

# Introduction à la robotique

## De la robotique industriel à la cobotique

Alexis Boulay  
alexis.boulay@inria.fr

2025/10/06

# Détail de l'enseignement

---

CM	2 h	Introduction à la robotique
TD	4 h	Modélisation robotique pour la commande
TP	12 h	Programmation robotique d'un UR5

---

# Détail de l'enseignement

---

CM	2 h	Introduction à la robotique
TD	4 h	Modélisation robotique pour la commande
TP	12 h	Programmation robotique d'un UR5

---

## Objectif du cours

Faire de vous des roboticien·ne·s

Pouvoir discuter avec des roboticien·ne·s et intéragir avec des robots.

# Détail de l'enseignement

---

CM	2 h	Introduction à la robotique
TD	4 h	Modélisation robotique pour la commande
TP	12 h	Programmation robotique d'un UR5

---

## Objectif du cours

Faire de vous des roboticien·ne·s

Pouvoir discuter avec des roboticien·ne·s et intéragir avec des robots.

## Evaluation

- Rapport de TP
- Examen écrit (2H)

# Outline

- 1 Qu'est-ce qu'un robot ?
- 2 La robotique à travers le temps
- 3 La robotique de nos jours

# Résumé

- ① Montrer plein de robot différents, demander de définir ce qu'est un robot
- ② exemple perso quand je cherchais un emploi beaucoup de proposition de faire des chatbots.
- ③ Différencier automate et robot, donner les différentes définition ethymologique et préciser qu'il y a pas de définition forcément fixe
- ④ Donner les caractéristique d'un robot : degrés de liberté, type d'actionneur, link, EE, précision, répétabilité, charge de travail.

# Qu'est-ce qu'un robot ?



# Définition

## Définition de l'ancienne enseignante de ce cours

Un robot est un dispositif se comportant de manière automatique doté de capteurs et d'effecteurs lui donnant une capacité d'adaptation et de déplacement proche de l'autonomie. Un robot est un agent physique réalisant des tâches dans l'environnement dans lequel il évolue.

# DéfinitionS

## Définition de l'ancienne enseignante de ce cours

Un robot est un dispositif se comportant de manière automatique doté de capteurs et d'effecteurs lui donnant une capacité d'adaptation et de déplacement proche de l'autonomie. Un robot est un agent physique réalisant des tâches dans l'environnement dans lequel il évolue.

## Définition d'un autre professeur de robotique

Système mécanique, poly-articulé, actionné, équipé de capteurs et dont le comportement est commandé automatiquement par un calculateur (re)programmable.

# Caractéristiques d'un robot

## L'architecture

- Robot sériel (bras manipulateur, scara...)
- Robot parallèle (robot delta, robot à câble...)
- Robot hybride (humanoïde, quadrupede...)
- Robot mobile (terrestre ou aérien)

Type de moteurs : hydraulique, électrique, pneumatique



Sériel



Parallèle



Hybride

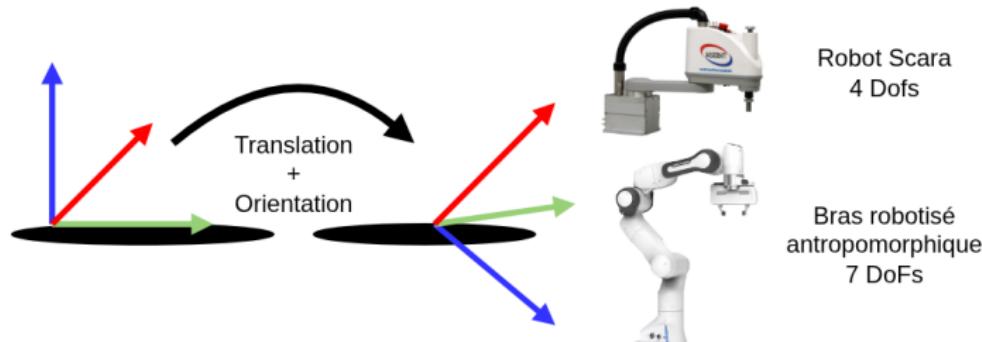


Mobile

# Degrés de liberté et limites

## Degrés de liberté (DoF)

Le nombre de degrés de liberté (DoF) d'un robot sériel est le nombre d'actionneurs indépendants qu'il possède. Ce nombre définit la capacité de mouvement du robot dans son espace de travail.



### Espace cartésien (monde)

Limite de l'espace de travail

Limites en vitesse et accélération cartésienne

Limites de charge

### Espace articulaire

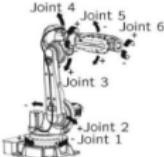
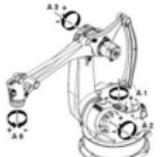
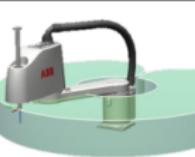
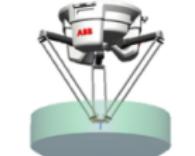
Butées articulaires

Limites en vitesse et accélération des actionneurs

Limites de couple des actionneurs

# Caractéristiques d'un robot

## Espace de travail et limites

Désignation	Cinématique	Enveloppe de travail	Photo
ANTHROPOMORPHE 6_AXES		 	
ANTHROPOMORPHE 4_AXES		 	
SCARA		 	
DELTA		 	

# Caractéristiques d'un robot

Capacité de charge maximales et utiles

## Charges

**Charge maximale** : charge que le robot peut théoriquement soulever dans des conditions idéales.

**Charge utile** : charge que le robot peut soulever en tenant compte de sa configuration, des contraintes dynamiques, de l'usure des composants et de la sécurité.



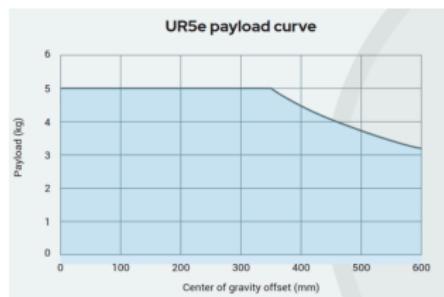
irb8700 (ABB)

Charge maximale 1000 kg

Charge utile 800 kg



UR 5e



UR 5e Charge utile

# Caractéristiques d'un robot

## Répétabilité et Précision

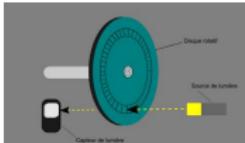
	Précis	Non précis
Répétable		
Non répétable		

Les imprécisions d'un robot :

- Mauvaise calibration
- Mauvaise commande / modélisation
- Jeu dans les articulations
- Usure et déformation

# Caractéristiques d'un robot

## Capteurs associés

<b>Encodeur</b>  Position articulaire	<b>Capteur de force</b>  Mesure des forces d'interaction
<b>LiDAR</b>  Cartographie et détection	<b>Caméra 3D (Kinect)</b>  Vision et perception 3D
<b>Barrière immatérielle</b>  Détection de présence	<b>Cage de sécurité</b>  Protection physique

# Facteurs de choix d'un robot

- ① Type de robot (sériel, parallèle, mobile, hybride)
- ② Degrés de liberté nécessaires
- ③ Espace de travail requis
- ④ Capacité de charge utile
- ⑤ Précision et répétabilité
- ⑥ Vitesse et accélération
- ⑦ Type d'actionneurs (électrique, hydraulique, pneumatique)
- ⑧ Environnement de travail (intérieur, extérieur, conditions extrêmes)

# Plan de la section

- ① Le développement de la robotique industrielle (1950-1990)
- ② La diversification des applications (1990-2010)
- ③ La robotique collaborative et l'IA (2010-aujourd'hui)
- ④ Normes et sécurité

# Le développement de la robotique industrielle

- **1961** : Unimate, premier robot industriel commercialisé (General Motors)



# Le développement de la robotique industrielle

- **1961** : Unimate, premier robot industriel commercialisé (General Motors)
- **1973** : 1er robot 6 axes Famulus (KUKA)



# Le développement de la robotique industrielle

- **1961** : Unimate, premier robot industriel commercialisé (General Motors)
- **1973** : 1er robot 6 axes Famulus (KUKA)
- **1985** : 1er robot delta



# Le développement de la robotique industrielle

- **1961** : Unimate, premier robot industriel commercialisé (General Motors)
- **1973** : 1er robot 6 axes Famulus (KUKA)
- **1985** : 1er robot delta
- **2015** : Arrivé des robots collaboratifs



# La robotique collaborative

## Les cobots (robots collaboratifs)

- 2008 : Universal Robots UR5 (pionnier)
- Légers et sûrs pour travailler avec les humains
- Programmation intuitive
- Flexibles et réutilisables



## Autres applications collaboratives

- Exosquelettes pour assistance physique
- Robots de rééducation
- Robots de service (hôtelier, logistique)

# Robotique et Intelligence Artificielle

- Apprentissage par démonstration

# Robotique et Intelligence Artificielle

- **Apprentissage par démonstration**
  - Le robot apprend en observant l'humain

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

# Robotique et Intelligence Artificielle

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- Le robot apprend par essai-erreur

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- Le robot apprend par essai-erreur
- Adaptation à des tâches complexes

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- Le robot apprend par essai-erreur
- Adaptation à des tâches complexes
- Peut être simulé

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- Le robot apprend par essai-erreur
- Adaptation à des tâches complexes
- Peut être simulé

- **VLA**

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- Le robot apprend par essai-erreur
- Adaptation à des tâches complexes
- Peut être simulé

- **VLA**

- Utilisation de LLM pour la comprehension de tâches

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- Le robot apprend par essai-erreur
- Adaptation à des tâches complexes
- Peut être simulé

- **VLA**

- Utilisation de LLM pour la comprehension de tâches
- Prise en charge de la Vision

# Robotique et Intelligence Artificielle

- **Apprentissage par démonstration**

- Le robot apprend en observant l'humain
- Réduction du temps de programmation

- **Apprentissage par renforcement**

- Le robot apprend par essai-erreur
- Adaptation à des tâches complexes
- Peut être simulé

- **VLA**

- Utilisation de LLM pour la comprehension de tâches
- Prise en charge de la Vision
- Apprentissage via démonstrations

# Les normes et la sécurité

## Encadrement de la robotique

### Principales normes

- **ISO 10218-1/2** : Robots industriels - Exigences de sécurité
- **ISO/TS 15066** : Robots collaboratifs - Spécifications de sécurité
- **ISO 13482** : Robots de service - Exigences de sécurité

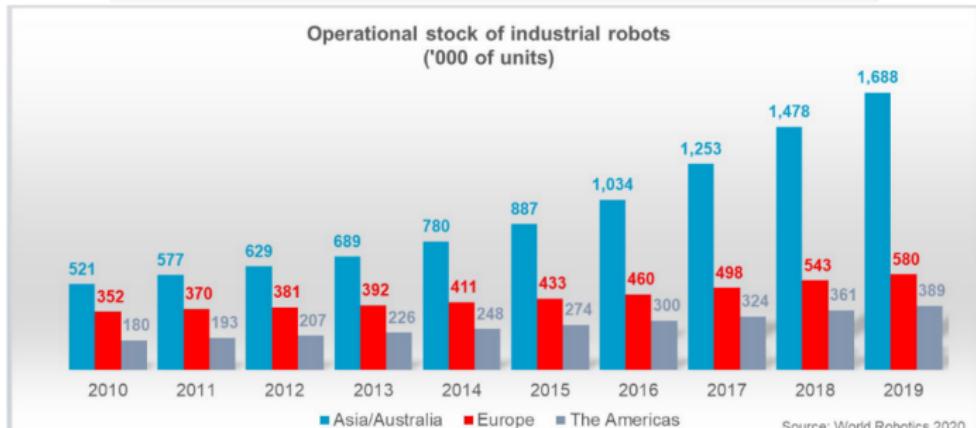
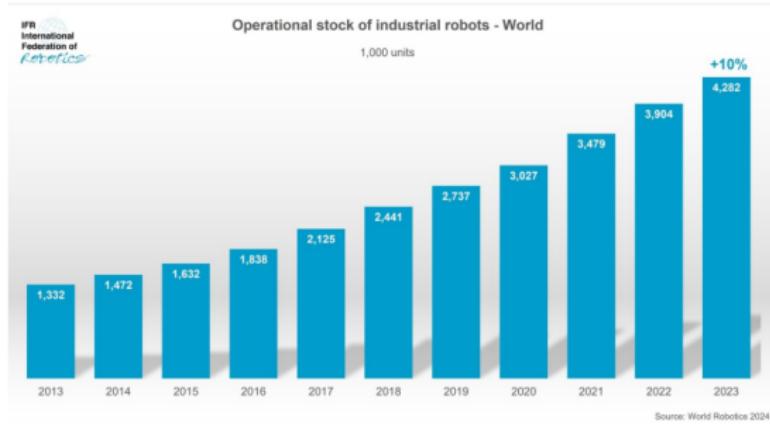
### Principes clés :

- Analyse des risques
- Limitation de force et de puissance pour les cobots
- Systèmes de sécurité (arrêts d'urgence, barrières)
- Formation des opérateurs
- Maintenance préventive

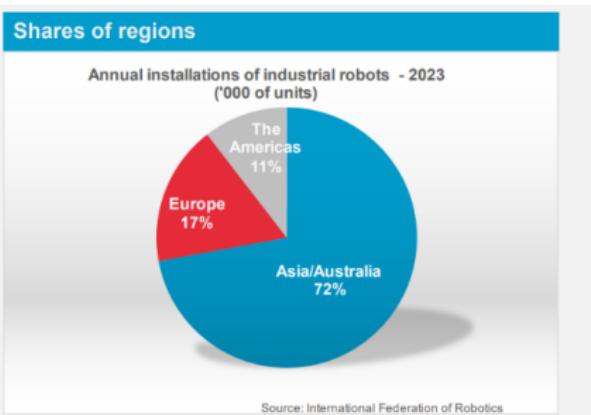
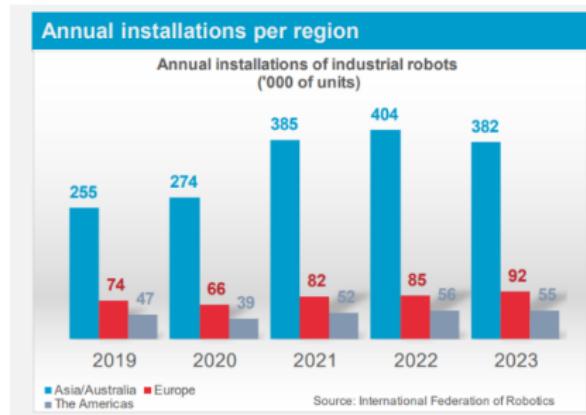
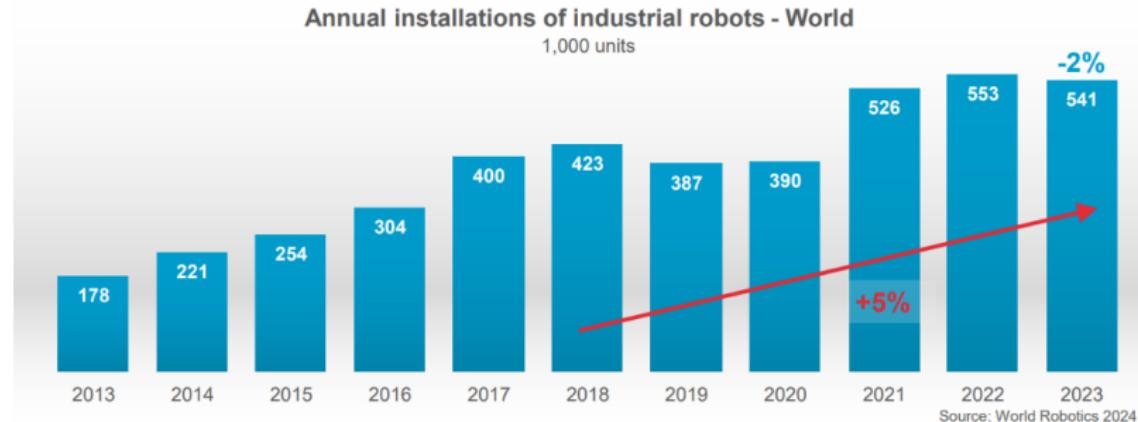
# Plan de la section

- ① Le marché mondial de la robotique
- ② Utilisation par pays et régions
- ③ Domaines d'application
- ④ Cas d'usage concrets et vidéos
- ⑤ Défis et opportunités

# Quelques chiffres



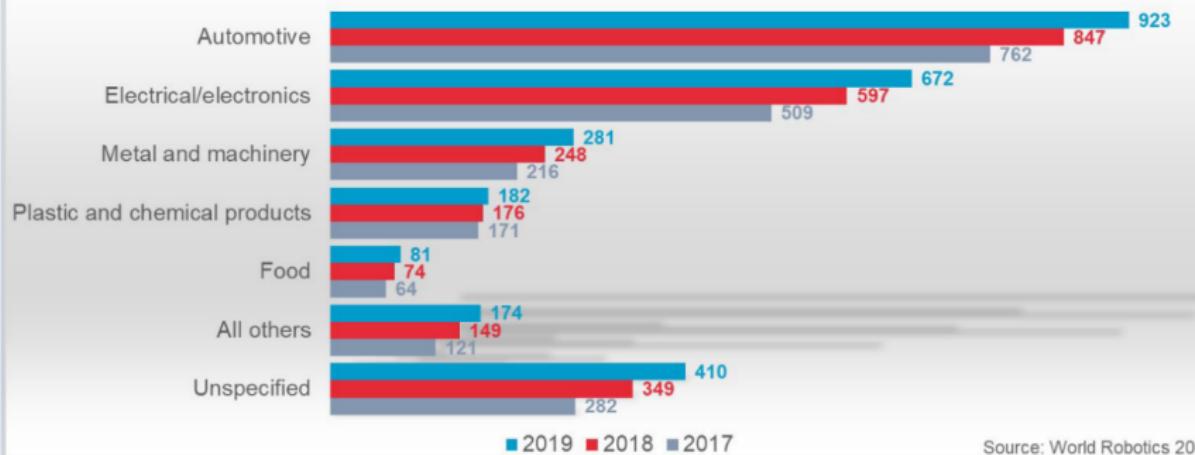
# Quelques chiffres



# Quelques chiffres

Operational stock of industrial robots by customer industry - World

1,000 units

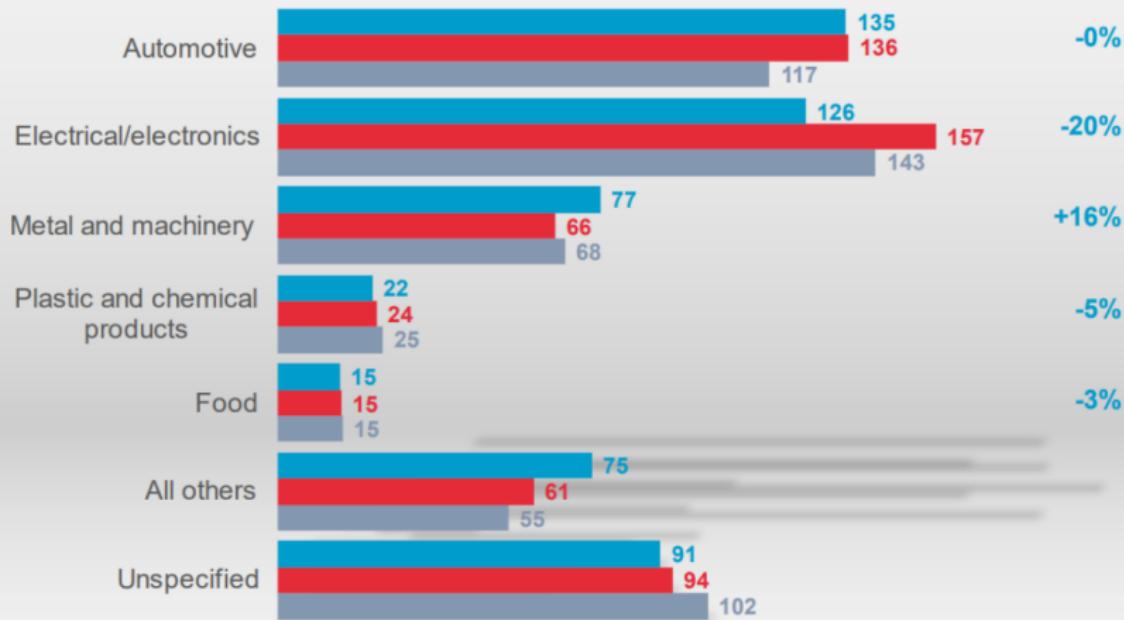


Source: World Robotics 2020

# Quelques chiffres

## Annual installations of industrial robots by customer industry- World

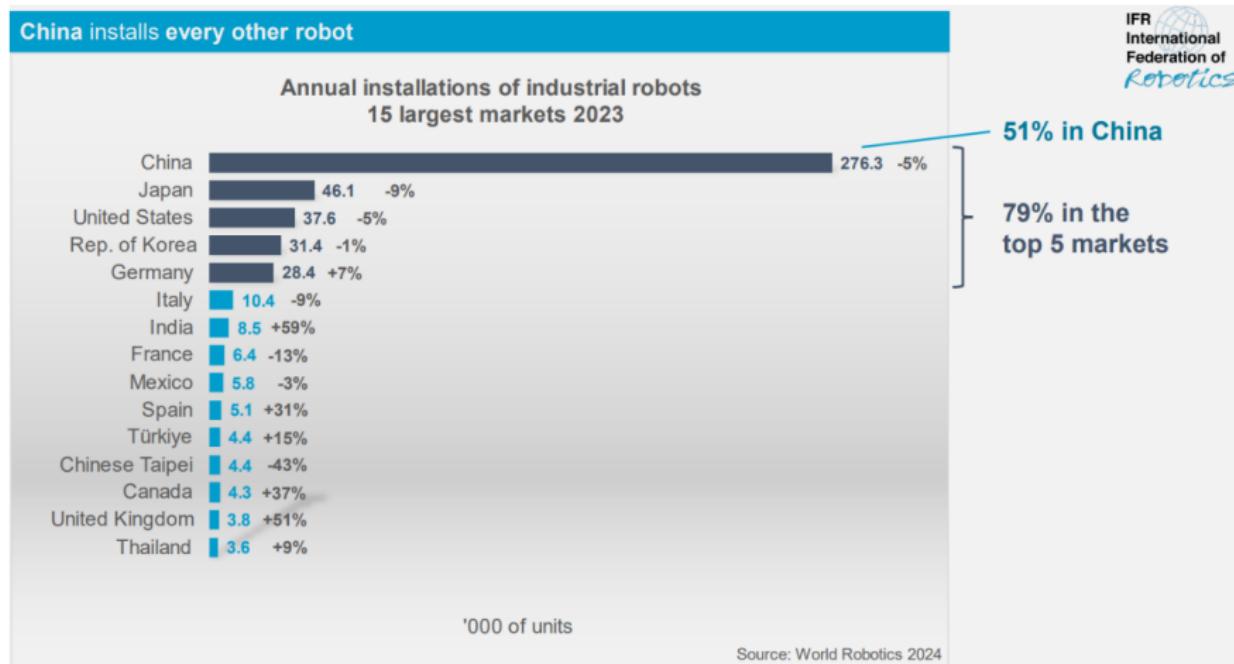
1,000 units



■ 2023 ■ 2022 ■ 2021

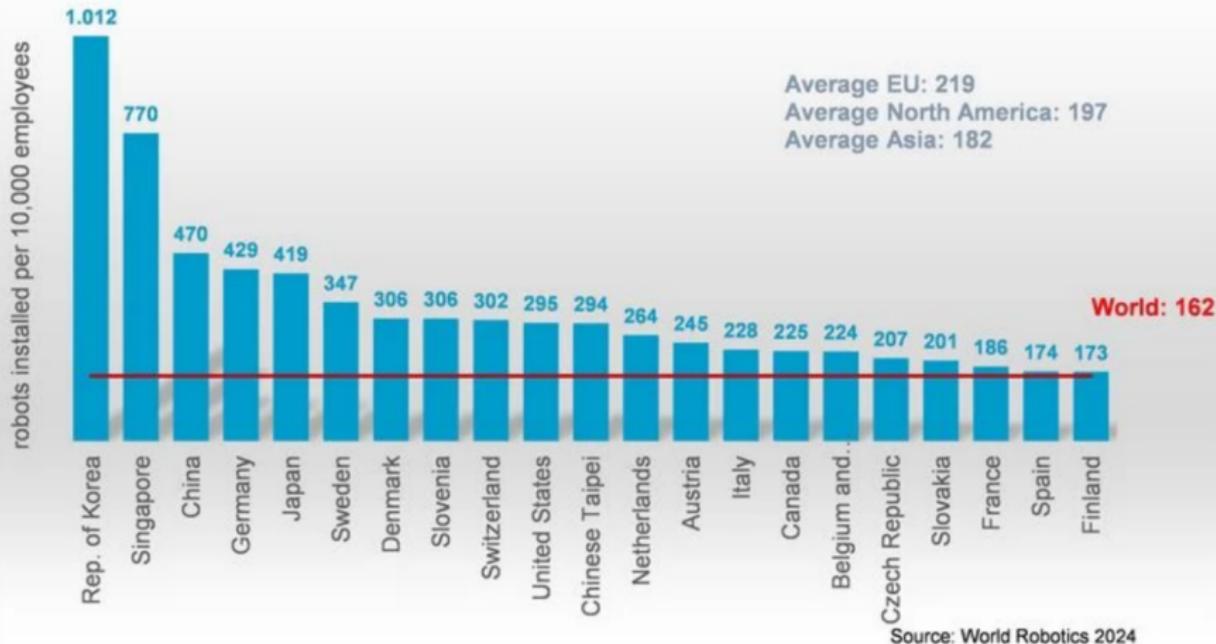
Source: World Robotics 2024

# Quelques chiffres



# Quelques chiffres

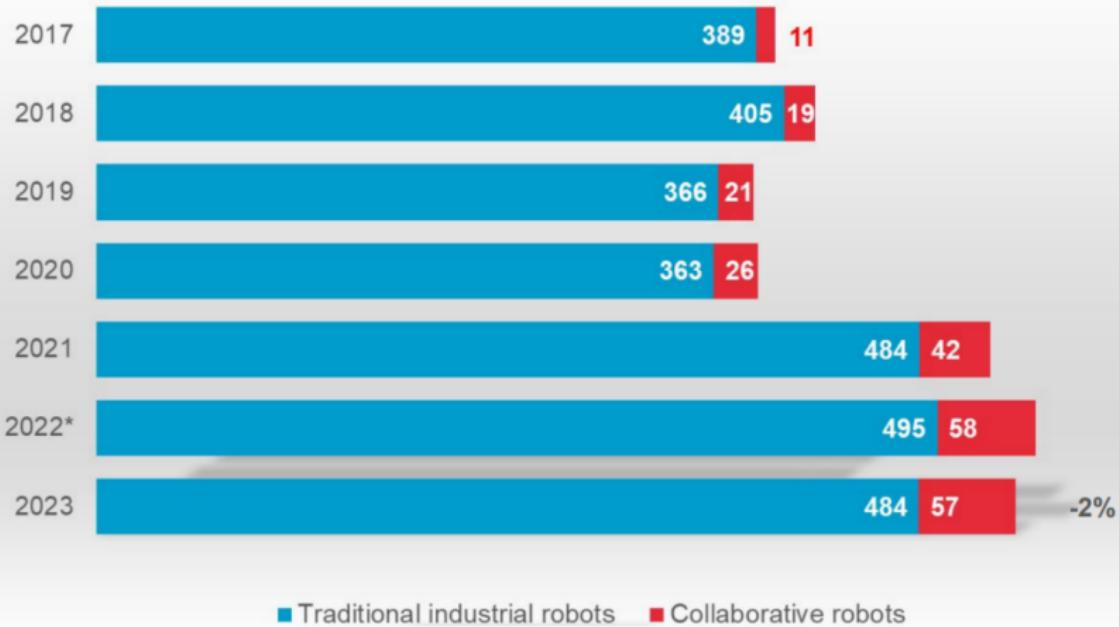
Robot density in the manufacturing industry 2023



# Quelques chiffres

## Collaborative and traditional industrial robots

'000 units



# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- Logistique et e-commerce

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**
  - Préparation de commandes

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments
- Robots de maçonnerie

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments
- Robots de maçonnerie

- **Services**

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments
- Robots de maçonnerie

- **Services**

- Nettoyage (hôtels, aéroports)

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments
- Robots de maçonnerie

- **Services**

- Nettoyage (hôtels, aéroports)
- Livraison urbaine

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments
- Robots de maçonnerie

- **Services**

- Nettoyage (hôtels, aéroports)
- Livraison urbaine
- Accueil et information

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments
- Robots de maçonnerie

- **Services**

- Nettoyage (hôtels, aéroports)
- Livraison urbaine
- Accueil et information

- **Exploration**

# Au-delà de l'industrie traditionnelle

- **Logistique et e-commerce**

- Préparation de commandes
- Tri et emballage

- **Santé et médical**

- Chirurgie assistée (da Vinci)
- Réhabilitation et rééducation

- **Agriculture**

- Robots de récolte
- Surveillance des cultures (drones)

- **Construction**

- Impression 3D de bâtiments
- Robots de maçonnerie

- **Services**

- Nettoyage (hôtels, aéroports)
- Livraison urbaine
- Accueil et information

- **Exploration**

- Intervention en milieu hostile

# Cas d'usage : Logistique Amazon

## Robots Kiva/Amazon Robotics

- +750 000 robots déployés
- Réduction du temps de préparation de 50%
- Optimisation de l'espace d'entrepôt
- Collaboration humain-robot

## Technologies utilisées

- Navigation autonome
- Vision par ordinateur
- Coordination multi-robots
- IA pour optimisation de flux



# Cas d'usage : Boston Dynamics Spot

## Applications

- Inspection industrielle (pétrole, gaz)
- Surveillance de sites
- Cartographie 3D
- Intervention en zone dangereuse

## Capacités

- Mobilité sur terrain accidenté
- Navigation autonome
- Équipement modulaire (caméras, capteurs)
- Opération à distance



Figure: \*

Boston Dynamics Spot

# Cas d'usage : Chirurgie robotique

## Système da Vinci

- +7 000 systèmes installés
- +10 millions d'interventions
- Chirurgie mini-invasive

## Avantages

- Précision submillimétrique
- Vision 3D HD
- Réduction des tremblements
- Récupération plus rapide
- Moins de complications

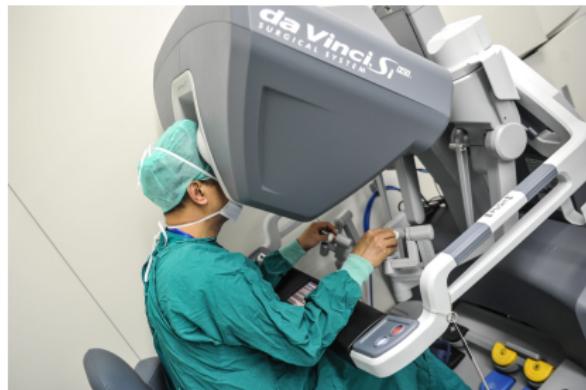


Figure: \*

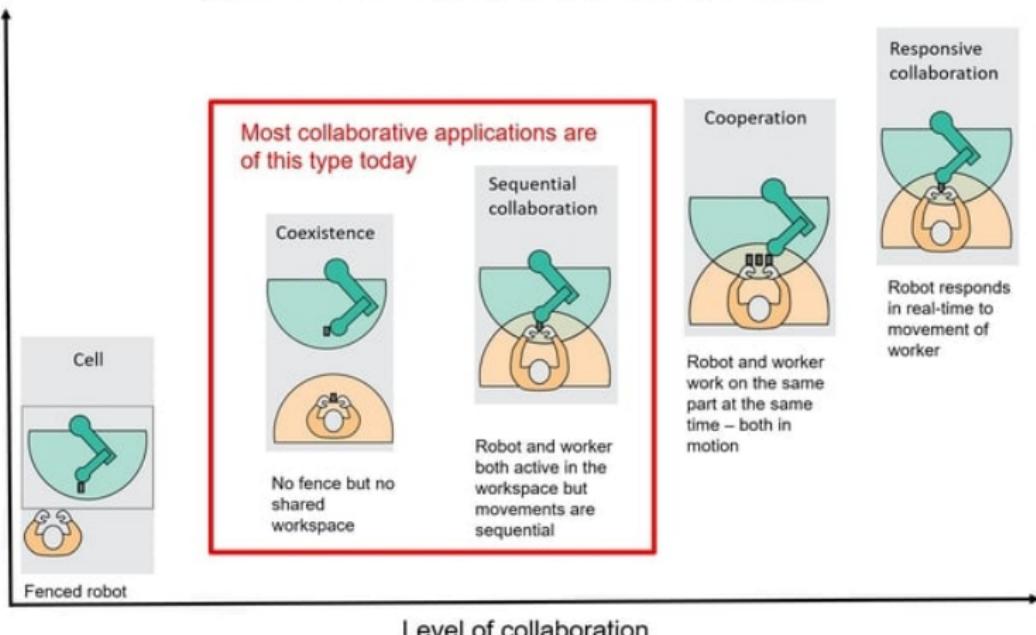
Robot da Vinci

# Opportunités et perspectives

## La robotique collaborative

### Types of collaboration with industrial robots

Requirement  
for intrinsic  
safety  
features vs.  
external  
sensors



Green area: robot's workspace; yellow area: worker's workspace

Source: IFR (classification), adapted and modified from Bauer et al. (2016).

# Robotique et VLA (Vision-Language-Action)

La nouvelle génération de robots intelligents

## Concept VLA

- Vision + Language + Action
- Instructions en langage naturel
- Apprentissage par imitation

## Exemples de robots

- **1X Neo:** Robot domestique
- **Google RT-2 + Gemini:** Raisonnement avancé
- **Figure AI:** Humanoïde avec OpenAI
- **Tesla Optimus:** Production de masse



# Résumé

- Différencier les acteurs de la robotique: de la conception à l'intégration en passant par la commande (Vincent à une slide sur les problèmes de la robotique)
- zoom sur ce qui va nous intéresser la modélisation géométrique et cinématique, programmation et les différentes méthodes d'utilisation de la robotique.

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne
- Perception et estimation de l'état - usages de capteurs internes et externes

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne
- Perception et estimation de l'état - usages de capteurs internes et externes
- Planification de trajectoire - hors ligne et en ligne

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne
- Perception et estimation de l'état - usages de capteurs internes et externes
- Planification de trajectoire - hors ligne et en ligne
- Commande - compromis robustesse/performance/sécurité

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne
- Perception et estimation de l'état - usages de capteurs internes et externes
- Planification de trajectoire - hors ligne et en ligne
- Commande - compromis robustesse/performance/sécurité
- **Interaction humain-robot - tâche partagée, apprentissage par démonstration,...**

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne
- Perception et estimation de l'état - usages de capteurs internes et externes
- Planification de trajectoire - hors ligne et en ligne
- Commande - compromis robustesse/performance/sécurité
- Interaction humain-robot - tâche partagée, apprentissage par démonstration,...
- **Intégration dans un environnement industriel**

# Problématiques de la robotique

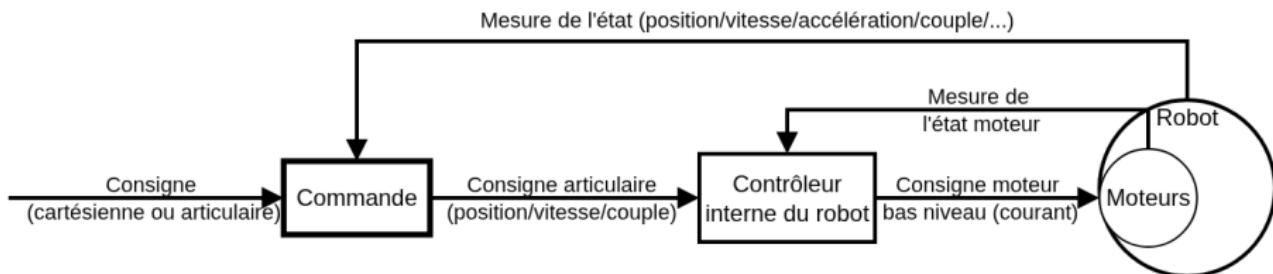
- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne
- Perception et estimation de l'état - usages de capteurs internes et externes
- Planification de trajectoire - hors ligne et en ligne
- Commande - compromis robustesse/performance/sécurité
- Interaction humain-robot - tâche partagée, apprentissage par démonstration,...
- Intégration dans un environnement industriel
- **Process métier, outillage**

# Problématiques de la robotique

- Conception (mécanique et mécatronique) - typologie, morphologie, DoFs, dimensionnement
- Identification et calibration - hors ligne et en ligne
- Perception et estimation de l'état - usages de capteurs internes et externes
- Planification de trajectoire - hors ligne et en ligne
- Commande - compromis robustesse/performance/sécurité
- Interaction humain-robot - tâche partagée, apprentissage par démonstration,...
- Intégration dans un environnement industriel
- Process métier, outillage
- ...

# Zoom sur la commande

## Boucle de commande d'un robot



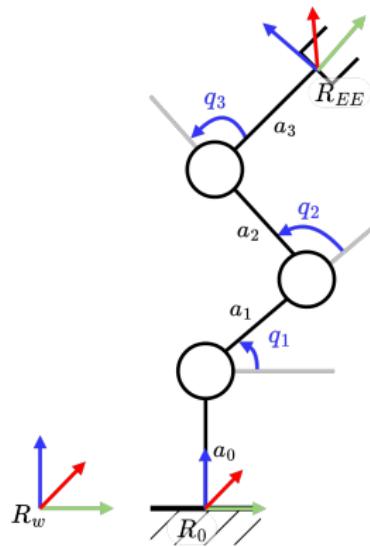
- Dépendance au robot : pas accès au même type de commande et de mesures.
- Dépendance à la tâche : pas les mêmes besoins en terme de contrôle.

# Zoom sur la commande

Passage du monde cartésien au monde articulaire

## Modèle géométrique directe

Permet de passer d'une position articulaire ( $\mathbb{R}^n$ , avec  $n$  le nombre d'articulations) à une position cartésienne ( $\mathbb{R}^6$ ).



Espace articulaire :  $(q_1, q_2, q_3) \in \mathbb{R}^3$

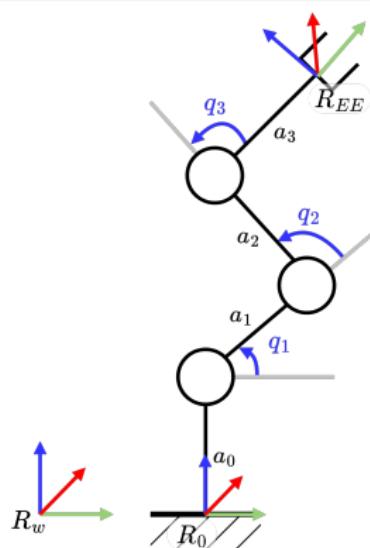
Espace cartésien :  
$$\left\{ \begin{pmatrix} x_{EE} \\ y_{EE} \\ \theta_{EE} \end{pmatrix}_w R_{EE \in w} \right\}$$

# Zoom sur la commande

Passage du monde articulaire au monde cartésien

## Modèle géométrique indirecte

Permet de passer d'une position cartésienne ( $\mathbb{R}^6$ ) à une position articulaire ( $\mathbb{R}^n$ , avec  $n$  le nombre d'articulations).



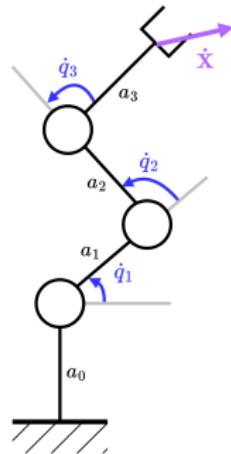
Il est nécessaire de bien définir nos repères pour définir la position cartésienne. Il existe plusieurs conventions (nous verrons Denavit-Hartenberg en TD).

Plus utile pour la commande, mais plus compliqué à calculer.

# Zoom sur la commande

## Modèle cinématique

Fait le lien entre vitesse articulaire et vitesse cartésienne.



$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

La matrice  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  est appelé la jacobienne du robot.

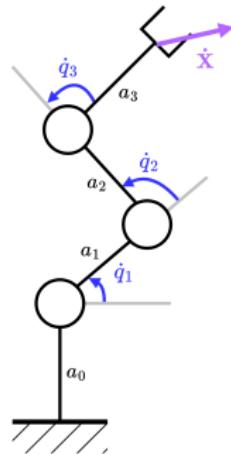
$\mathbf{J}$  inversible  $\Rightarrow$  on peut faire du contrôle en vitesse.

$\mathbf{J}$  non inversible  $\Rightarrow$  on est en présence de singularités.

# Zoom sur la commande

## Modèle cinématique

Fait le lien entre vitesse articulaire et vitesse cartésienne.



$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

La matrice  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  est appelé la jacobienne du robot.

$\mathbf{J}$  inversible  $\Rightarrow$  on peut faire du contrôle en vitesse.

$\mathbf{J}$  non inversible  $\Rightarrow$  on est en présence de singularités.

## Modèle dynamique

Passer de forces/torques cartésiennes à des couples articulaires.

# Zoom sur la planification

## Génération de trajectoire

### Cas 1 : Planification automatique

Peut être fait hors ligne ou en ligne.

- ① Cible cartésienne
- ② Algorithme (RRT, A\*, etc.)
- ③ Conversion articulaire

### Cas 2 : Programmation manuelle

Hors ligne uniquement, plus courant en industrie

- ① Enregistrement de configurations/trajectoires articulaires
- ② Rejou de la trajectoire

