

# Perception Avancée et Robotique Mobile

UPJV, Département EEA

Master 2 3EA, EC31

Parcours RoVA

**Fabio MORBIDI**

Laboratoire MIS

Équipe Perception Robotique

E-mail: [fabio.morbidi@u-picardie.fr](mailto:fabio.morbidi@u-picardie.fr)



Electronique

Energie Electrique

Automatique

CM, TD - Mardi 9h00-12h00, Jeudi 13h30-16h30, salle CURI 305

TP: Jeudi 13h30-16h30, salle TP204

AU 2021-2022



# Modules du parcours RoVA (M1 et M2)

## Bras Robotiques

Robotique Industrielle (M1)

Commande des Robots (M2)

Asservissement Visuel (M2)

Vision Non Conventiennelle (M2)

Vision Avancée et Réalité Augmentée (M2)

Projet transversal: L'Usine du Futur (M2)

## Robots Mobiles

Perception Avancée et Robotique Mobile (M2)

Localisation et Navigation de Robots (M2)

Systèmes Robotiques Hétérogènes et Coopératifs (M2)

# Plan du cours

## **Chapitre 1: Perception pour la robotique**

1. Introduction
2. Classification des capteurs
3. Typologies de capteur

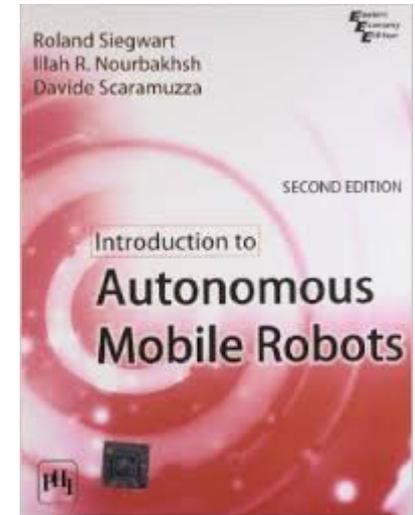
## **Chapitre 2: Robotique mobile**

1. Petit historique
2. Systèmes, locomotions, applications
3. Marché mondial et besoins technologiques
4. Effecteurs et actionneurs
5. Robots mobiles à jambes, à roues et aériens

# Bibliographie

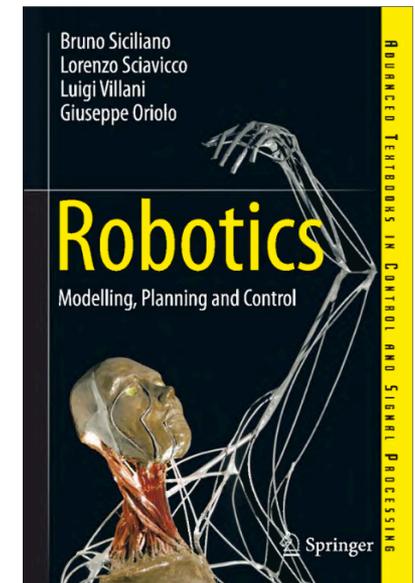
- ***Introduction to Autonomous Mobile Robots***

R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza,  
MIT press, 2<sup>e</sup> édition, 2011  
[Perc. Avan., Ch. 4; Rob. Mob., Ch. 1-3]



- ***Robotics: Modelling, Planning and Control***

B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo,  
Springer, 1<sup>re</sup> édition, 2009  
[Perc. Avan., Ch. 5; Rob. Mob., Ch. 11]



# Bibliographie

- *Diapos du cours*

[http://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Teaching\\_PARM21-22.html](http://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Teaching_PARM21-22.html)

## Perception Avancée et Robotique Mobile

UPJV, Département EEA

Master 2 3EA, EC31

Parcours RoVA

**Fabio MORBIDI**

Laboratoire MIS

Équipe Perception Robotique

E-mail: [fabio.morbidi@u-picardie.fr](mailto:fabio.morbidi@u-picardie.fr)



Electronique

Energie Electrique

Automatique

CM, TD - Mardi 9h00-12h00, Jeudi 13h30-16h30, salle CURI 305

TP: Jeudi 13h30-16h30, salle TP204

AU 2021-2022



# Connaissances préalables ...

On part de l'hypothèse que vous avez une (bonne) connaissance de:

- *Algèbre linéaire* (manipulation de vecteurs et de matrices)
- *Calcul différentiel* (gradient, matrice jacobienne, éq. différentielles)
- *Notions de base de robotique* (cours M1 de Robotique Industrielle)
- *Programmation de base* (envir. Matlab [TD], langage C++ [TP, 3h])

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



AmigoBot

# **Introduction et motivation**

# DARPA Robotics Challenge (DRC) 2015



**TEAM TARTAN RESCUE**  
 Robot: CHIMP  
 Country: USA  
 DOB: 2012  
 Height: 150 cm  
 Weight: 201 kg



**TEAM AERO**  
 Robot: Aero DRC  
 Country: Japan  
 DOB: 2015  
 Height: 160 cm  
 Weight: 50 kg



**TEAM AIST-NEDO**  
 Robot: HRP-2+  
 Country: Japan  
 DOB: 2002  
 Height: 170 cm  
 Weight: 65 kg



**TEAM DRC-HUBO@UNLV**  
 Robot: Metal Rebel  
 Country: USA  
 DOB: 2013  
 Height: 175 cm  
 Weight: 80 kg



**TEAM GRIT**  
 Robot: Cog-Burn  
 Country: USA  
 DOB: 2013  
 Height: 122 cm  
 Weight: 27 kg



**TEAM HECTOR**  
 Robot: Johnny 05  
 Country: Germany  
 DOB: 2014  
 Height: 147 cm  
 Weight: 55 kg



**TEAM HKU**  
 Robot: Atlas  
 Country: Hong Kong & USA  
 DOB: 2015  
 Height: 187 cm  
 Weight: 175 kg



**TEAM HRP2-TOKYO**  
 Robot: HRP-2  
 Country: Japan  
 DOB: 2003  
 Height: 154 cm  
 Weight: 60 kg



**TEAM IHMC ROBOTICS**  
 Robot: Running Man (Atlas)  
 Country: USA  
 DOB: 2015  
 Height: 190 cm  
 Weight: 175 kg



**TEAM INTELLIGENT PIONEER**  
 Robot: Xing Tian  
 Country: China  
 DOB: 2014  
 Height: 160 cm  
 Weight: 70 kg  
 (withdrew from DRC Finals)



**TEAM ROBOSIMIAN**  
 Robot: RoboSimian  
 Country: USA  
 DOB: 2012  
 Height: 70 cm  
 Weight: 125 kg



**TEAM ROBOTIS**  
 Robot: THORMANG  
 Country: South Korea  
 DOB: 2013  
 Height: 160 cm  
 Weight: 60 kg



**TEAM SNU**  
 Robot: THORMANG  
 Country: South Korea  
 DOB: 2014  
 Height: 140 cm  
 Weight: 60 kg



**TEAM THOR**  
 Robot: THOR-RD  
 Country: USA  
 DOB: 2014  
 Height: 150 cm  
 Weight: 54 kg



**TEAM TRAC LABS**  
 Robot: Hercules (Atlas)  
 Country: USA  
 DOB: 2013  
 Height: 190 cm  
 Weight: 180 kg



**TEAM KAIST**  
 Robot: DRC-HUBO  
 Country: South Korea  
 DOB: 2014  
 Height: 180 cm  
 Weight: 80 kg



**TEAM MIT**  
 Robot: Helios (Atlas)  
 Country: USA  
 DOB: 2013  
 Height: 195 cm  
 Weight: 182 kg



**TEAM NEDO-HYDRA**  
 Robot: Hydra  
 Country: Japan  
 DOB: 2015  
 Height: 180 cm  
 Weight: 110 kg



**TEAM NEDO-JSK**  
 Robot: JAXON  
 Country: Japan  
 DOB: 2015  
 Height: 188 cm  
 Weight: 110 kg



**TEAM NIMBRO RESCUE**  
 Robot: Momaro  
 Country: Germany  
 DOB: 2015  
 Height: 150 cm  
 Weight: 60 kg



**TEAM TROOPER**  
 Robot: LEO (Atlas)  
 Country: USA  
 DOB: 2015  
 Height: 190 cm  
 Weight: 180 kg



**TEAM VALOR**  
 Robot: ESCHER  
 Country: USA  
 DOB: 2015  
 Height: 182 cm  
 Weight: 80 kg



**TEAM VIGIR**  
 Robot: Florian  
 Country: USA & Germany  
 DOB: 2013  
 Height: 193 cm  
 Weight: 160 kg



**TEAM WALK-MAN**  
 Robot: WALK-MAN  
 Country: Italy  
 DOB: 2015  
 Height: 185 cm  
 Weight: 120 kg



**TEAM WPI-CMU**  
 Robot: WARNER (Atlas)  
 Country: USA  
 DOB: 2013  
 Height: 190 cm  
 Weight: 180 kg

# DARPA Robotics Challenge (DRC) 2015

D.A.R.P.A. = U.S. **D**efense **A**dvanced **R**esearch **P**rojects **A**gency

- Grand Challenge (2004, 2005), Urban Challenge (2007), Robotics Challenge (2015), Subterranean Challenge (2018-2021)
- DRC: 5-6 juin 2015, Pomona CA, USA
- 25 robots finalistes (11 américains) - Robots *semiautonomes*
- **Objectif:** Intervention dans des situations d'urgence et en cas de catastrophes (suite à l'accident nucléaire de Fukushima en mars 2011)
  1. Drive a utility vehicle at the site
  2. Travel dismounted across rubble
  3. Remove debris blocking an entryway
  4. Open a door and enter a building
  5. Climb an industrial ladder and traverse an industrial walkway
  6. Use a tool to break through a concrete panel
  7. Locate and close a valve near a leaking pipe
  8. Connect a fire hose to a standpipe and turn on a valve

# DARPA Robotics Challenge (DRC) 2015

**Grand gagnant:** Team Kaist, Corée du Sud, robot **DRC-Hubo**

- 8 points, durée de la mission: 44 min 28 s
- Prix (1ère place): 2 M\$

[Vidéo : DRC-Hubo](#)

[Vidéo : autres robots](#)



# DARPA Subterranean Challenge (SubT) 2018-2021



[Vidéo DARPA SubT](#)

- 11 équipes: USA, Canada, Suisse, Corée du Sud, Australie, Rép. Tchèque, etc.
- **Robots:** 20 drones, 64 robots terrestres, 1 dirigeable (“duckiefloat”)
- **Objectif:** faire la cartographie à distance, et détecter et géoréférencer le plus grand nombre possible d’*artefacts* (survivants, valves, pompes électriques, fuites de gaz, etc.) dans un environnement souterrain
- **Défis:** Perception/communication dans un environnement obscur et confiné
- **Solution:** Perception multi-modale: vision, laser, thermique, acoustique, radio-fréquence, olfactive (pour la détection de gaz)

# DARPA Subterranean Challenge (SubT) 2018-2021



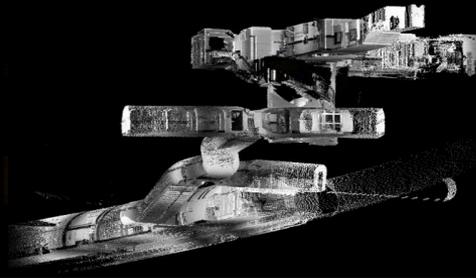
1 Tunnel Systems



2 Urban Underground



3 Cave Networks



Trois sous-domaines (épreuves):

1. **Tunnel circuit** (août 2019: mine désaffectée, Pittsburgh, PA)
2. **Urban circuit** (février 2020), cf. les tunnels du métro de Paris
3. **Cave circuit** (novembre 2020 – virtuel à cause du Covid19)

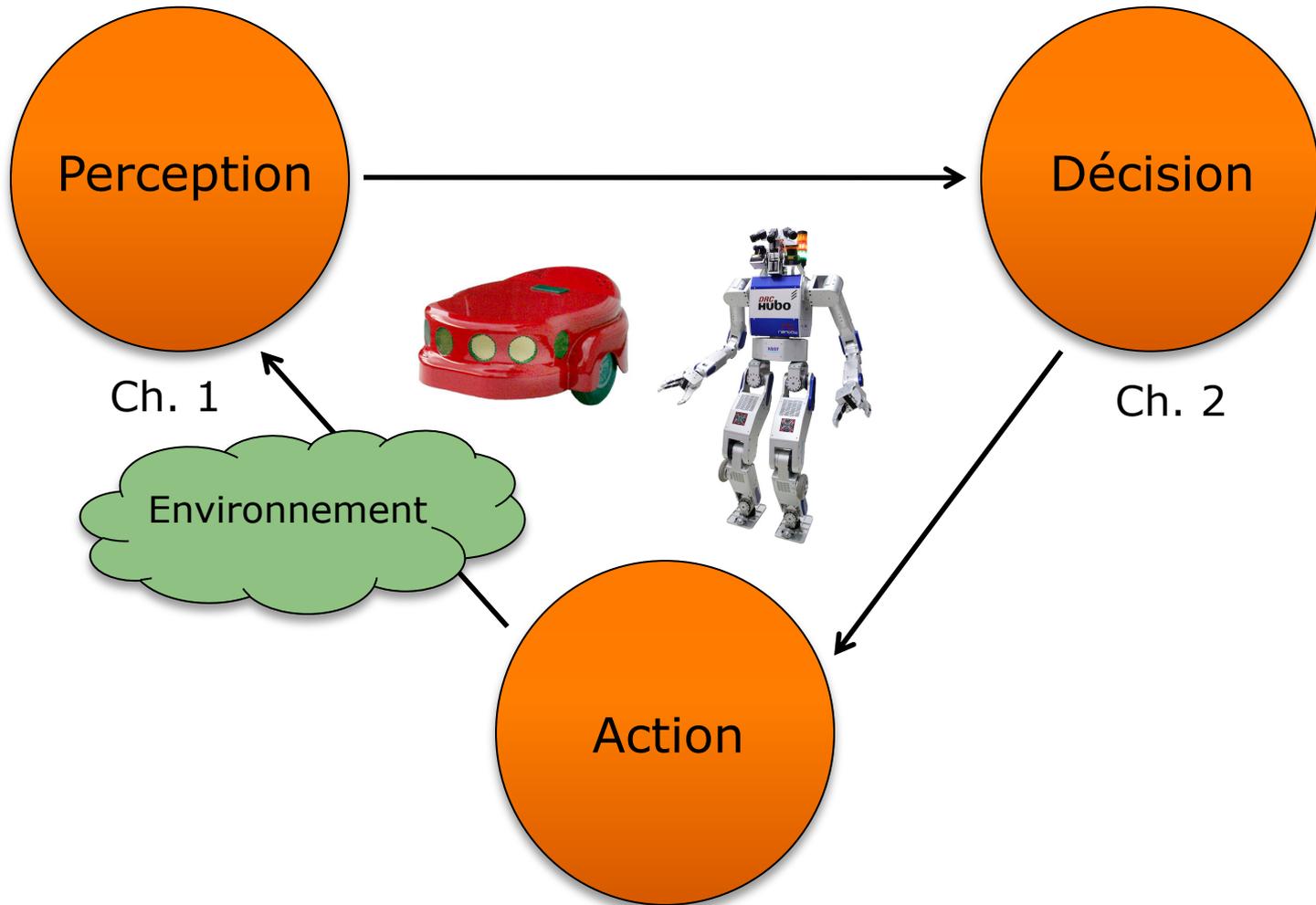
Épreuve finale dans les trois sous-domaines: 21-24 septembre 2021

# DARPA Subterranean Challenge (SubT) 2018-2021

Classement après la 1ère épreuve:

Score	Équipe	Sponsor
25	Explorer	DARPA
11	CoSTAR (Collaborative SubTterranean Autonomous Resilient Robots)	DARPA
10	CTU-CRAS	Autofinancé
9	MARBLE (Multi-agent Autonomy with Radar-Based Localization for Exploration)	DARPA
7	CSIRO Data 61	DARPA
5	CERBERUS (CollaborativE walking & flying RoBots for autonomous ExploRation in Underground Settings)	DARPA
2	NCTU (National Chiao Tung University)	Autofinancé
2	Robotika	Autofinancé
1	CRETISE (Collaborative Robot Exploration and Teaming In Subterranean Environments)	DARPA
1	PLUTO (Pennsylvania Laboratory for Underground Tunnel Operations)	DARPA
0	Coordinated Robotics	Autofinancé

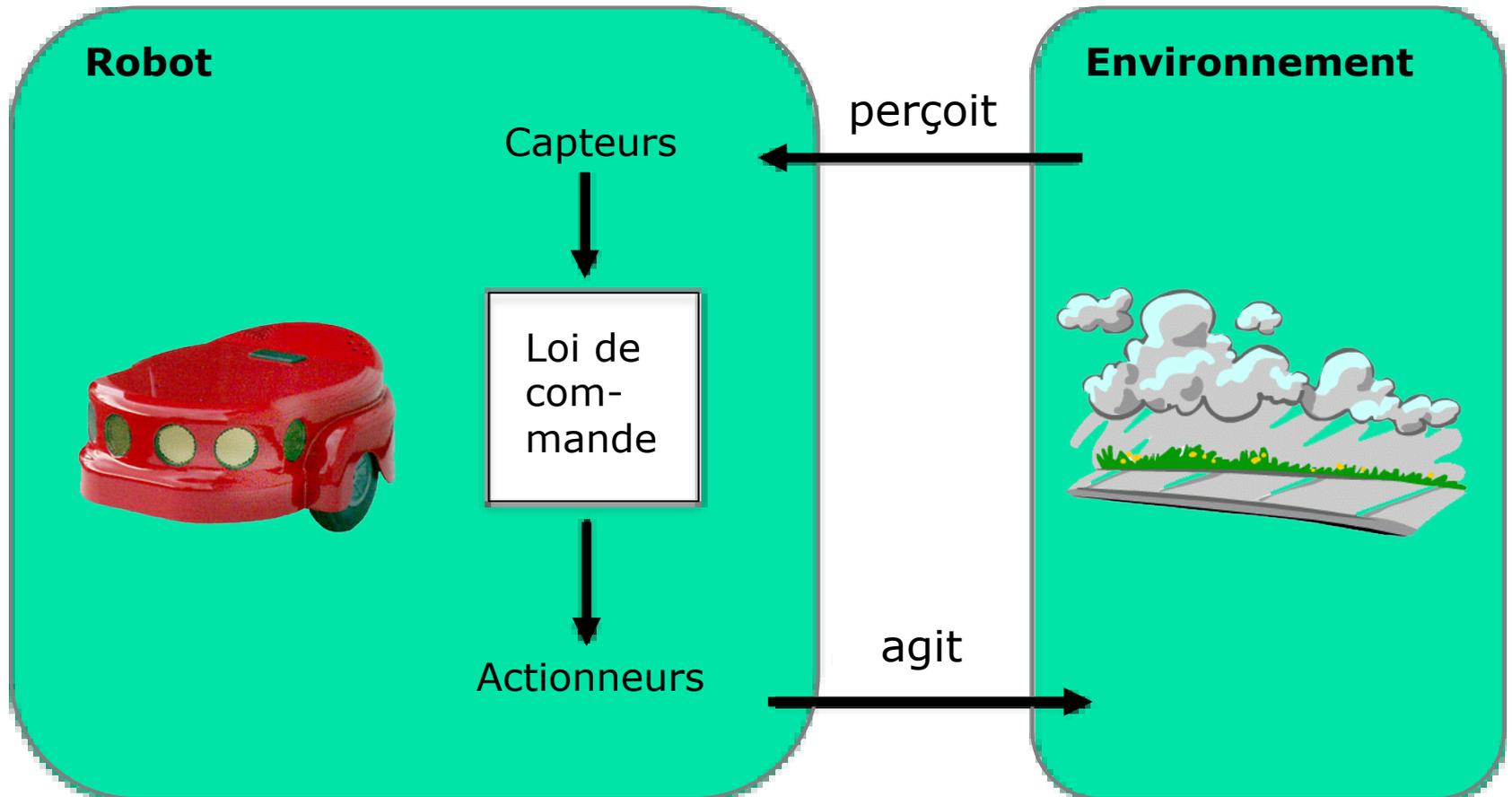
# Vue d'ensemble



Paradigme "See-Think-Act"

Ch. 2

# Au niveau du robot ...



# Ch. 1: Perception pour la robotique

- Introduction

**Partie 1**

- Classification des capteurs

**Partie 2**

- Typologies de capteur

**Partie 3**

## 1. Introduction

**Perception:** « Événement cognitif dans lequel un stimulus ou un objet, présent dans l'environnement immédiat d'un individu, lui est représenté dans son activité psychologique interne, en principe de façon consciente » (Dictionnaire Larousse)

## 1. Introduction

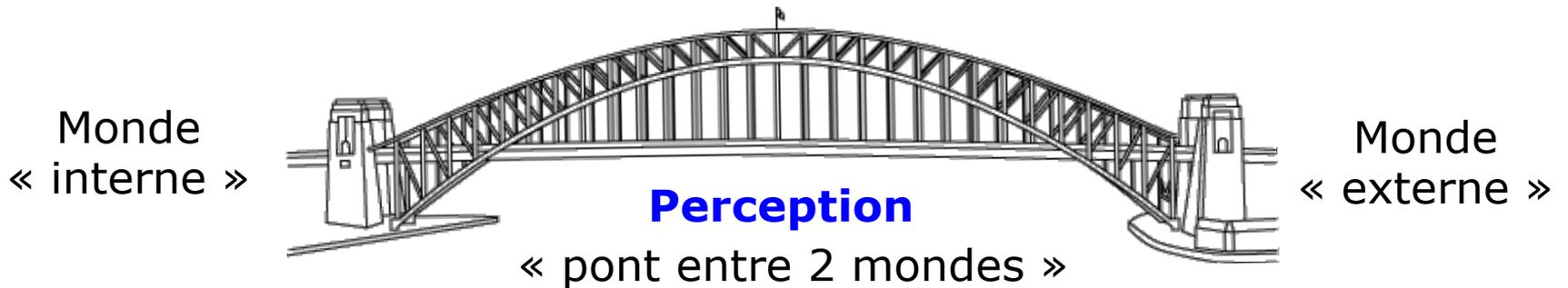
**Perception:** « Événement cognitif dans lequel un stimulus ou un objet, présent dans l'environnement immédiat d'un individu, lui est représenté dans son activité psychologique interne, en principe de façon consciente » (Dictionnaire Larousse)

**Perception:** « La capacité de voir, écouter, ou prendre conscience de quelque chose à travers les sens » (Oxford dictionary)

## 1. Introduction

**Perception:** « Événement cognitif dans lequel un stimulus ou un objet, présent dans l'environnement immédiat d'un individu, lui est représenté dans son activité psychologique interne, en principe de façon consciente » (Dictionnaire Larousse)

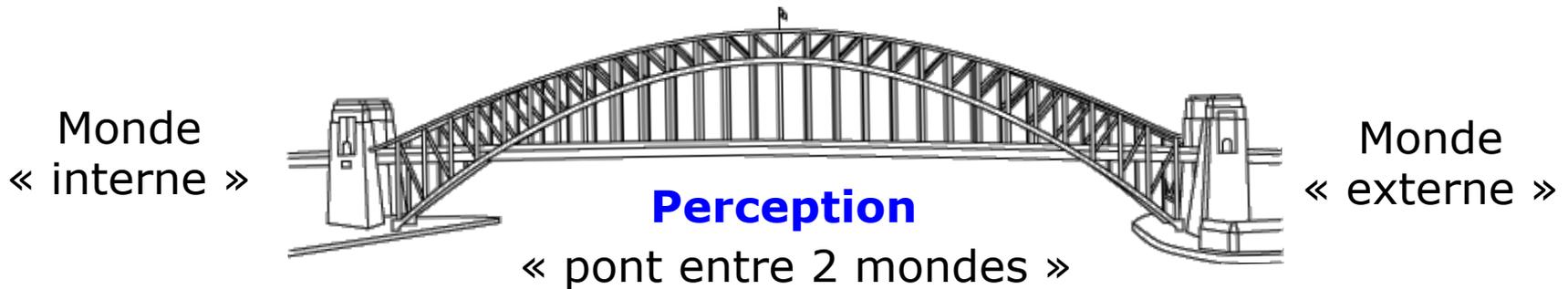
**Perception:** « La capacité de voir, écouter, ou prendre conscience de quelque chose à travers les sens » (Oxford dictionary)



## 1. Introduction

**Perception:** « Événement cognitif dans lequel un stimulus ou un objet, présent dans l'environnement immédiat d'un individu, lui est représenté dans son activité psychologique interne, en principe de façon consciente » (Dictionnaire Larousse)

**Perception:** « La capacité de voir, écouter, ou prendre conscience de quelque chose à travers les sens » (Oxford dictionary)



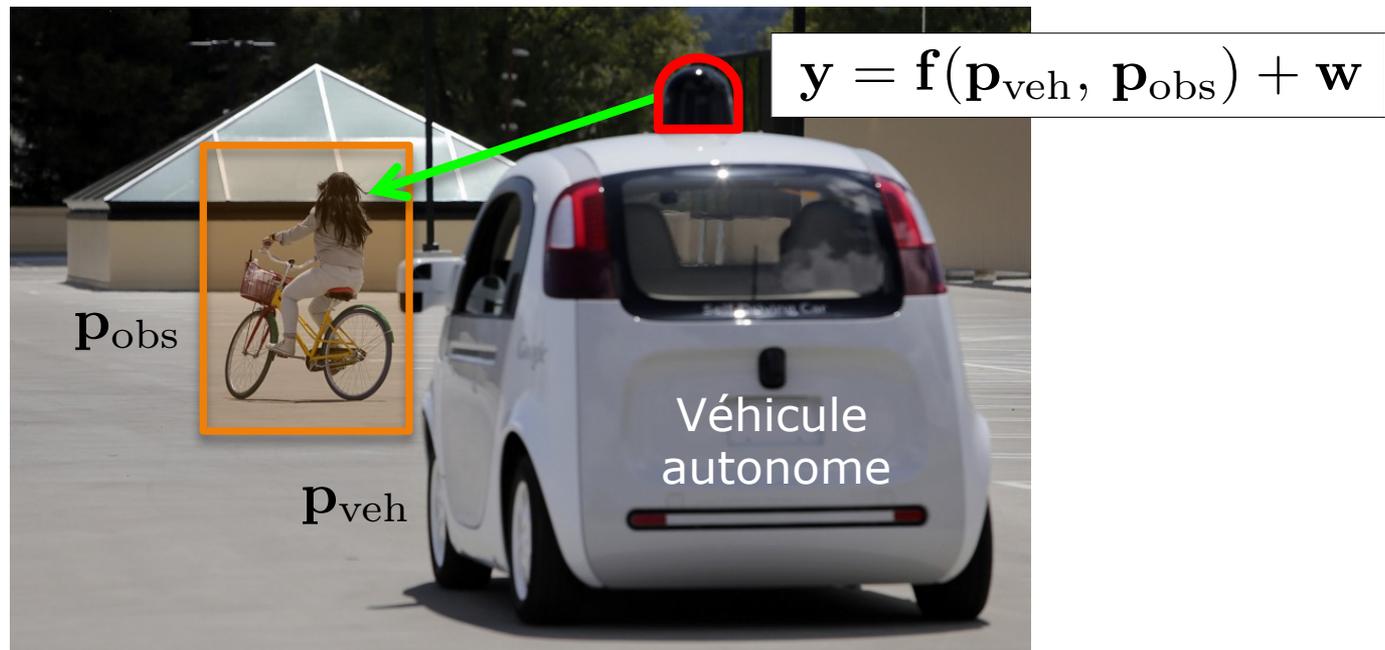
### Etymologie

Du Latin *perceptio(n-)* à partir du verbe *percipere* 'saisir' ou 'comprendre'

# Perception et compréhension

**Compréhension** = données brutes + modèles (probab.) + contexte

Les systèmes intelligents interprètent les données brutes en fonction de modèles (probabilistes) et utilisant des informations contextuelles qui donnent un sens aux données



# Perception: une tâche difficile !

« En robotique les problèmes *faciles* sont difficiles et les problèmes *difficiles* sont faciles »

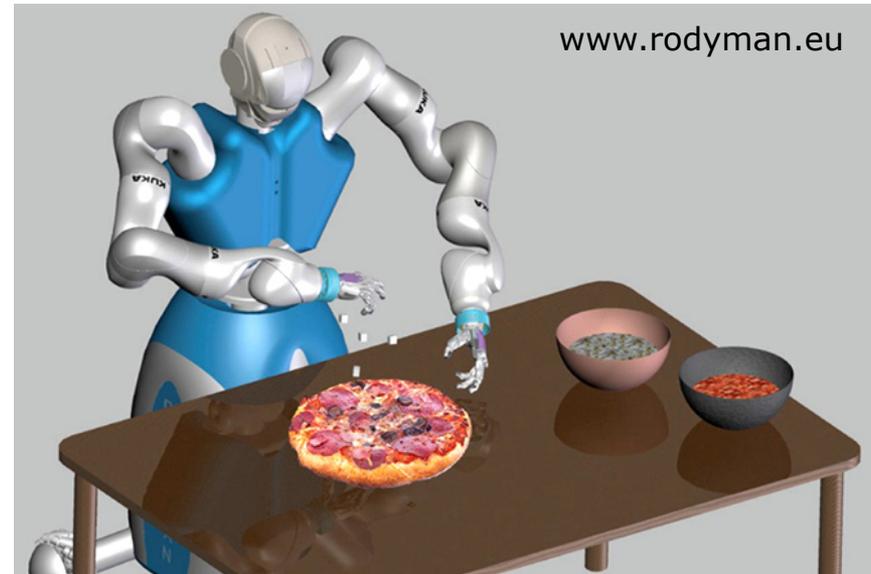
S. Pinker, « The Language Instinct », Harper Perennial Modern Classics, 1994

Pick & place: FACILE !



Le robot *TP80 Fast Picker* de Stäubli peut saisir 200 objets/min (objets d'un poids inférieur à 1 Kg)

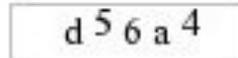
Créer une machine avec un certain « bon sens » : DIFFICILE !



RoDyMan: le robot *pizzaiolo* (laboratoire PRISMA, Univ. Federico II, Naples, Italie)

# Perception: une tâche difficile !

- **CAPTCHA**: « **C**ompletely **A**utomated **P**ublic **T**uring test to tell **C**omputers and **H**umans **A**part » (marque commerciale de l'Université Carnegie-Mellon)



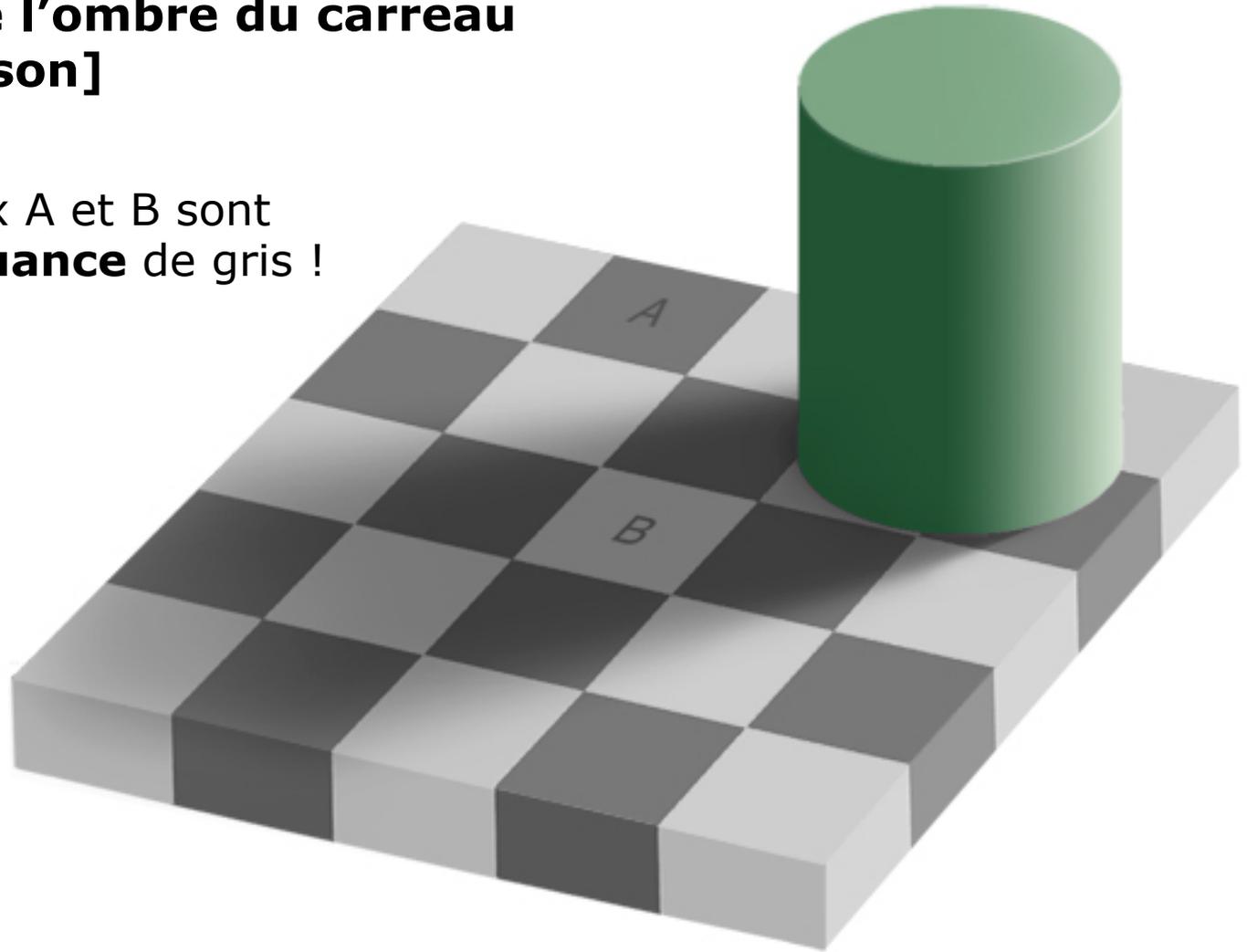
- La perception est une **construction statistique** effectuée d'après la signification antérieure des stimuli
- « Percevoir (une luminosité, une couleur, une surface concave ou convexe, une longueur) en fonction des *probabilités relatives* des sources du stimulus donne à l'observateur les plus grandes chances d'émettre des réponses comportementales adaptées au monde visuel ambigu dans lequel nous vivons »
- La **vision** est un **processus constructif**:
  - La perception du monde réel est une illusion construite par le cerveau (cf. les « lunettes de soleil » de I. Kant et le roman « Flatland » de E.A. Abbott)
- La **vision** résout des tâches spécifiques dans un **contexte précis**
  - Le comportement visuel est lié aux *besoins* et au *contexte*
- Le **système visuel humain** sert souvent de référence ...



Cependant, il est loin d'être un système *parfait*  
et il peut être facilement piégé

## Illusion de l'ombre du carreau [E.H. Adelson]

Les carreaux A et B sont  
la **même nuance** de gris !

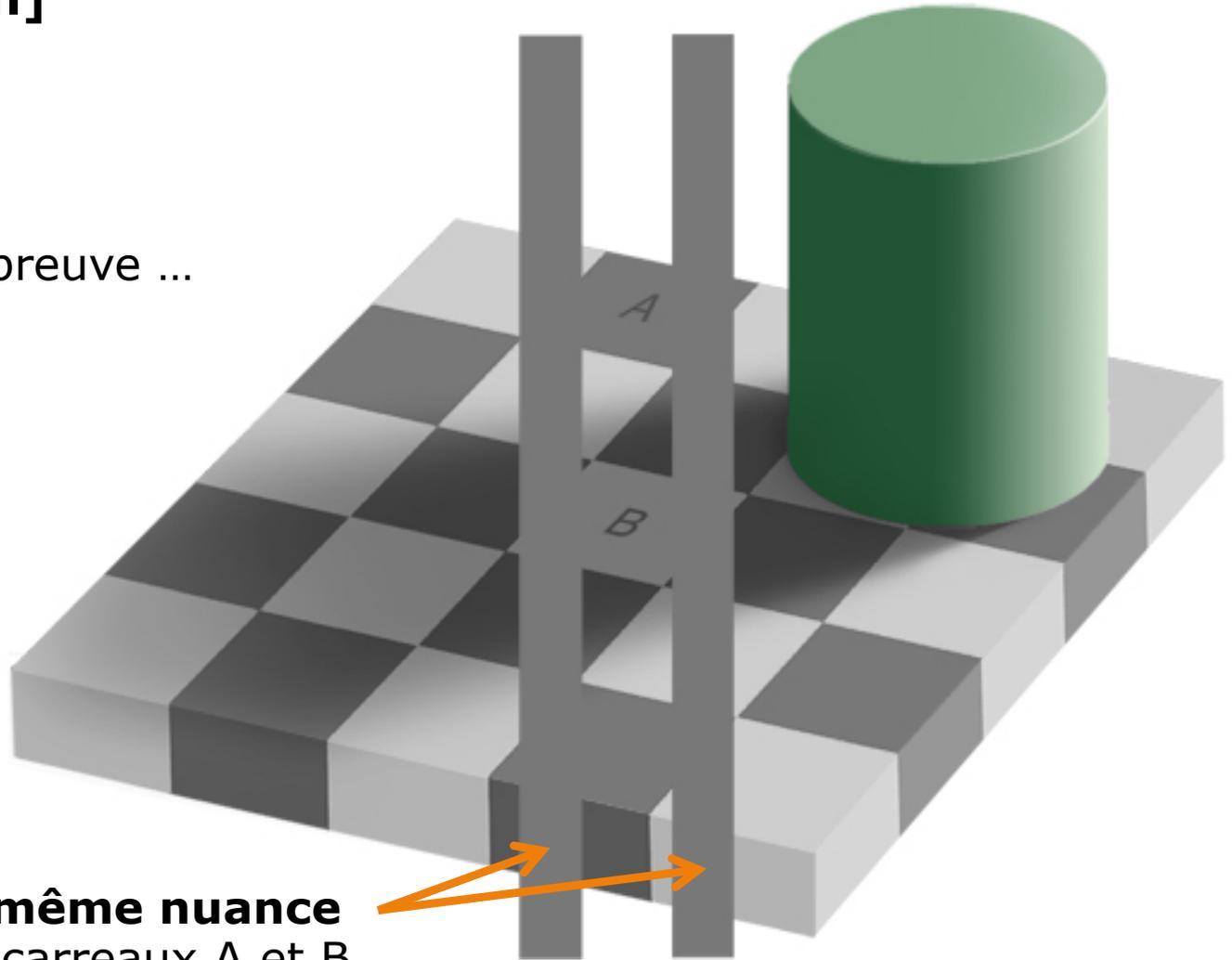


Perception: **processus inférentiel**

On compte ici sur la *luminosité* pour apercevoir la couleur des carreaux

## Illusion de l'ombre du carreau [E.H. Adelson]

Et voici la preuve ...



Barres avec la **même nuance**  
de gris que les carreaux A et B

## Illusion du contraste simultané [M.E. Chevreul]



Les petits carreaux au centre sont la **même nuance** de gris: cependant le carreau de gauche semble légèrement plus sombre

Autres illusions optiques (effet de contraste):

<http://persci.mit.edu/gallery/checkershadow>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_illusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_illusion)

## Les sens humains



La vue



L'ouïe



Le toucher



L'odorat



Le goût

## Les sens des robots

## Les sens humains



La vue



L'ouïe



Le toucher



L'odorat



Le goût

## Les sens des robots



Caméras (spectre visible, IR),  
lasers, lidars

## Les sens humains



La vue



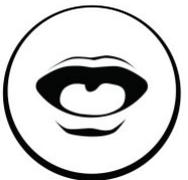
L'ouïe



Le toucher



L'odorat



Le goût

## Les sens des robots



Caméras (spectre visible, IR),  
lasers, lidars



Sonars, caméras ToF (Time  
of Flight), microphones



Accéléromètres } «Centrale  
gyroscopes } inertielle»  
ou IMU

## Les sens humains



La vue



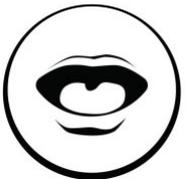
L'ouïe



Le toucher



L'odorat



Le goût

## Les sens des robots



Caméras (spectre visible, IR),  
lasers, lidars



Sonars, caméras ToF (Time  
of Flight), microphones



Accéléromètres } «Centrale  
gyroscopes } inertielle»  
ou IMU



Capteurs d'effort,  
interfaces haptiques

## Les sens humains



La vue



L'ouïe



Le toucher



L'odorat



Le goût

## Les sens des robots



Caméras (spectre visible, IR),  
lasers, lidars



Sonars, caméras ToF (Time  
of Flight), microphones



Accéléromètres } «Centrale  
gyroscopes } inertielle»  
ou IMU



Capteurs d'effort,  
interfaces haptiques



Nez électronique: detection  
de fuites de gaz, stupéfiants,  
nourriture avariée, maladies, ...

## Les sens humains



La vue



L'ouïe



Le toucher



L'odorat



Le goût

## Les sens des robots



Caméras (spectre visible, IR),  
lasers, lidars



Sonars, caméras ToF (Time  
of Flight), microphones



Accéléromètres } «Centrale  
gyroscopes } inertielle»  
ou IMU



Capteurs d'effort,  
interfaces haptiques



Nez électronique: detection  
de fuites de gaz, stupéfiants,  
nourriture avariée, maladies, ...



Robot sommelier .... ?!

# Robot Shakey (1966-1972) - Stanford Res. Institute



Espace de travail:  
à l'intérieur

Capteurs:

- Encodeurs (roues)
- Caméra
- Sonar
- Capteur de contact (bumper)

## Robot guide Rhino (1995-1998) - Université de Bonn



Fig. 1: RHINO gives a tour



Fig. 2: Interaction with people

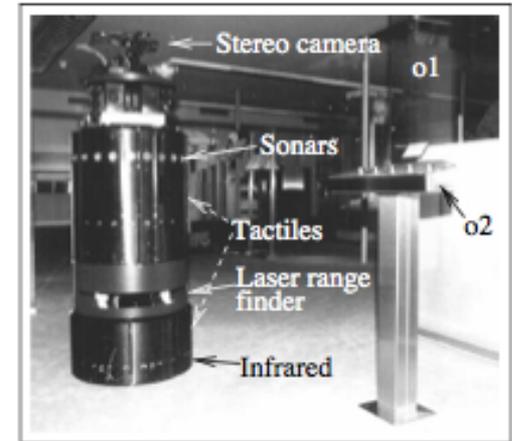


Fig. 3: The Robot and its sensors.

Espace de travail: à l'intérieur (un musée: environnement *non structuré et dynamique* à cause des visiteurs)

Capteurs:

- Encodeurs (roues)
- Caméra stéréo pan/tilt
- Anneau de sonars
- Capteurs IR et laser

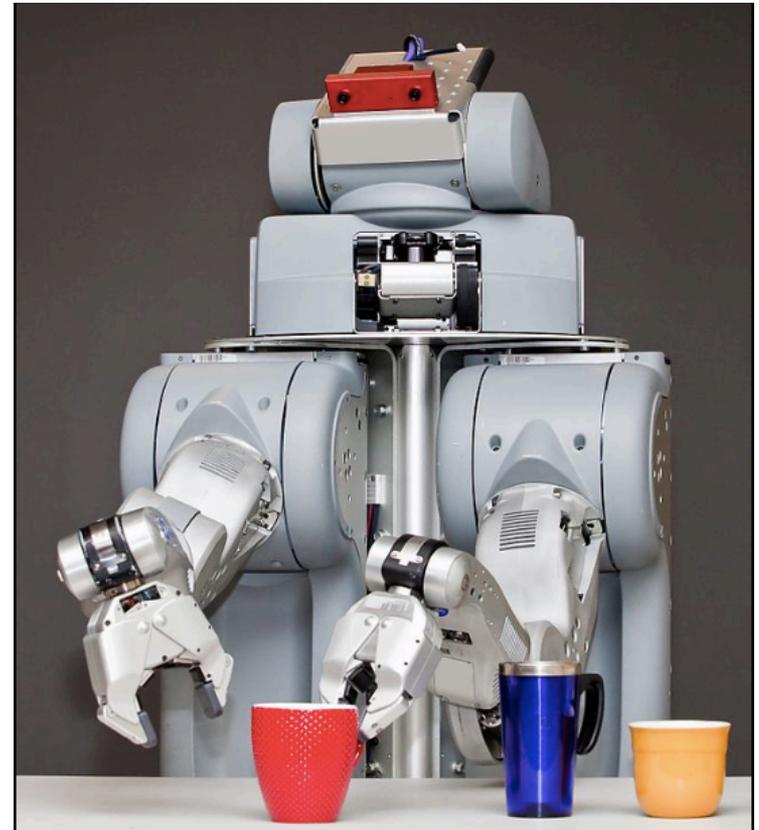
[Vidéo Rhino](#)

## PR2 de *Willow Garage* (2010)

Espace de travail:  
à l'intérieur et à l'extérieur  
(mais seulement sur route)

Capteurs:

- Encodeurs (roues)
- Capteurs de contact (bumper)
- Capteurs IR
- Télémètres lasers (2D, 3D)
- Centrale inertielle
- Caméra stéréo (active) pan/tilt
- Capteurs de pression et accéléromètres (dans les deux préhenseurs)



[Vidéo PR2](#)

# Atlas de *Boston Dynamics* (2016-2021)

Espace de travail:  
à l'intérieur et à l'extérieur

Actionnement:

- Quatre membres (28 DDL)  
à commande hydraulique
- Squelette en aluminium et titanium

Capteurs:

- Télémètre laser (LIDAR)
- Caméra stéréo
- Centrale inertielle



[www.bostondynamics.com/atlas](http://www.bostondynamics.com/atlas)

[Vidéo parkour](#)

# Ch. 1: Perception pour la robotique

- Introduction

**Partie 1**

- Classification des capteurs

**Partie 2**

- Typologies de capteur

**Partie 3**

## 2. Classification des capteurs

**Robot** = capteurs + actionneurs + processeur(s)

- Le succès d'un robot dépend du *choix* de ses capteurs (et de ses actionneurs): ils doivent être **appropriés** par rapport à la tâche à accomplir
- L'autonomie d'un robot dépend de sa *perception* de l'environnement

## Classification des capteurs selon deux axes

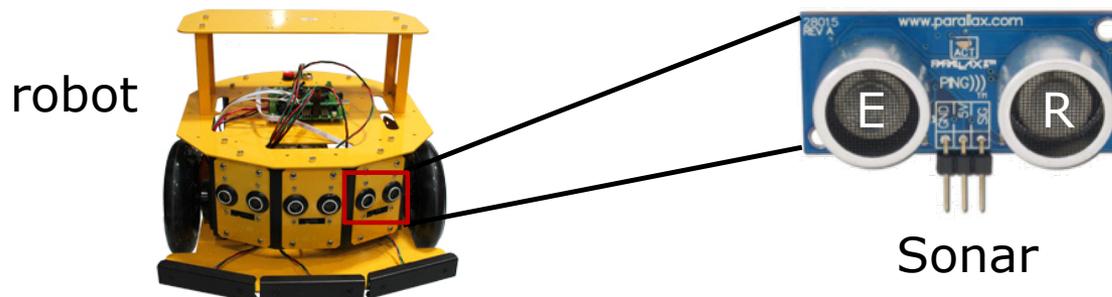
**Extéroceptifs**: ils fournissent mesures sur l'*environnement autour du robot* (ex. pour la détection d'obstacles, la construction de cartes)

**Proprioceptifs**: ils informent le robot sur son *propre état* (ex. vitesse d'un moteur, attitude, tension d'une batterie)

**Passifs**: des « vrais » observateurs de l'environnement.

Ils capturent les signaux qui sont émis par les autres sources de l'environnement (ex. caméra → lumière, thermomètre → température, microphone → ondes sonores)

**Actifs**: ils émettent de l'*énergie*: cette énergie est réfléchiée par l'environnement au capteur (élément émetteur-récepteur).  
Ex. sonar, télémètre laser, caméra RGB-D, radar



# Caractéristiques d'un capteur (1/4)

- *Champ de perception/vue* (ex. 53° horiz. pour une caméra)
- *Portée ou plage de mesure* [« range » en anglais]
  - Valeurs max et min d'un paramètre qui sont mesurables (ex. de 4 à 0.05 mètres pour un télémètre laser)
- *Plage dynamique* [« dynamic range » en anglais]
  - Rapport entre la valeur maximale d'entrée et la valeur mesurable minimale d'entrée
    - Exprimé en décibel « dB » (rapport de « puissances »)

$$L_P = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \text{ dB} \quad \begin{cases} P : \text{Puissance maximale} \\ P_0 : \text{Puissance mes. minimale} \end{cases}$$

Par ex. mesure de  
puissance de 1mW à 20W

$$L_P = 10 \log_{10} \left( \frac{20}{0.001} \right) \simeq 43 \text{ dB}$$

# Caractéristiques d'un capteur (2/4)

- *Résolution*

- La plus petite variation  $\Delta X$  de l'entrée qui peut être détectée en sortie (ex.  $0.1^\circ$  pour un encodeur optique)

- *Fréquence ou largeur de bande*

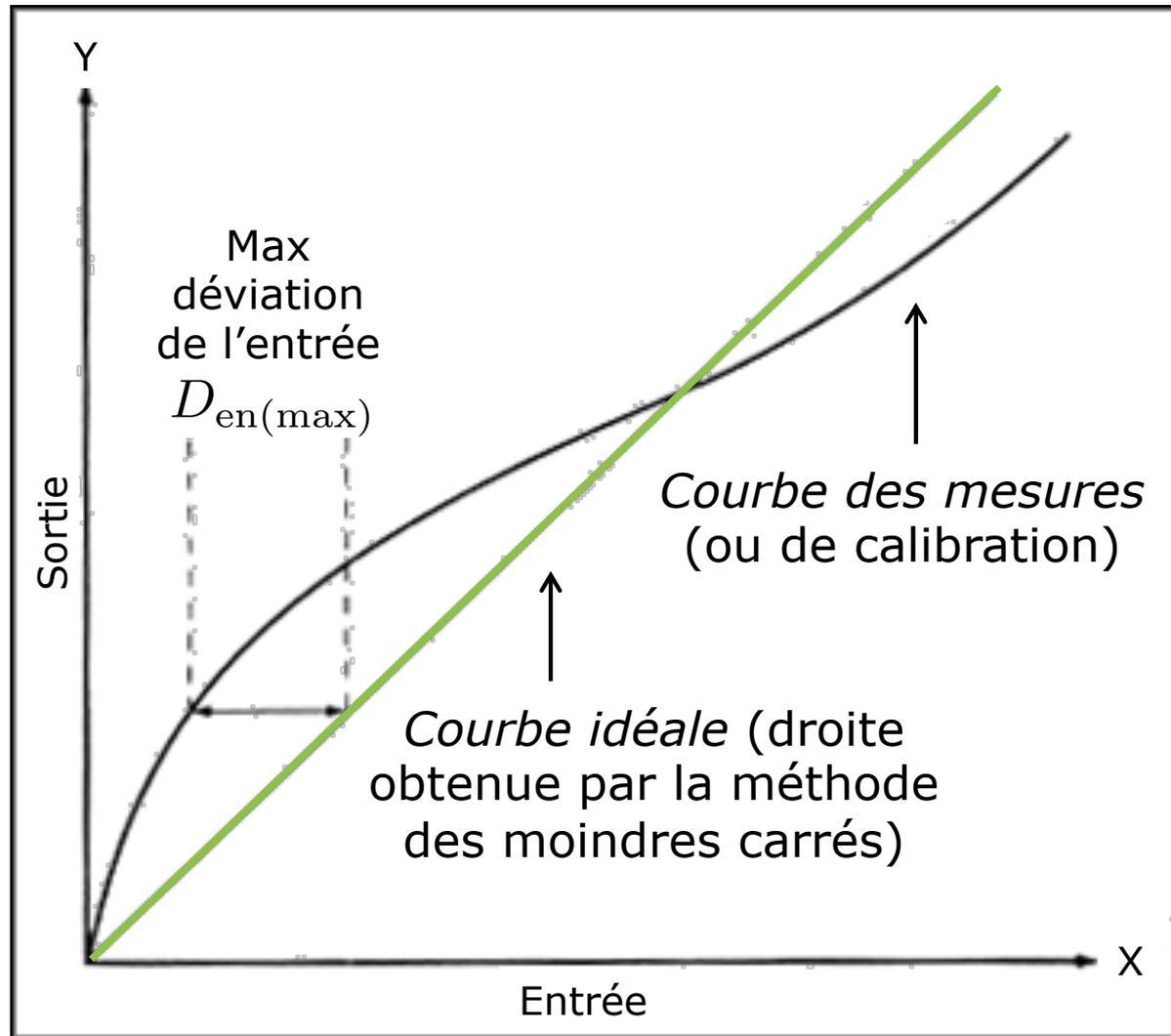
- Débit de mesures du capteur
  - Borne supérieure due à la fréquence d'échantillonnage (cf. le théorème de Shannon)
  - Délai (déphasage) possible

- *Linéarité*

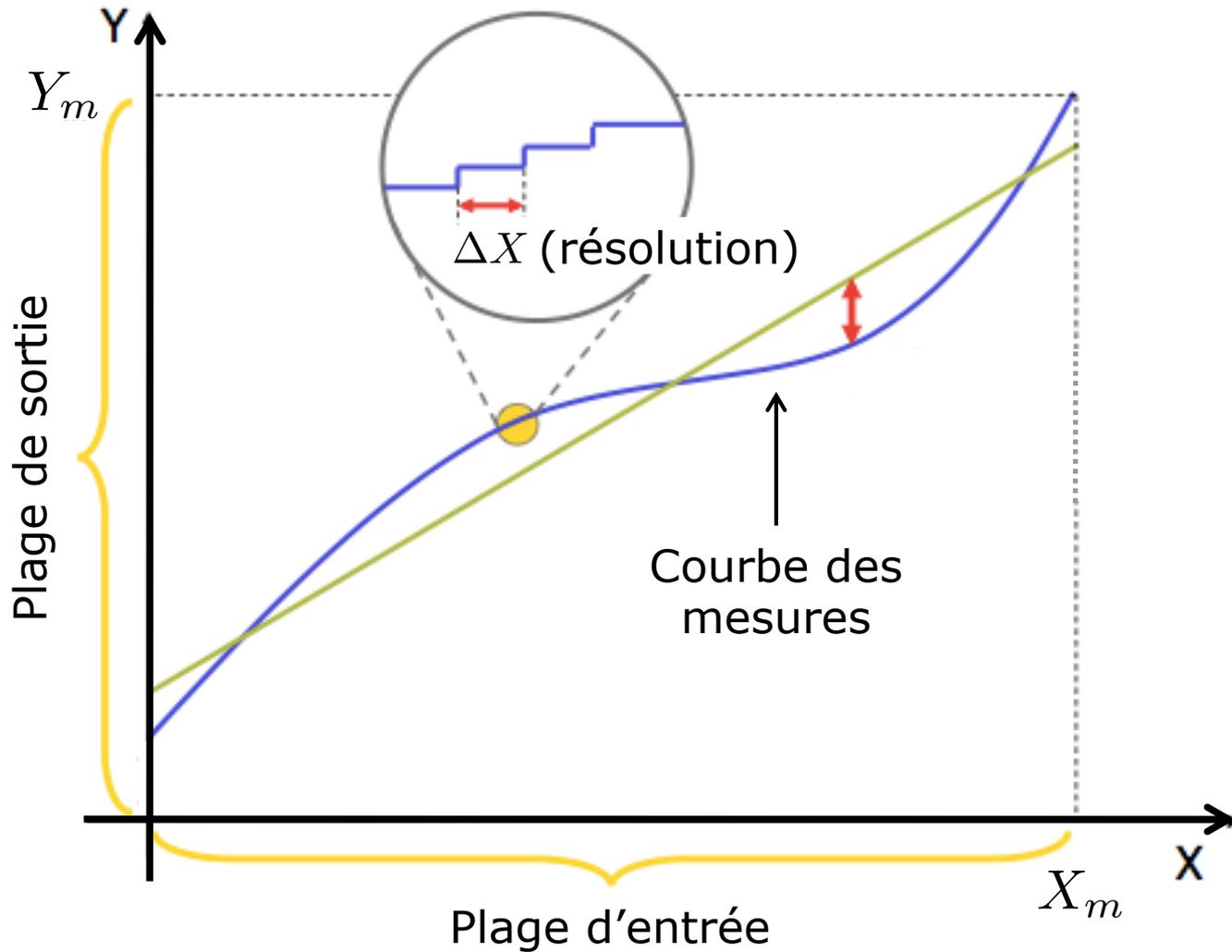
- La linéarité d'un capteur est une expression de la plage d'écart entre la courbe des mesures du capteur et la courbe idéale
- La linéarité est souvent exprimée en *pourcentage de non-linéarité*:

$$\text{Non-linéarité (\%)} = 100 \frac{D_{\text{en(max)}}}{X_m} \left\{ \begin{array}{l} D_{\text{en(max)}} : \text{max déviation} \\ \text{de l'entrée} \\ X_m : \text{valeur fond échelle} \\ \text{de l'entrée} \end{array} \right.$$

## Caractéristiques d'un capteur (2/4)



## Caractéristiques d'un capteur (2/4)

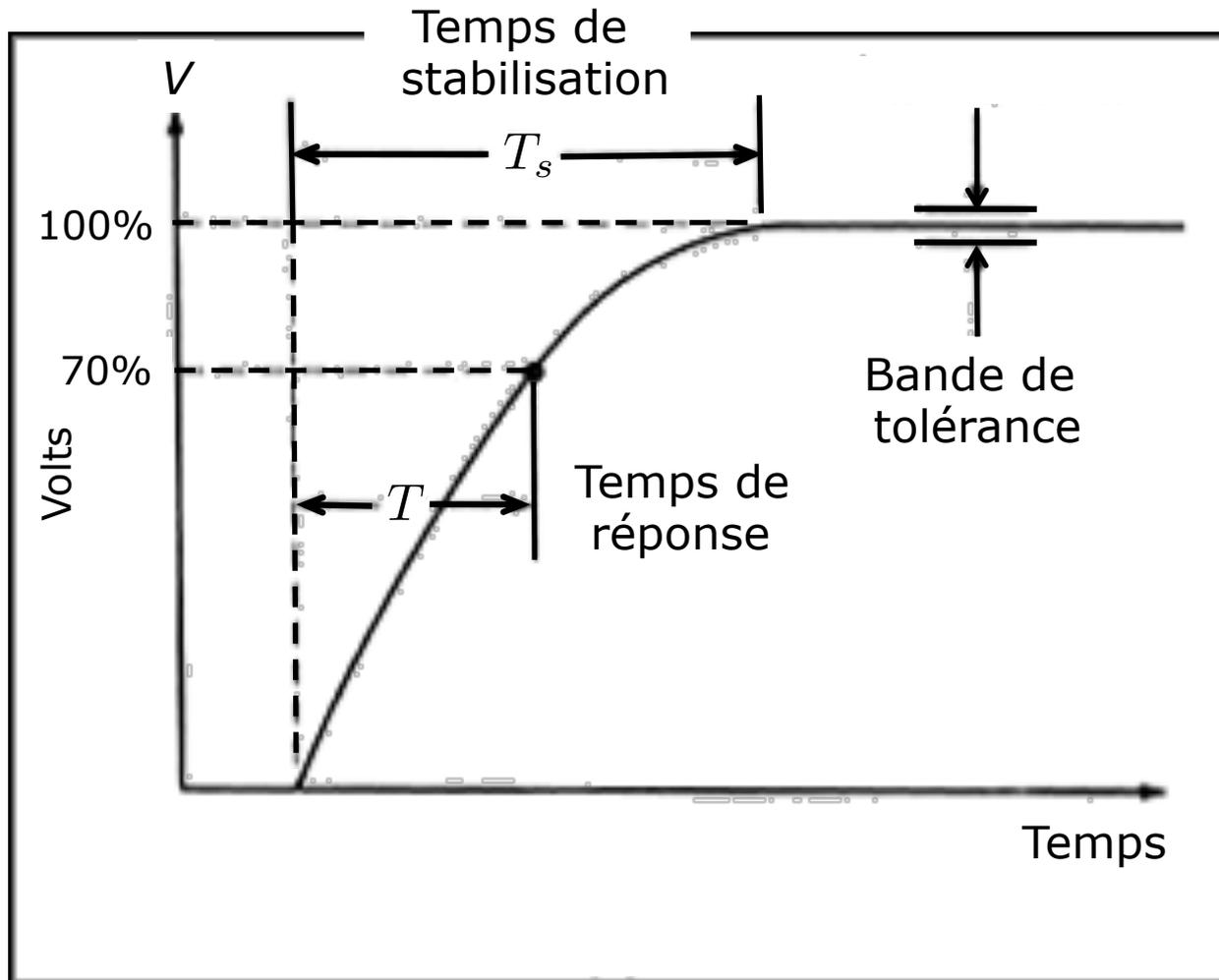


# Caractéristiques d'un capteur (3/4)

- *Linéarité dynamique*
  - La linéarité dynamique d'un capteur est une mesure de sa capacité à suivre des *changements rapides* du signal d'entrée
- *Temps de réponse*
  - La sortie d'un capteur ne change pas *immédiatement* lorsque le signal d'entrée varie
  - Au contraire, la sortie met un certain temps pour changer d'état, appelé le *temps de réponse* ( $T$  dans la figure de la diapo suivante)
  - Le temps de réponse peut être défini comme le temps nécessaire pour que la sortie du capteur passe de son état précédent à une valeur finale dans une certaine bande de tolérance

# Caractéristiques d'un capteur (3/4)

Exemple:



# Caractéristiques d'un capteur (3/4)

- *Sensibilité*

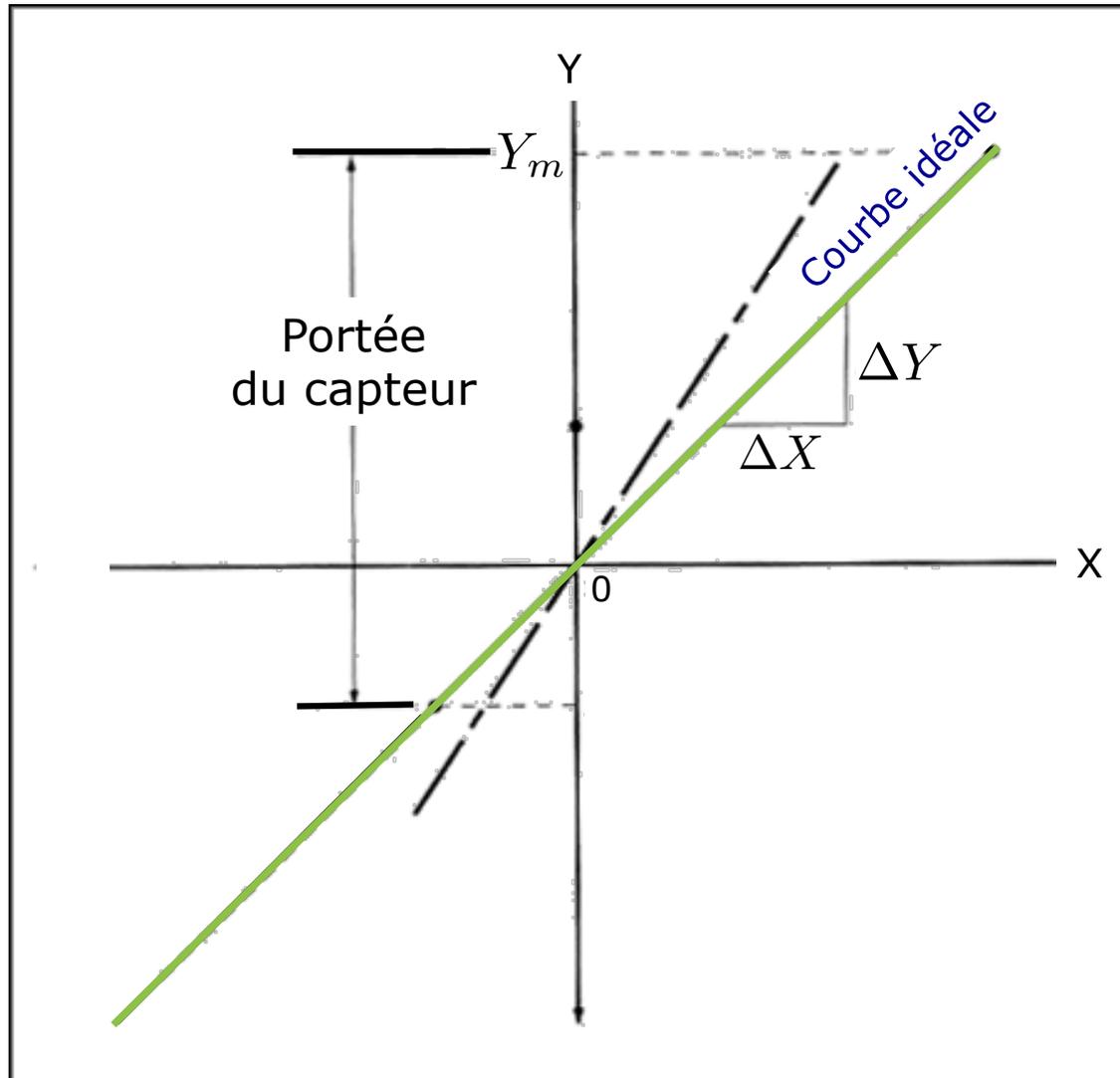
- La sensibilité d'un capteur est définie comme la pente de la courbe caractéristique ou idéale de sortie ( $\Delta Y/\Delta X$  dans la diapo suivante)
- De façon plus générale, elle est la *valeur minimale* du signal d'entrée qui produit un changement détectable dans la sortie



- *Erreur de sensibilité*

- L'erreur de sensibilité est l'écart par rapport à la pente idéale de la courbe caractéristique (voir la droite pointillée dans la diapo suivante)

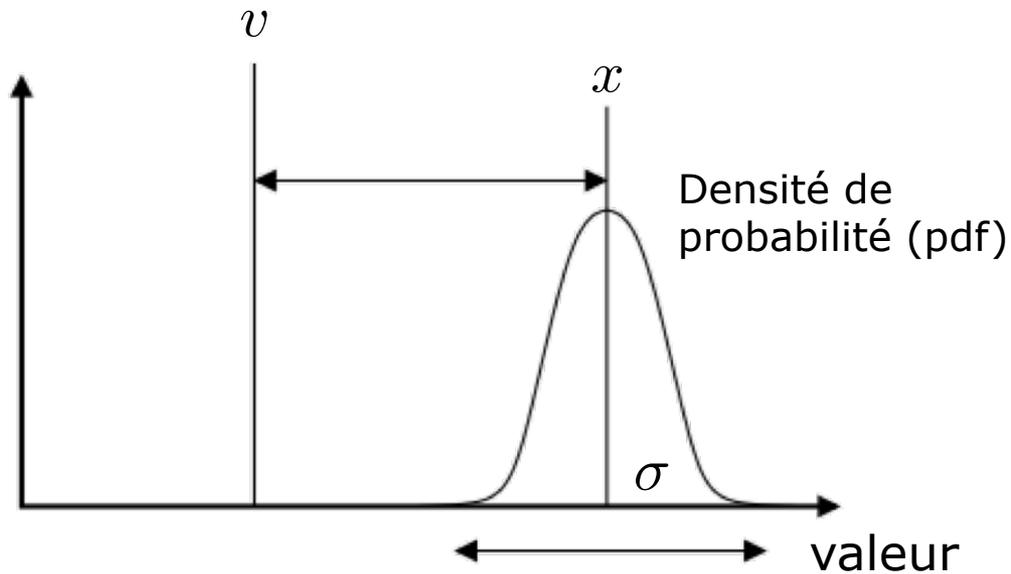
## Caractéristiques d'un capteur (3/4)



# Caractéristiques d'un capteur (4/4)

- *Sensibilité croisée*
    - Sensibilité à d'autres influences de l'environnement (ex. les matériaux ferreux pour le compas fluxgate)
    - Influence d'autres capteurs actifs (ex. deux sonars face-à-face)
  - *Exactitude* (opposée à l'erreur) [« accuracy » en anglais]
    - **Degré de conformité** entre la *mesure* et la *valeur réelle*
    - Elle est exprimée en pourcentage (%) de la valeur réelle
  - *Précision*
    - Liée à la **reproductibilité** des résultats d'un capteur
    - Si exactement la même quantité était mesurée plusieurs fois, un capteur *idéal* fournirait *exactement* la même valeur à chaque fois
- Attention:** *exactitude* n'est pas synonyme de *précision* !

# Caractéristiques d'un capteur (4/4)



- Exactitude (%) =  $100 \left( 1 - \frac{|x - v|}{v} \right)$
- Précision =  $\frac{Y_m}{\sigma}$

$x$  : valeur mesurée

$v$  : valeur réelle (référence)

$\sigma$  : écart type de la mesure

$Y_m$  : valeur fond échelle  
de la sortie

Étant données les mesures:

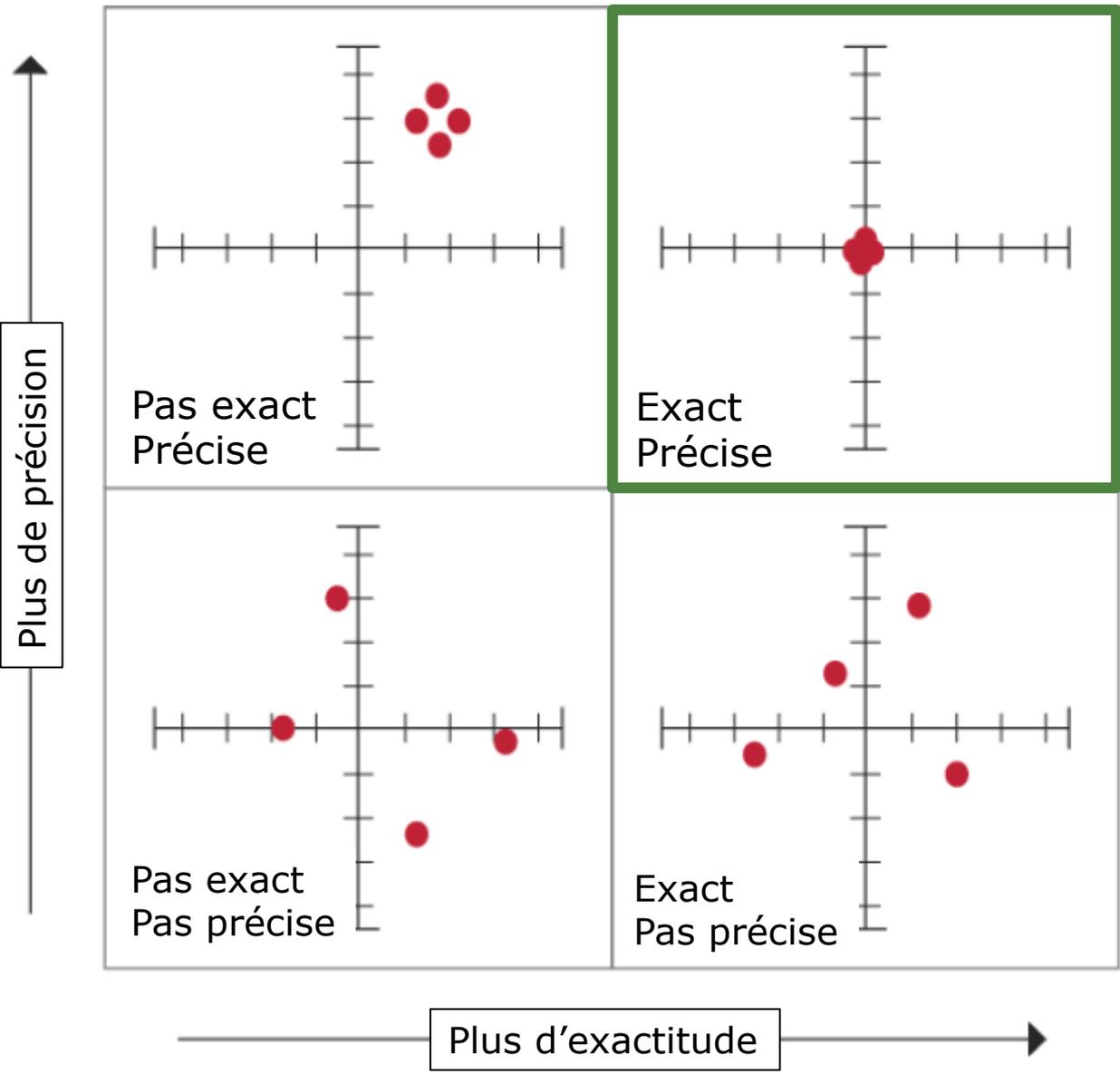
$$\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$

on peut estimer (sans biais)  
l'écart type avec la formule:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

où la moyenne:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$



## Autres caractéristiques d'un capteur ...

- *Coût* (par ex. un télémètre laser est typiquement plus coûteux qu'une camera)
- *Taux d'erreur* (« Bit Error Rate »)
  - Niveau d'atténuation et/ou de perturbation mesuré à la réception du signal transmis par le capteur
- *Robustesse* (par ex. par rapport aux champs électromagnétiques présents dans l'environnement)
- *Charge de calcul* (par ex. une caméra implique plus de traitements de données qu'un sonar)
- *Taille, poids, consommation énergétique, interface, étanchéité, etc.*

# Les erreurs

- **Erreurs systématiques (déterministes)**
  - Causes modélisables et qu'on peut prédire et compenser (au moins partiellement)
  - Par ex. distorsions optiques d'une caméra (par étalonnage)
- **Erreurs aléatoires (non déterministes)**
  - Prédiction impossible
  - Description probabiliste possible
  - Par ex. teinte variable d'une caméra, bruit des photorécepteurs aux basses intensités, échos non réfléchis des sonars, etc.
- **Autres**
  - Sensibilité croisée de capteurs, flou de bougé (blur)

**En général:** modélisation difficile des erreurs systématiques et aléatoires en *environnement non contraint*