

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



Electronique

Energie Electrique

Automatique

CM, TD: Mardi et Mercredi 13h30-16h00, salle CURI 305

TP: Jeudi 9h00-12h00, salle TP204

AU 2024-2025



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

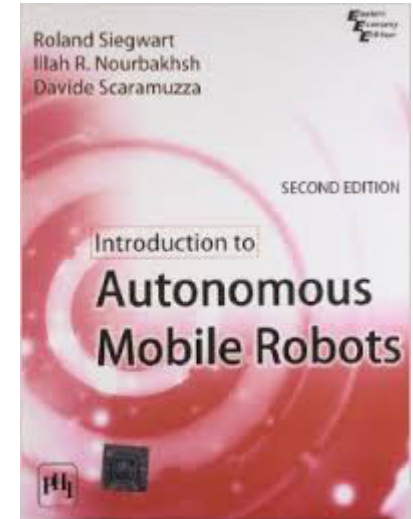
Chapitre 2 : Robotique mobile

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 robots aériens

Bibliographie

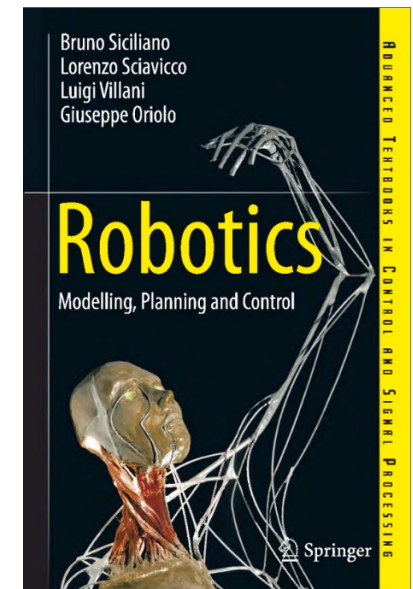
- ***Introduction to Autonomous Mobile Robots***

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



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

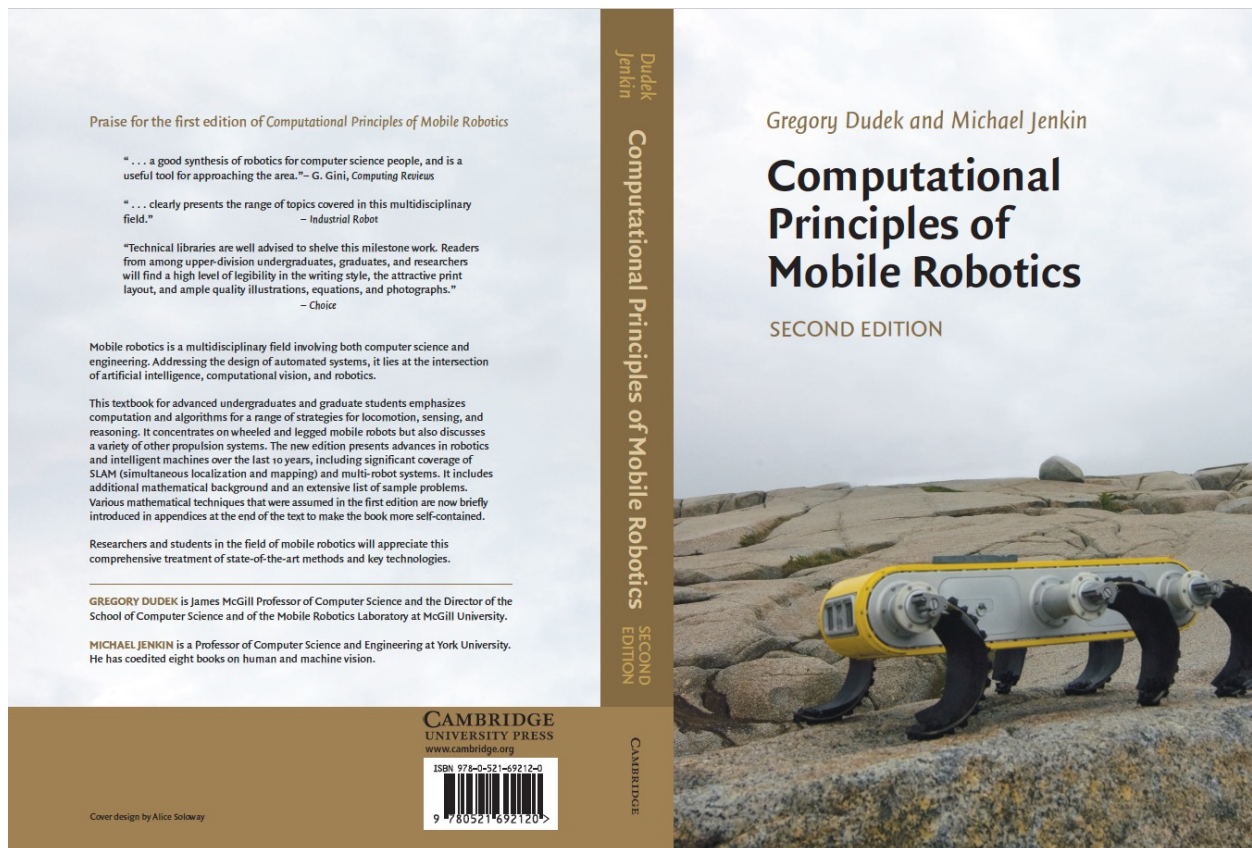
B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo,
Springer, 1^{re} édition, 2009
[Perc. Avan., Ch. 5; Rob. Mob., Ch. 11]



Bibliographie

• **Computational Principles of Mobile Robots**

G. Dudek, M. Jenkin, Cambridge University Press, 2^e édition, 2010
[Perc. Avan., Ch. 4 et 5; Rob. Mob., Ch. 3, 6 et 11]



Bibliographie

- *Diapos du cours*

http://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Teaching_PARM24-25.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



Electronique

Energie Electrique

Automatique

CM, TD - Mardi et Mercredi 13h30-16h00, salle CURI 305

TP: Jeudi 9h00-12h00, salle TP204

AU 2024-2025



Connaissances préalables

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

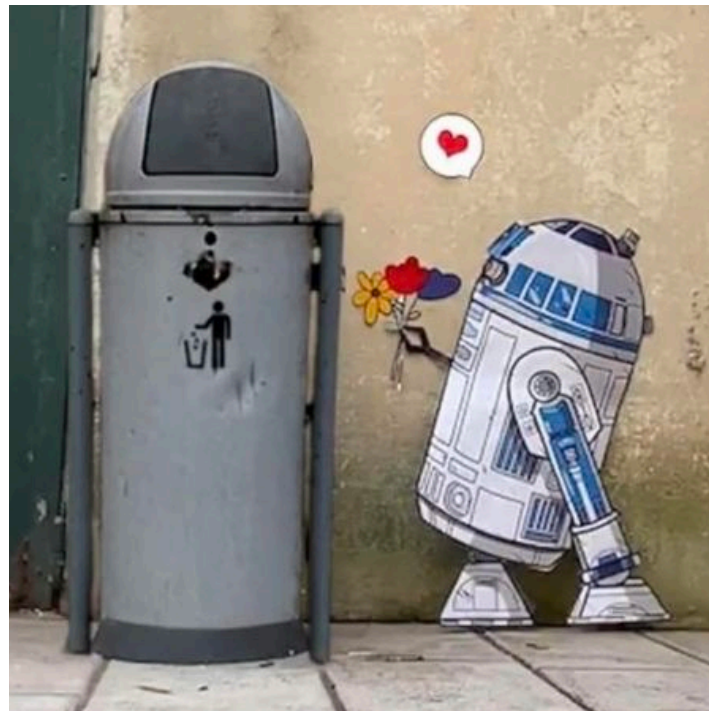
- *Algèbre linéaire* (opérations avec vecteurs et matrices)
- *Calcul différentiel* (équations différentielles)
- *Notions de base de robotique* (cours M1 de Robotique Industrielle)
- *Programmation de base* (envir. Matlab [TD], langage C++ [TP, 3h])

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



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 AIIST-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 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



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

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)

8 Défis

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 (1^{ère} place): 2 M\$

[Vidéo : DRC-Hubo](#)

[Vidéo : autres robots](#)



DARPA Subterranean Challenge (SubT) 2018-2021



www.subtchallenge.com



[Vidéo DARPA SubT](#)

- 11 équipes: USA, Canada, Suisse, Corée du Sud, Australie, Répub. 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 sombre et confiné
- **Solution:** Perception multi-modale: vision, laser, thermique, acoustique, radio-fréquence, olfactive (pour la détection de gaz)

DARPA Subterranean Challenge (SubT) 2018-2021



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 COVID-19)

Épreuve finale dans les trois sous-domaines: 21-24 septembre 2021
(Mega Cavern, Louisville, KY)

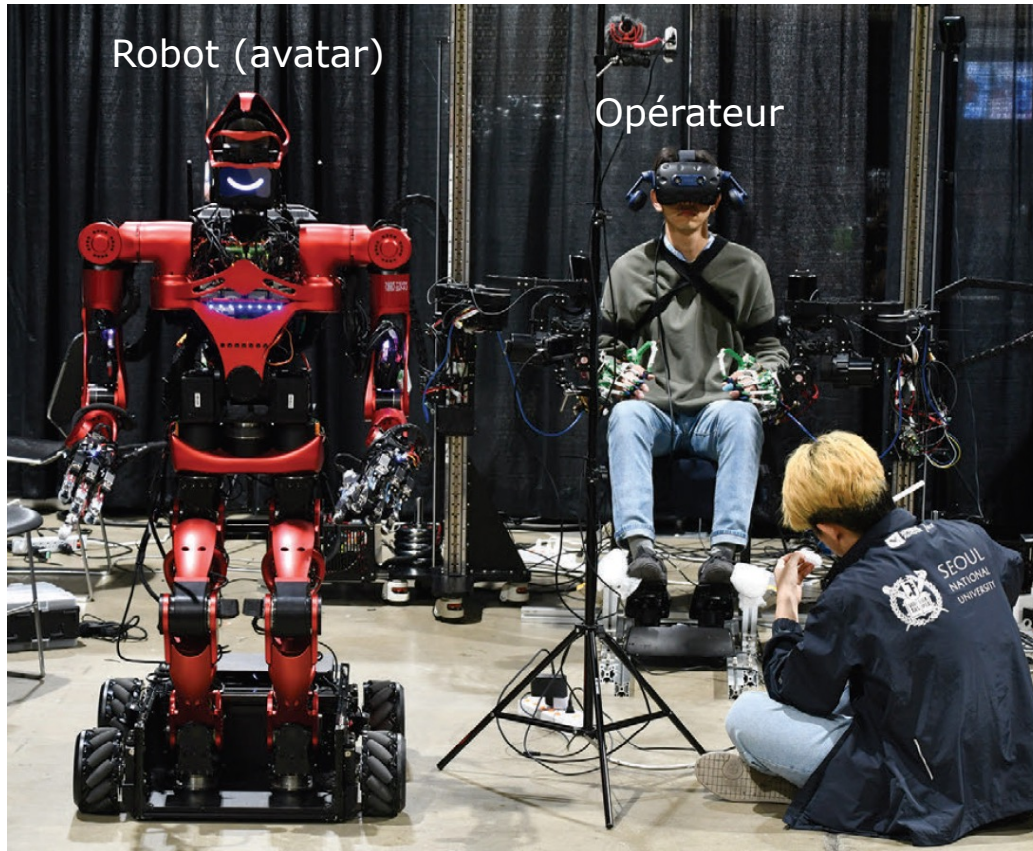
DARPA Subterranean Challenge (SubT) 2018-2021



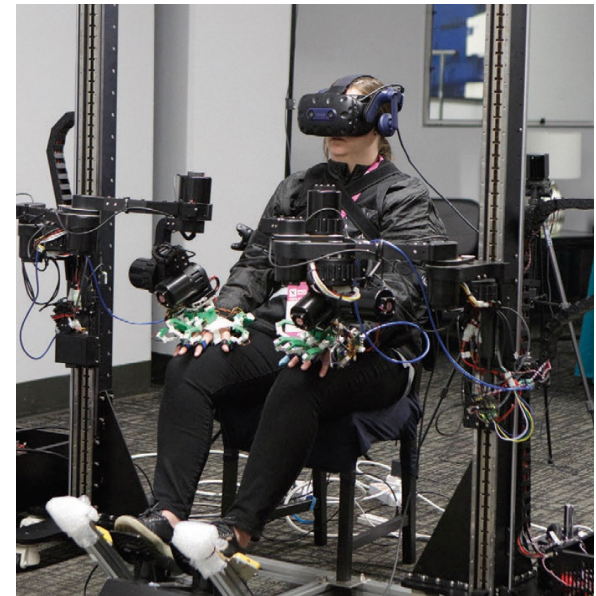
Classement final:

Score	Équipe	Prix	Sponsor
23	CERBERUS (<i>CollaborativE walking & flying RoBots for autonomous ExplorAtion in Underground Settings</i>)	2 M\$	DARPA
23	CSIRO Data 61	1 M\$	DARPA
18	MARBLE (<i>Multi-agent Autonomy with Radar-Based Localization for Exploration</i>)	0.5 M\$	DARPA
17	Explorer		DARPA
13	CoSTAR (<i>Collaborative SubTerranean Autonomous Resilient Robots</i>)		DARPA
7	CTU-CRAS-NORLAB (<i>Czech Technical University in Prague - Center for Robotics and Autonomous Systems - Northern Robotics Laboratory</i>)		DARPA
2	Coordinated Robotics		Autofinancé
2	Robotika		Autofinancé

Avatar XPrize – Novembre 2022 (Long Beach, CA)

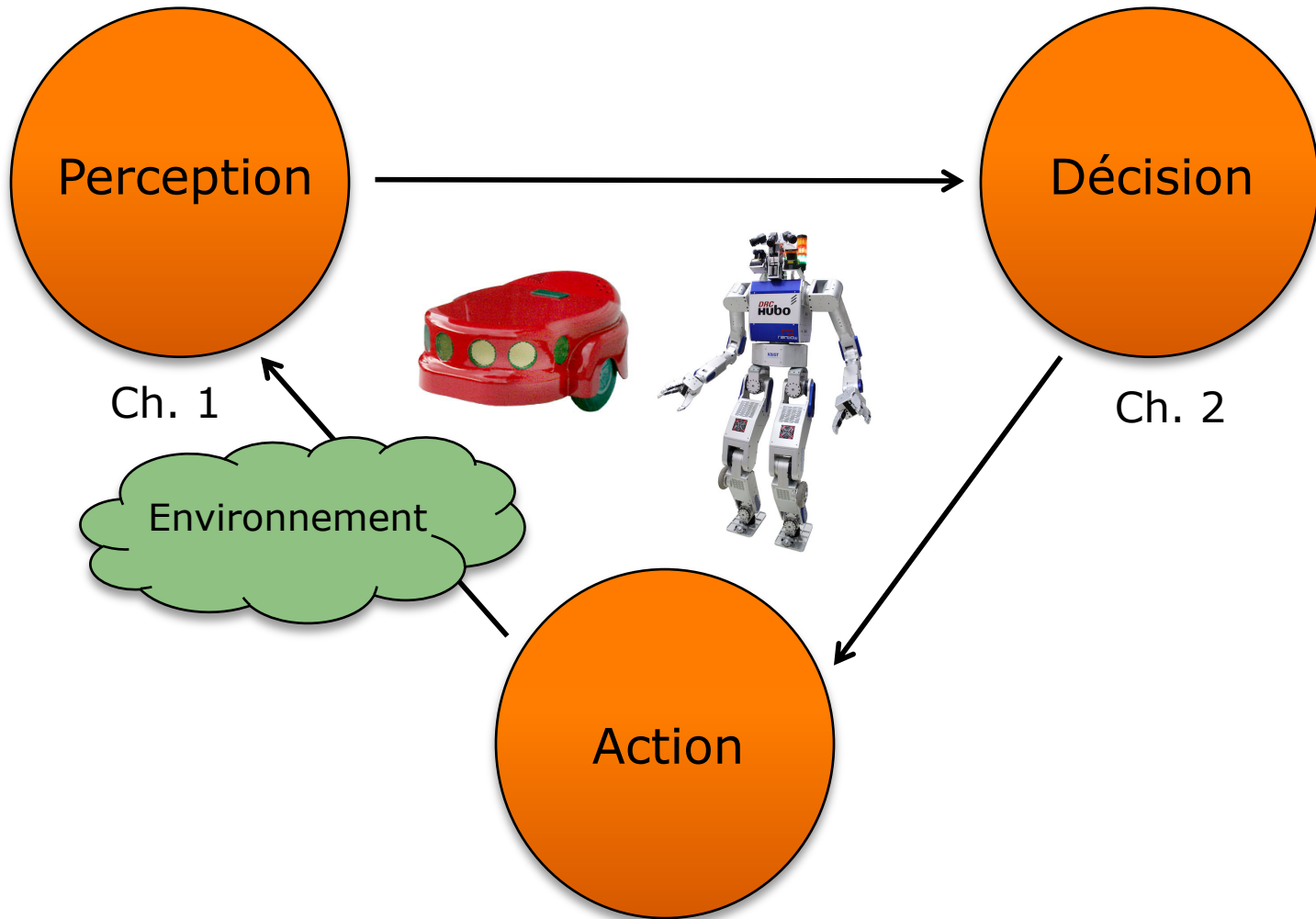


Téléopération (contrôle à distance)
de robots humanoïdes



Prix (1^{ère} place): 10 M\$

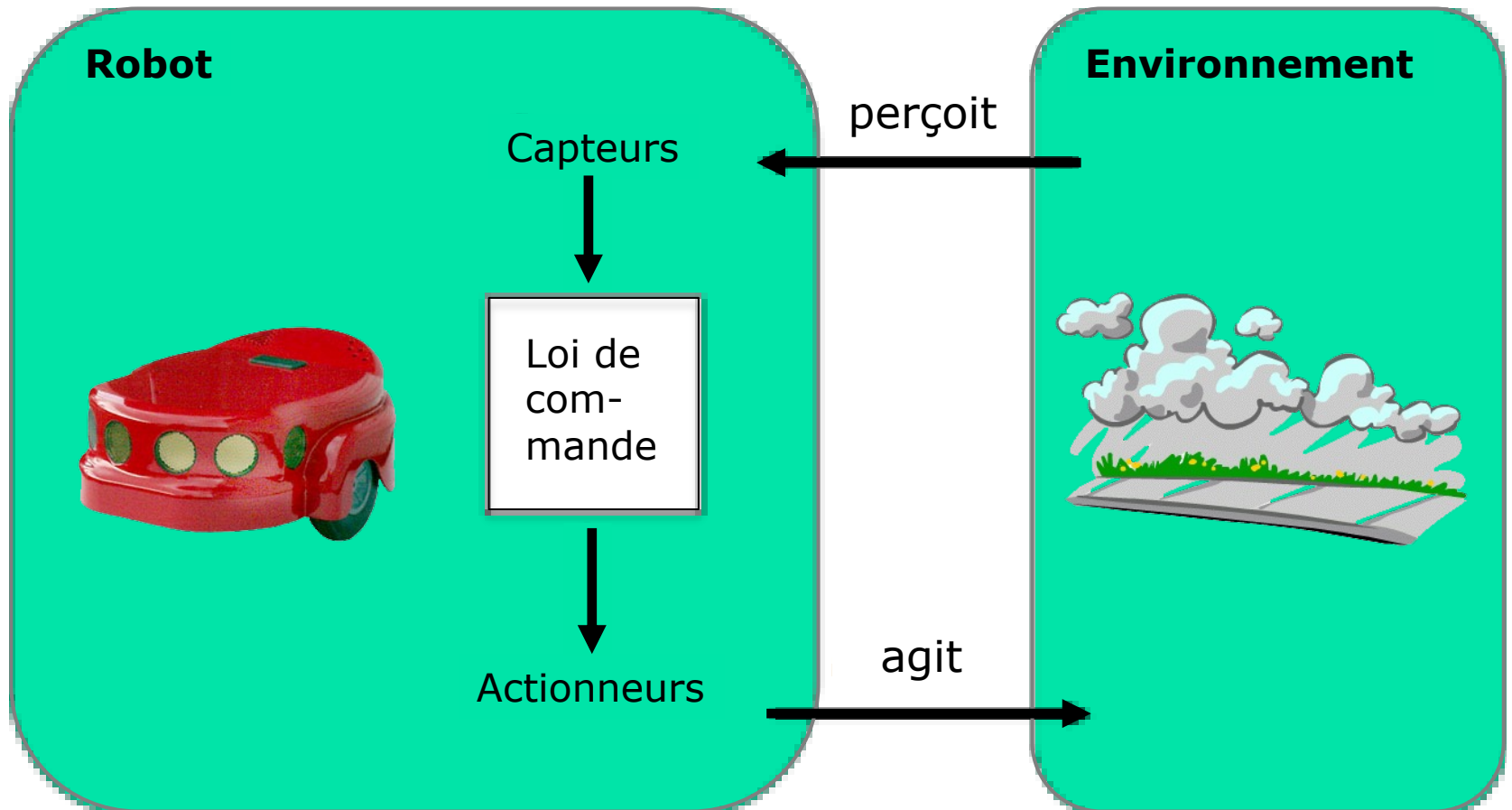
Vue d'ensemble



Paradigme "See-Think-Act"

Ch. 2

Au niveau du robot ...



Ch. 1: Perception pour la robotique

- Introduction

Partie 1

- Classification des capteurs

Partie 2

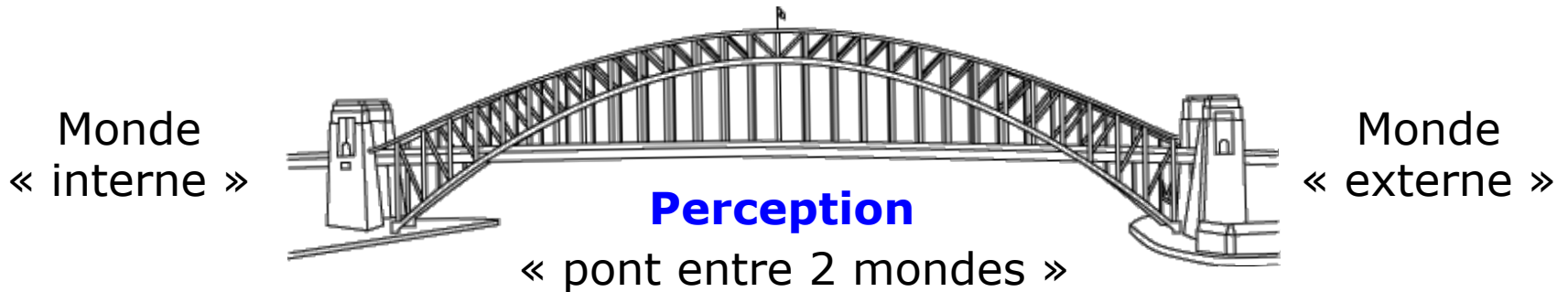
- Typologies de capteur

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)

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



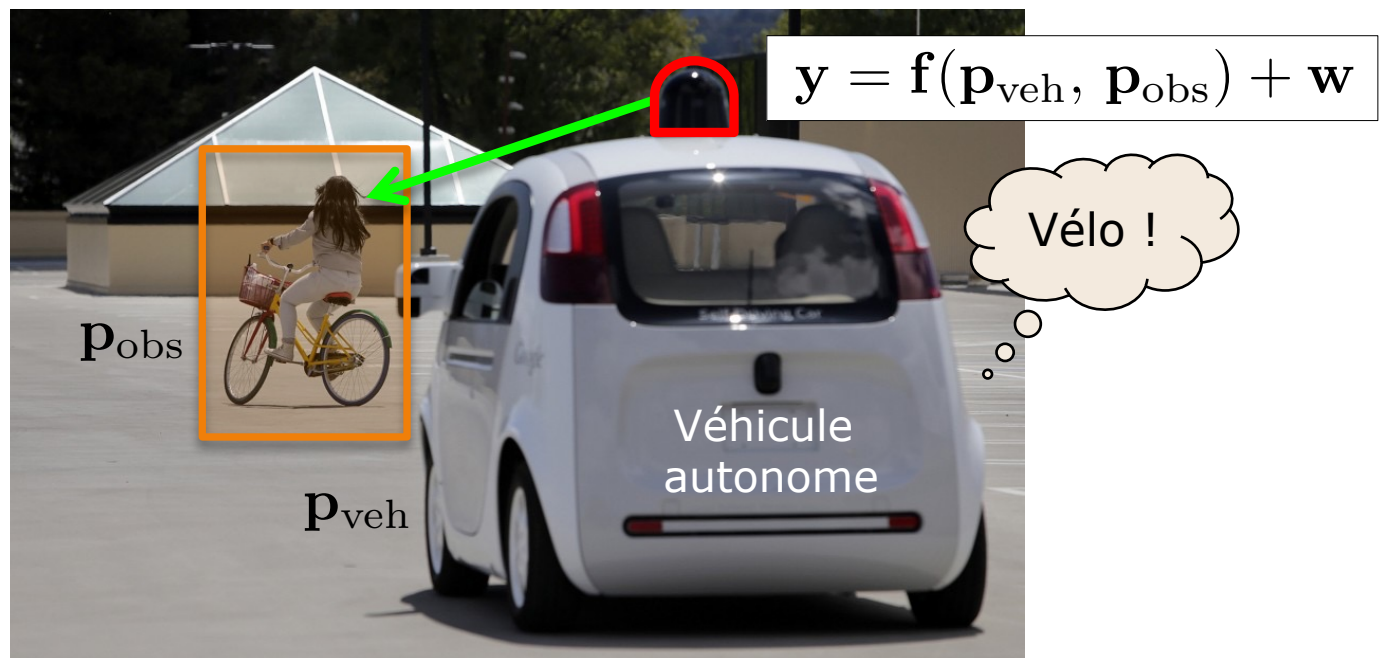
Etymologie

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 » (Paradoxe de Moravec)

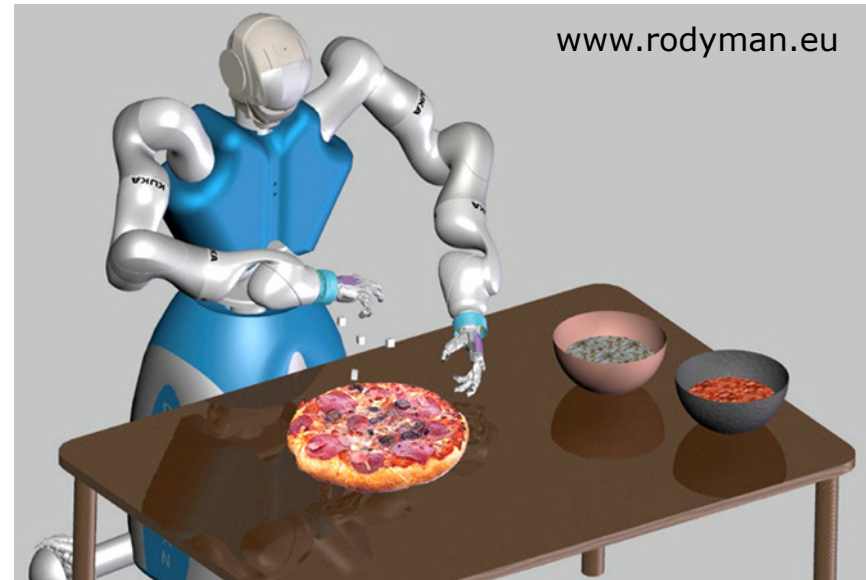
S. Pinker, « The Language Instinct », Harper Perennial Modern Classics, 1994

Pick & place: FACILE !



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

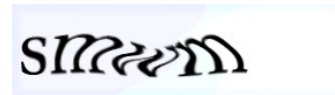
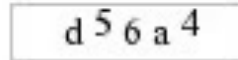
Créer une machine avec un certain « bon sens » : DIFFICILE !



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 la Carnegie Mellon University)



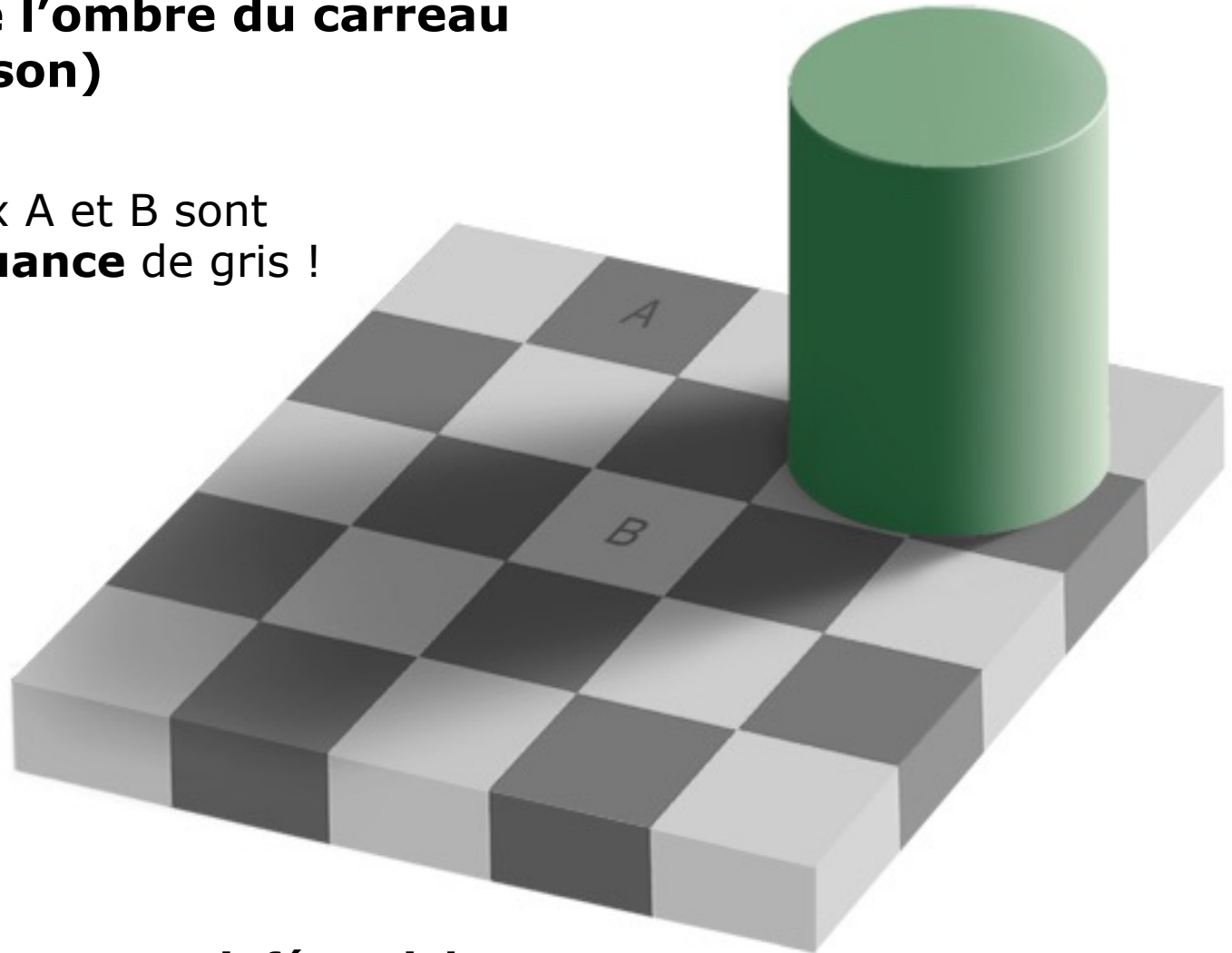
- La perception est une **construction statistique** effectuée d'après la signification antérieure des stimuli
- « Percevoir (une luminosité, une couleur, une surface concave ou convexe, une longueur) en fonction des *probabilités relatives* des sources du stimulus, donne à l'observateur les plus grandes les 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 !

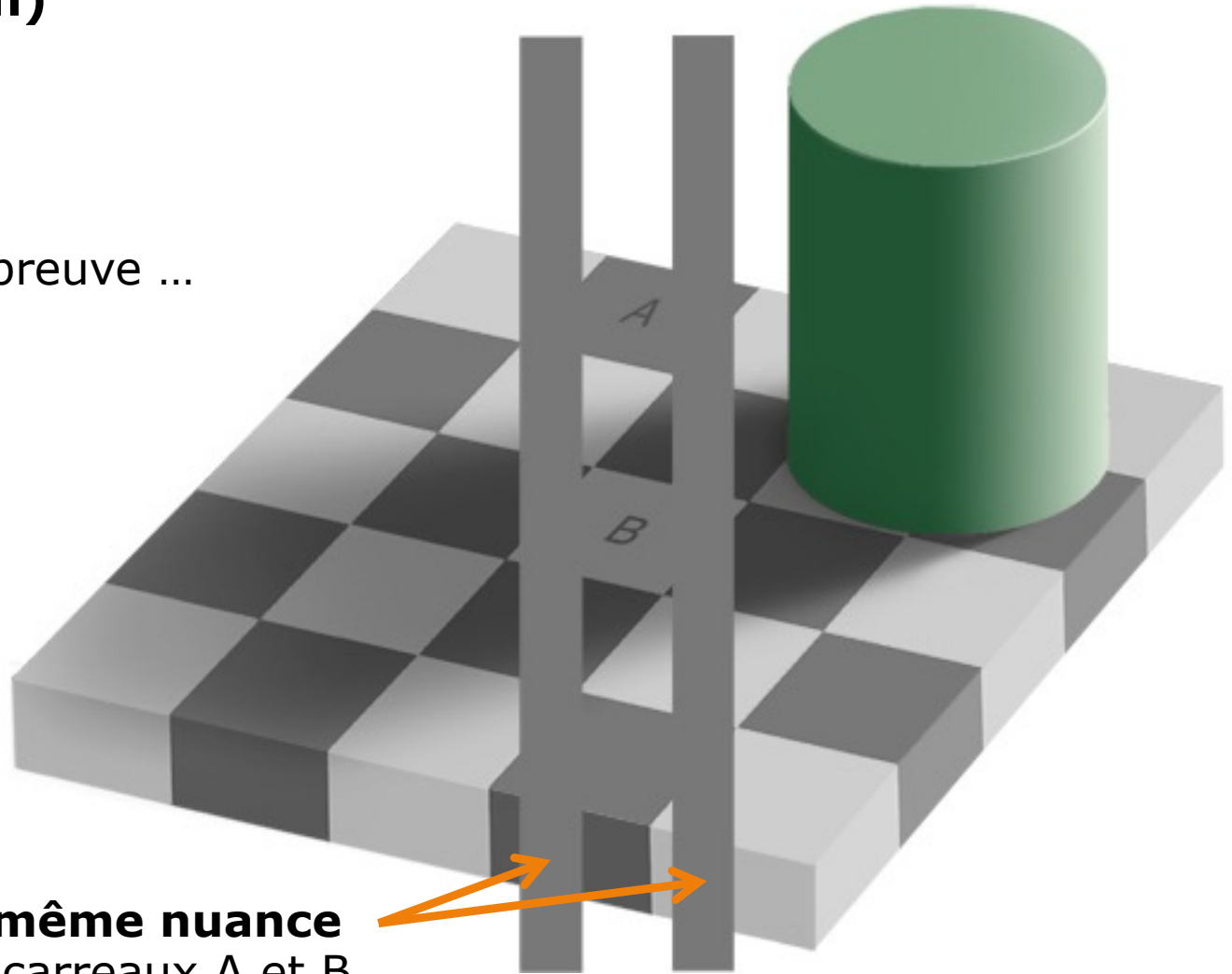


Perception: **processus inférentiel**

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 ...



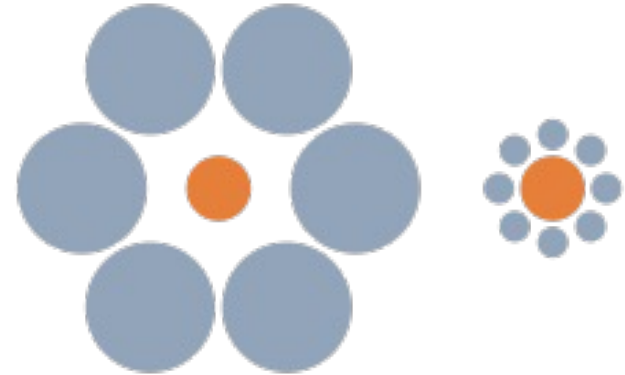
Barres avec la **même nuance**
de gris que les carreaux A et B

Autres illusions optiques



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



Illusion d'Ebbinghaus
ou *cercles de Titchener*

Les deux cercles orange ont le **même diamètre**: cependant, celui de droite semble plus grand

Pour d'autres illusions optiques (effet de contraste, perception de taille relative, etc.) voir:

https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_illusion

Les sens humains



La vue



L'ouïe



Le toucher



L'odorat



Le goût

Les sens des robots



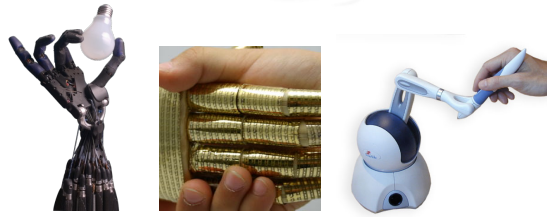
Caméras (spectre visible, IR),
lasers (LIDARs)



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

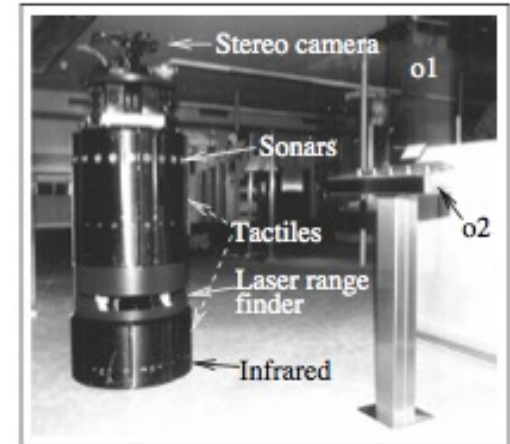


Fig. 3: The Robot and its sensors.

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

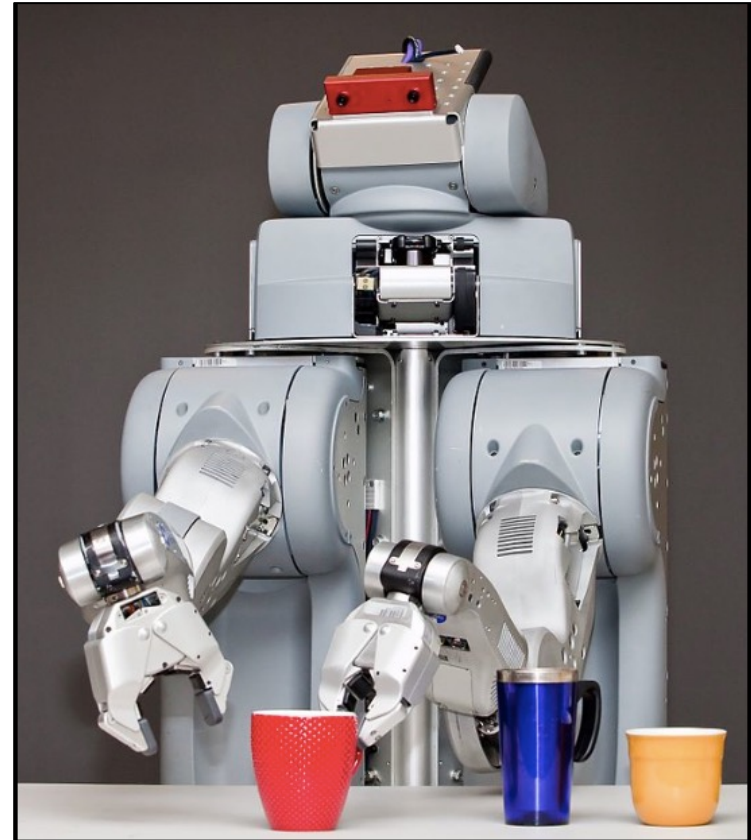
[Vidéo Rhino](#)

PR2 de *Willow Garage* (2010)

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

Capteurs:

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



[Vidéo PR2](#)

Atlas de *Boston Dynamics* (2016-2022)

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

Actionnement:

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

Commande:

- Model Predictive Control (MPC)

Capteurs:

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



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

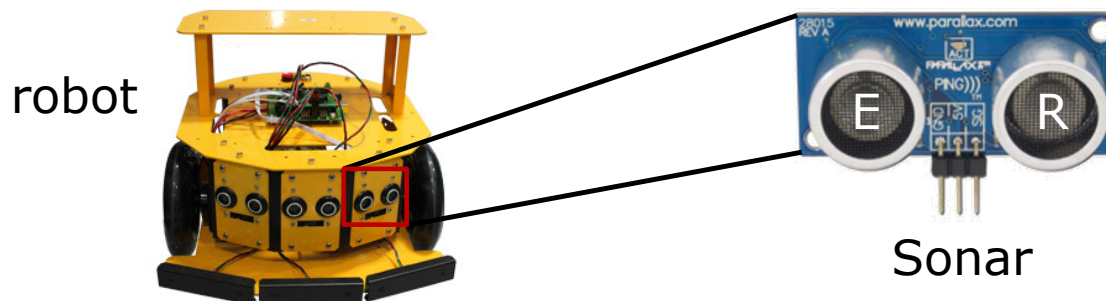
Classification des capteurs selon deux axes

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: Ils sont 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 min et max d'un paramètre qui sont mesurables (ex. de 0.05 à 4 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 »)

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

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 (1/4)

- *Plage dynamique*

Exemples:

- Audition humaine : > 100 dB, la plage varie avec la fréquence (entre un murmure dans une pièce insonorisée, 30 dB, et le bruit de décollage d'un jet, 130 dB)
- Vue humaine : 90 dB (entre la perception de la lumière des étoiles et la lumière directe du soleil)
- Caméra de téléphone portable : 30 dB
- Caméra numérique professionnelle : > 50 dB



Faible plage dynamique



Large plage dynamique

Caractéristiques d'un capteur (2/4)

- *Résolution*

- La plus petite variation ΔX de l'entrée qui peut être détectée en sortie (ex. 0.1° pour un encodeur optique)

- *Fréquence ou largeur de bande*

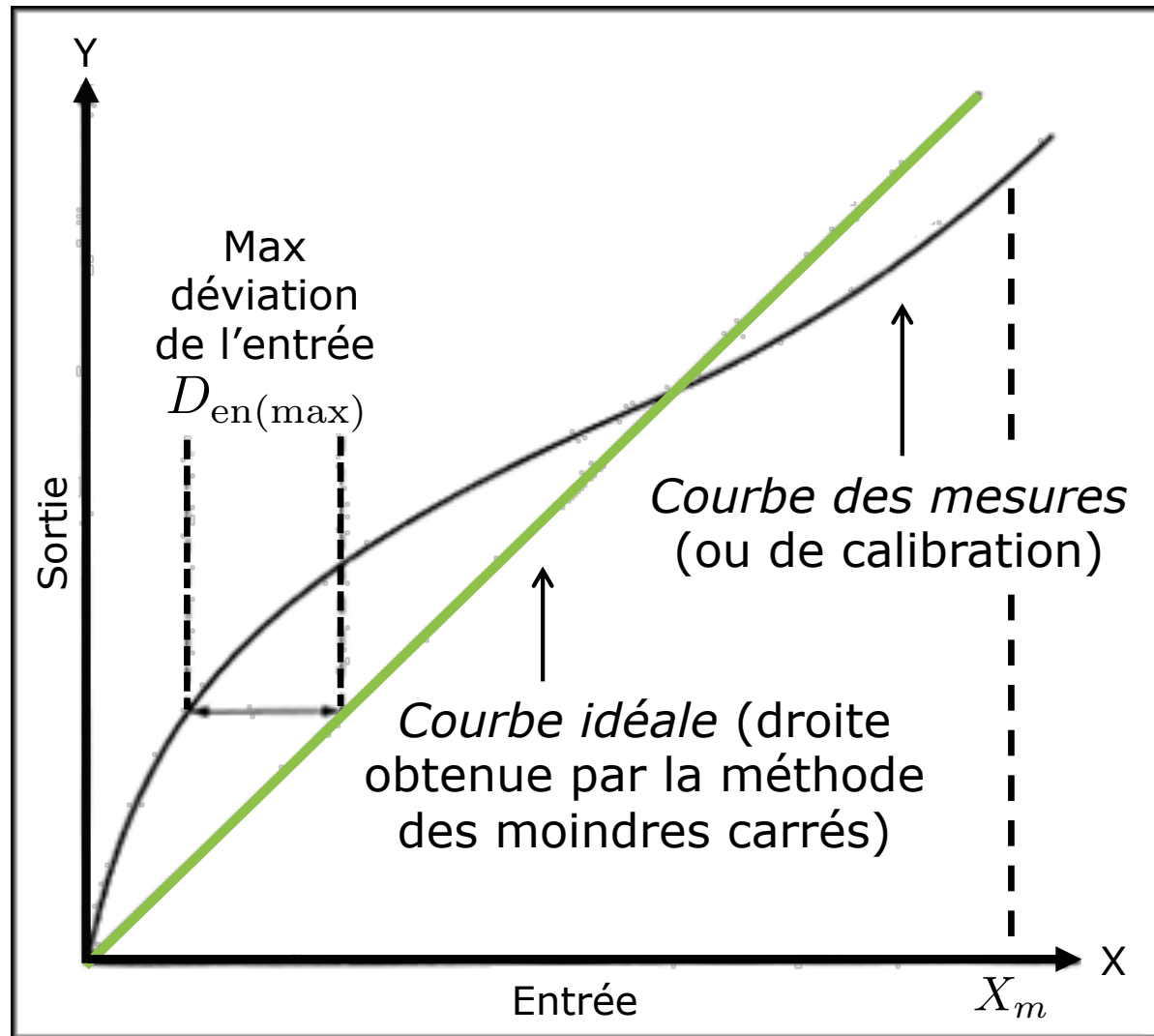
- Débit de mesures du capteur
 - Borne supérieure due à la fréquence d'échantillonnage (cf. le théorème de Shannon)
 - Délai (déphasage) possible

- *Linéarité*

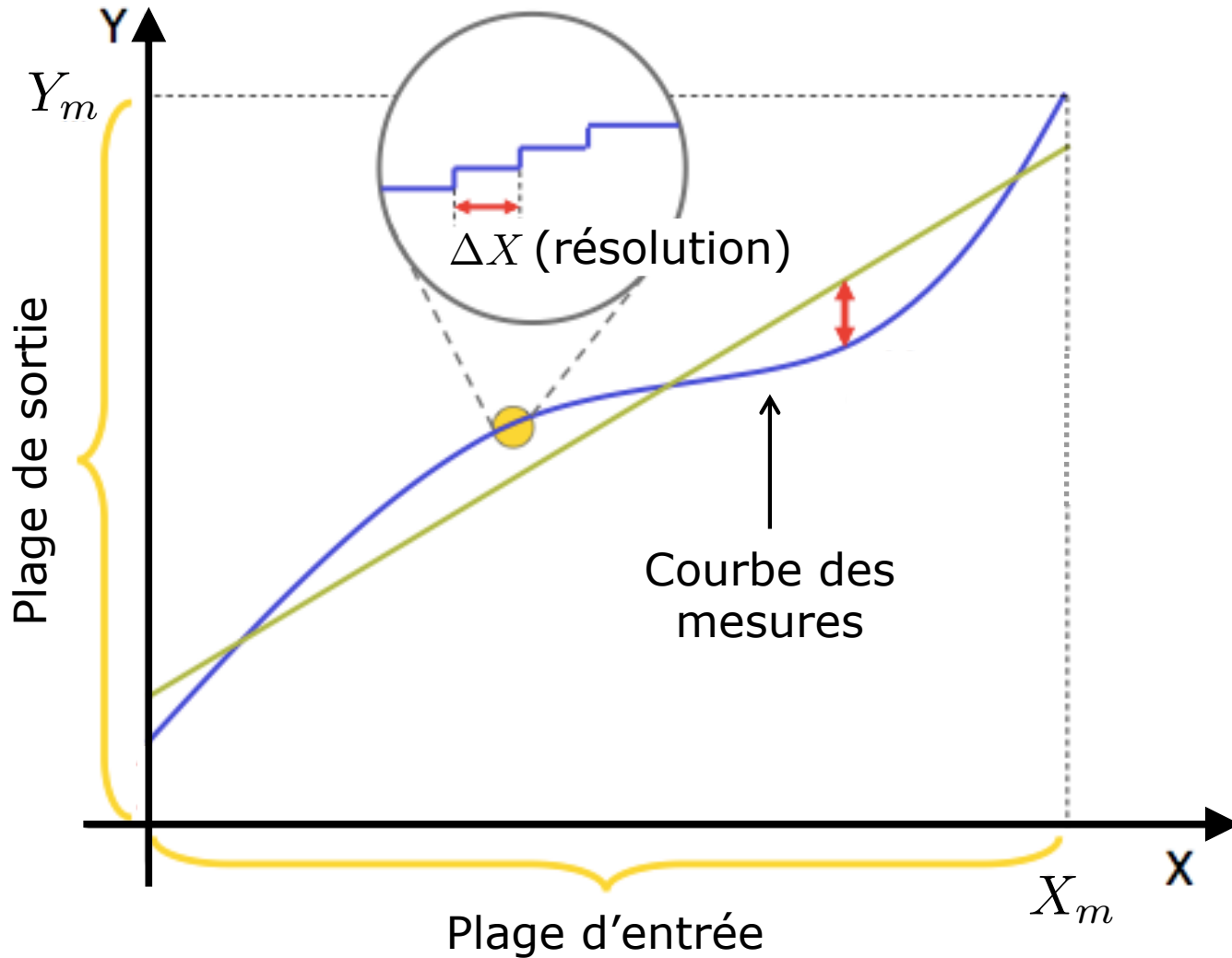
- La linéarité d'un capteur est une expression de la plage d'écart entre la courbe des mesures du capteur et la courbe idéale
- La linéarité est souvent exprimée en *pourcentage de non-linéarité*:

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

Caractéristiques d'un capteur (2/4)



Caractéristiques d'un capteur (2/4)

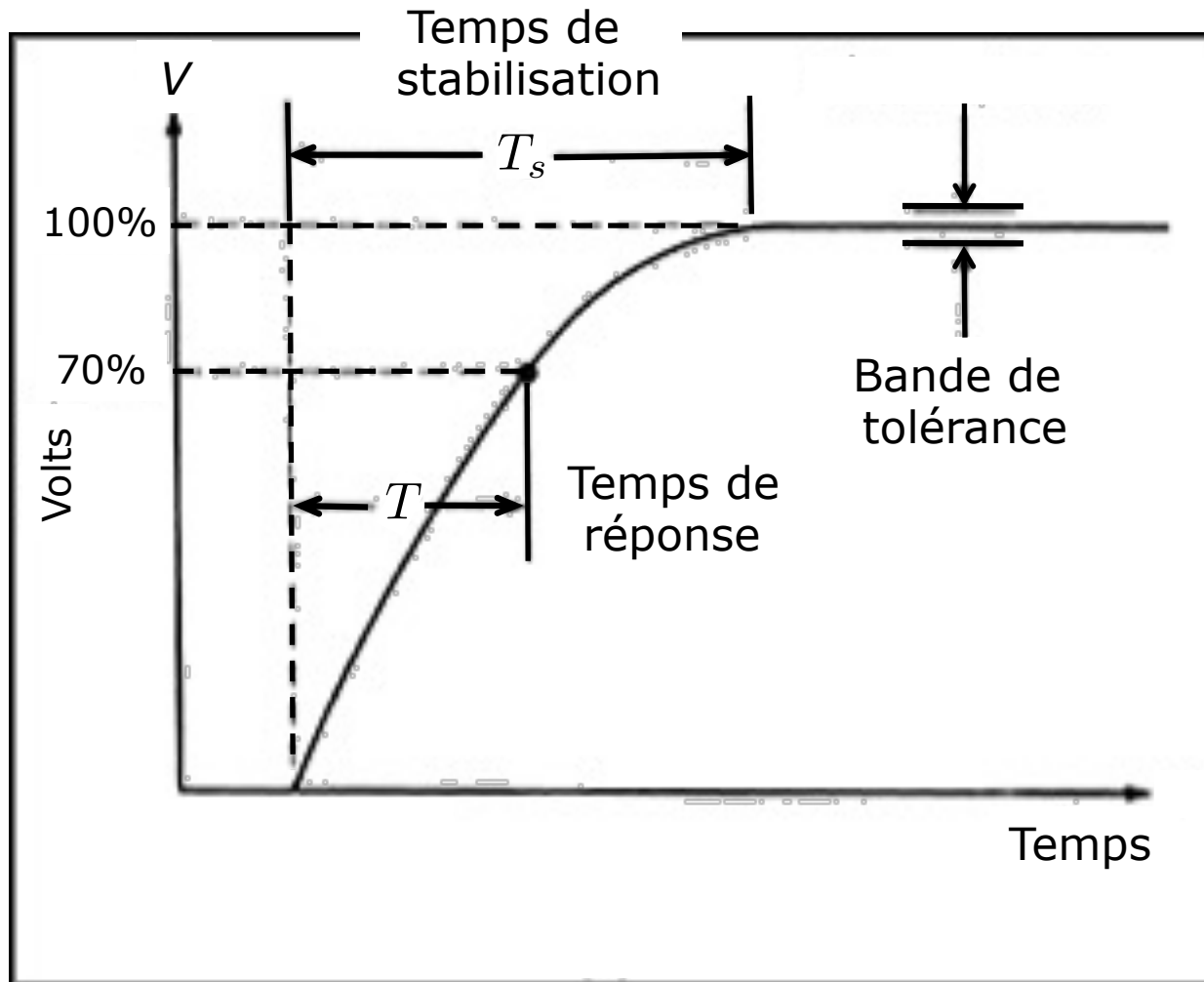


Caractéristiques d'un capteur (3/4)

- *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)

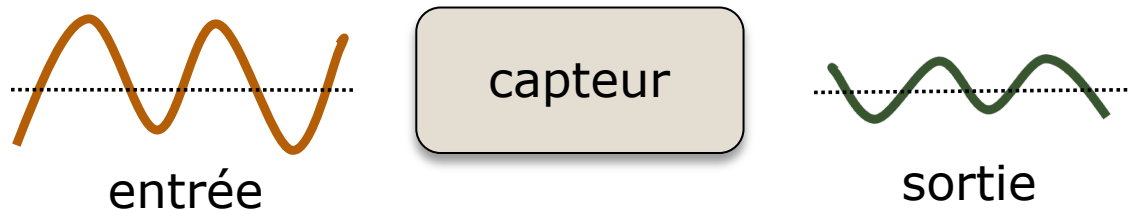
Exemple:



Caractéristiques d'un capteur (3/4)

- *Sensibilité*

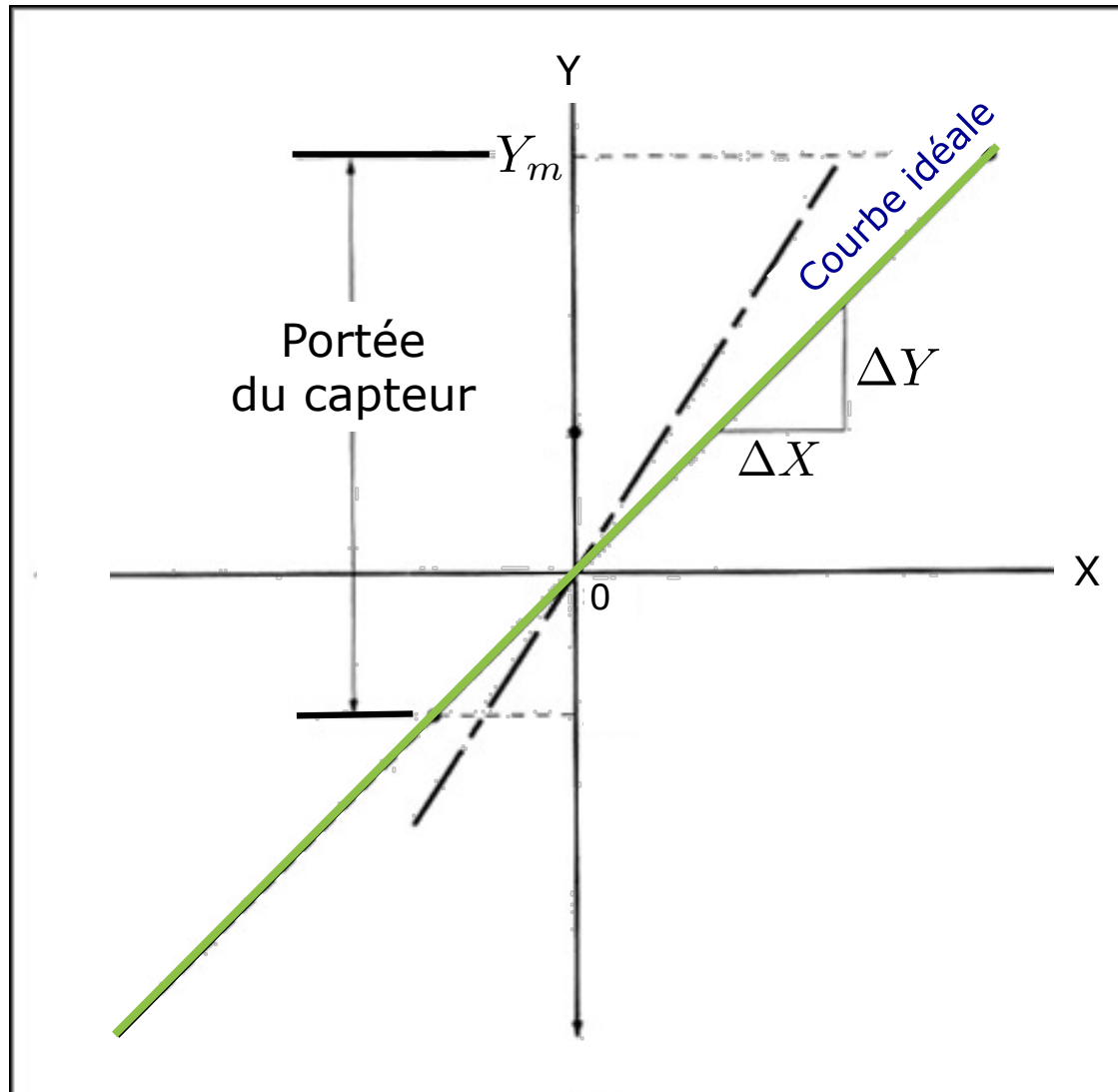
- La sensibilité d'un capteur est définie comme la pente de la courbe caractéristique ou idéale de sortie ($\Delta Y/\Delta X$ dans la diapo suivante)
- De façon plus générale, elle est la *valeur minimale* du signal d'entrée qui produit un changement détectable dans la sortie



- *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)

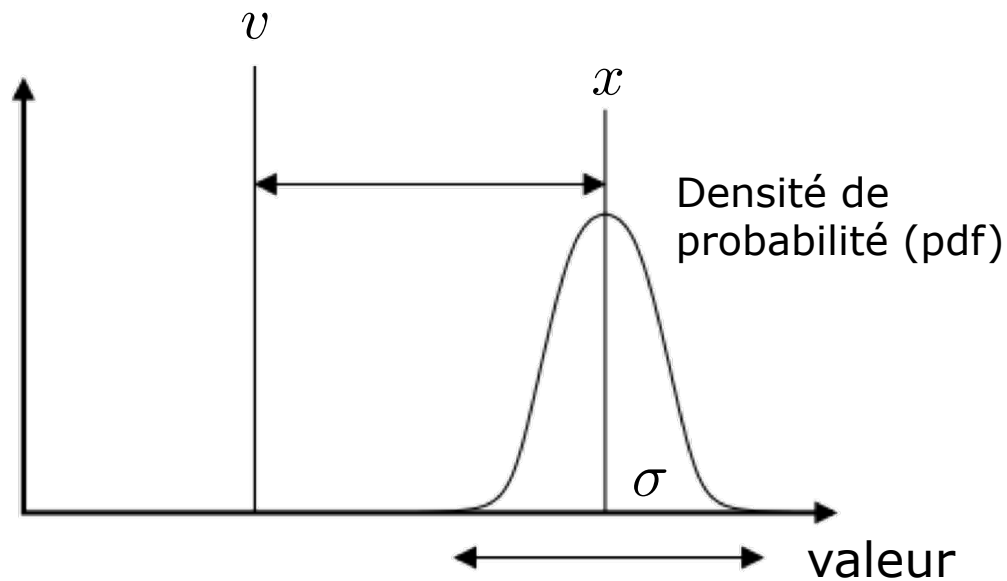


Caractéristiques d'un capteur (4/4)

- *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)

σ : écart type de la mesure

Y_m : valeur fond échelle
de la sortie

Étant données N mesures:

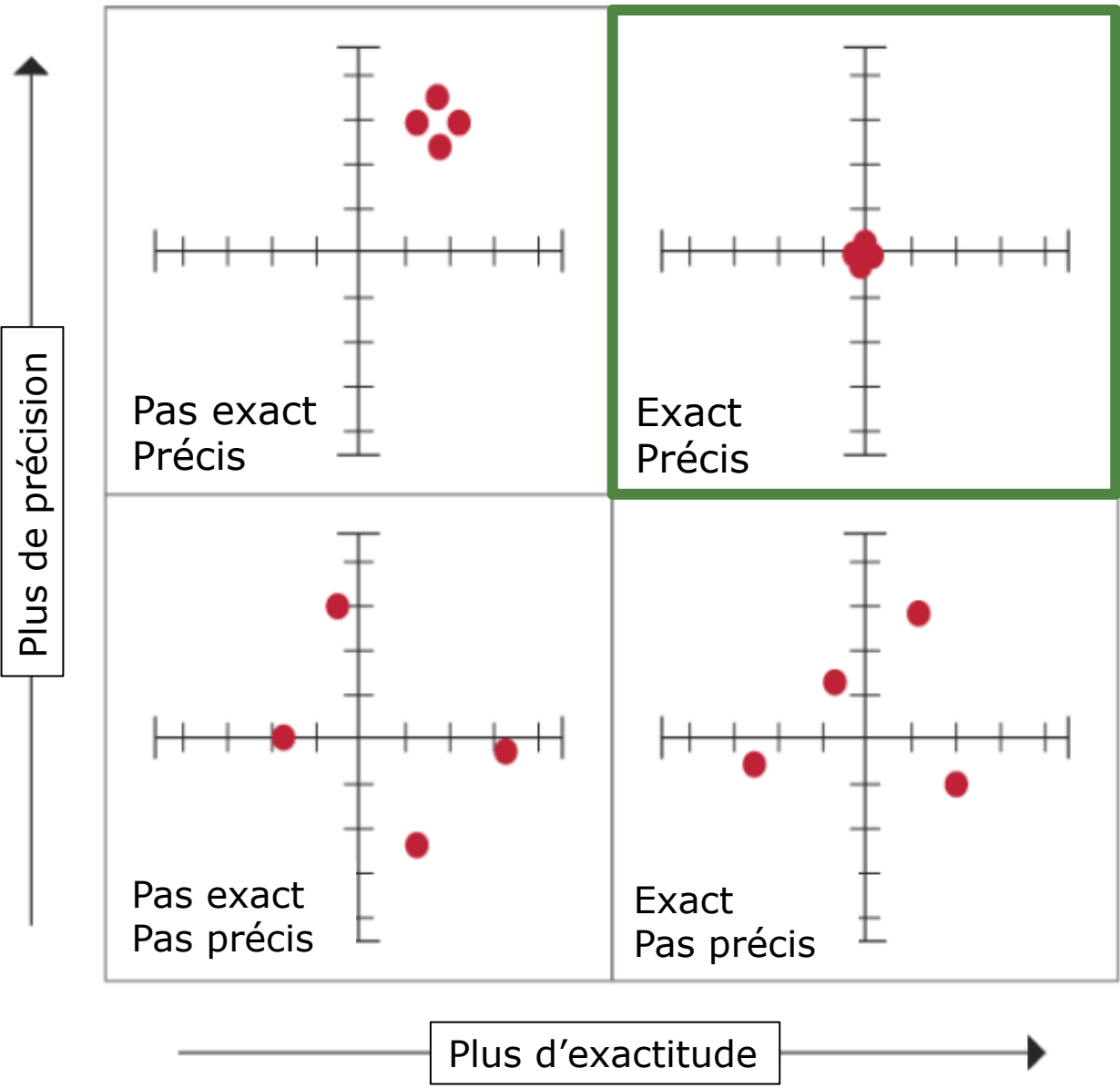
$$\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$

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 coûte généralement plus cher qu'une caméra)
- *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*