

Introduction à la robotique & cobotique

1

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

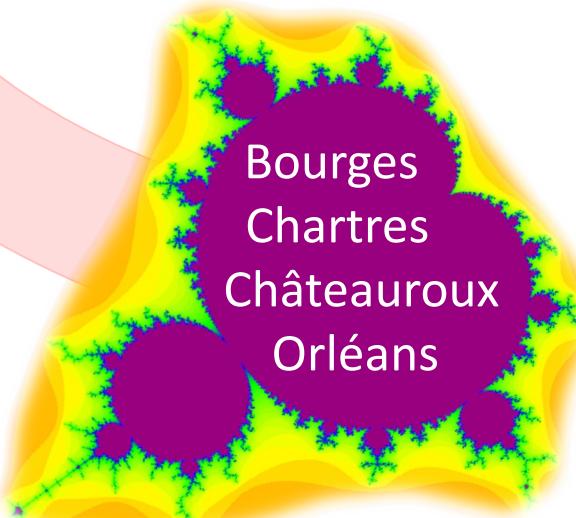
Fabrication Additive Robotisée

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

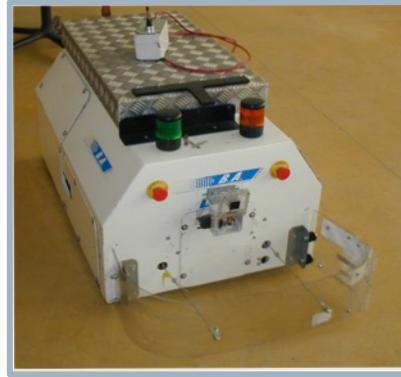
3

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



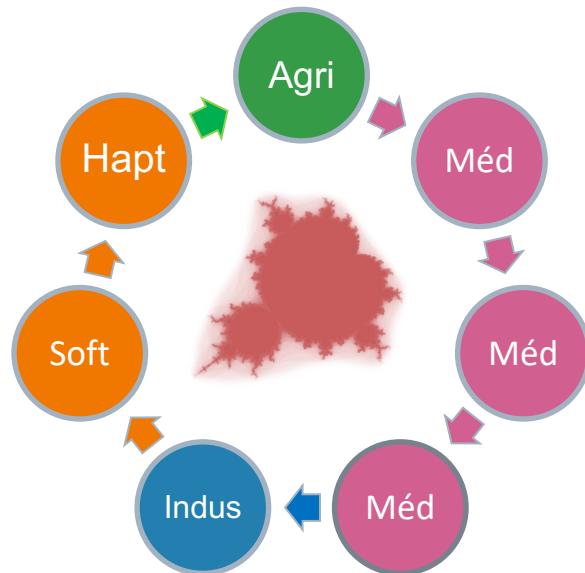
Intégration de prototypes, TRL9



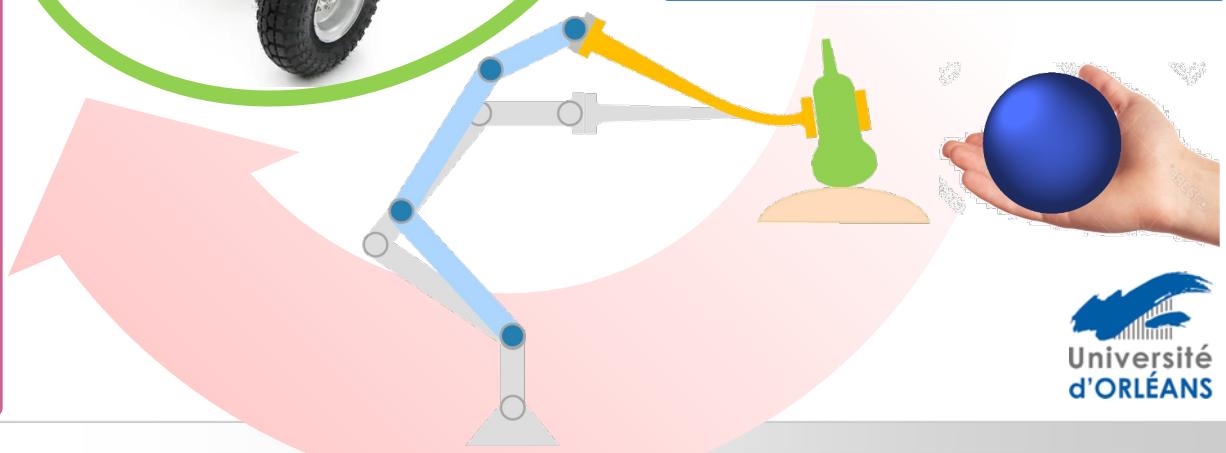
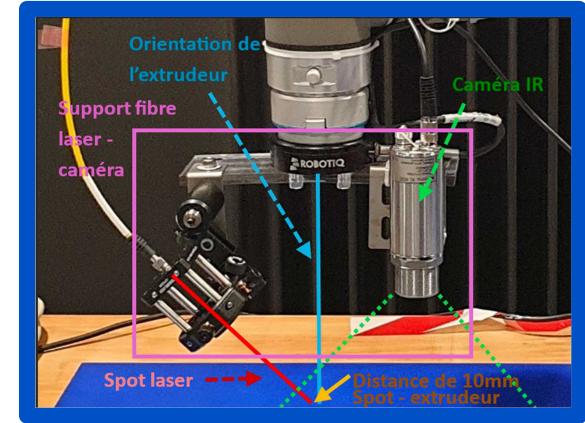
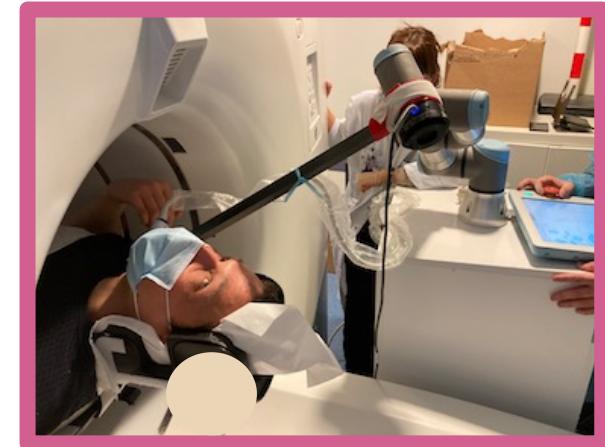
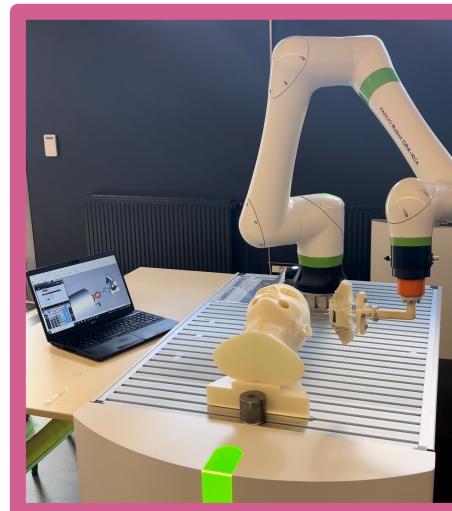
Télé-échographie

Recherches récentes et en cours

Trois Secteurs d'Application



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



Histoire...

...de la Robotique

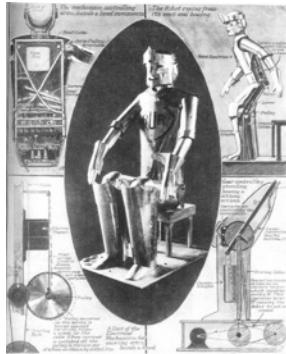


et de la Robotique Médicale

Les dates clés en robotique du XX^e

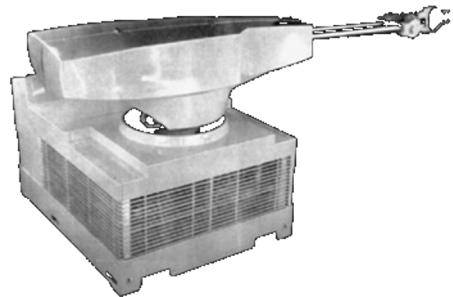
Origine du mot
“Robot”

1921



Unimate 001
1^{er} Robot Industriel

1961



Opération
Lindbergh
Zeus

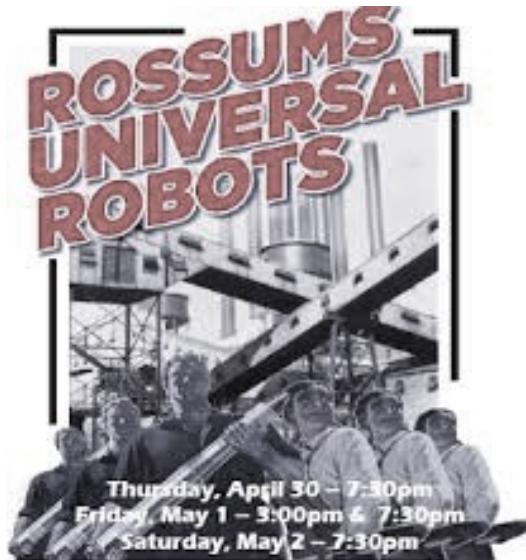
1985

NeuroChirurgie

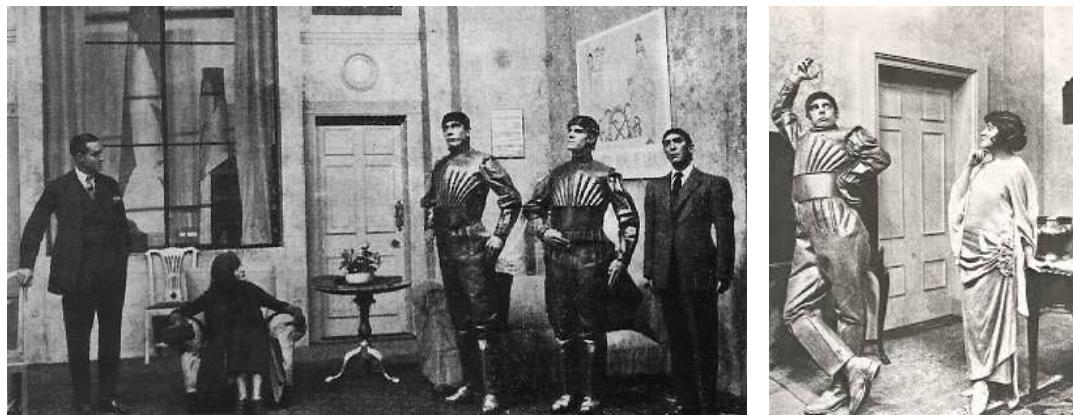
2001

Chirurgie
Mini
Invasive

1921 : le concept de Robot



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



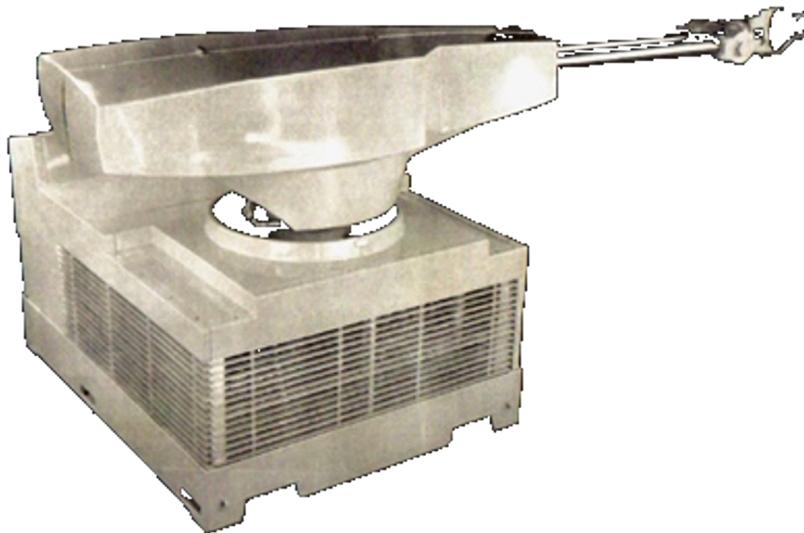
“robota” signifie
travail

1961 : Robotique et Industrie



Unimate 001 : le 1^{er} Robot Programmable

Brevet de George Devol et Joseph Engelberger (USA)



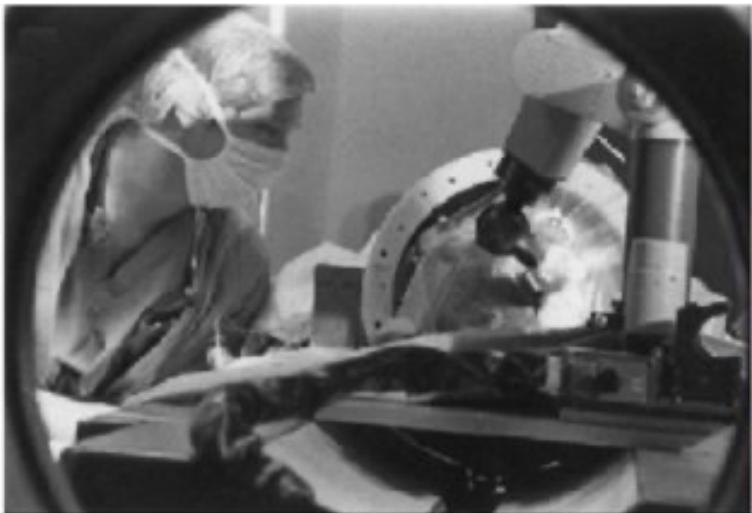
Unimate a été inspiré par les manipulateurs nucléaires

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

1985 : 1^{re} intervention médicale



Pour des biopsies (ponction de tumeurs) dans le cerveau



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

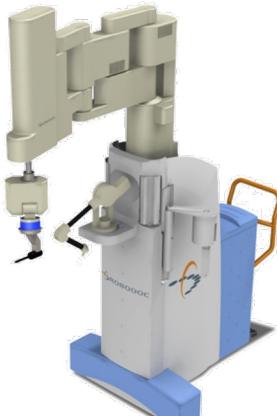
Le robot était considéré comme inadapté pour l'utilisation clinique, et générait des tremblements de la main



De robot *type-industriel* à solution dédiée



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



Robodoc (Robot **IBM** en 1992)



MedTech, Montpellier
→ Zimmer Biomet USA

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



OrthoMaquet
Allemagne

Caspar (Robot **Stäubli** en 1999)

Les robots médicaux

2 exemples de robots téléopérés



Da Vinci,

robot de chirurgie Mini-invasive,
Intuitive Surgical, USA



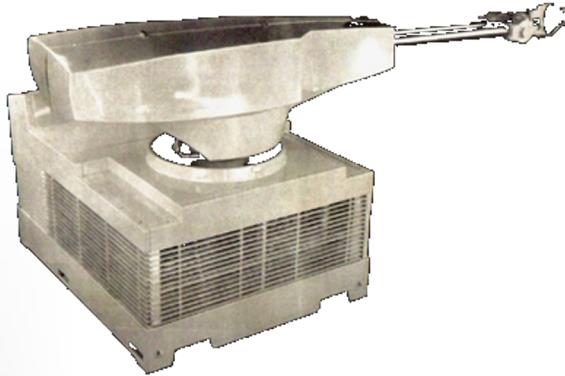
Melody,
robot de Télé-échographie
Développé à partir de recherches
PRISME,
à Bourges

Évolution...



...des performances

64 années de robotique industrielle



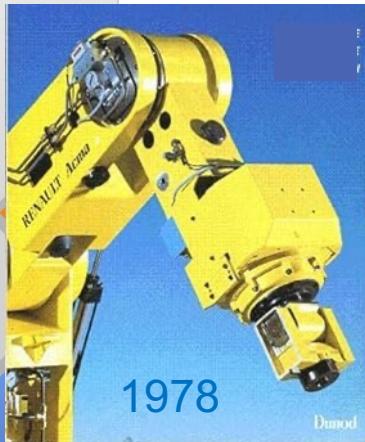
1961
Unimate 001



1973
KUKA Famulus



1974
ASEA IRB6

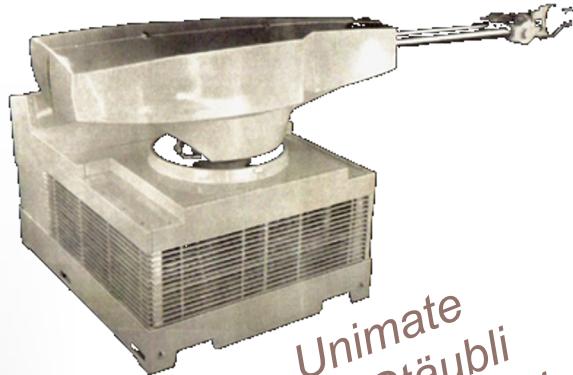


1978
RENAULT Acma

« 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

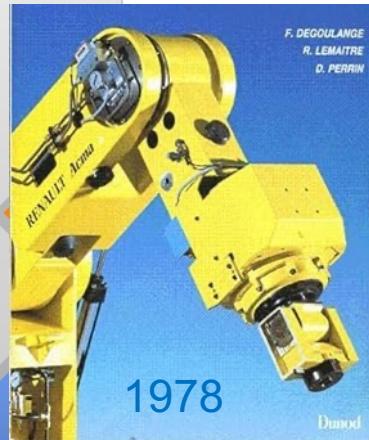


1961
Unimate 001

Unimate
→ Stäubli
→ en 2004



1973
KUKA Famulus



1978

RENAULT Acma



1974
ASEA IRB6

ASEA
→ ABB
en 1988



2008
Universal Robots UR5



2021
FANUC
CRX-10iA

64 années de robotique industrielle



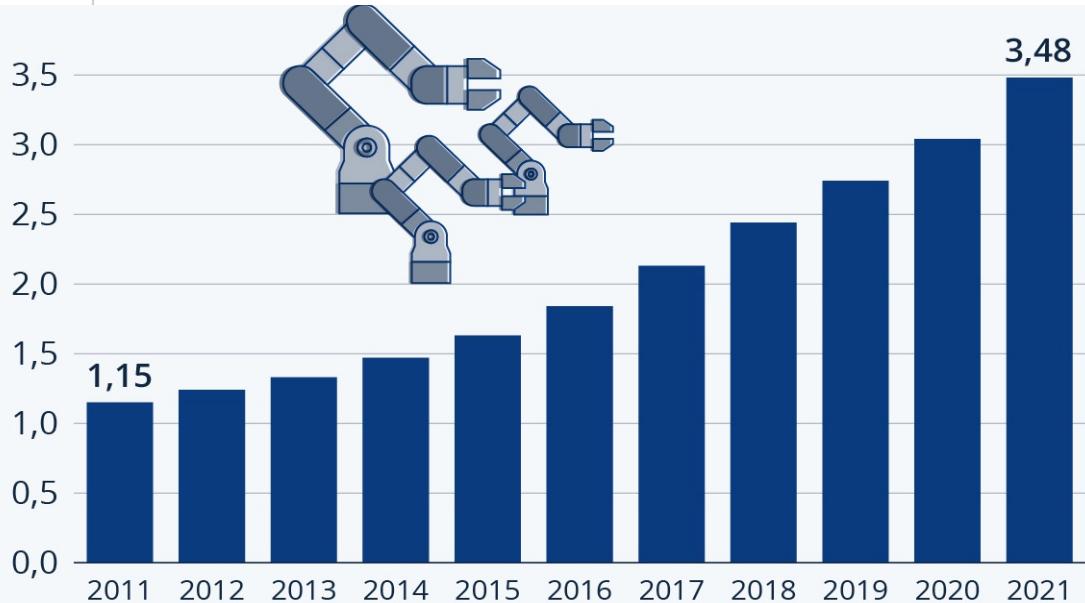
1974
ASEA IRB 6



2024
KUKA KR 160



Observation des parcs de robots



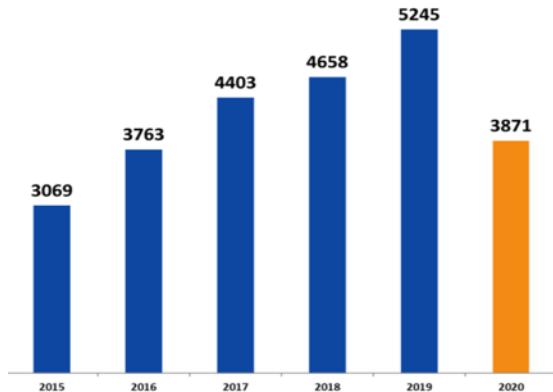
Parc Mondial :

1 million en 2010

3 millions en 2020

5 millions en 2025

Devrait tripler d'ici 2030



En France :

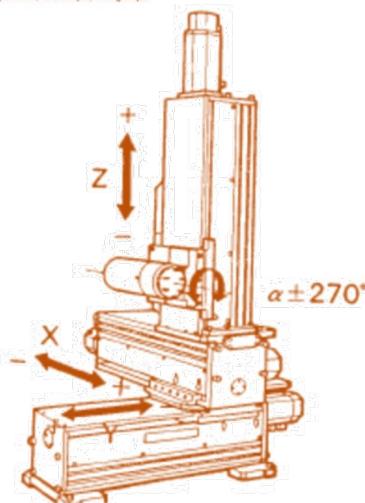
Parc d'environ **80 000**

Environ **7 000**

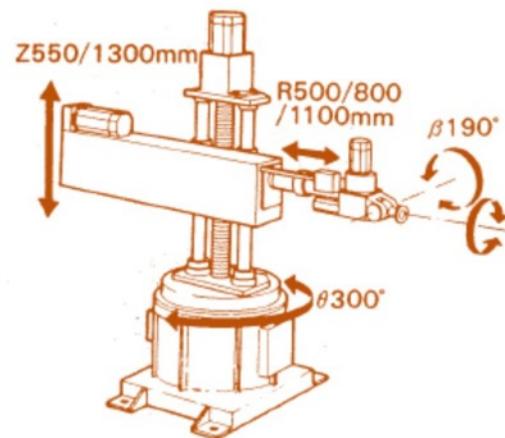
installés par année

Nombre de robots installés en France par année

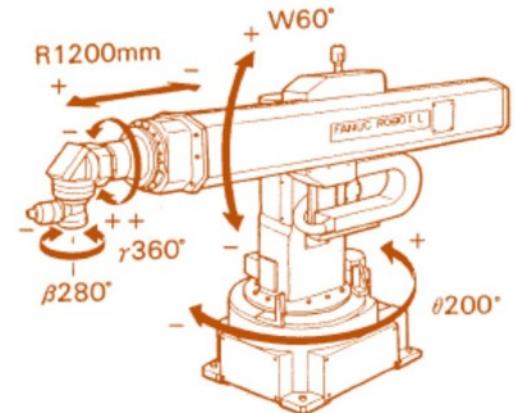
Architectures des robots sériels



Robot Cartésien

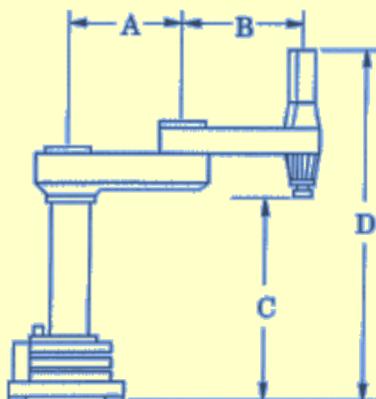


Robot Cylindrique

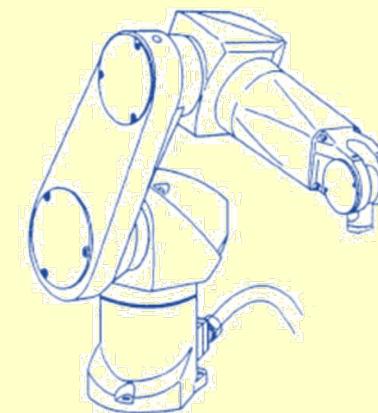


Robot Sphérique

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 : **2300 kg**



Fanuc M 2000 iA

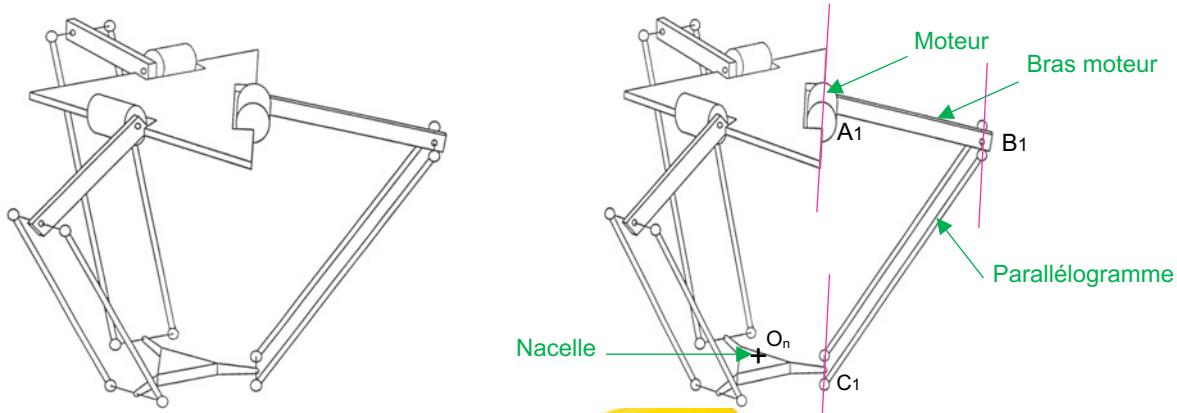
Version 1700L

Charge : 1700 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)



Robots légers, compliant

Light-Weight Robot (Kuka), 7 ddl

Masse : 14 kg

Charge portée : 14 kg

LBR iiwa 14 R820

Charge 14 kg

Masse 30 kg



Capot léger en matériau composite

Matériaux des moteurs dits en « terres rares »

Commande compliant pour la collaboration (cobots)

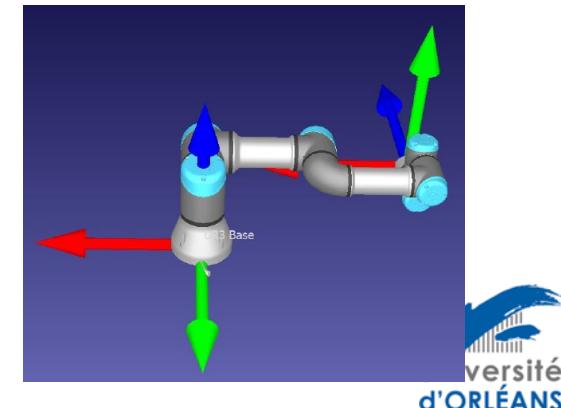
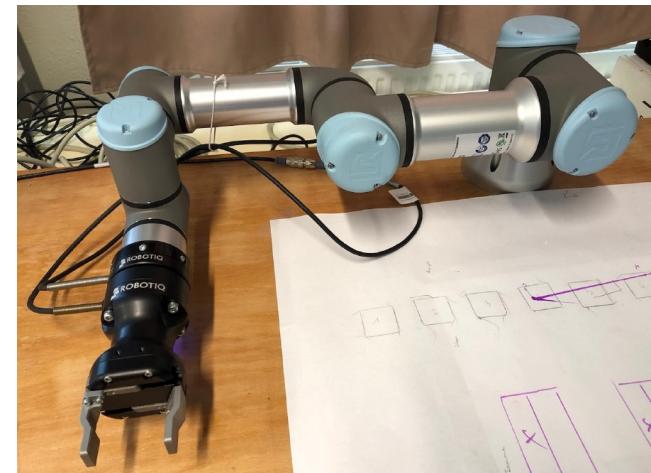
**Kuka
LBR iiwa**

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 |

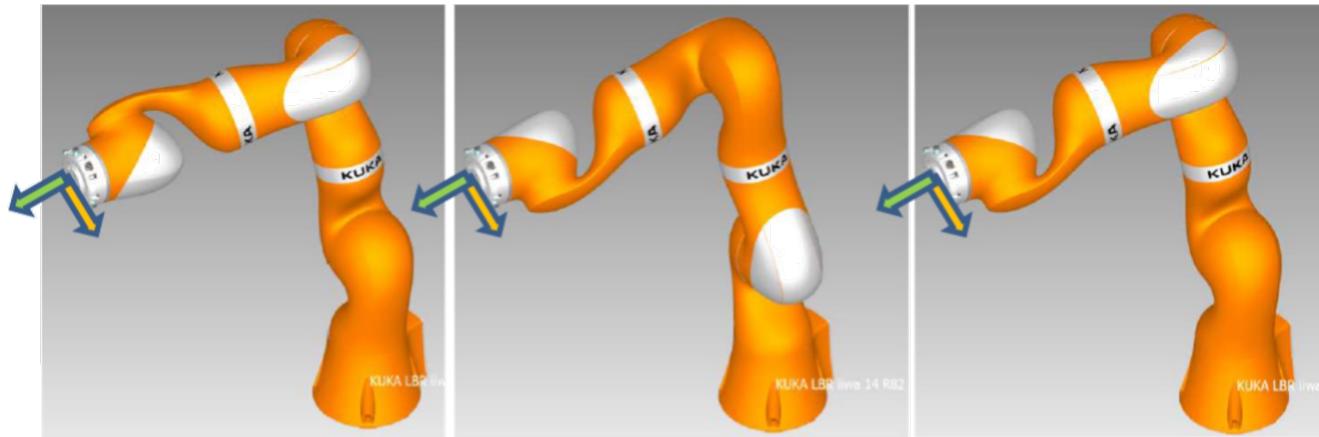


Les configurations d'un robot redondant

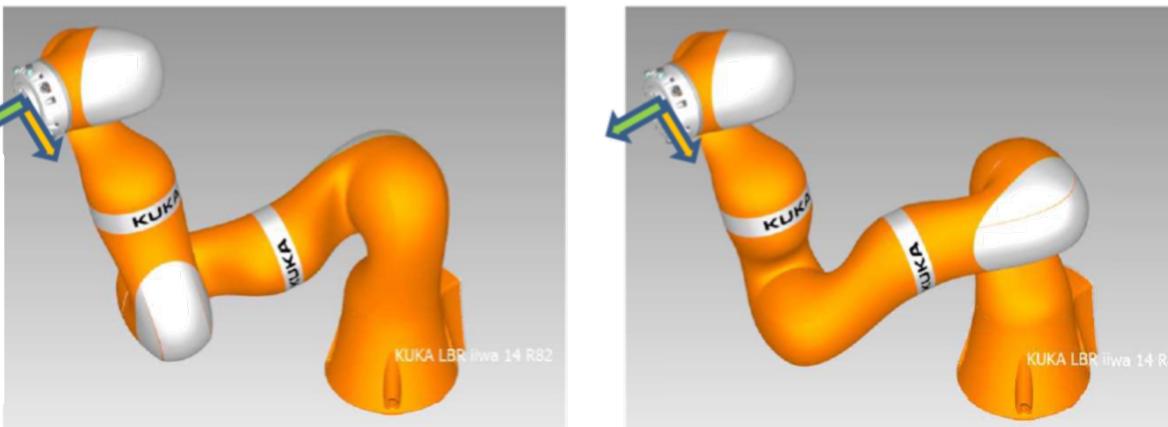
Cas du Kuka LWR

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 |



24

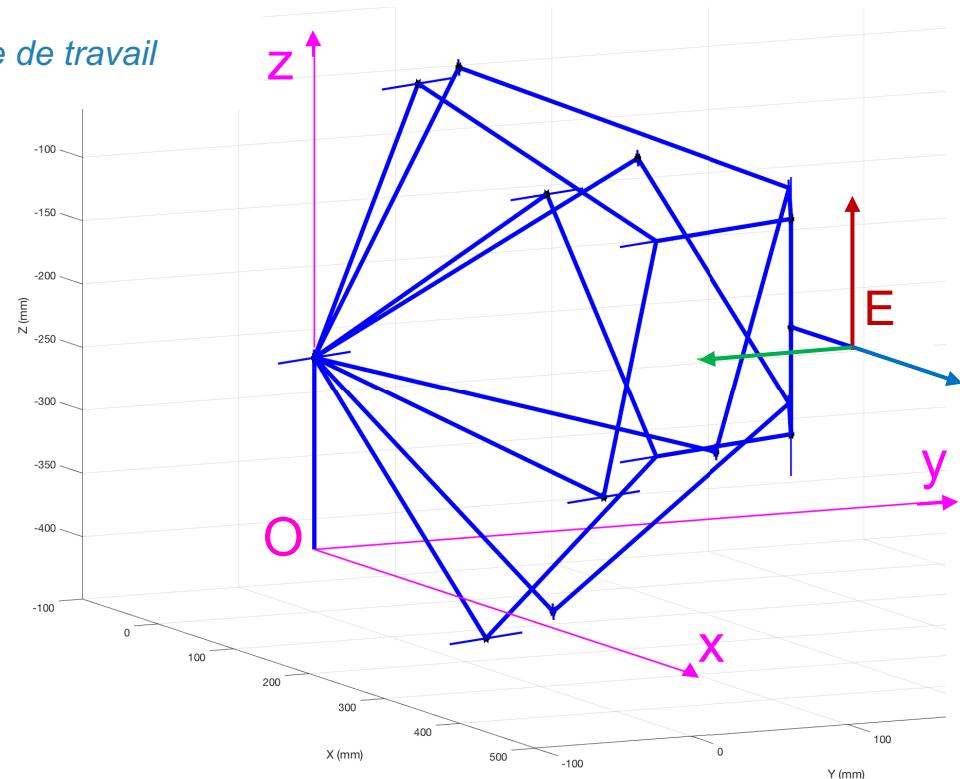
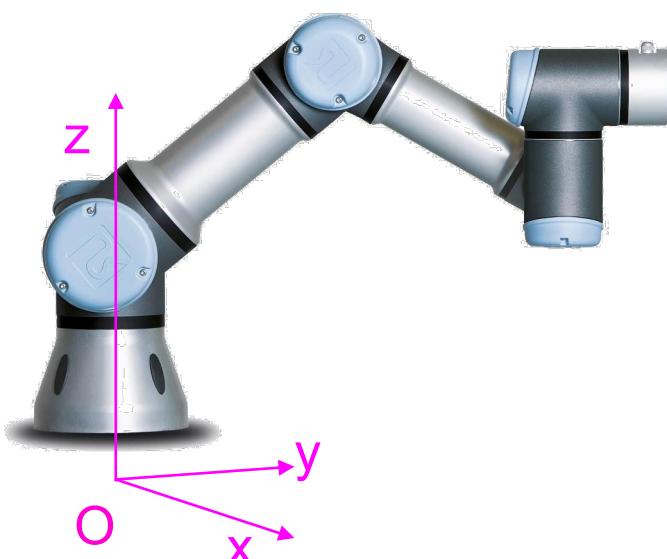
Le tableau des 7 valeurs
articulaires (qi)
correspondant à 6
configurations possibles

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

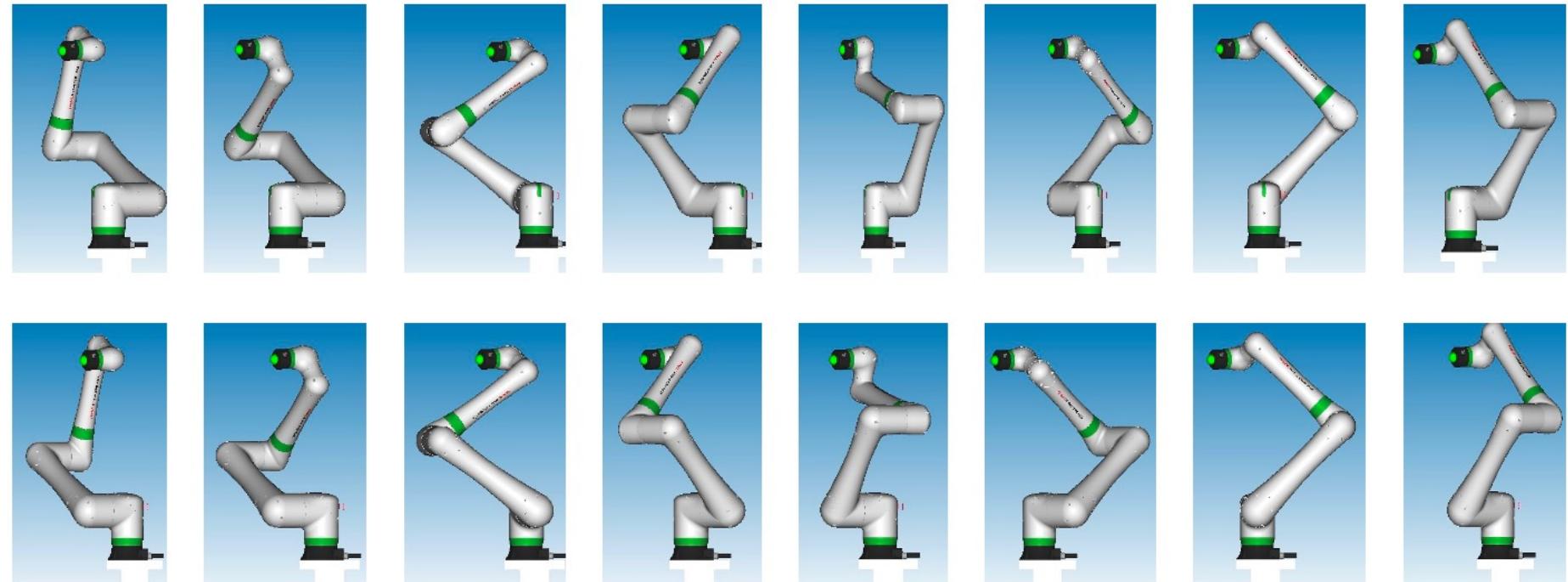
vers le centre ou vers la frontière de l'espace de travail



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



26

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 :

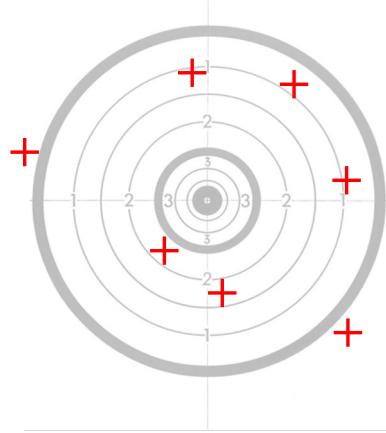
170 cycles avec une charge de 1 kg

200 cycles avec une charge de **0,1 kg**

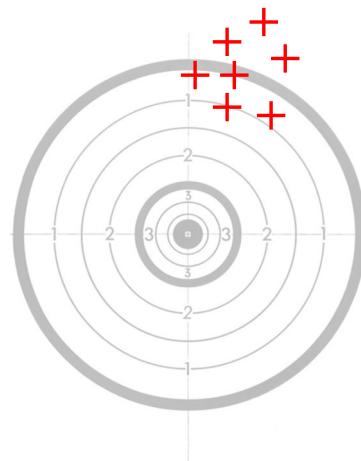
| Série | Rayon d'action | Cycles/min | Tcy |
|-------|----------------|------------|--------|
| TS100 | 1000 | 170 | 0,35 s |
| TS80 | 800 | 200 | 0,30 s |
| TS60 | 620 | 220 | 0,27 s |
| TS40 | 460 | 240 | 0,25 s |

Les robots sont-ils précis ?

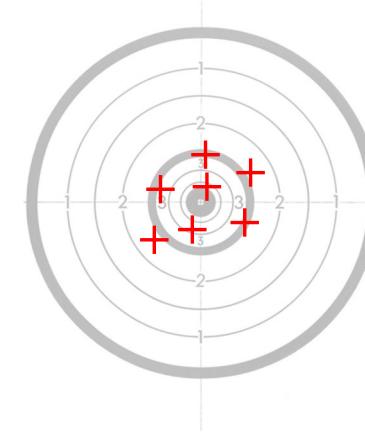
Répétabilité et Exactitude



Mauvaise répétabilité



Bonne répétabilité



Bonne Exactitude

La Répétabilité du robot ABB IRB 8700

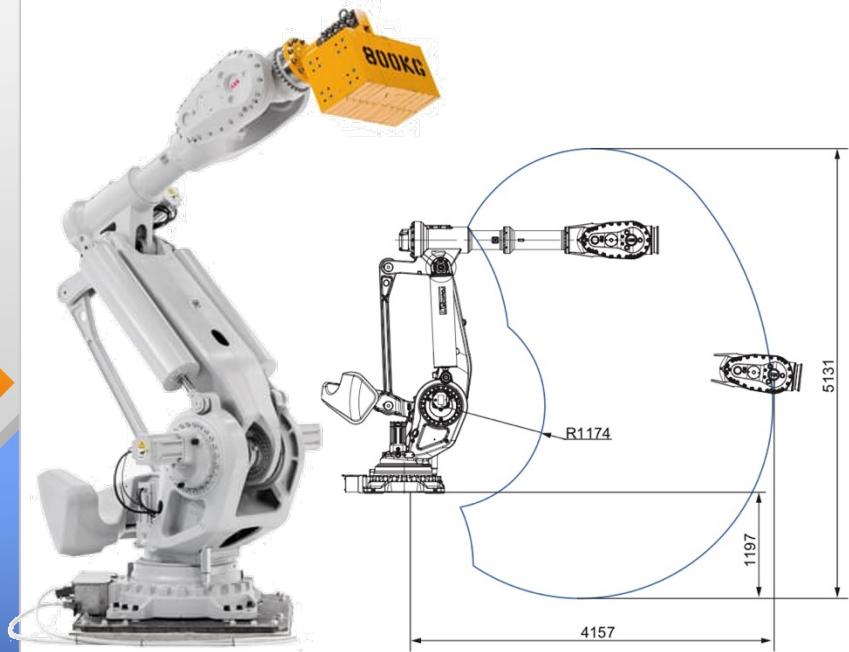
0,05 mm

IRB 8700

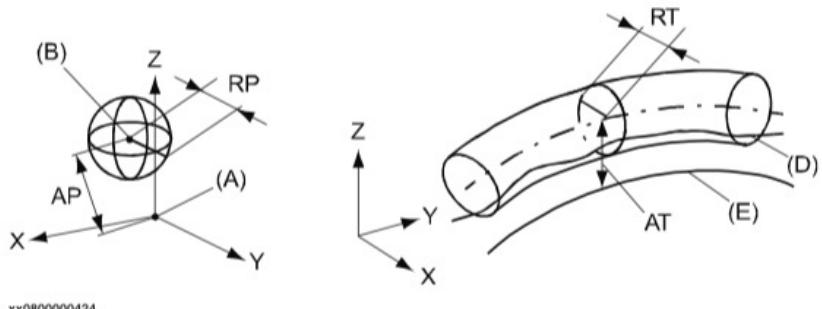
Ω axe 1 : 65°/s
 Ω axe 6 : 115°/s



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



| 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 |

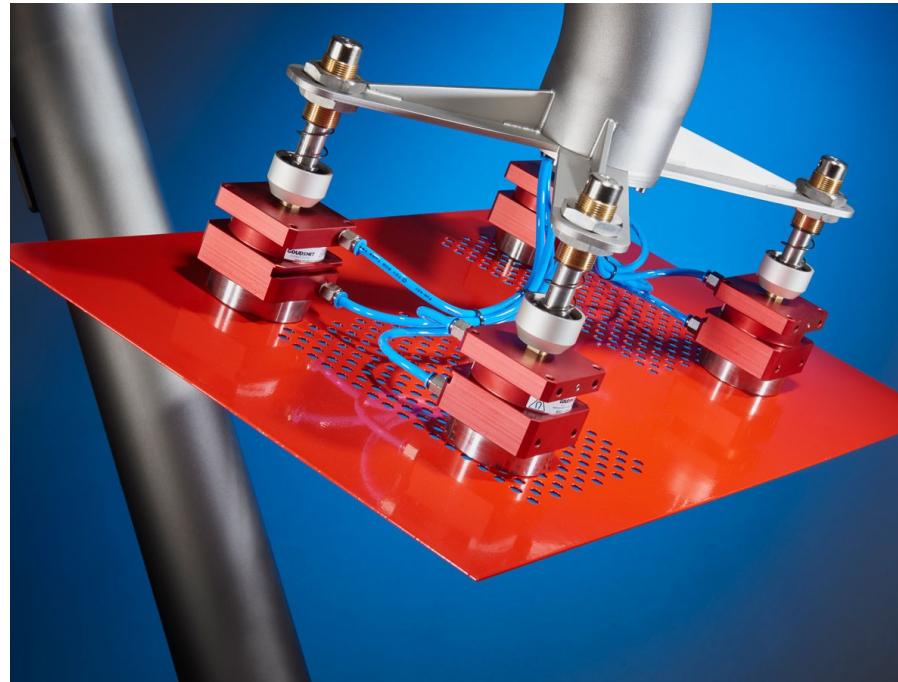
| IRB 8700 | -550/4.20 | -800/3.50 |
|--|-----------|-----------|
| Pose accuracy, AP (mm) ⁱ | 0.07 | 0.09 |
| Pose repeatability, RP (mm) | 0.08 | 0.05 |
| Pose stabilization time, PSt (s) within 0.4 mm of the position | 0.48 | 0.25 |
| Path accuracy, AT (mm) | 1.36 | 1.29 |
| Path repeatability, RT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

ⁱ AP according to the ISO test above, is the difference between the teached 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 transitique de
l'industrie, l'agro-alimentaire, l'agriculture, le médical, les services

Application collaborative directe, indirecte, coexistence

Collaboration directe

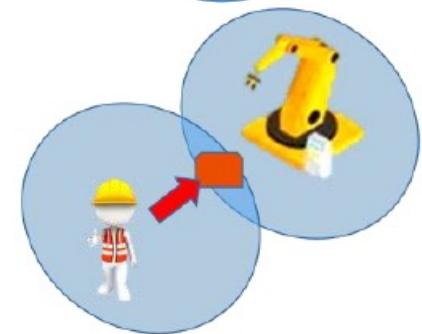
Opérateur et robot agissent au même endroit et en même temps. Ce type encore très rare.



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.



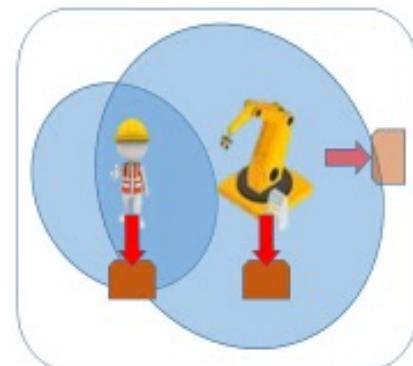
Application robotique en **coexistence** :

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



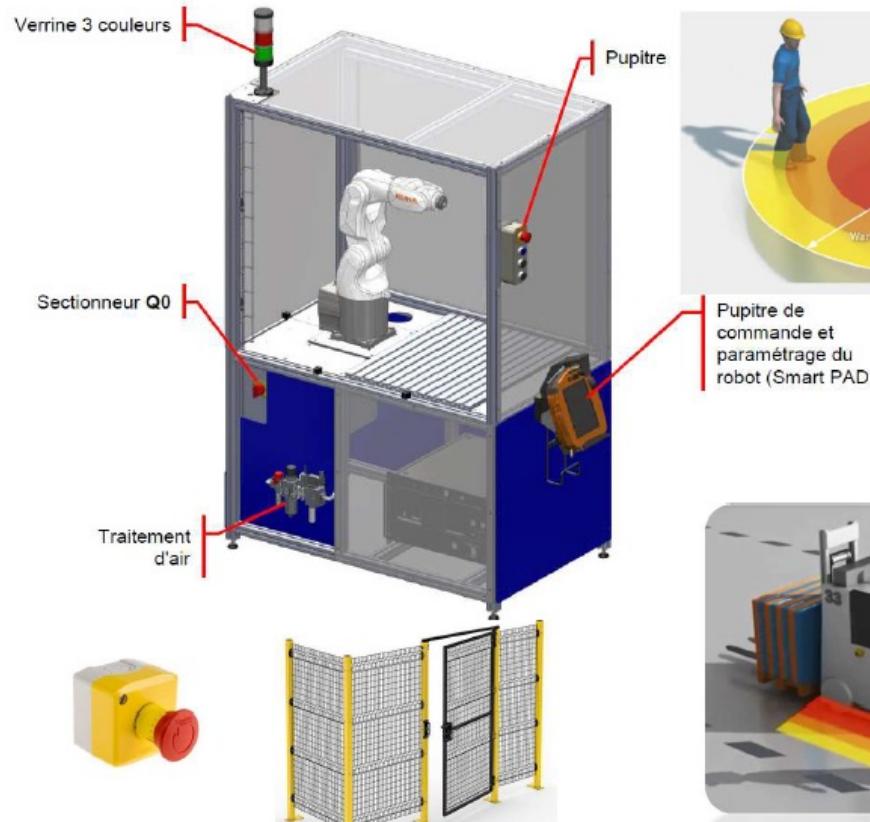
Humain et robot collaborent
dans une même tâche de
façon directe ou indirecte

Les barrières de sécurité :

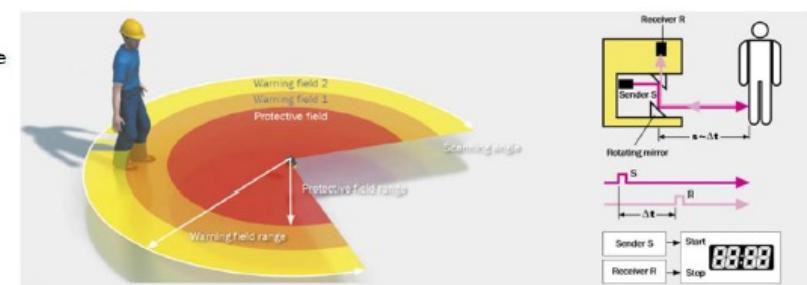
Matérielle ou immatérielle

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^{er} UR5
commercialisé

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

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



37

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)

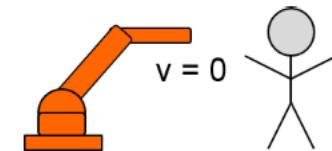
| | Robotique industrielle | Robotique collaborative |
|----------------|---|--|
| Rapidité | 8 à 10 m/s (Scara IAI IXA) | 1 m/s max, en général 0,25 m/s |
| Rayon d'action | 4,7 m (Fanuc M2000 iA) | Rarement > 1m |
| Charge utile | 2300 kg (Fanuc M2000 iA) | Rarement > 10 kg |
| Précision | Quelques 1/100 ^e mm | Quelques 1/10 ^e 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

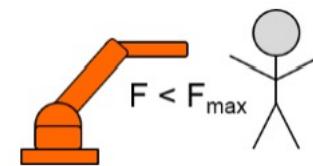
Norme NF EN ISO 10218-2 : 2011 & Directive ISO TS 15066 : 2016

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

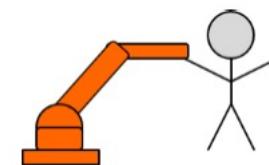
N°1 : Arrêt contrôlé nominal de sécurité



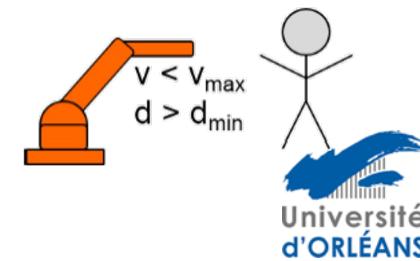
N°2 : Guidage manuel



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

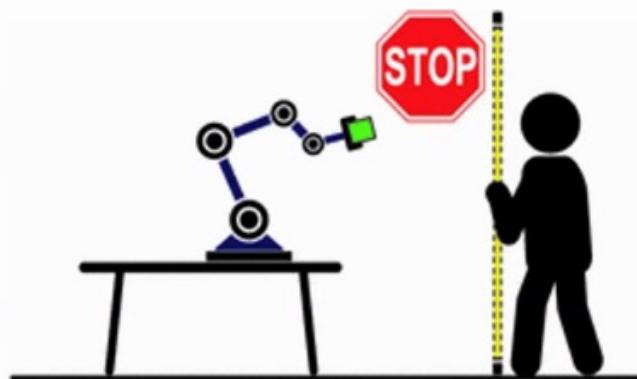


**N°4 : Limitation de la puissance et de la force
par conception ou par commande**

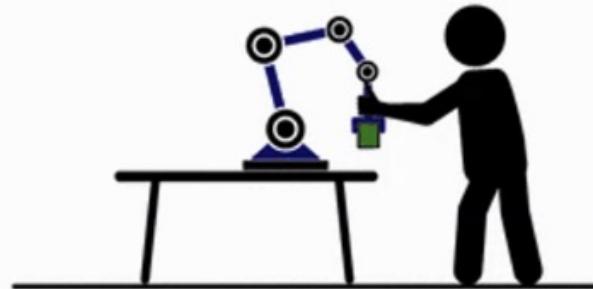


Norme NF EN ISO 10218-2 : 2011 & Directive ISO TS 15066 : 2016

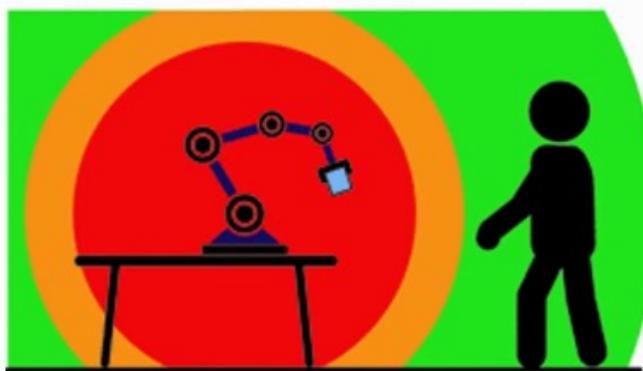
Quatre types de mesures de prévention ou *éléments de sécurité* peuvent être implémentés par l'intégrateur



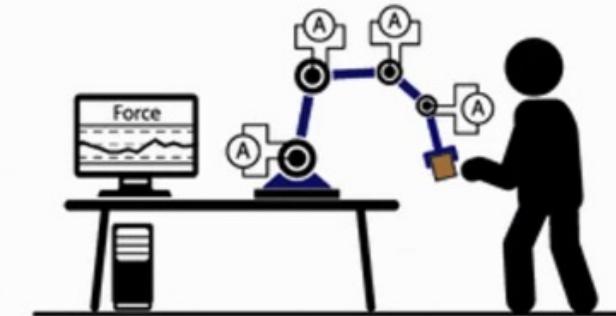
Arrêt contrôlé nominal de sécurité



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 »

42



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



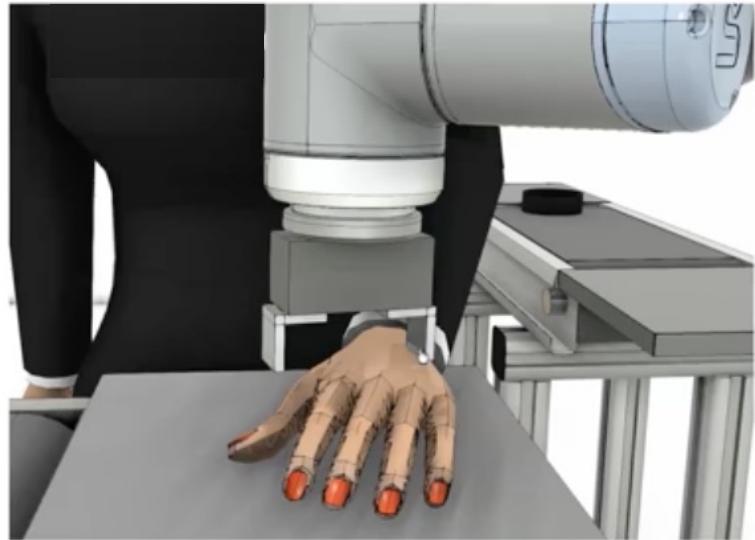
Pour cela :

- 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.

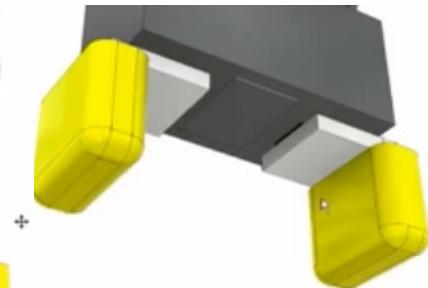


Limitations des risques de blessures en cas de collisions : cas de la main

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



Formes à exclure



Pince équipée de
housses en mousse

Formes à privilégier

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

Pression max : 200 N/cm²

Force max : 140 N

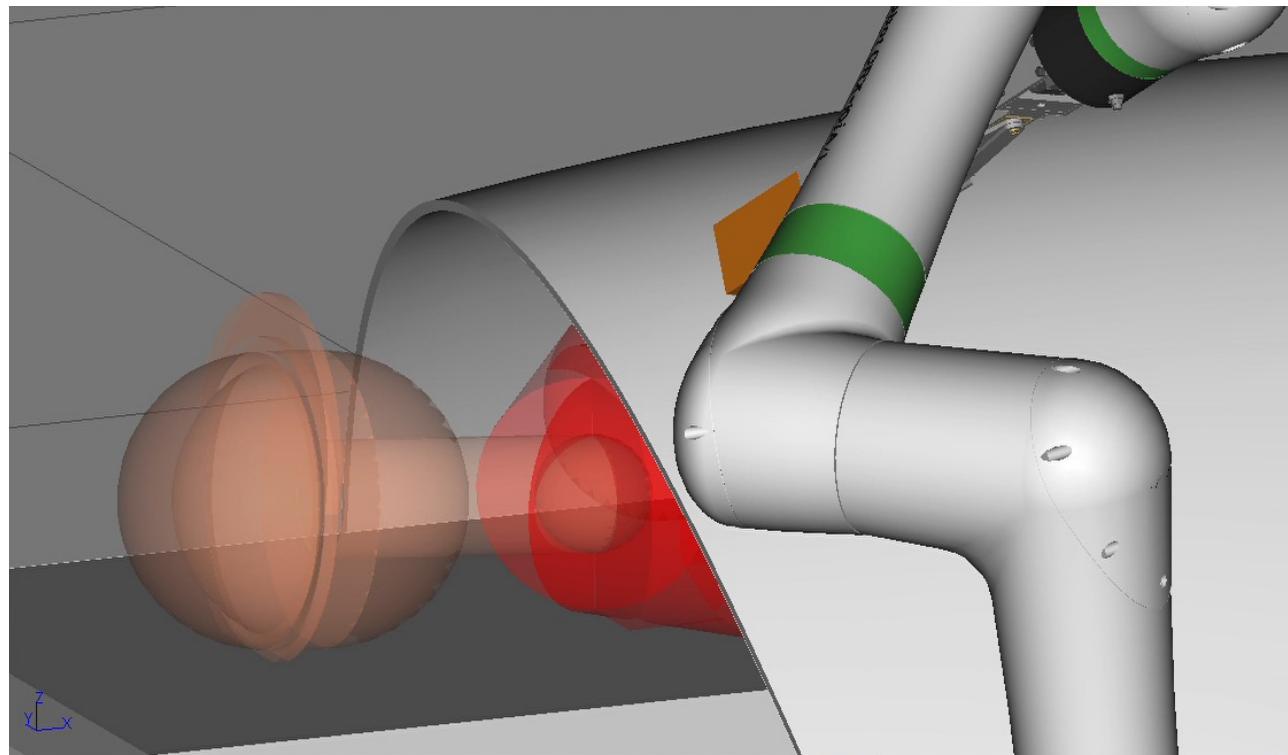
En situation transitoire (< 0,5 s), on tolère le double

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

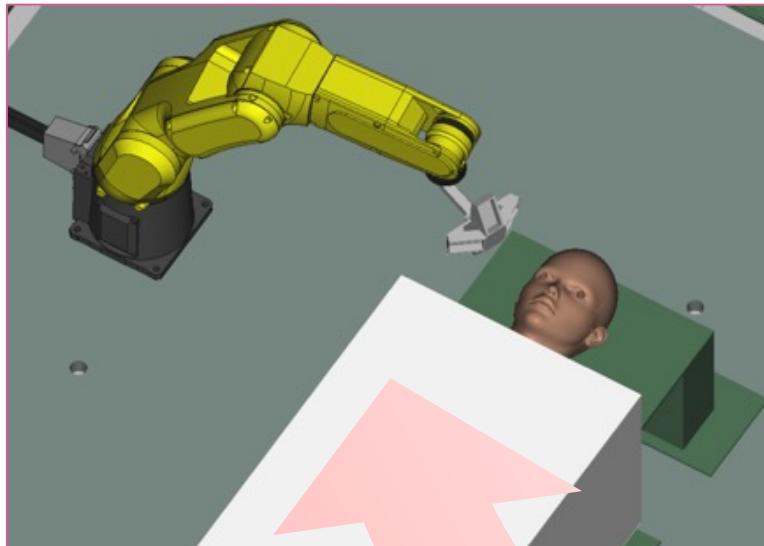
Intégrer **courbures et congés importants** sur toutes les formes

La Robotique Médicale...

...à PRISME



Délivrance de médicaments dans la cochlée

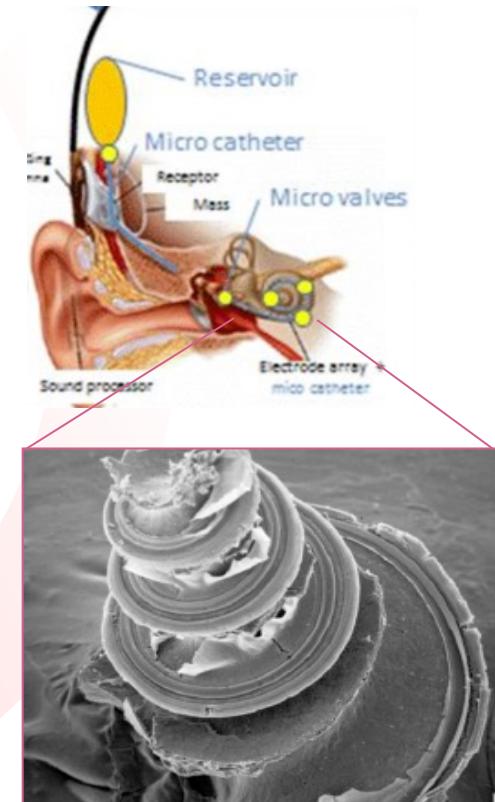


Objectifs

- Un robot pour délivrer les médicaments
- Il déplace un Effecteur-Terminal autour de la tête

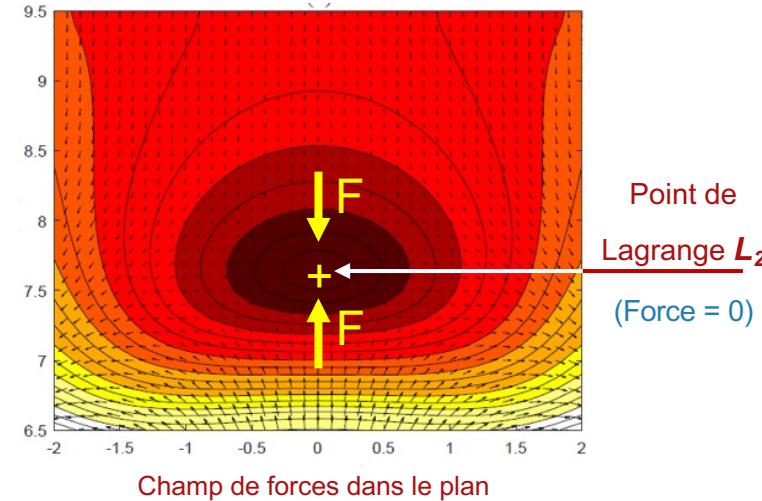
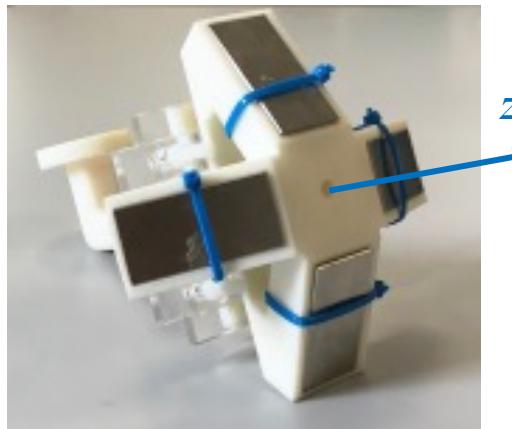


Toujours du même côté de la tête

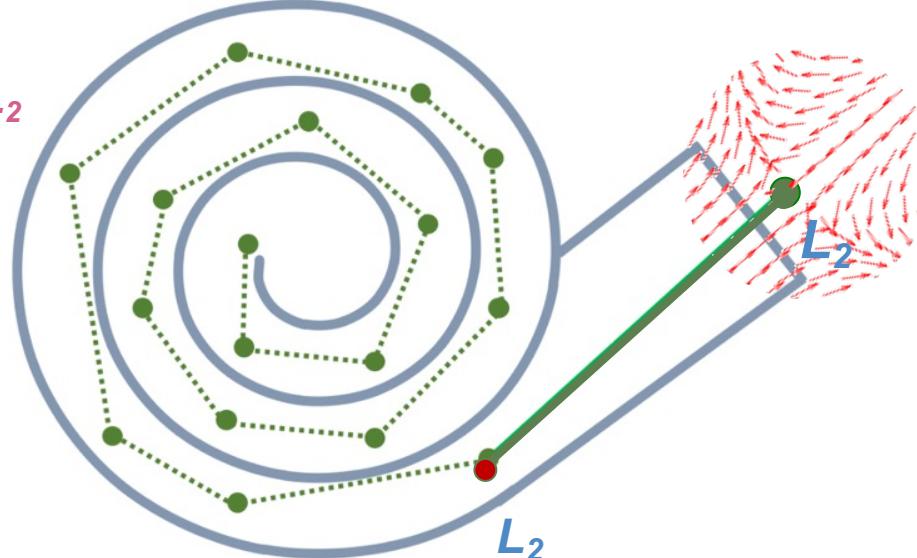


- Un effecteur terminal à aimants permanents
- Permet de Tirer et Pousser les médicaments dans la cochlée

L'effecteur à quatre aimants permanents

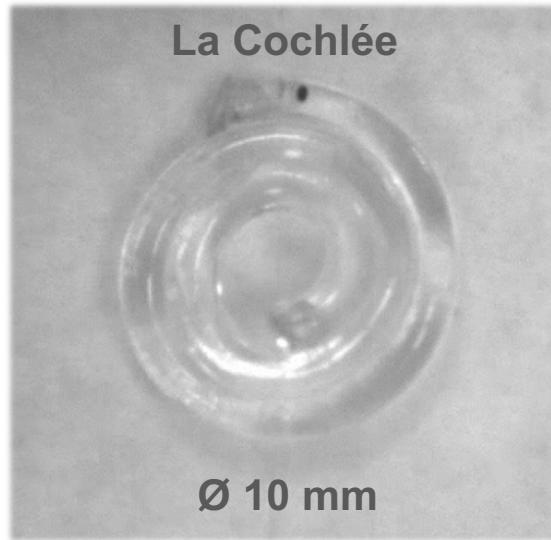


- **4 Aimants** dans une structure compacte
- **Plans** (x, z) et (y, z)
- **Le Point de Lagrange L_2**
Une petite zone,
8 cm devant l'effecteur
- Particules $\varnothing = 0,5$ mm
- Forces de 5.10^{-6} N

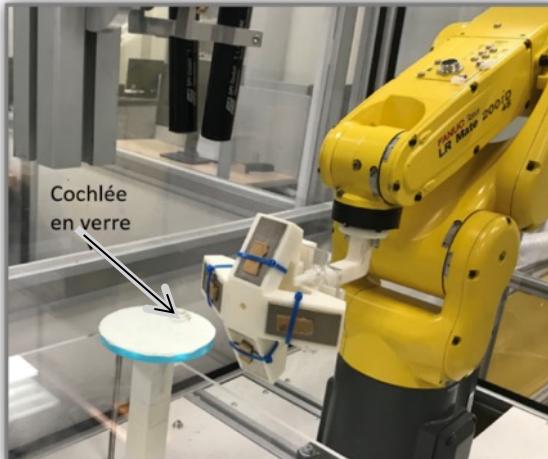


Validation dans une cochlée en verre

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

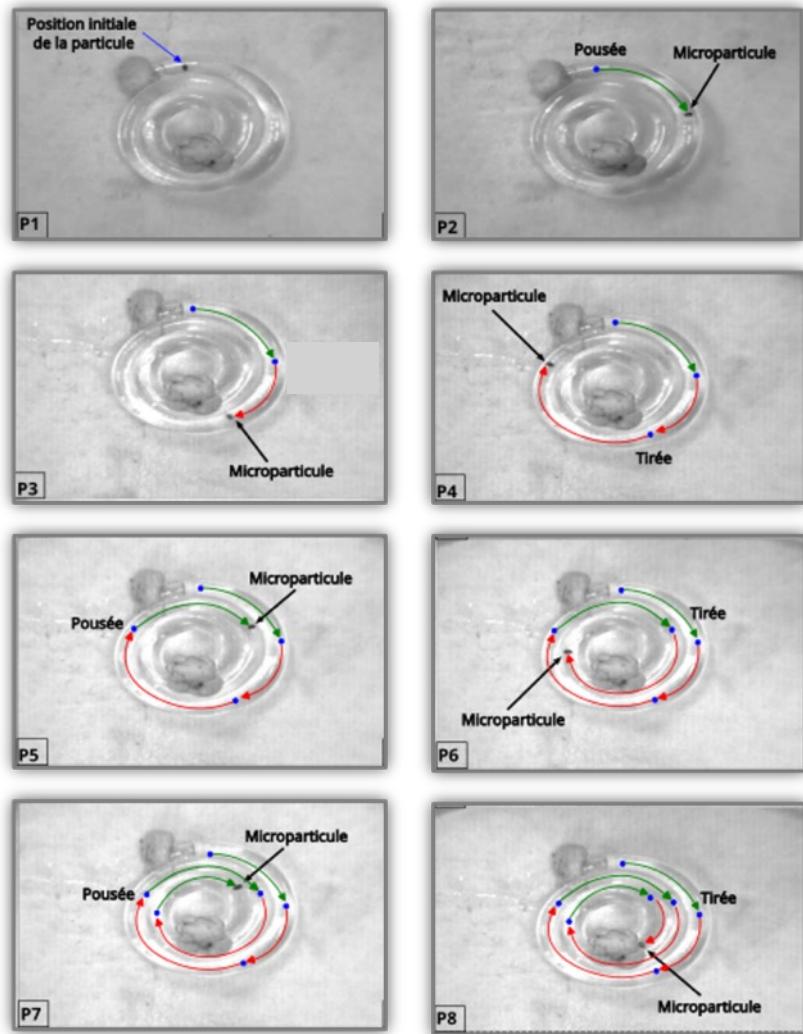


FANUC LR Mate

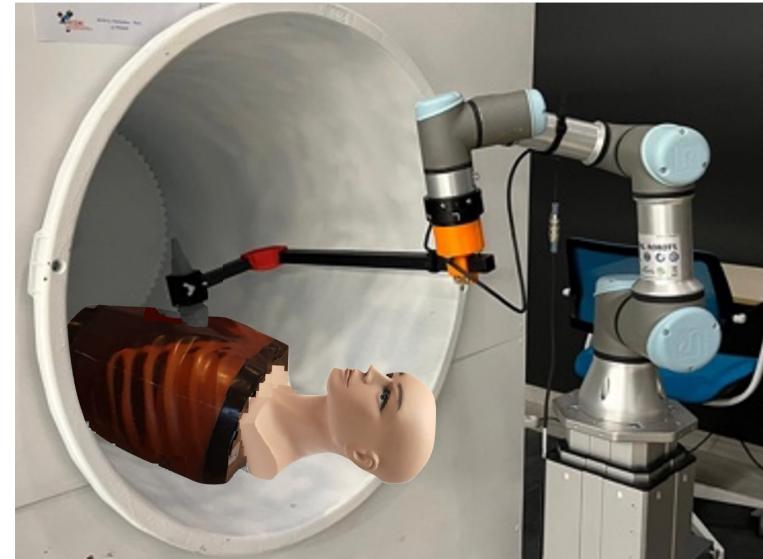


48

26/11/2025



Navigation dans le Gantry TEP



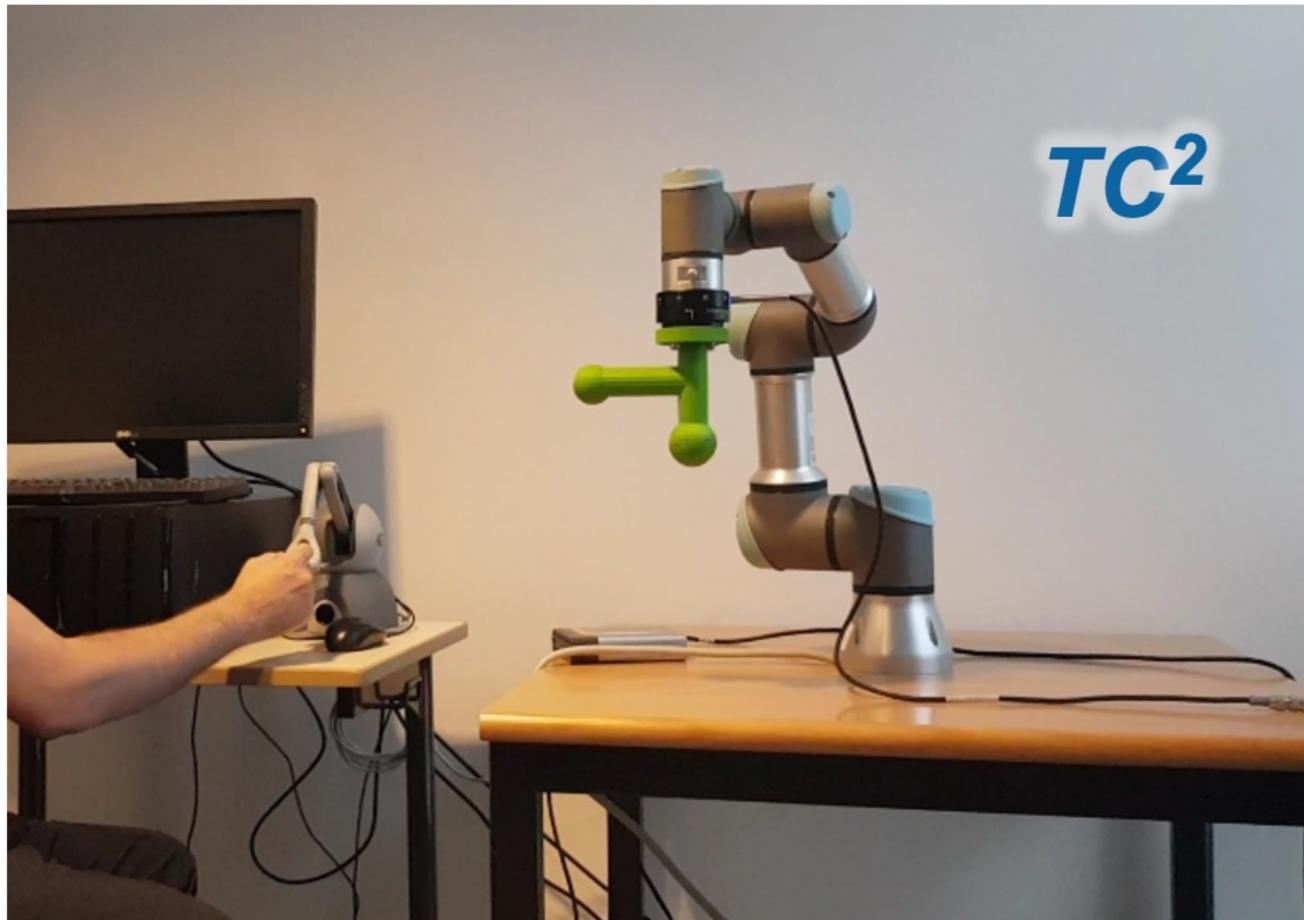
Téléopération & Comanipulation Combinées



TC²

① Combinaison Isotropique TC²

Mêmes combinaisons dans les 6 directions de l'espace

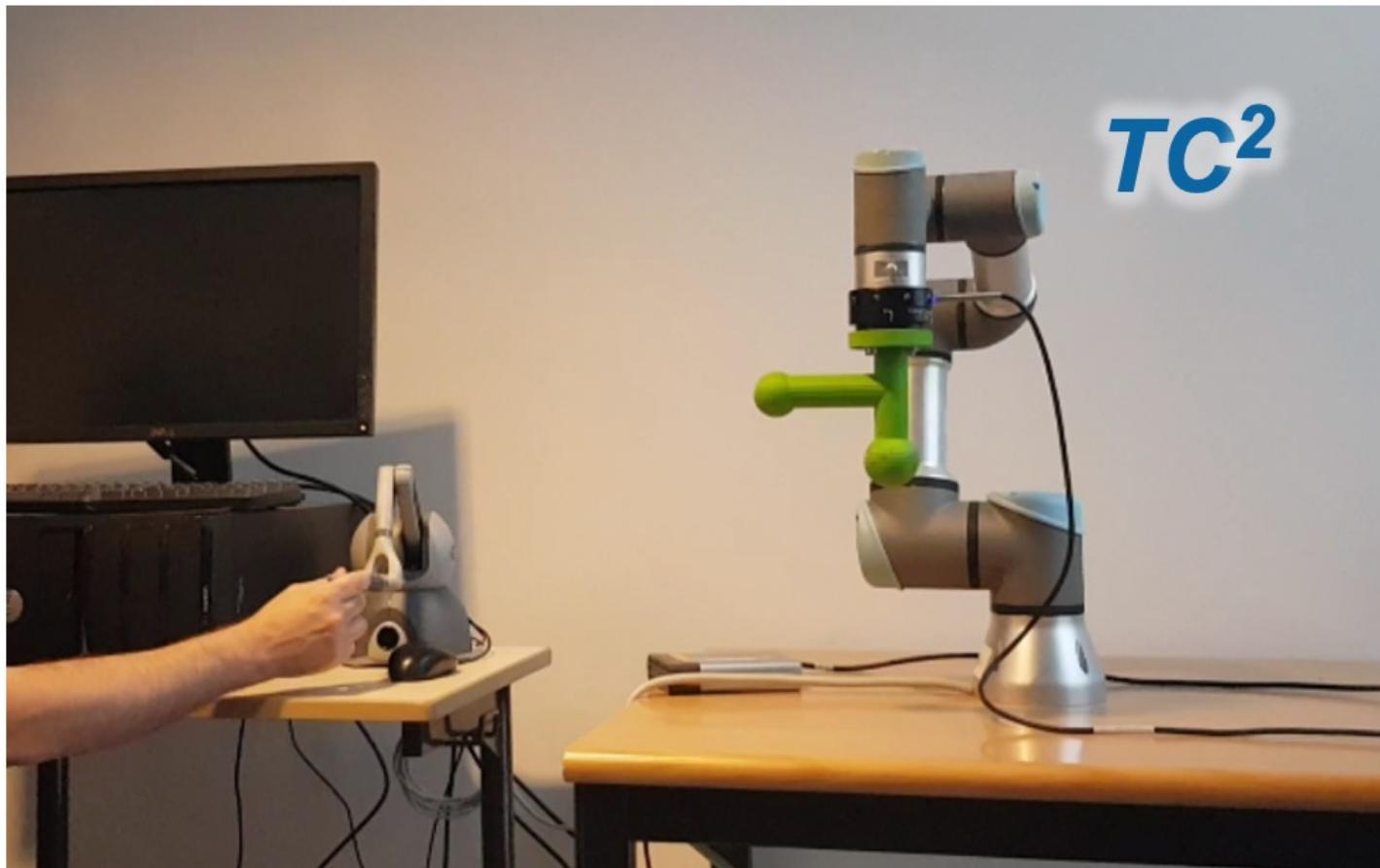


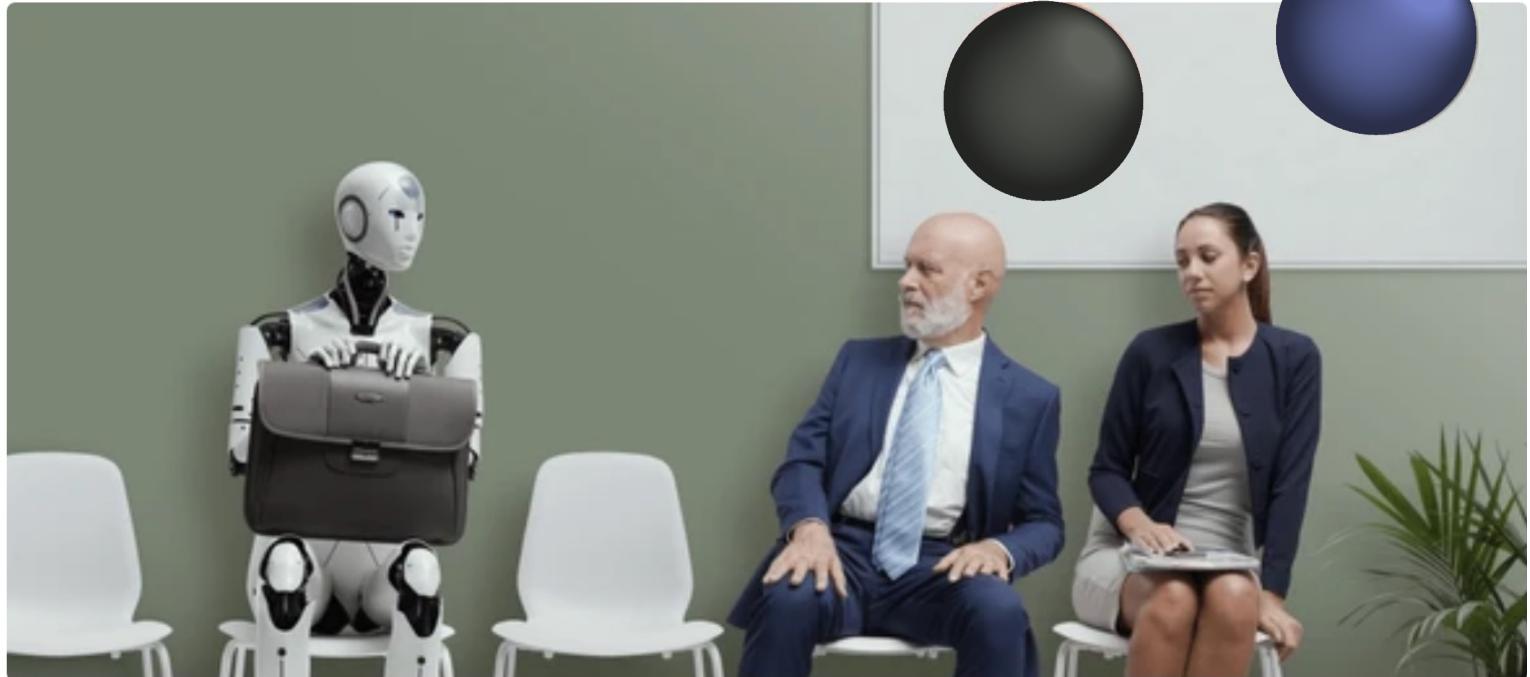
50

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

② Combinaison Anisotropique TC²

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





52

Merci de votre Attention