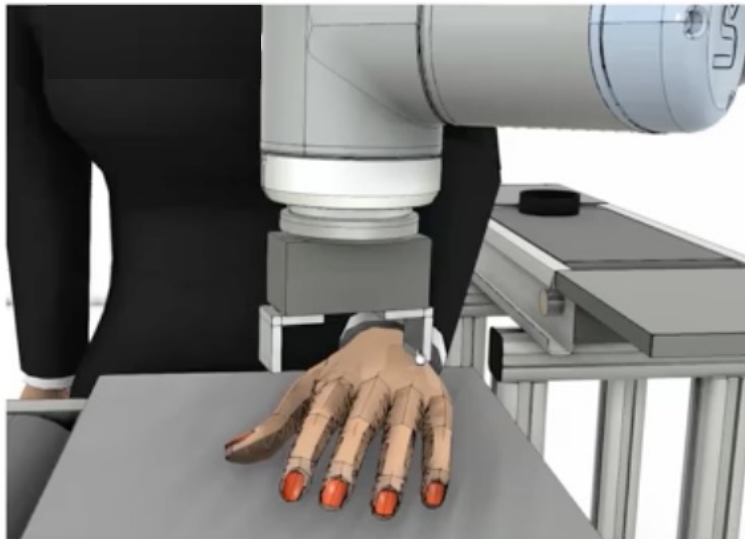
Pour cela :

- On va configurer le **système de sécurité du robot** pour empêcher que l'outil n'accède à la partie haute de la sphère de travail. On va de ce fait éviter la collision avec la tête.
- C'est différent et plus fiable que de le faire dans le programme utilisateur.



# Limitations des risques de blessures en cas de collisions : cas de la main

## Limitations des risques de blessure en cas de collisions sur l'arrière de la main



Données biomécaniques des limites tolérées sur l'arrière de la main lors de contacts quasi-statiques

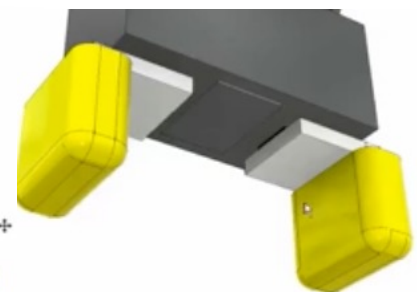
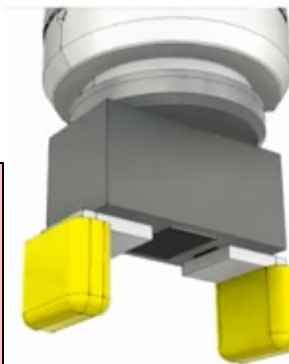
Pression max : 200 N/cm<sup>2</sup>

Force max : 140 N

En situation transitoire ( < 0,5 s ), on tolère le double



Formes à exclure



Pince équipée de housses en mousse

Formes à privilégier

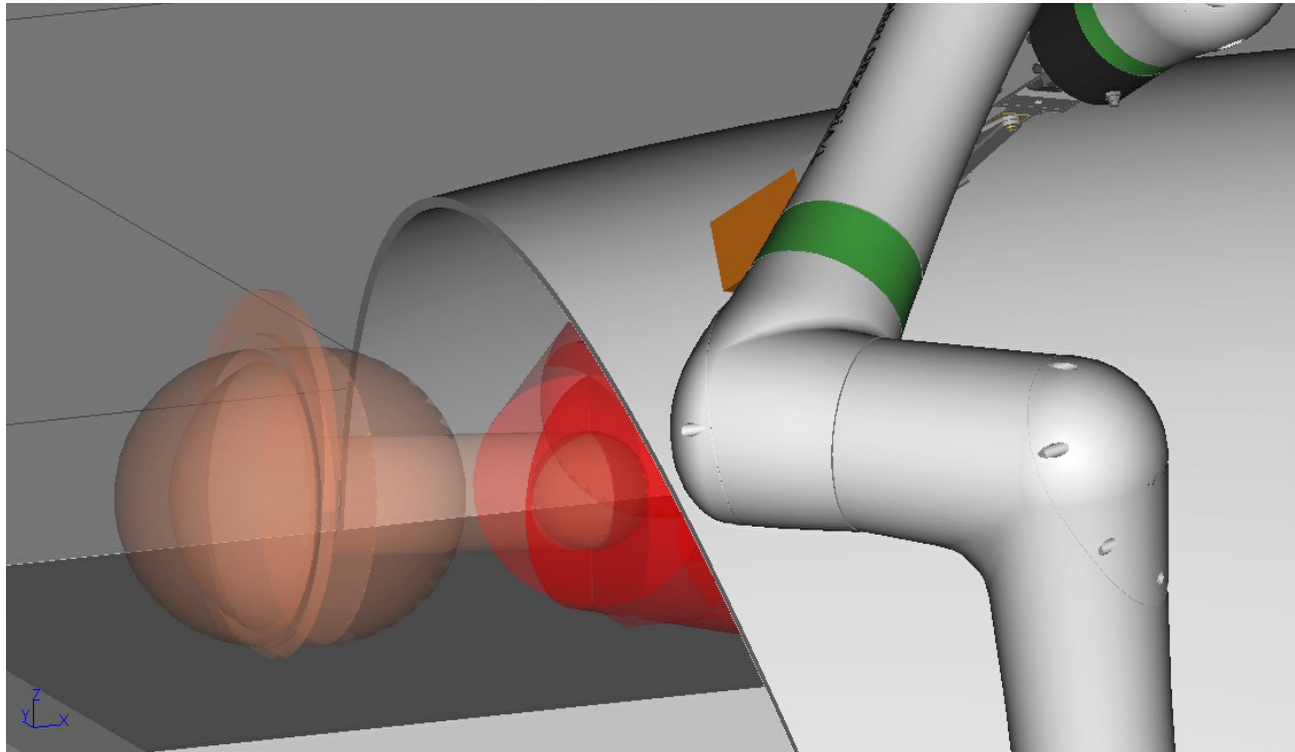
Les éléments mobiles (ex. pinces) ne doivent pas présenter d'arêtes vives et de coins pointus.

Intégrer **courbures et congés importants** sur toutes les formes



# La Robotique Médicale...

...à PRISME

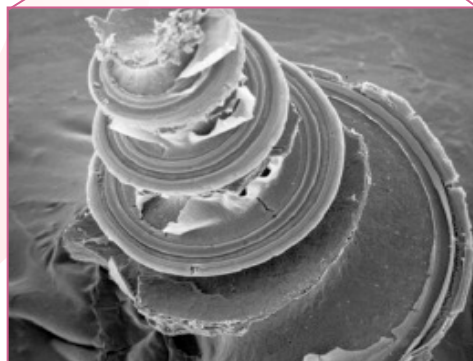
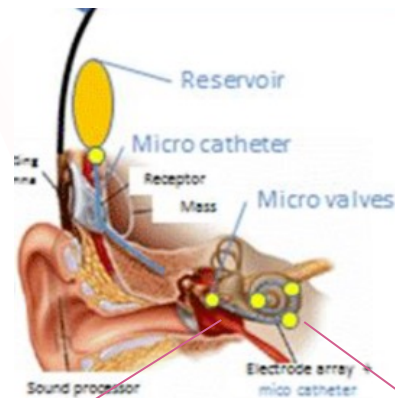


# Délivrance de médicaments dans la cochlée

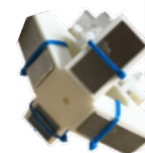
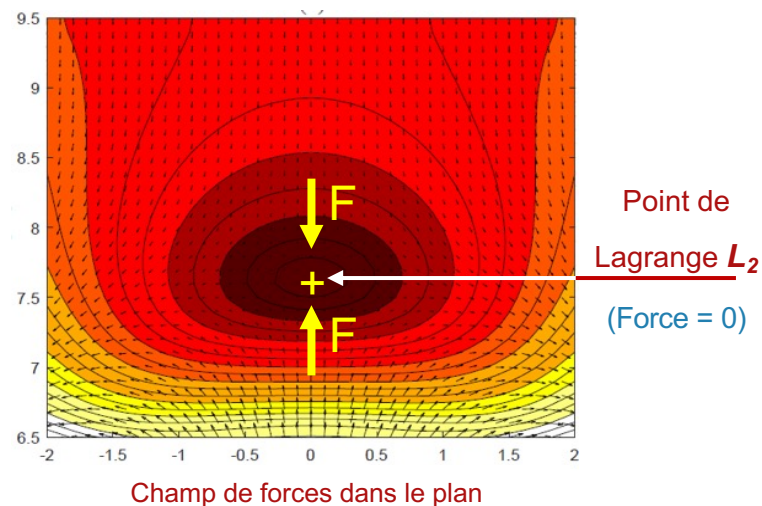
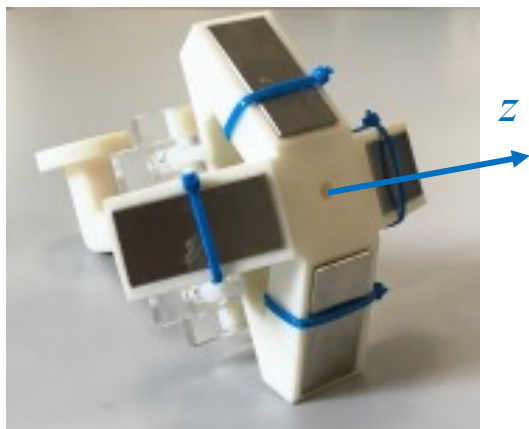


## Objectifs

- Un robot pour délivrer les médicaments
- Il déplace un Effecteur-Terminal autour de la tête
  - ⚠ Toujours du même côté de la tête
- Un effecteur terminal à aimants permanents
- Permet de Tirer et Pousser les médicaments dans la cochlée

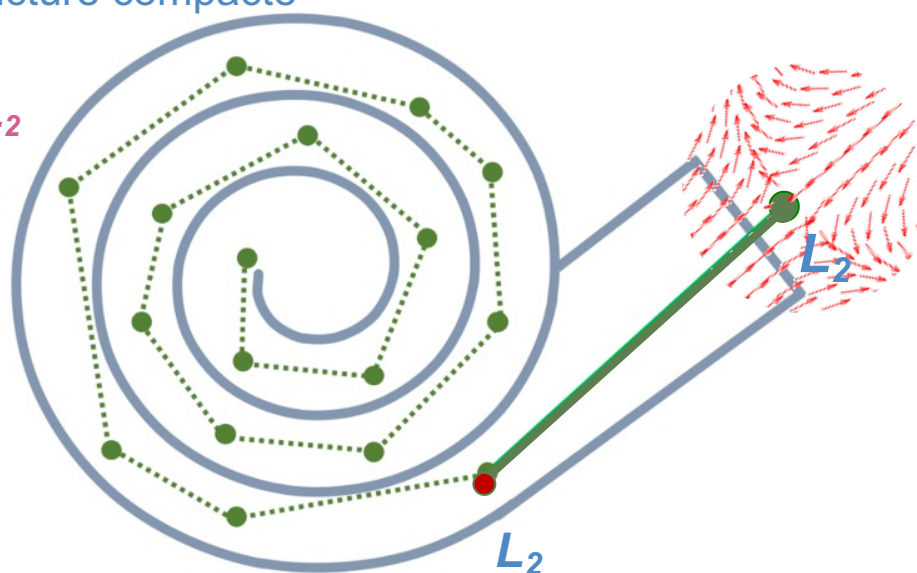


# L'effecteur à quatre aimants permanents



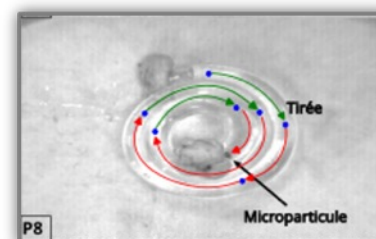
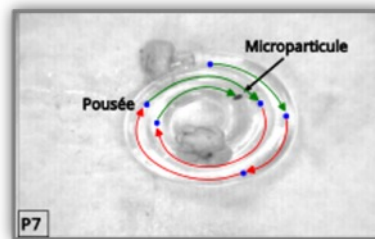
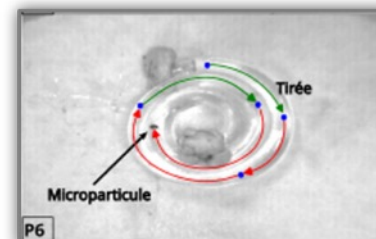
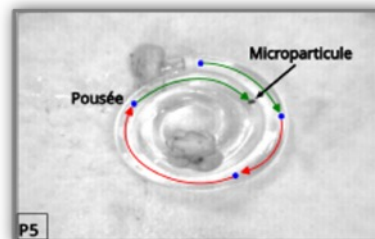
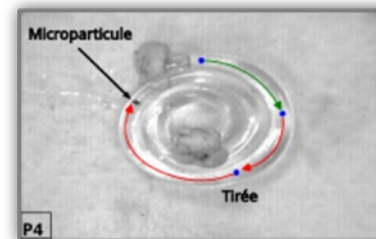
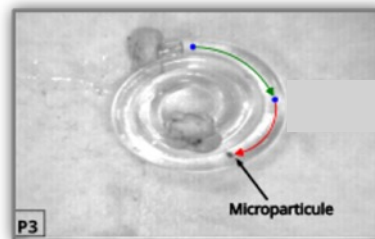
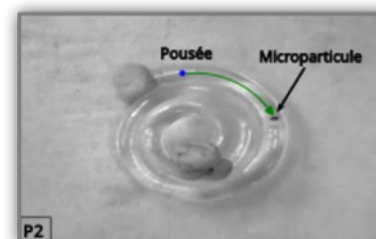
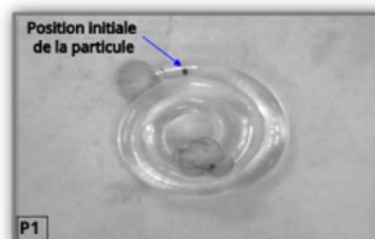
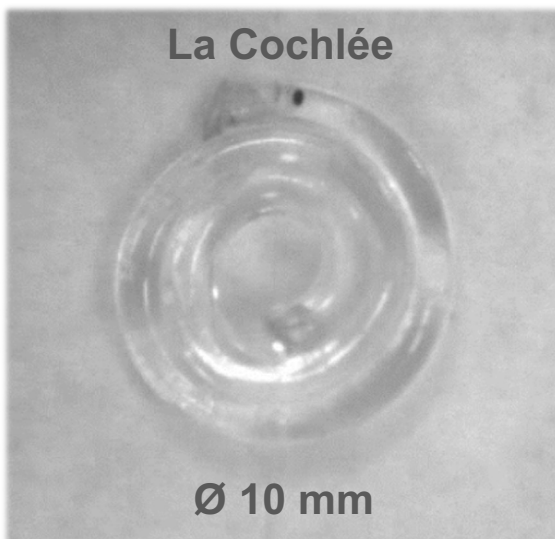
- **4 Aimants** dans une structure compacte
- **Plans**  $(x, z)$  et  $(y, z)$
- **Le Point de Lagrange  $L_2$**   
Une petite zone,  
8 cm devant l'effecteur

- Particules  $\varnothing = 0,5 \text{ mm}$
- Forces de  $5 \cdot 10^{-6} \text{ N}$



# Validation dans une cochlée en verre

Expérience de **Pousser/Tirer** une particule dans la cochlée facsimilée

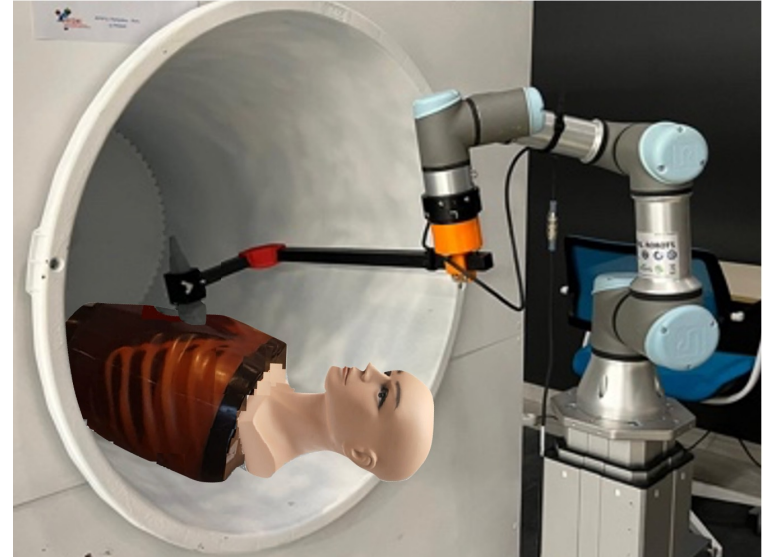


FANUC LR Mate





# Navigation dans le Gantry TEP



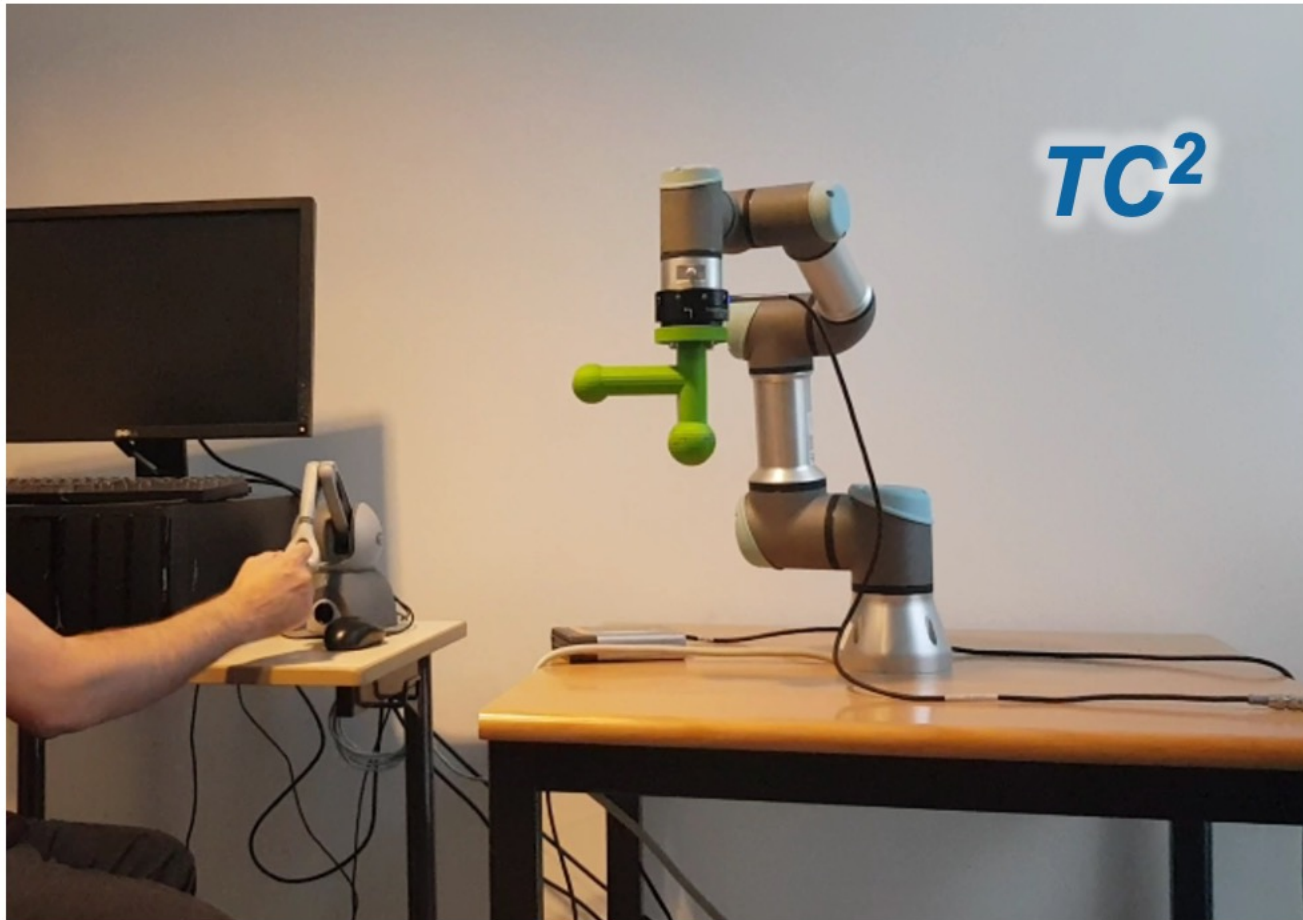
## Téléopération & Comanipulation Combinées



*TC<sup>2</sup>*

# ① Combinaison Isotropique TC<sup>2</sup>

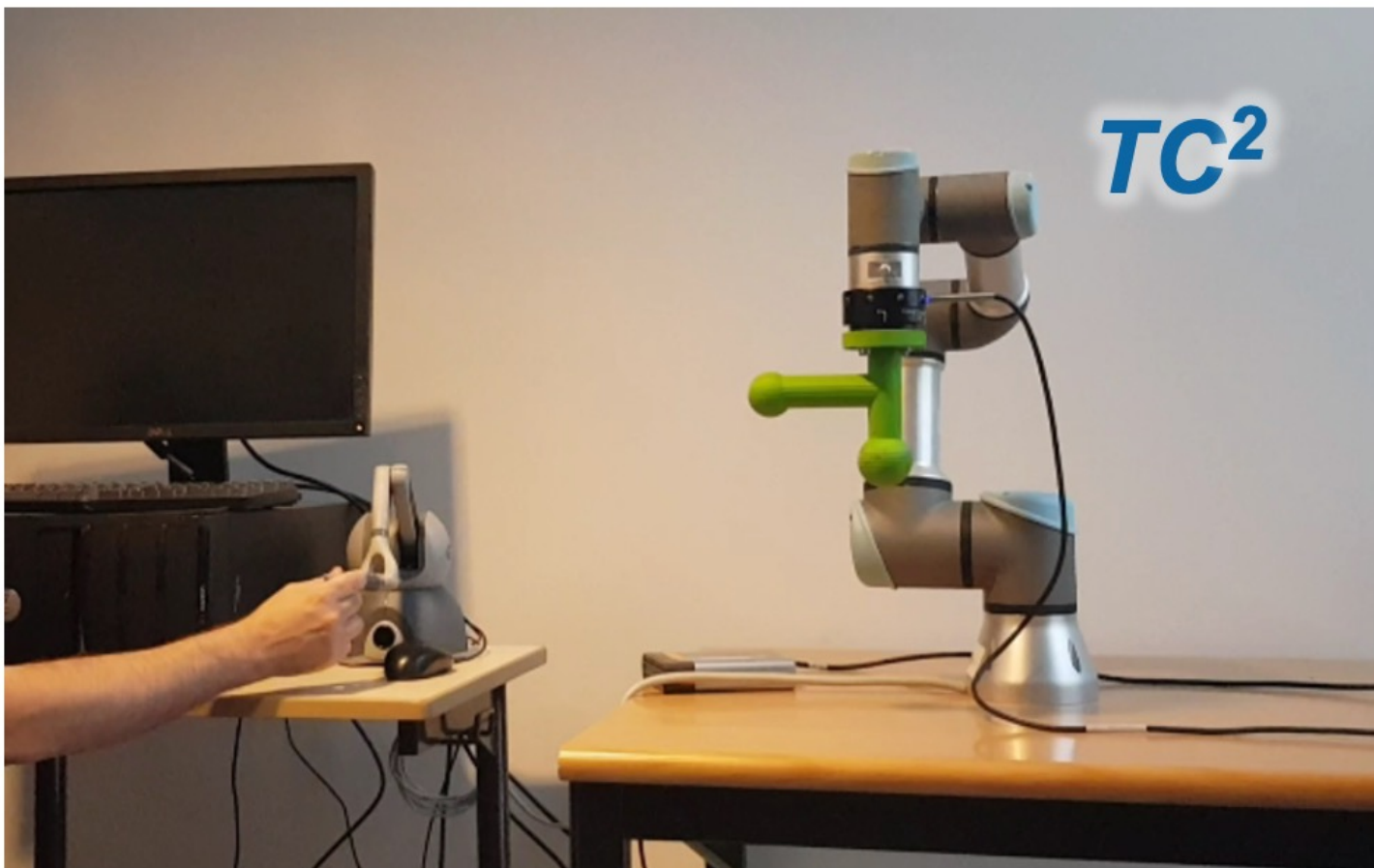
Mêmes combinaisons dans les 6 directions de l'espace

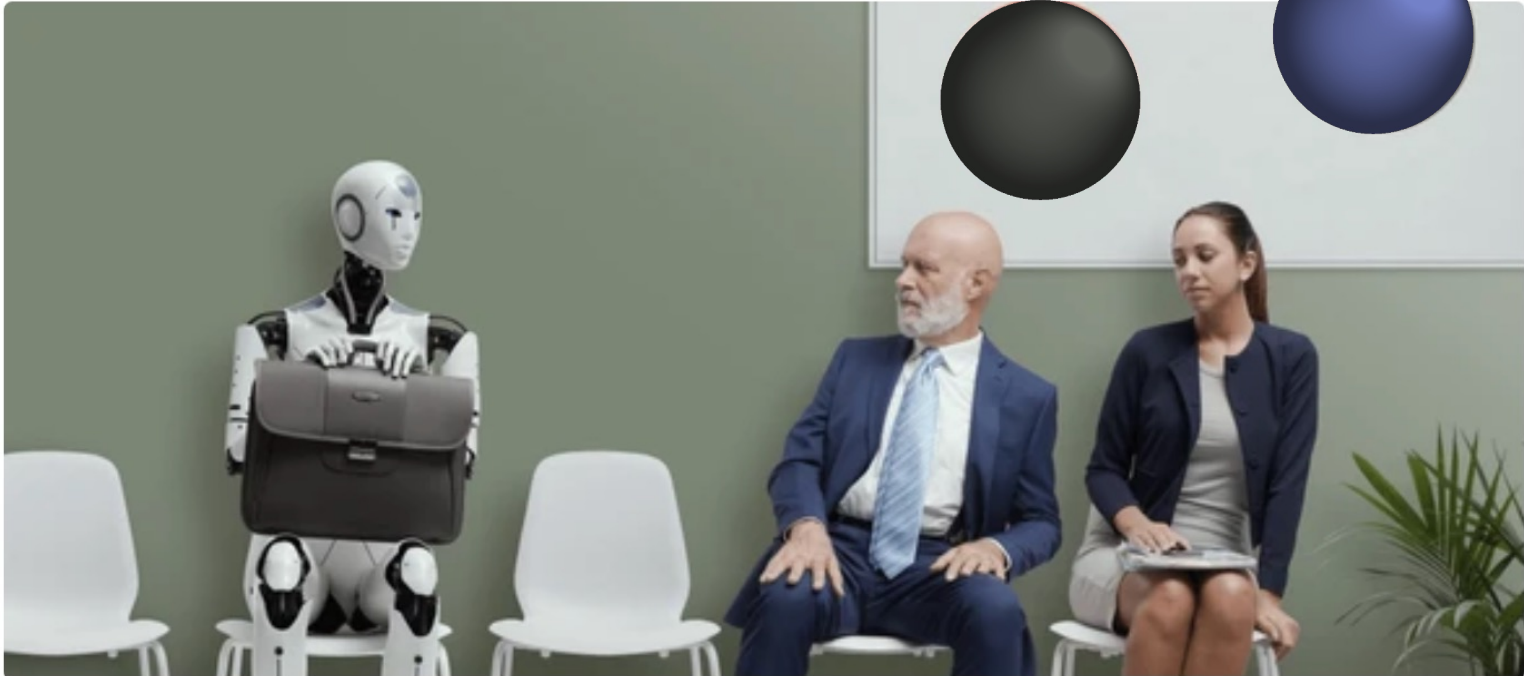


Ex. : 50% 50%... Mais toute combinaison est possible

## ② Combinaison Anisotropique TC<sup>2</sup>

Téléopération dans le plan  $(x, y)$  + Comanipulation en direction  $z$





# Merci de votre Attention