



UNIVERSITÉ
LAVAL

GLO-4001/7021

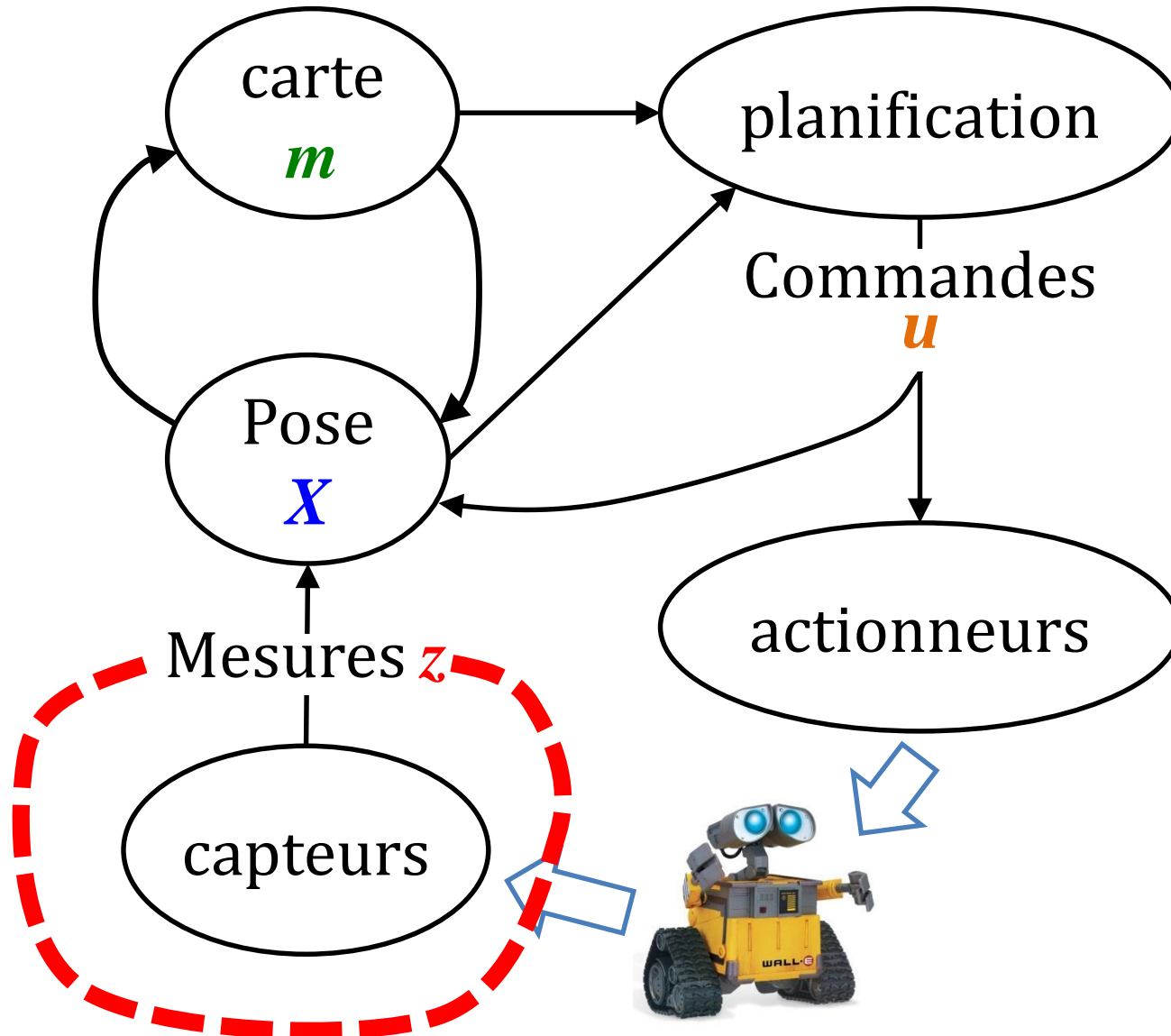
INTRODUCTION À LA ROBOTIQUE MOBILE

Capteurs

(Automne 2019)

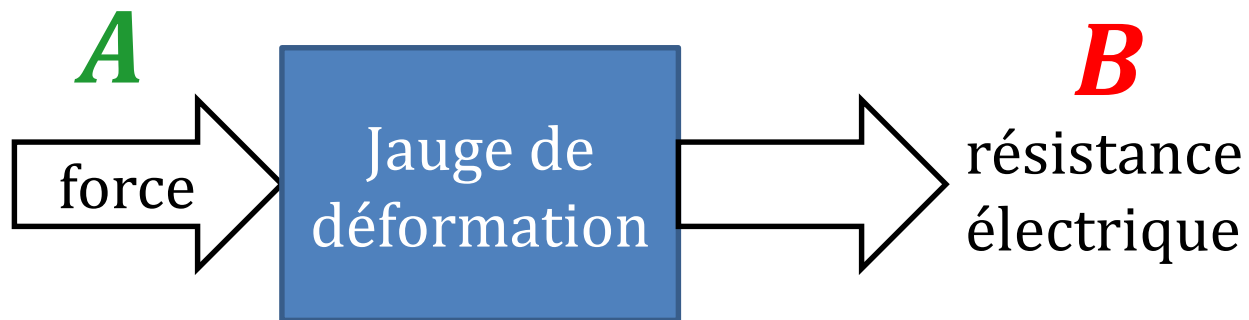
Philippe Giguère

Feuille de route



Capteurs

- Repose sur un **transducteur** qui convertit une grandeur physique **A** en une autre **B**



- Cette grandeur physique **B** est généralement facile à mesurer (voltage, résistance, courant)

Catégories de capteurs

- **Actif** : émet de l'énergie dans l'environnement

- e.g. radar, laser, caméra avec flash, sonar

aspects positifs

- robuste (plus indépendant de l'environnement)
- bonne qualité d'information
 - plus précis/moins bruité

aspects négatifs

- interférence entre capteurs (e.g. plus de 2 Kinect?)
- énergivore (*drone?*)
- détectable par autrui

- **Passif** : se base sur l'énergie de l'environnement

- caméra sans flash, microphone, etc.

aspects positifs

- moins intrusif
- difficile à détecter
- possiblement moins énergivore

aspects négatifs

- dépend de l'environnement (pas de lumière?)
- moins précis/plus bruité

Catégories de capteurs

Proprioceptif

donne de l'information sur l'état (interne) du robot

(Si le robot est téléporté dans le vide intersidéral, j'aurais encore des mesures)

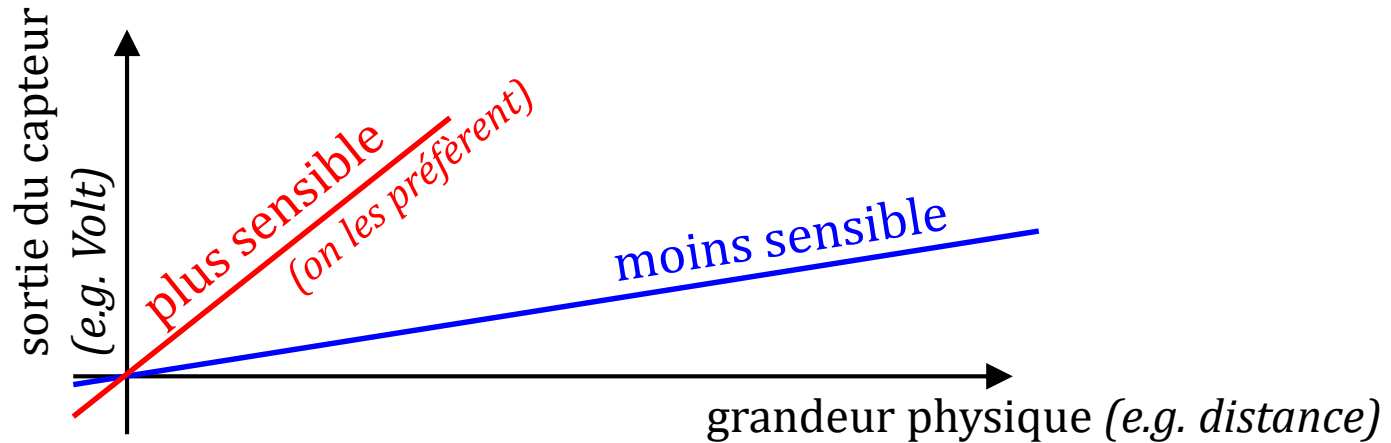
- Cette différence est **EXTRÊMEMENT** importante
- Elle se fera sentir quand on utilisera nos capteurs pour se localiser (divergence de l'estimé avec proprio.)



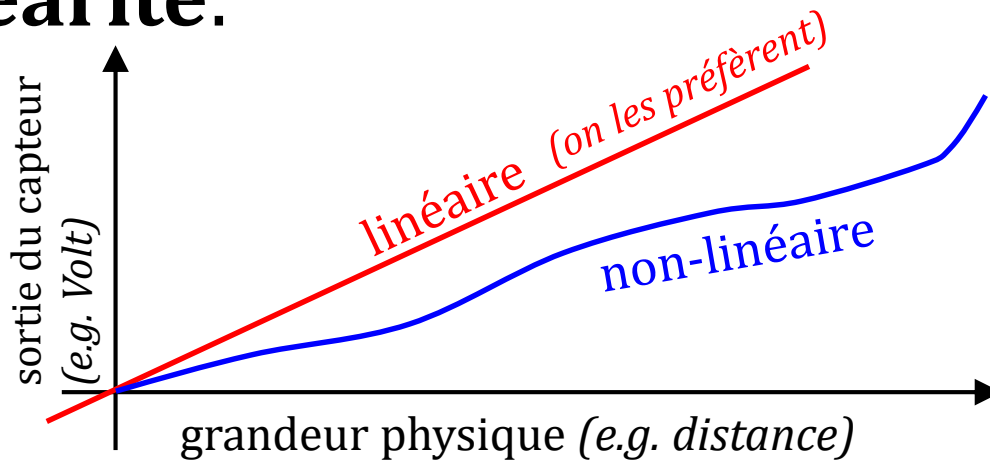
Imaginez devoir vous localiser si vous êtes dans une boîte en carton parfaitement insonorisée, à l'épreuve des ondes radio, et qu'on vous déplace...

Caractéristiques des capteurs

- **Sensibilité:** $(\Delta \text{ sortie}) / (\Delta \text{ entrée})$ (*pente*)



- **Linéarité:**



Exception: réponse logarithmique désirable pour certains capteurs (caméra, microphone)

Caractéristiques des capteurs

- **Plage dynamique:**
 - différence entre min. et max. senti
 - important pour des capteurs comme microphone et caméra

Oreille : facteur 10,000,000,000

Œil : facteur 1,000,000,000

Caméra CCD 16 bits : facteur 65,536

HDRI simulé
avec caméra

Original images



-4 stops

-2 stops

+2 stops

+4 stops

Results after processing



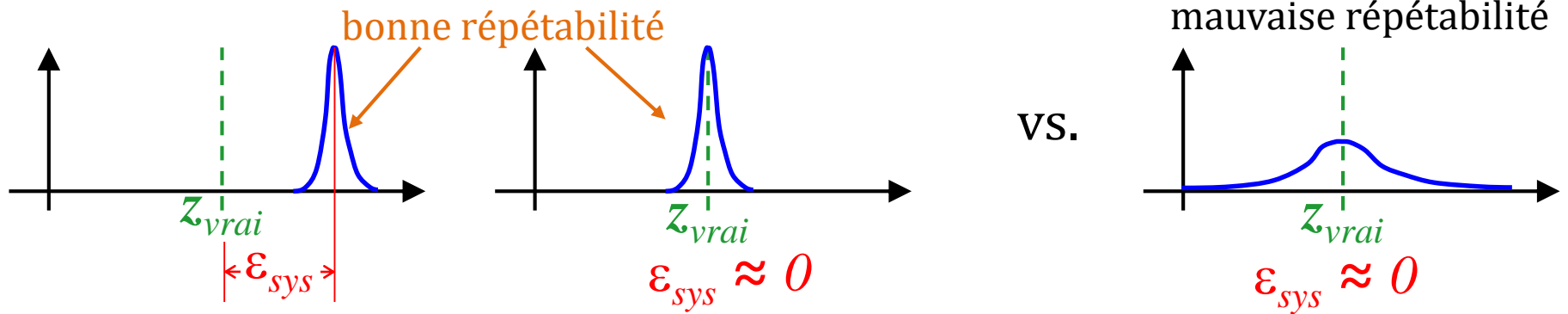
Simple contrast reduction

Local tone mapping

- **Temps réponse :** temps requis pour changement entre entrée et sortie (*important pour véhicule routier*)

Caractéristiques des capteurs

- **Résolution** : plus petit incrément observable (souvent dicté par le nombre de bits du convertisseur)
- **Répétabilité** : différence entre mesures consécutives (erreur aléatoire)



- **Erreur systématique** ϵ_{sys} (se corrige via calibration)

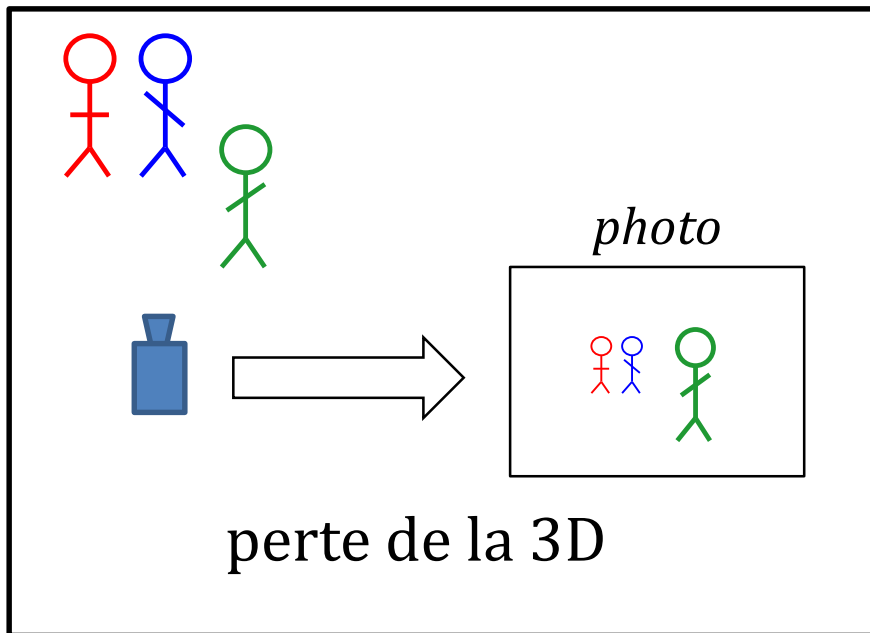
Bande passante

- **Bande-passante** : quantité information/sec
 - de quelques bits/secondes à Go/sec
- Humain
 - œil : 10 000 000 bits/s
 - peau : 1 000 000 bits/s
 - oreille : 100 000 bits/s
 - nez : 100 000 bits/s
 - langue : 1 000 bits/s

Capacité consciente de traitement du cerveau : 50 bit/s

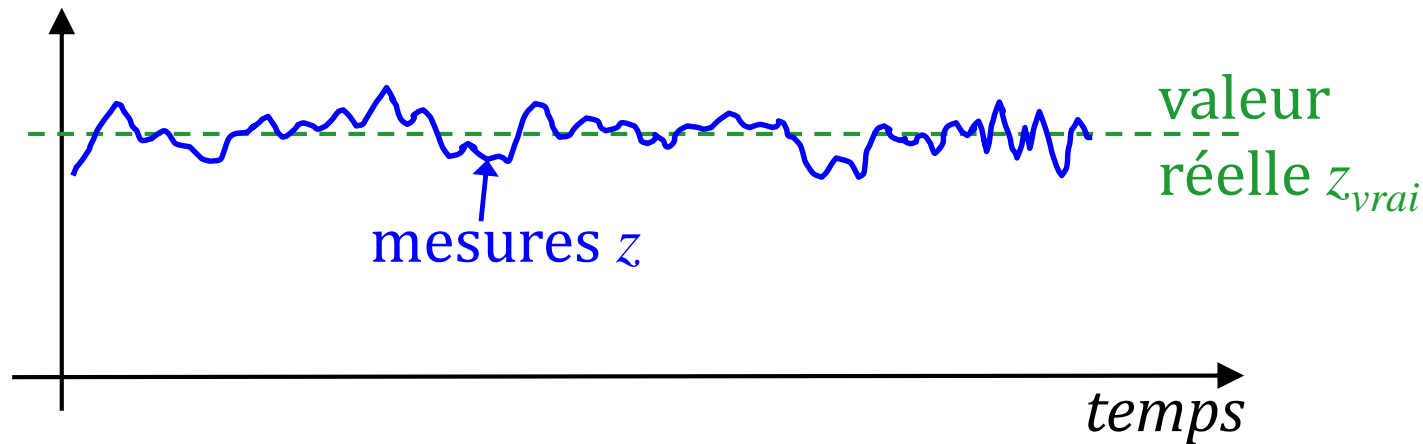
Capteurs : problèmes associés

- Donne une information :
 - **incomplète** (perte de dimension)
 - **bas niveau** (pas un numéro de local, mais un scan de la pièce)

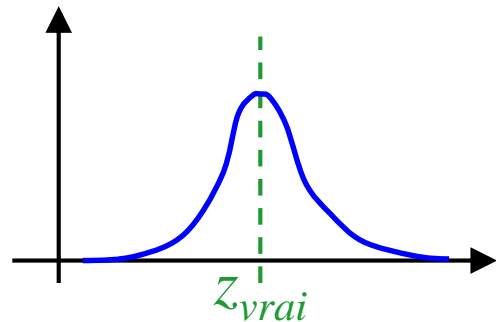


Capteurs : problèmes associés

- Mesures bruitées : fluctuations aléatoires du signal



Souvent modélisées par une distribution gaussienne (normale)



`randn` pour matlab

`numpy.random.normal` pour Python

- Qualité est souvent fonction du prix

Capteurs : problèmes associés

- Pour beaucoup de méthodes (filtrage bayésien, à voir plus tard), il faut avoir un modèle du capteur

$$z = f_{\text{capteur}}(\text{monde})$$

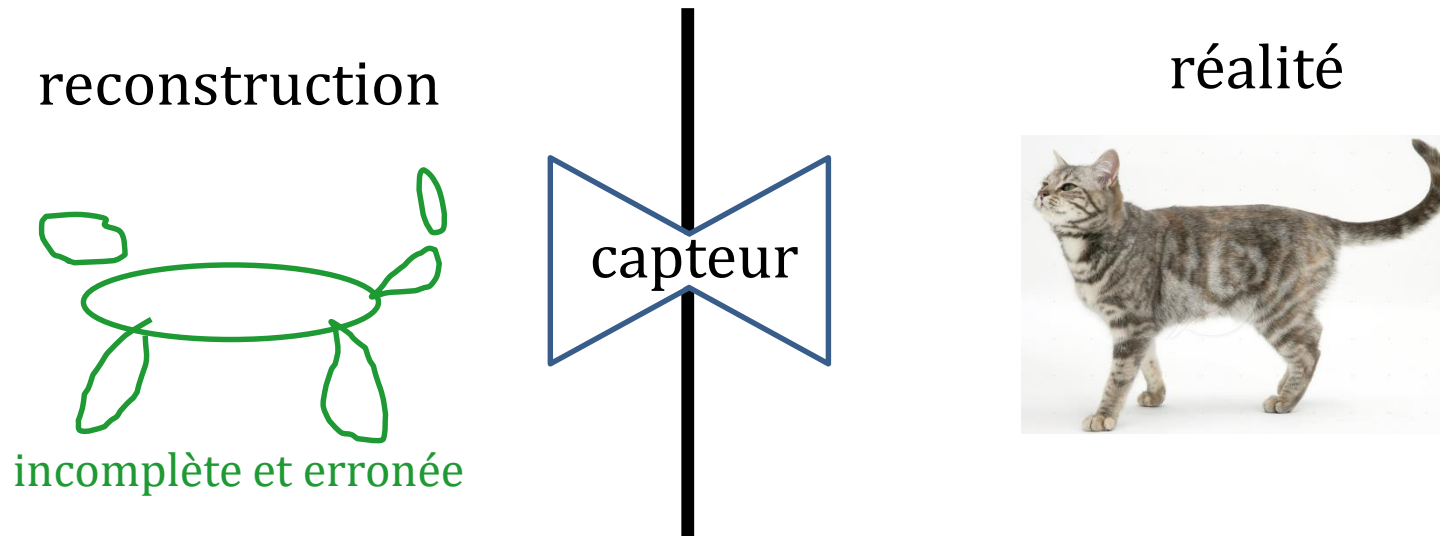
- Plus le modèle f_{capteur} colle à la réalité, meilleure sera l'estimation
- Hélas, impossible de tout modéliser la physique, l'électronique, etc.
- On **approxime** alors...

Inverse de la fonction capteur : f_{capteur}^{-1}

- Si j'ai un bon modèle $z = f_{\text{capteur}}(\text{monde})$, je devrais pouvoir retrouver l'état du monde?

$$\text{monde} = f_{\text{capteur}}^{-1}(z)$$

- Problème de perception :



Test de perception

- Trouvez le truc de magie :
 - dos des cartes passent du bleu au rouge!



Test de perception

- Victime du *perceptual blindness*



Problème bien posé : définition

- (Hadamard) Un modèle mathématique des **phénomènes physiques** devrait avoir les propriétés suivantes :
 1. Une solution **existe**
 2. La solution est **unique**
 3. La solution dépend de façon continue des données (*stable*)
- Si on a les 3 critères, on a un problème **bien posé**
- Est-ce que l'inverse f_{capteur}^{-1} répond à ces critères?

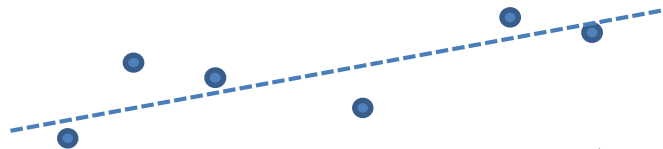
Concept clef!

tiré de Wikipedia

$f_{\text{capteur}}^{-1} \rightarrow$ problème mal posé

1. La solution existe-t-elle?

Le monde ne contient qu'une droite. J'ai des mesures (bruitées) de cette droite.



On pourrait bien sûr faire un problème de moindres carrés, mais ce n'est pas le but de l'exercice ici

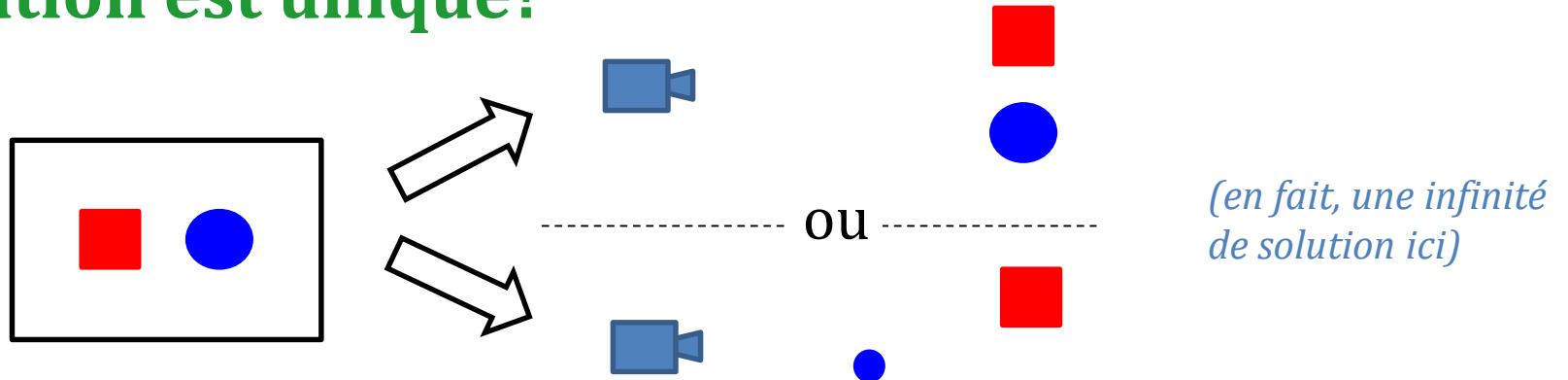
Puis-je retrouver la droite qui passe par toutes les mesures?

NON!

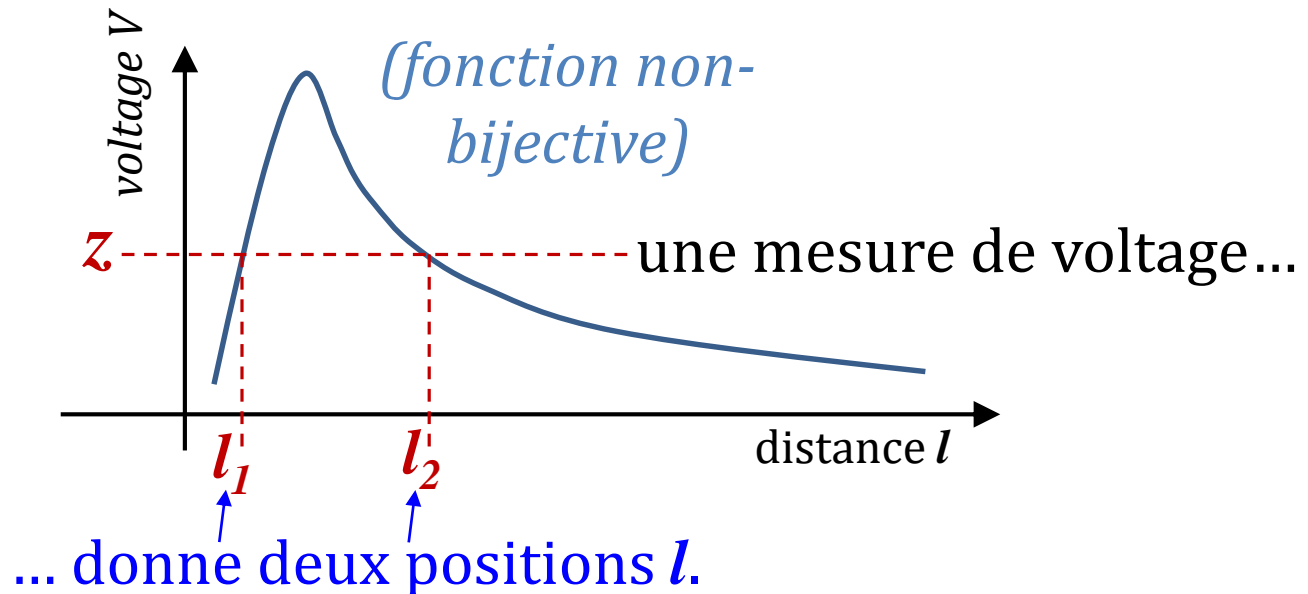
$f_{\text{capteur}}^{-1} \rightarrow$ problème mal posé

2. La solution est unique?

exemple A
photo



exemple B
Télémètre
infrarouge Sharp

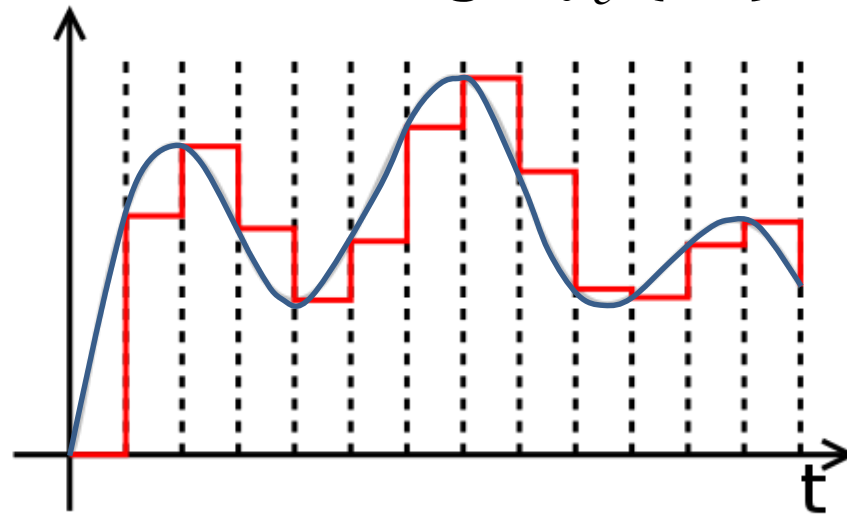


Catalogue de capteurs

Convertisseur Analogue-numérique

Convertisseur analogique – numérique

- Échantillonne un signal à intervalle régulier
 - fréquence d'échantillonnage : f_e (Hz)

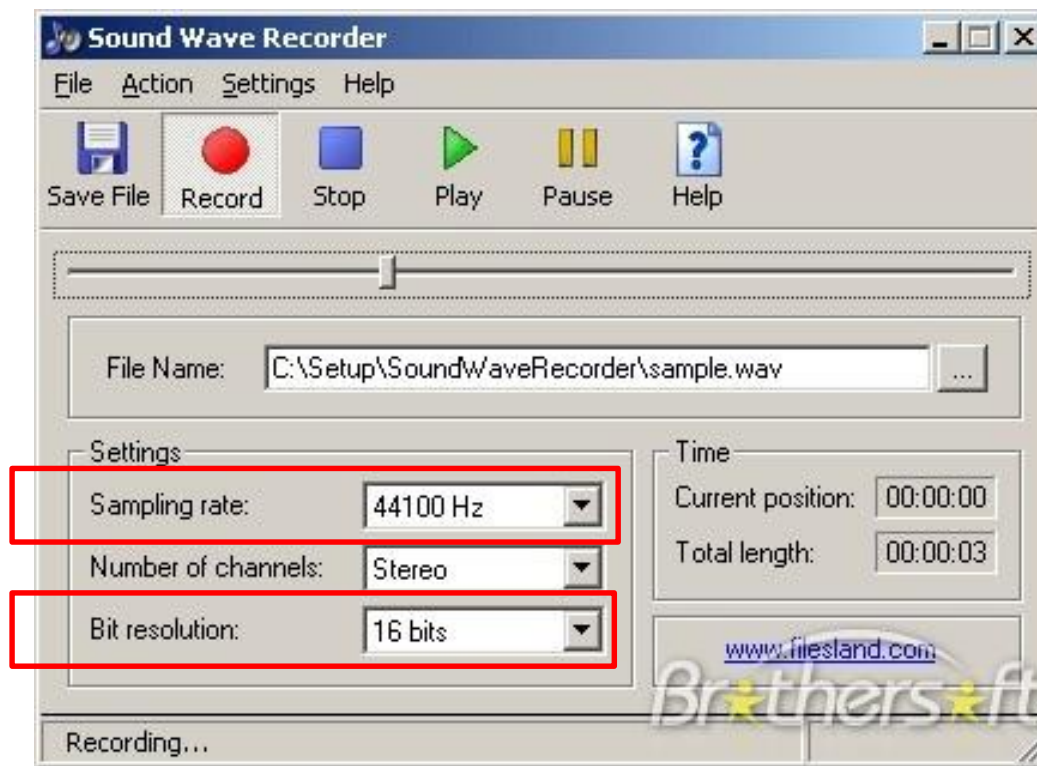


– résolution (bits) 8 bits = 256 niveaux

- Permettre à un ordinateur de « lire » le monde extérieur
- Critère de Nyquist : $f_e > 2 f_{max}$

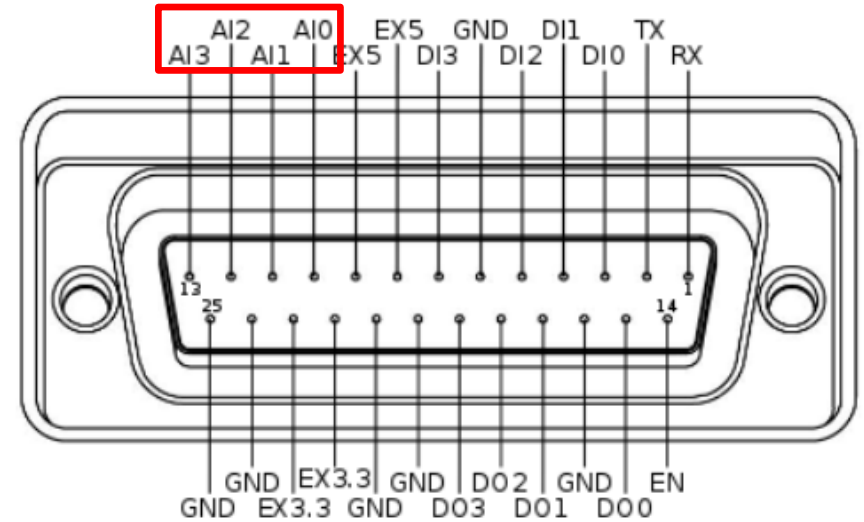
Convertisseur analogique – numérique

- Pensez à une carte de son pour PC...



Convertisseurs sur Kobuki

- 4 entrées analogiques
- 0 V à 3.3 V
- Résolution 12 bits (4096 valeurs)
- Fréquence échantillonnage 50 Hz



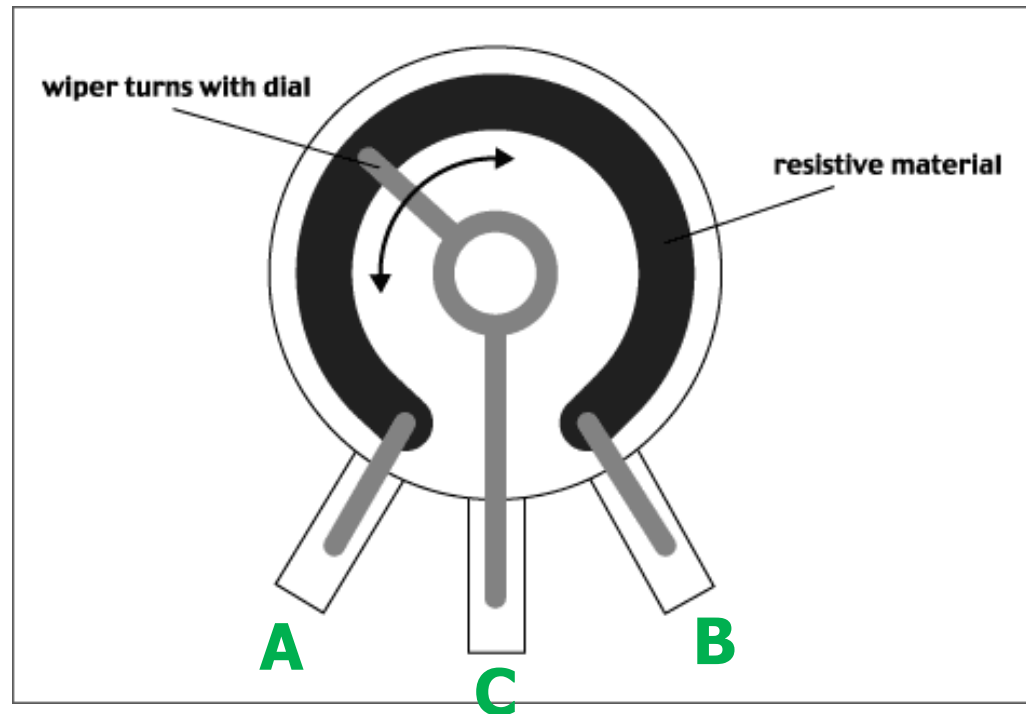
- RX / TX: Serial data connection (RS232; used voltage level is 3.3V!)
- EX3.3 / EX5: 3.3V/1A and 5V/1A power supply
- DI0 - 3: 4 x Digital input (high: 3.3 - 5V, low: 0V)
- DO0 - 3: 4 x Digital output (open-drain, pull-up resistor required)
- AI0-3: 4 x Analog input (12bit ADC: 0 - 4095, 0 - 3.3V)
- GND: Ground
- EN: Used for detecting an external board (connect to external ground)

Capteurs positions

Position Angulaire : Potentiomètre

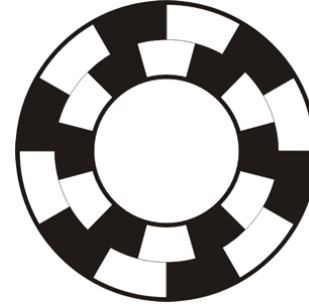
- Résistance électrique variable
- Résistance R_{AC} , R_{BC} est fonction angle rotation
- Capteur linéaire
- Problème :
 - friction
 - bruit si poussière
 - usure

si durée vie 1,000,000 cycles
humain : 5,000 pas/jours
donc 200 jours durée vie



Angle : Codeur optique incrémental

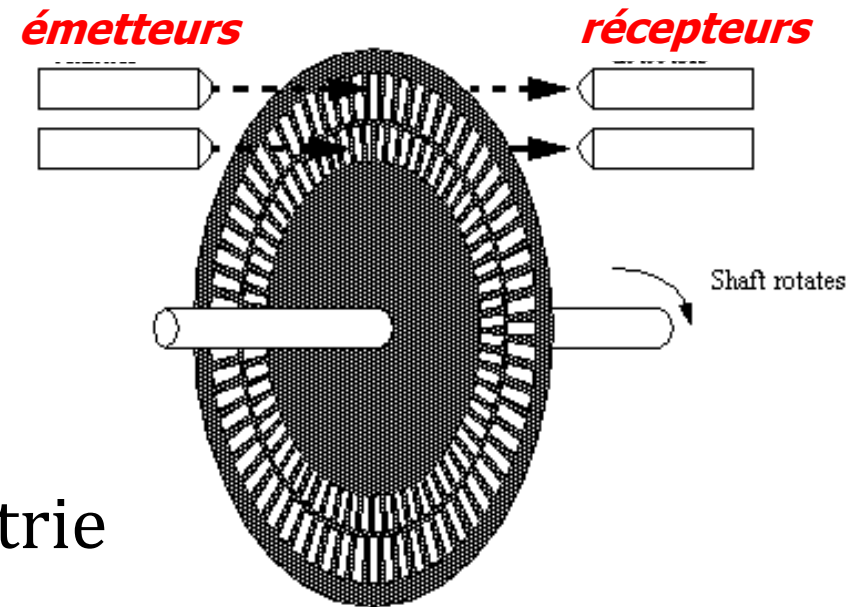
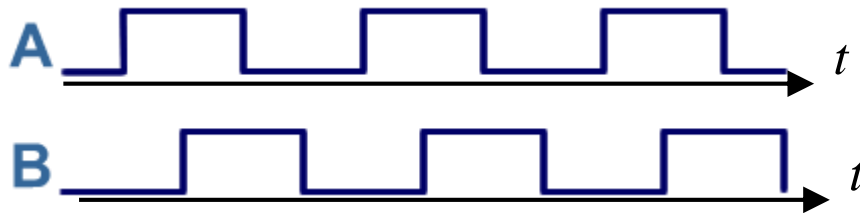
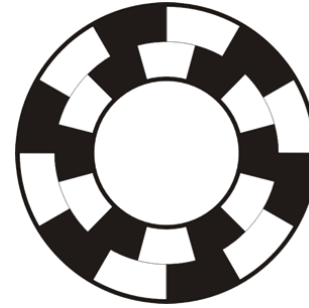
- Encodeur incrémental
 - disque opaque avec fentes
 - décompte des interruptions



Angle : Codeur optique incrémental

- Encodeur incrémental

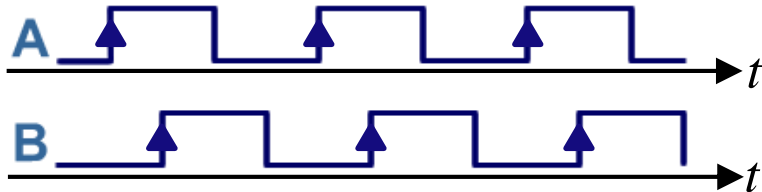
- disque opaque avec fentes
- décompte des interruptions
- direction : 2 paires émetteur-récepteur, hors-phase
 - encodage quadrature



- fréquence élevée : 100 *kHz*
- placé sur axe de route : odométrie

Décodeur quadrature pour encodeur optique

- Matériel dédié pour compter montée/descente
- Haute fréquence (>50 kHz) trop vite pour *interrupt* ordinateur
- **A** monte avant **B**
– *incrémente*



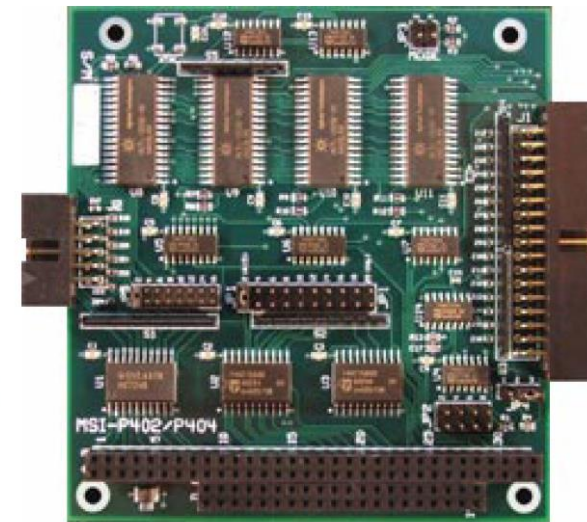
- **B** monte avant **A**
– *décrémente*

MSI PC/104
Embedded PC Series

MSI-P402 Quadrature
Decoder/Counter Card

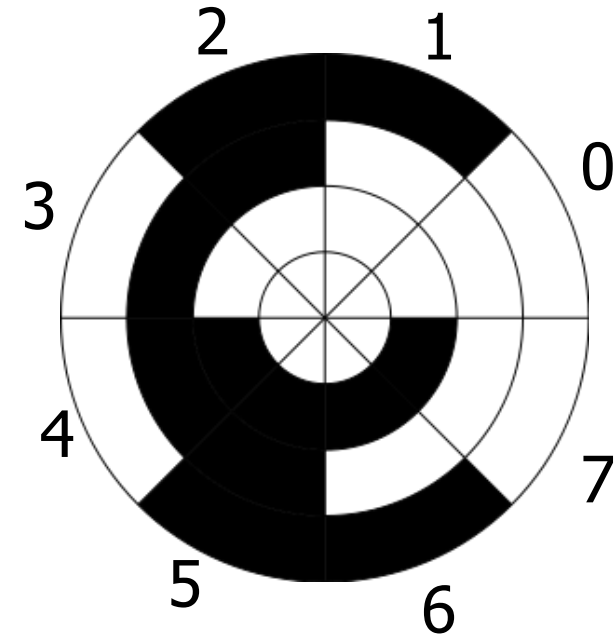
FEATURES

- ◆ 2, 4, 6 or 8 channels of quadrature encoder inputs.
- ◆ 32-bit binary up/down counter with selectable 1X, 2X or 4X decoding using a Agilent HCTL-2032 decoder IC.
- ◆ Ideal for monitoring shaft positions and rotations in machinery and robotic applications.
- ◆ Individual software reset for each channels.
- ◆ Selectable interrupts IRQ3 thru IRQ9 for processing roll-overs at $\pm 2,147,483,647$ counts.
- ◆ Single +5V operation.
- ◆ 8-bit stackthrough PC/104 with I/O mapped 16-bit addressing.
- ◆ Jumper selectable card addresses.
- ◆ Operating temperature range -40°C to 85°C .
- ◆ Two-year warranty from date of shipment.

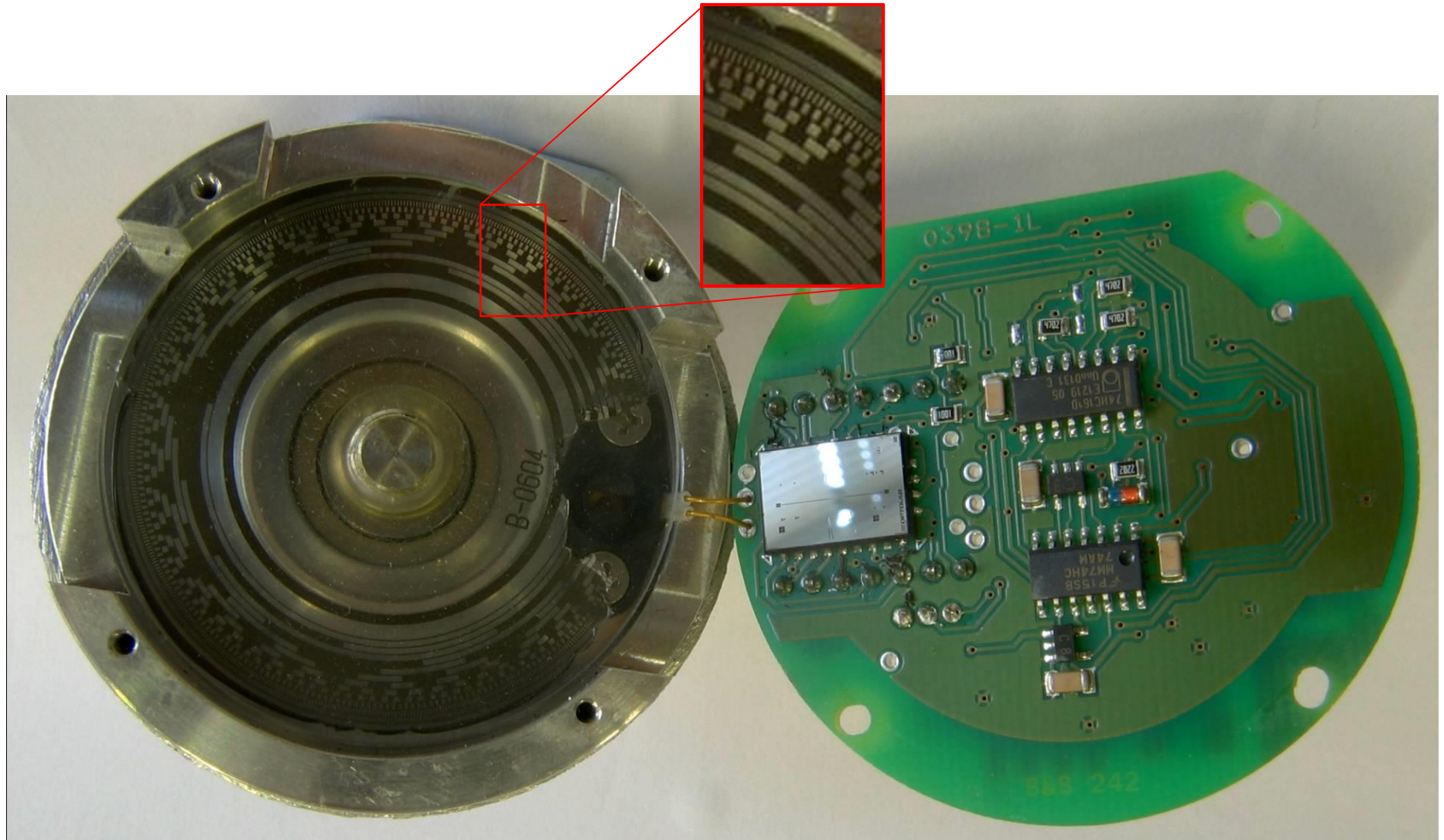


Angle : Codeur optique absolu

- Encodeur précédent : relatif (changement)
- Ici encodeur absolu
- Un seul bit change par déplacement
- Code Grey:
 - 0:000, 1:100, 2:110, 3:010,
 - 4:011, 5:111, 6:101, 7:001
- Moins sensible aux erreurs d'enlignement des lumières que si encodé en binaire direct



Angle : Codeur optique absolu

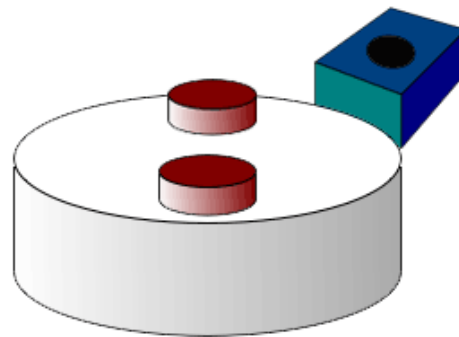


Capteurs proximité

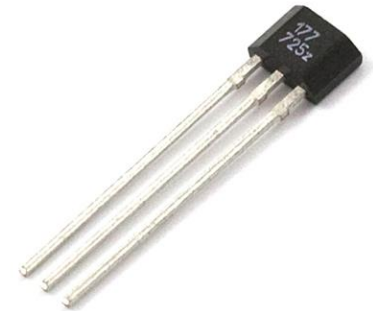
Capteurs magnétique interrupteur

- Détection angle de référence
 - avec encodeur optique incrémental, on obtient angle absolu (avec phase de calibration)

 aimant



capteur
magnétique



Encodeur Kobuki : magnétique

- 52 impulsions/tour de moteur
- 2578.33 impulsions/tour de roue
- 11.7 impulsions/mm

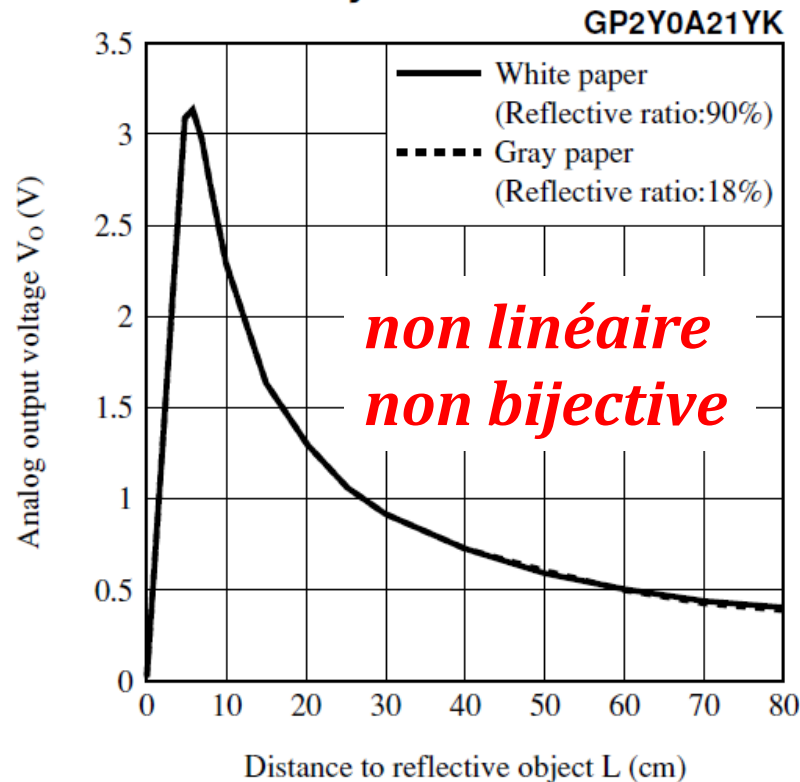
Capteurs de proximité infrarouge

- Capteur proximité très simple
 - assez répandu en robotique
- Fonctionne par
 - émission IR modulée (quelques kHz par exemple)
 - distinguer sources ambiantes comme le soleil ou l'éclairage
 - détection des réflexions provenant de la surface

Capteur infrarouge (Sharp GP2Y0A21YK)

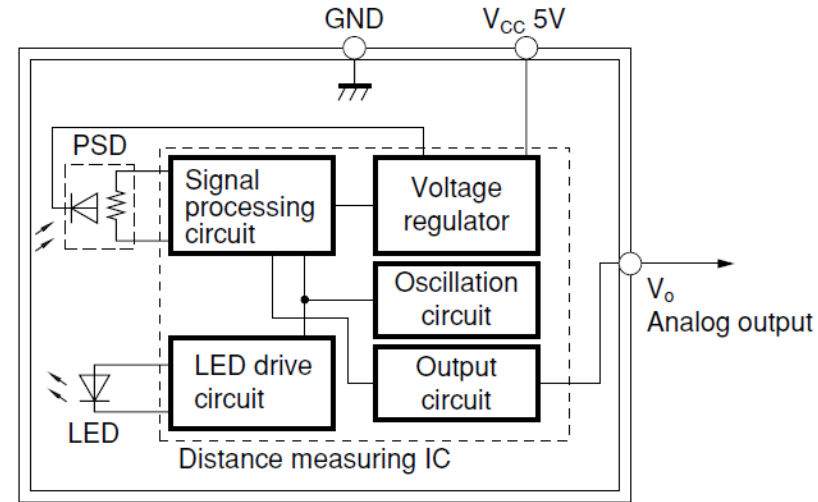
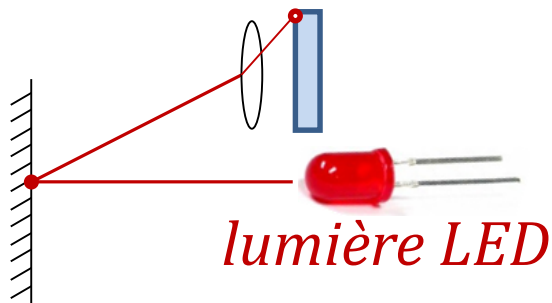
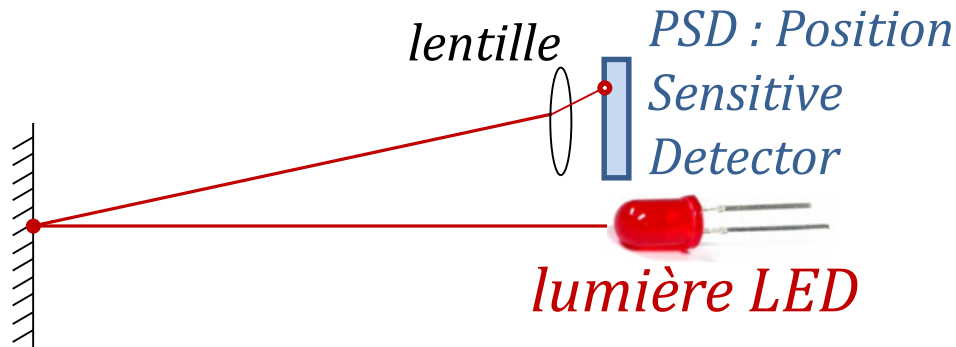
- Paire émetteur-récepteur infrarouge
- Coût peu élevé : 15 \$

Fig.5 Analog Output Voltage vs. Distance to Reflective Object



Capteur infrarouge (Sharp GP2Y0A21YK)

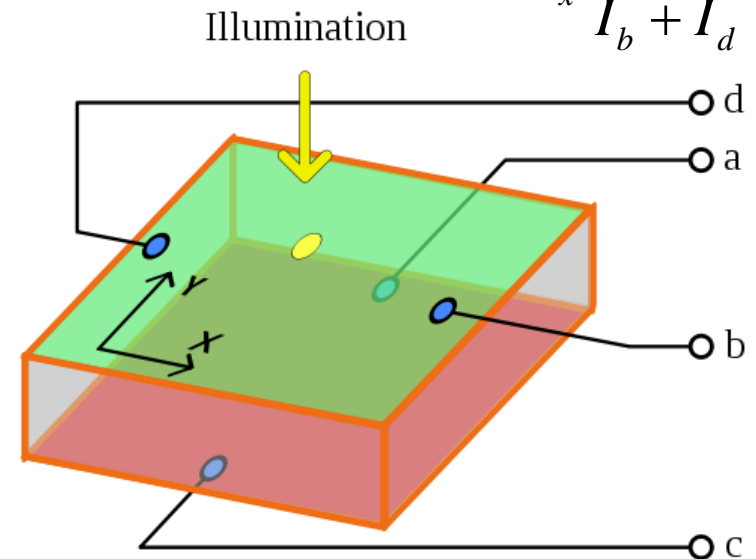
- Basée sur mesure de la position d'un point lumineux
- « caméra continue »



Position Sensitive Device

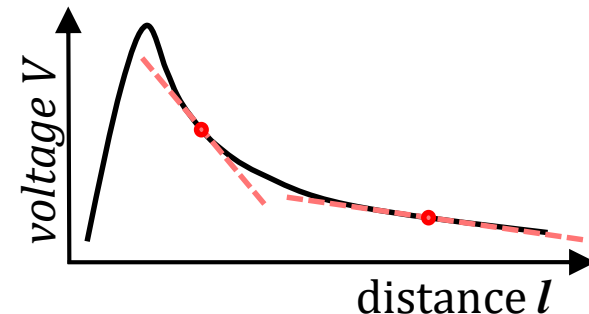
PSD : diode

$$x = k_x \frac{I_b - I_d}{I_b + I_d}$$



Capteur IR Sharp : problèmes

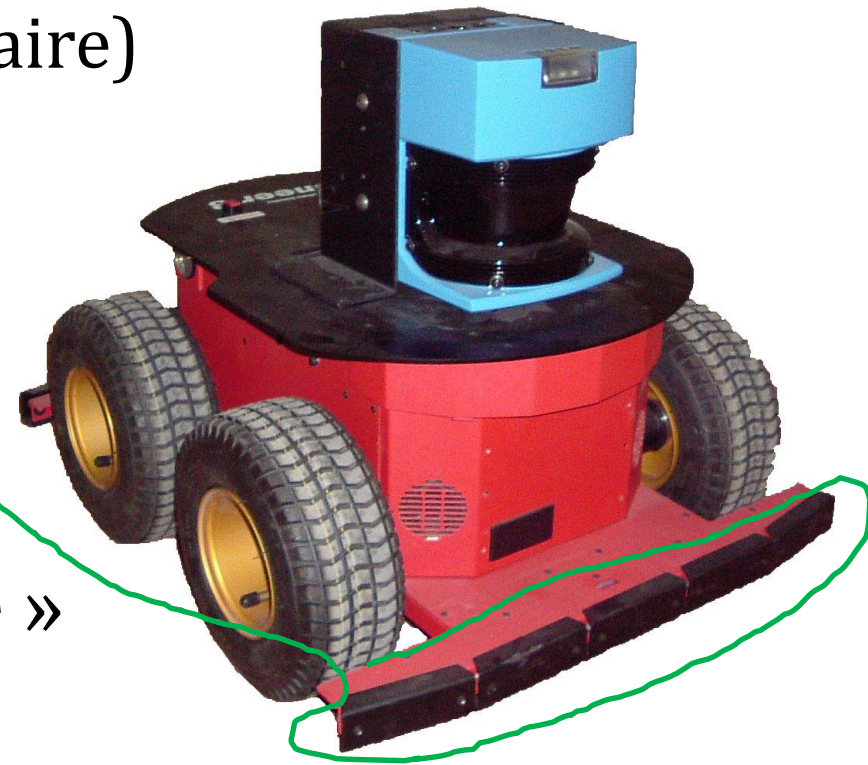
- Si retour signal IR \rightarrow obstacle présent
- Absence de retour IR \rightarrow absence d'obstacle?
 - “Absence of evidence is not evidence of absence.”
C. Sagan
 - objet noir lointain
 - miroir/lustre
 - angle prononcé de la surface
- Capteurs proximité IR sont de courte portée
 - distance maximale 50 *cm* – 2 *m*
- Peu précis, surtout à grande distance
(perte de sensibilité)



Capteurs tactiles

Capteurs tactiles : contact

- Détection contact mécanique avec obstacle
 - interrupteur électrique (binaire)
- Pare-choc sensible
 - pression/force
- « Dernière ligne de défense »



Capteurs tactiles : pression

- Peau synthétique de caoutchouc résistif
- Pression → changement résistance
- Détection par matrice contact électrique
 - balayage 2D de résistance électrique de la surface



Flexible Robot Skin



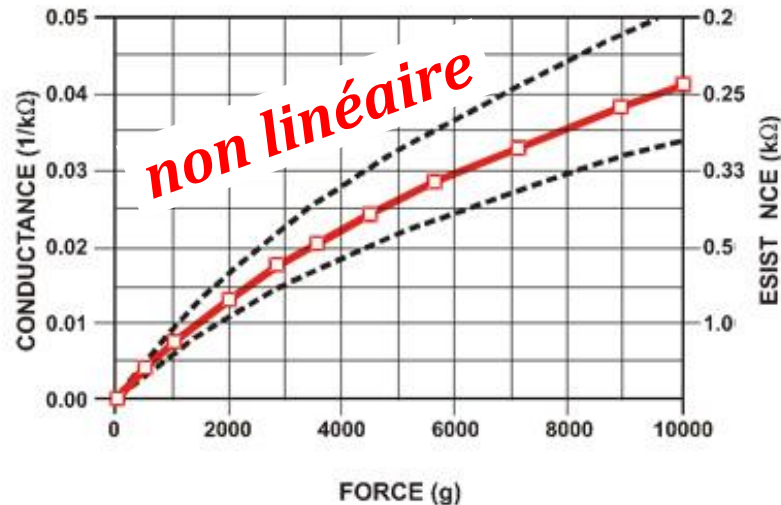
Laboratoire de
robotique

de l'Université Laval

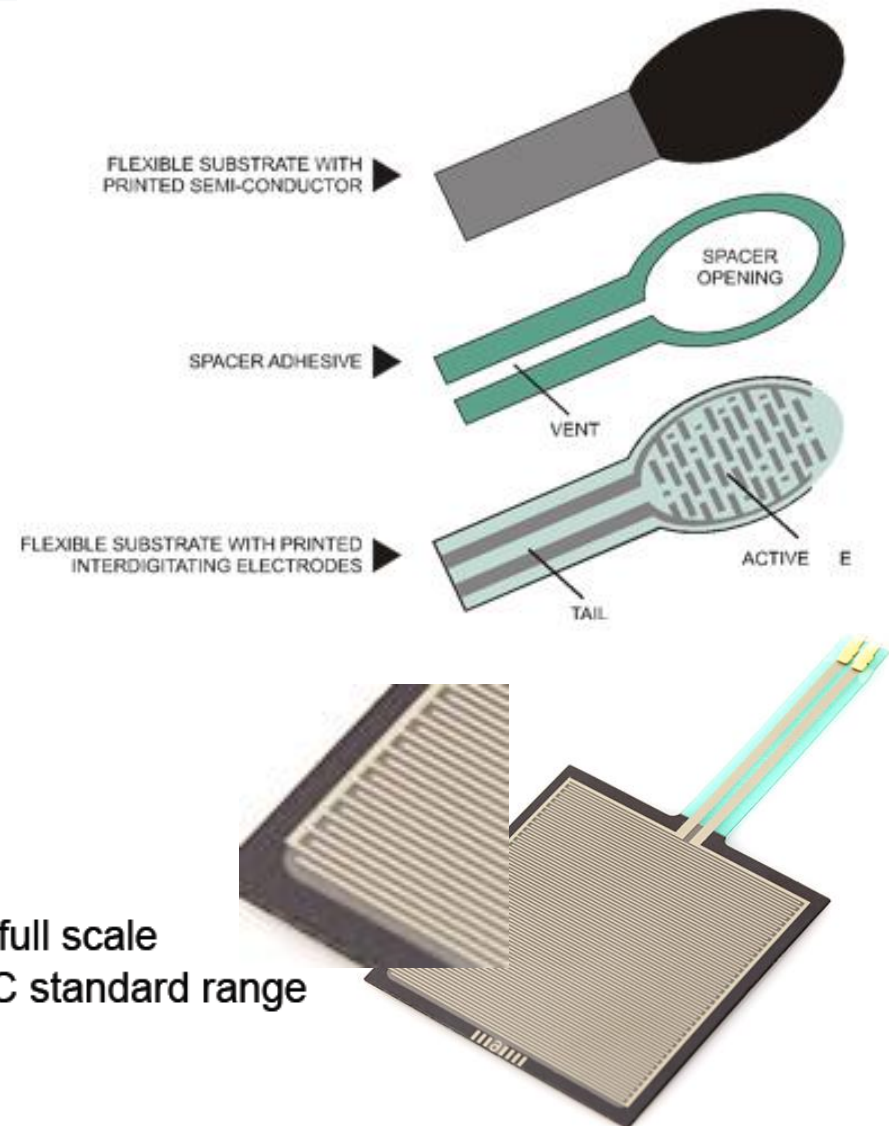
Génie mécanique

Capteurs tactiles : FSR d'Interlink™

• Force Sensing Resistors

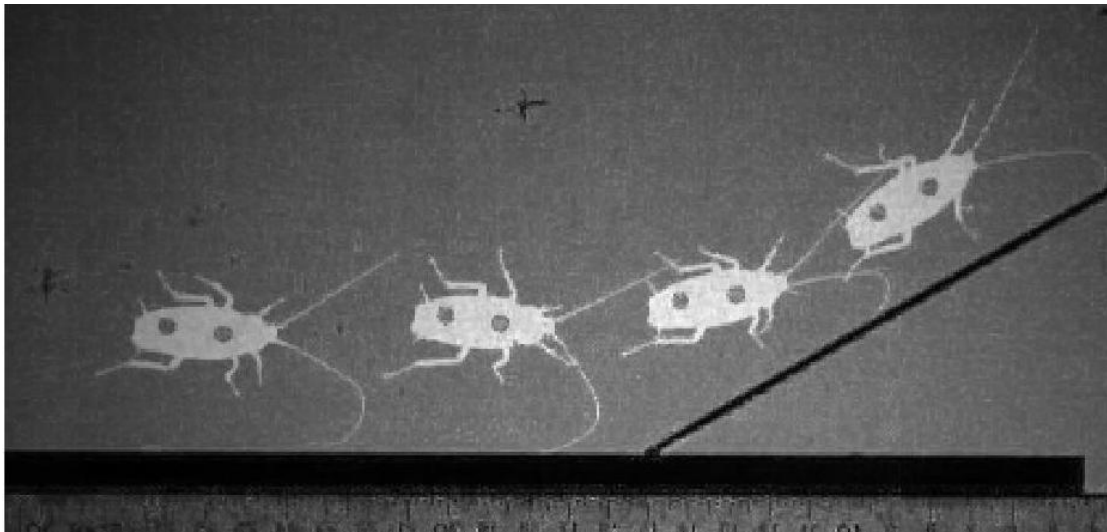


- Highly durable, up to 10M actuations without failure
- Actuation Force as low as 2 grams
- Wide force sensitivity range 0.1Kg - 10Kg
- High Force resolution less than 0.5% Of Full Scale
- Customizable range of sizes
- Highly Repeatable Force Reading; As low as 2% of full scale
- Wide operating temperature range; from -20C to 85C standard range
- Simple circuit implementation



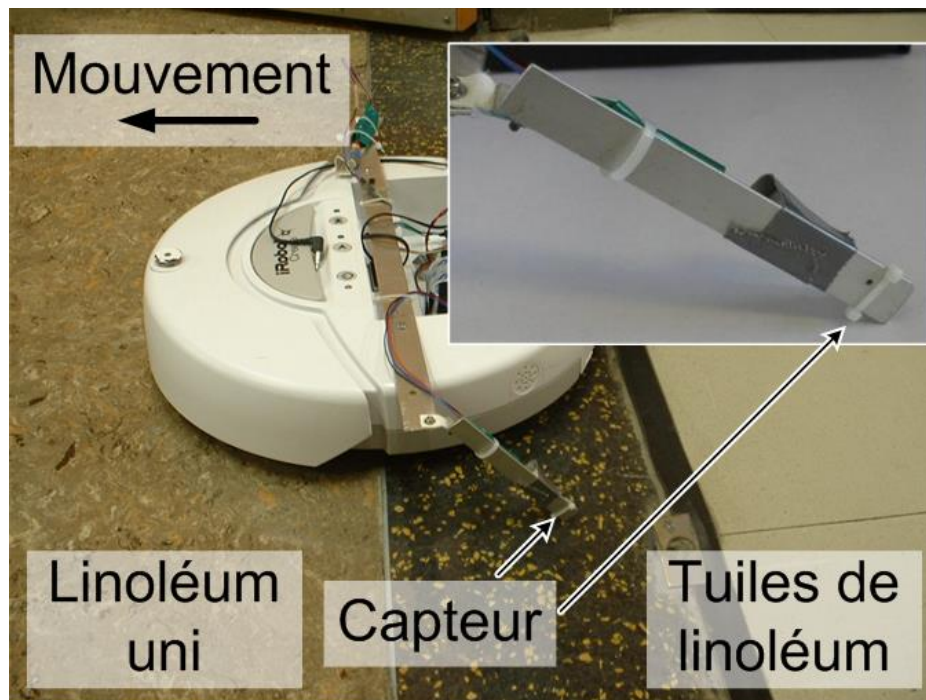
Capteurs tactiles : vibrisses et antennes

- Information sur la texture d'une surface
 - localisation
- Évitement obstacle aveugle



Capteurs tactiles : vibrisses et antennes

- Analyse des vibrations (2009)

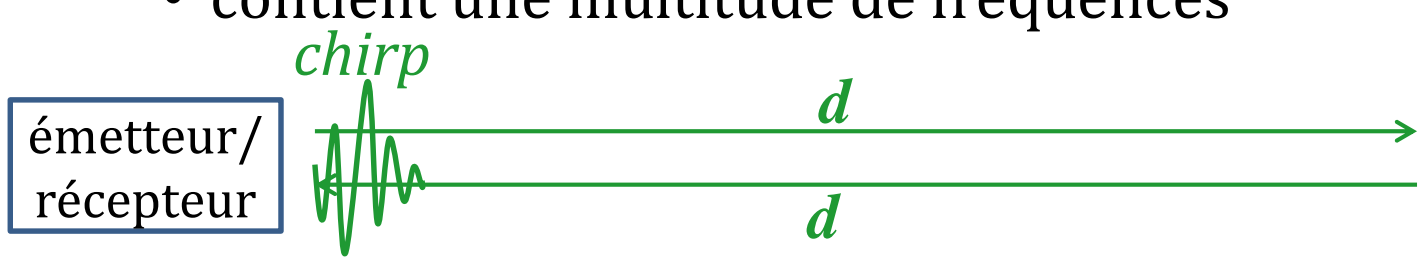


P. Giguère, G. Dudek, Surface identification using simple contact dynamics for mobile robots, ICRA 2009.

Capteurs par temps de vol

Sonar

- Appelé aussi *capteur ultrasonique*
- Même principe que les chauves-souris
 - émission son court (*chirp*), par exemple 1.2 ms
 - contient une multitude de fréquences



- Doit détecter l'écho (*pas toujours évident*)
- Distance par temps de vol

– Vitesse du son dans l'air $v \approx 330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ $d = \frac{vt}{2}$

– distance minimum = $165 t_{chirp}$ (21 cm pour 1.2 ms)

(pour laisser le temps aux vibrations génératrices du module piézo-électrique de disparaître)

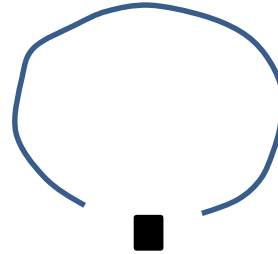
Sonar : faisceau

- Forme du faisceau

idéal



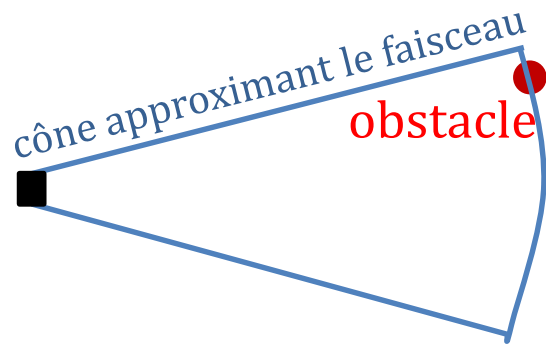
large



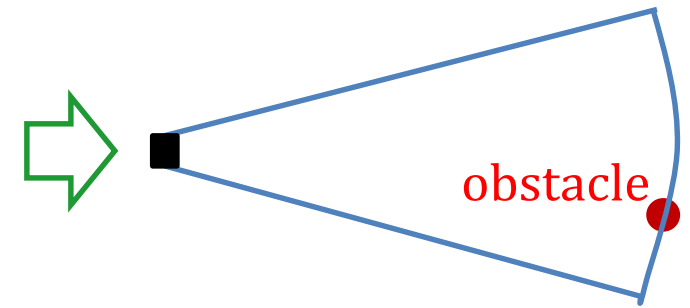
étroit



- Impacte la résolution spatiale du capteur :



donne approx. la même réponse (même temps t pour l'écho)

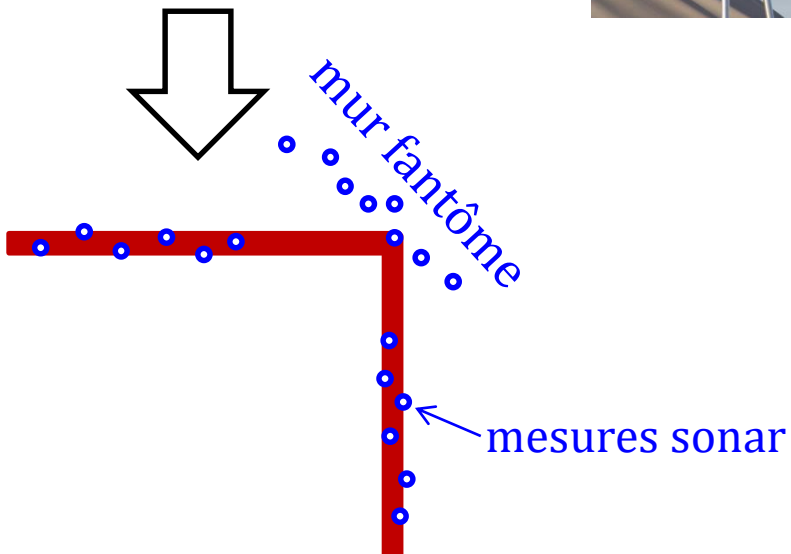
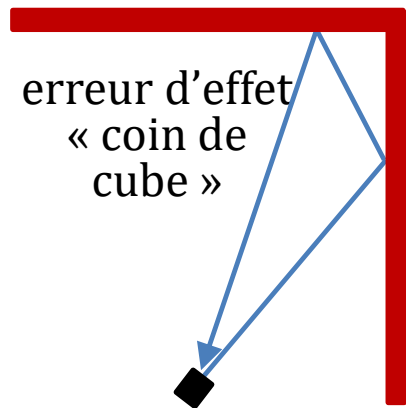
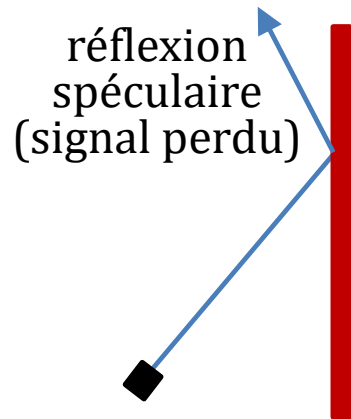


Sonar : longueur d'onde

On ne peut
différencier des
objets plus petit que
la longueur d'onde λ



Sonar : réflexions



(réflecteur radar pour bateau)



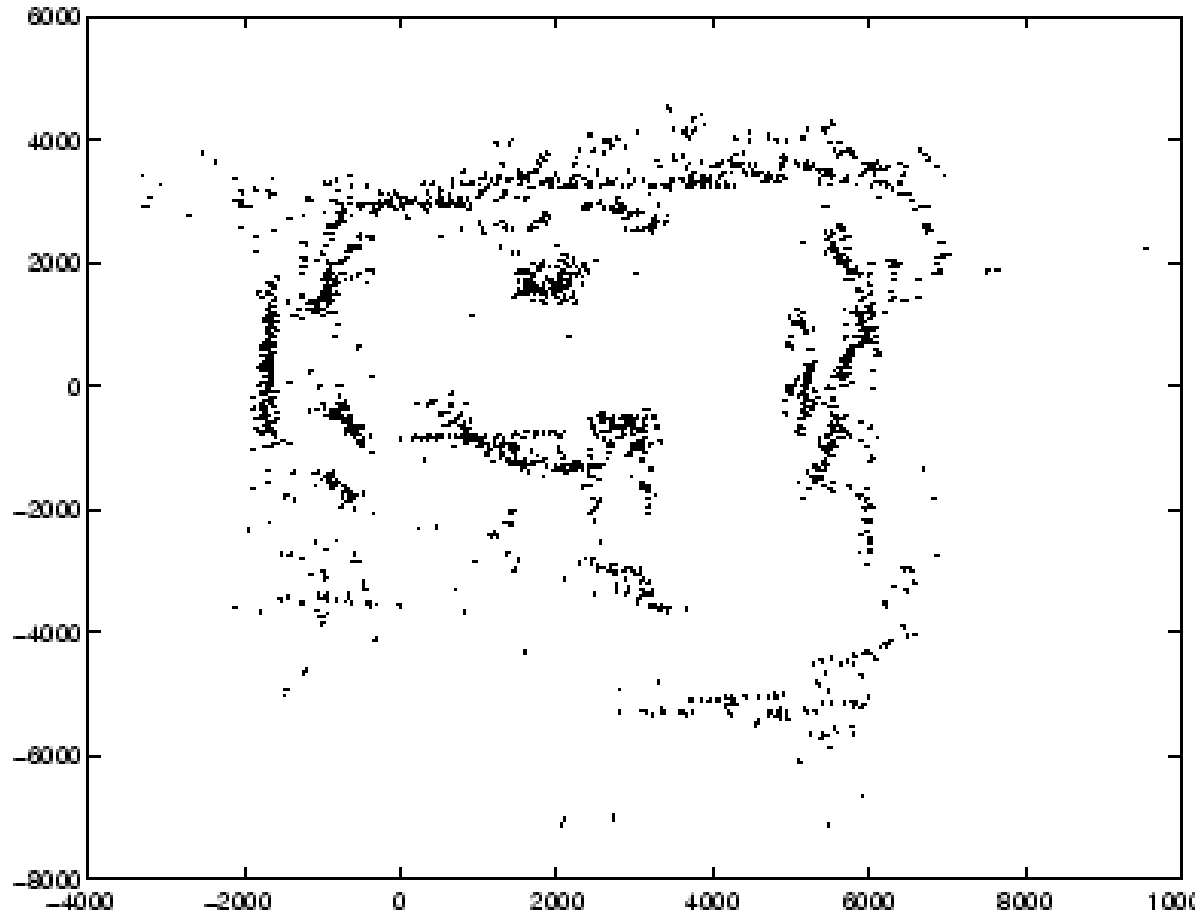
(catadioptr)



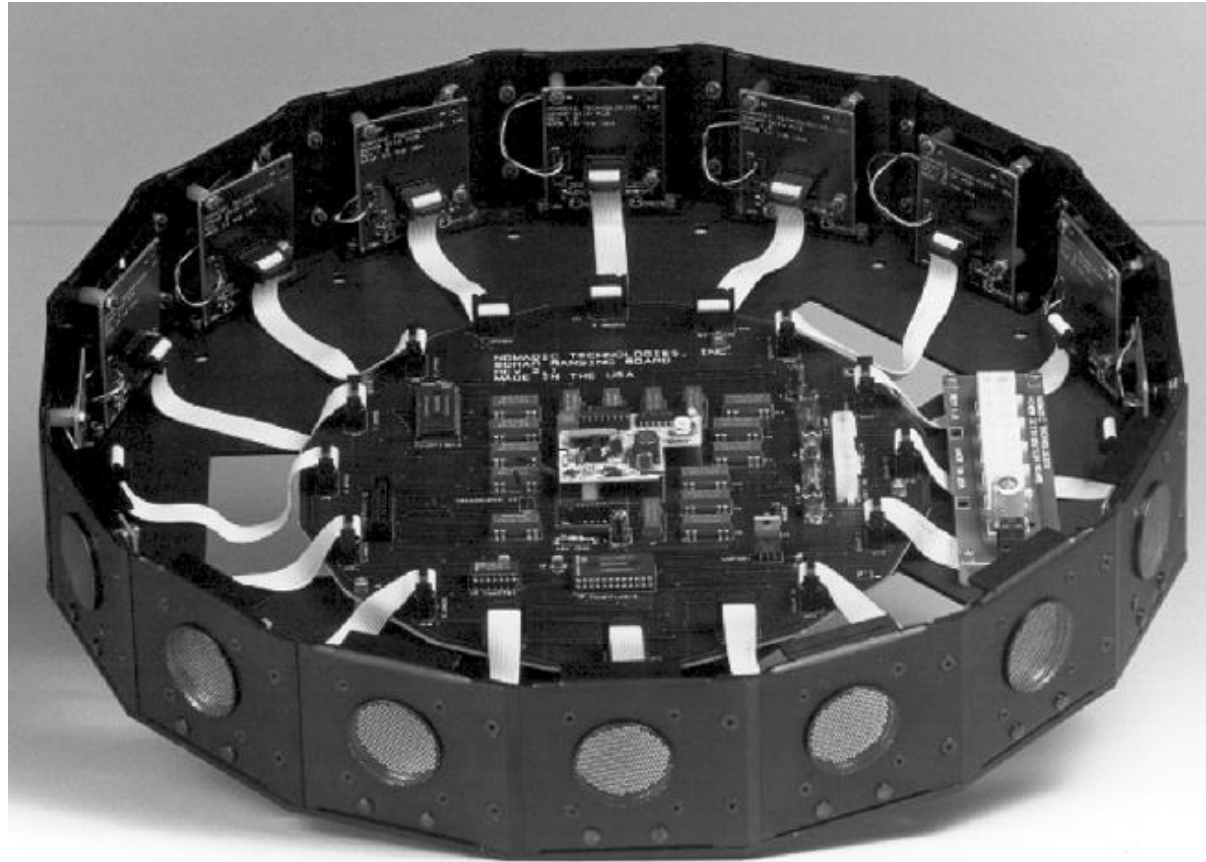
Carte SONAR d'une pièce

donne
une carte
« floue »
du monde

d'où
l'importance
de gérer les
bruits/
incertitudes

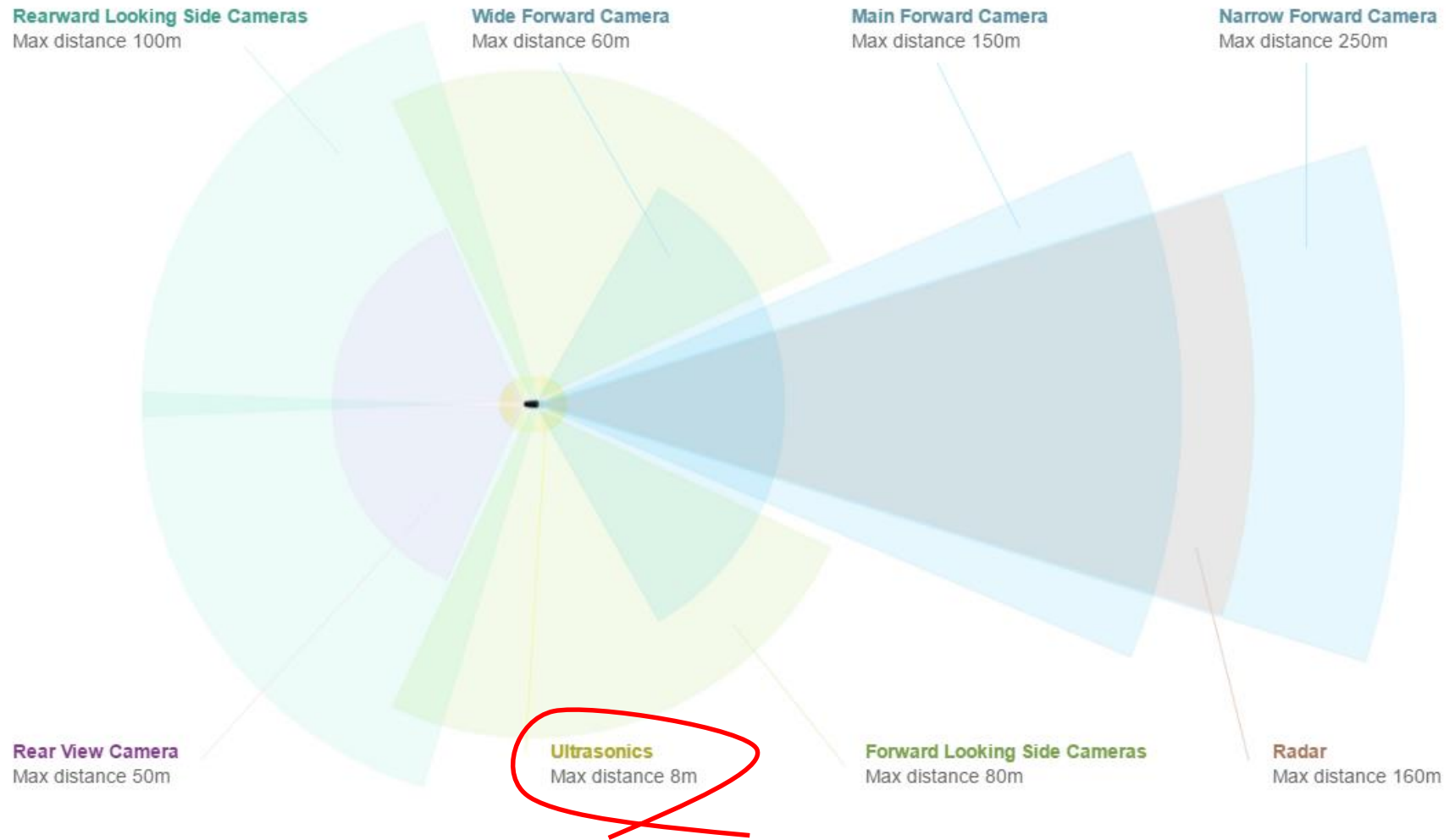


Capteurs sonar sur robot



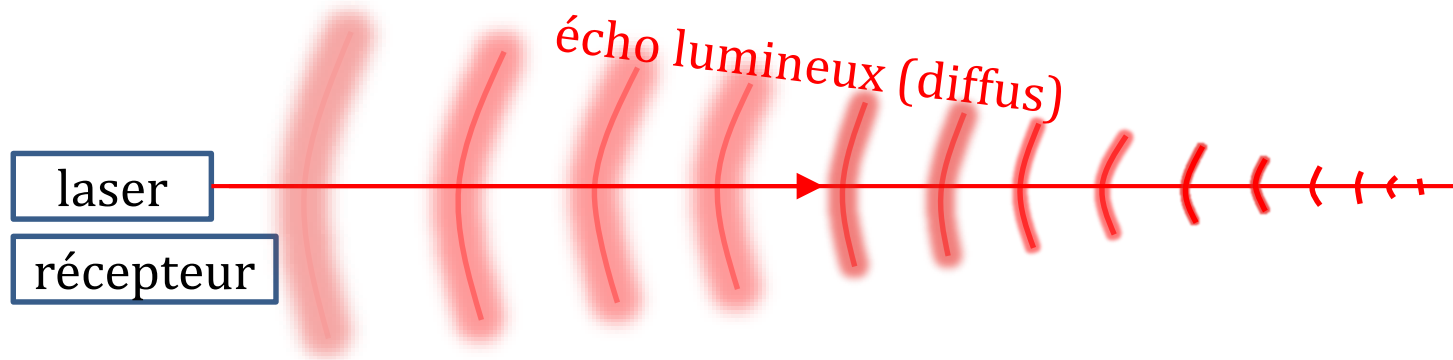
- Anneau de capteurs: problème de *cross-talk*...
(diaphonie)
interférence avec capteurs actifs

Capteurs sonar sur Tesla



Télémètre (*Laser Range Finders, LiDAR*)

- Mesure du « temps de vol » d'une impulsion laser (1D)



- par délai (horloge)
- par différence de phase
- Précision de l'ordre mm
- Portée dépend de la puissance (de m à plusieurs km)
- Difficulté détection de la réflexion
 - verre
 - objets noir
 - grilles d'aération

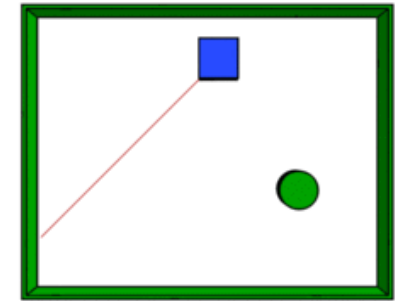
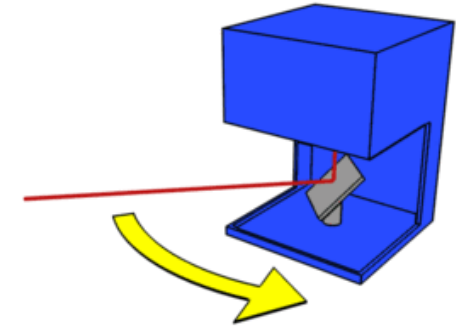
LiDAR

- 2D : Balayage par miroir rotatif



encodeur d'angle (optique)

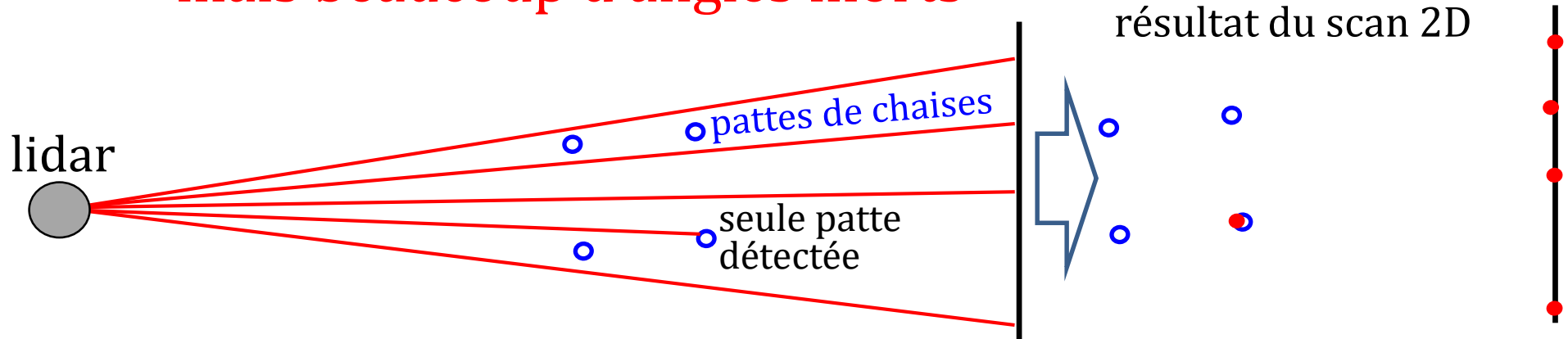
balayage 2D



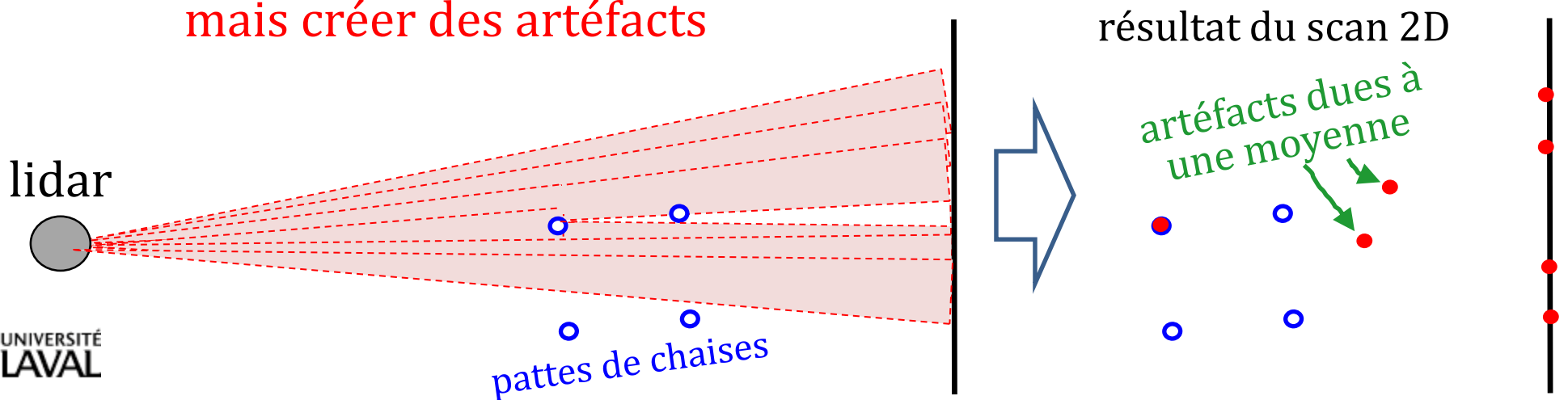
source : wikipédia

LiDAR : largeur du faisceau

- **étroit** : longue portée, bonne résolution spatiale,
mais beaucoup d'angles morts



- **large** : plus sécuritaire (car pas d'angles morts)
mais créer des artéfacts






LiDAR SICK

portée change avec la réflectivité



Technical data

Type	LMS100-10000 	LMS111-10100 	LMS120-10000 ¹⁾ 
Max. range/ at 10% reflectivity	50 m/ 10 m	50 m/ 18 m	50 m/ 10 m
Scanning angle	Max. 270°		
Angular resolution	0.5°/0.25° adjustable		
Statistical error	± 40 mm		
Systematic error	± 30 mm		
Data interfaces	Ethernet 100 Mbit TCP/IP, UDP; RS-232; CAN		
Supply voltage	10.8V to 30V DC		9V to 30V DC
Laser Protection Class	Laser Class 1 (IEC 608251, corresponds to 21 CFR 1040.10 and 1040.11)		
Enclosure rating	IP 65 acc. to EN 60529, section 14.2.5	IP 67 acc. to EN 60529, section 14.2.7	IP 65 acc. to EN 60529, section 14.2.5
Housing alloy	Excellent weather resistance acc. to DIN/EN 1061988, Table 3		
Dimensions (WxHxD)	102 mm x 152 mm x 105 mm ²⁾	102 mm x 162 mm x 105 mm	102 mm x 152 mm x 105 mm ²⁾
Weight ³⁾	< approx. 1.1 kg		
Operating temperature	0 °C to +50 °C	-30 °C to +50 °C	0 °C to +50 °C

LiDAR Hokuyo

URG-04LX

HOKUYO

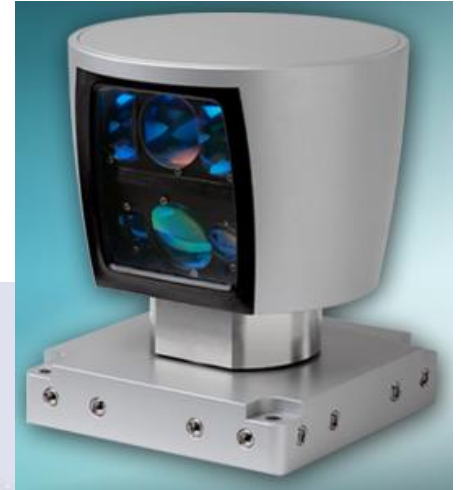
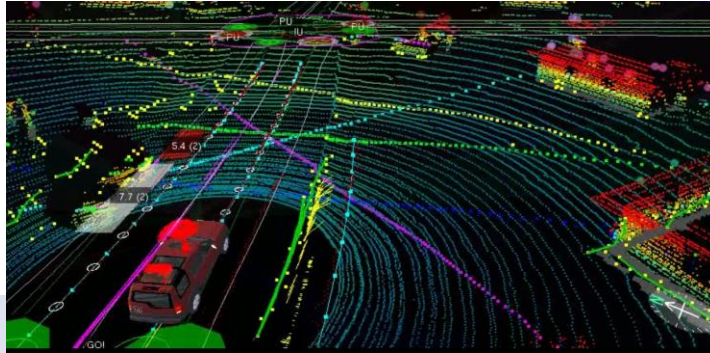
Specifications

Products	Scanning Laser Range Finder
Model No.	URG-04LX
Light source	Semiconductor laser $\lambda = 785\text{nm}$, Laser safety class 1(IEC60825-1)
Power source	5VDC, $\pm 5\%$
Current consumption	500mA or less(rush current 800mA)
Detectable distance and objects	20mm to 4000mm, white Kent sheet 70mm x 70mm*
Accuracy	(Official 20 to 1000mm : $\pm 10\text{mm}$, 1000 to 4000mm : $\pm 1\%$ of measurement) (White Kent sheet 70mm x 70mm)
Resolution	1mm
Scanning angle	240°
Angle resolution	Approx. 0.36° (360° / 1024 steps)
Scanning time	100msec/scan
Interface	RS-232C(19.2k, 57.6k, 115.2k, 500k, 750kbps), USB : Ver.2.0 FS mode(12Mbps)
Ambient temperature/ humidity	-10 to +50°C, 85%RH or less(without dew and frost)
Protective structure	Optics : IP64, Case : IP40
Weight	Approx.160g
Material	Polycarbonate



LiDAR Velodyne HDL-64E

- 75,000\$ US

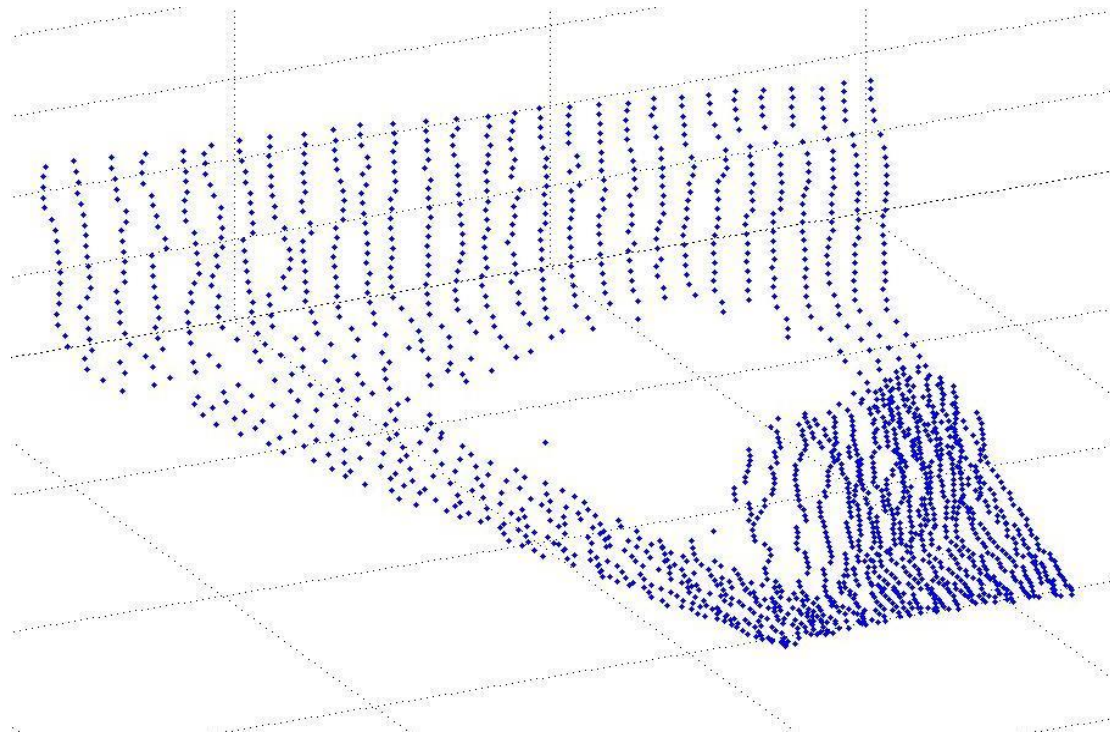


- 64 lasers/detectors
- 360 degree field of view (azimuth)
- 0.09 degree angular resolution (azimuth)
- 26.8 degree vertical field of view (elevation) - +2° up to -24.8° down with 64 equally spaced angular subdivisions (approximately 0.4°)
- <2 cm distance accuracy (one sigma)
- 5-15 Hz field of view update (user selectable)
- 50 meter range for pavement (~0.10 reflectivity)
- 120 meter range for cars and foliage (~0.80 reflectivity)
- >1.333 M points per second
- Operating temperature - 10° to 50° C
- Storage temperature - 10° to 80° C



LiDAR

- Apparence d'une voiture par balayage...



LiDAR : Signal d'amplitude de retour

- « Caméra » active qui mesure la réflectance
- Indépendamment de l'illumination ambiante



(a) Camera intensity image.



(b) Processed lidar intensity image.

Visual Teach and Repeat Using Appearance-Based Lidar

Colin McManus¹, Paul Furgale², Braden Stenning³, and Timothy D. Barfoot³

2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation

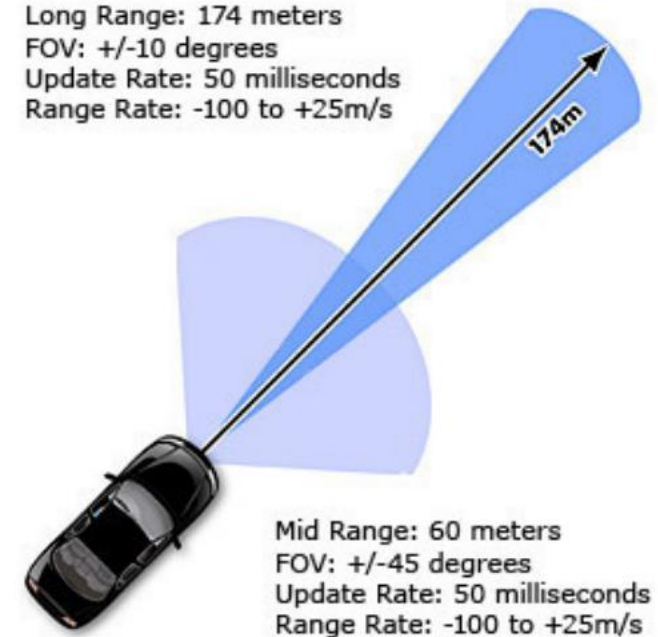
RADAR

- Fréquence radio 1 - 12.5 GHz
 - peu affecté par pluie, brouillard, poussière, fumée
- Pulsé : temps de vol
- Changement de fréquence:
 - effet Doppler → vitesse cible
- Signal difficile à interpréter

Delphi ESR



Long Range: 174 meters
FOV: +/-10 degrees
Update Rate: 50 milliseconds
Range Rate: -100 to +25m/s

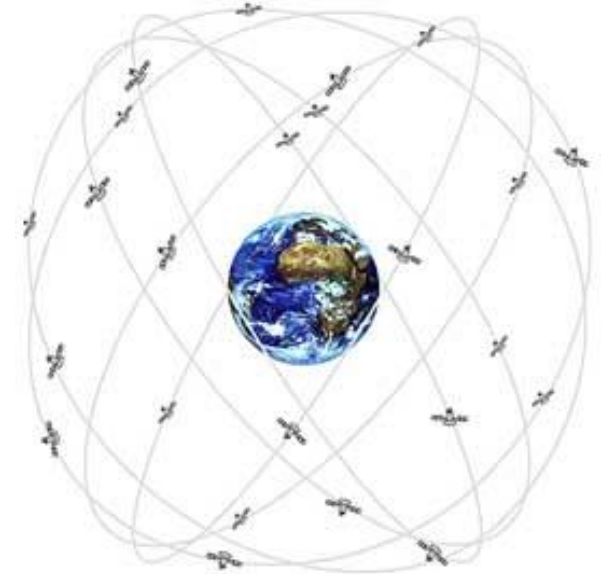


Mid Range: 60 meters
FOV: +/-45 degrees
Update Rate: 50 milliseconds
Range Rate: -100 to +25m/s

GPS (Global Positioning System)

- GPS utilise une constellation de satellites (24-32) à 20 000 *km*.
- Satellites diffusent position et temps.
- Délai mesuré sur transmission de 4 satellites + trilatération.
- Fréquence du positionnement 1-2 *Hz*
- Signaux pas toujours présents:
 - centre-ville (effet canyon), mines, édifices, autre planète, etc.
- Multi-path
- Précision au sol : 10-100 *m*

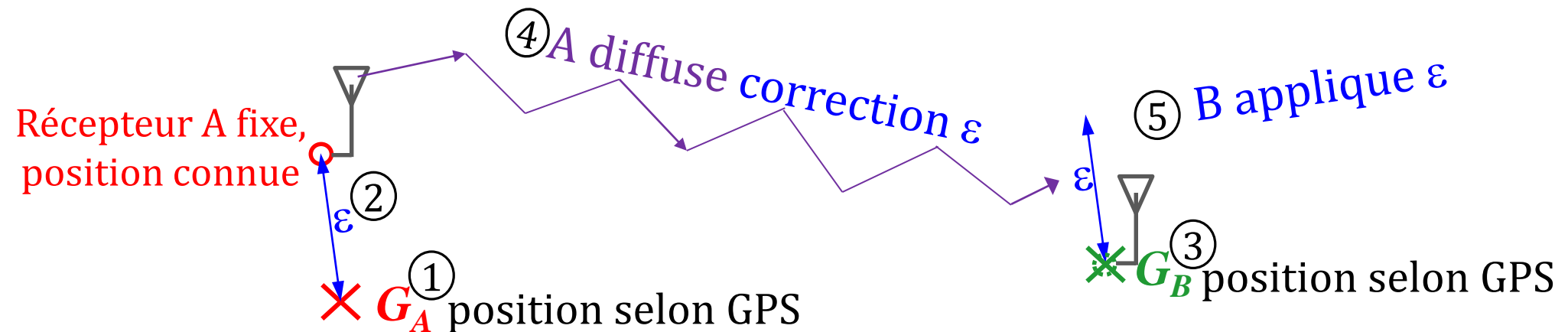
distances à l'échelle



Error	Value
Ionosphere	4.0 meters
Clock	2.1 meters
Ephemeris	2.1 meters
Troposphere	0.7 meters
Receiver	0.5 meters
Multipath	1.0 meter
Total	10.4 meters

DGPS (Differential GPS)

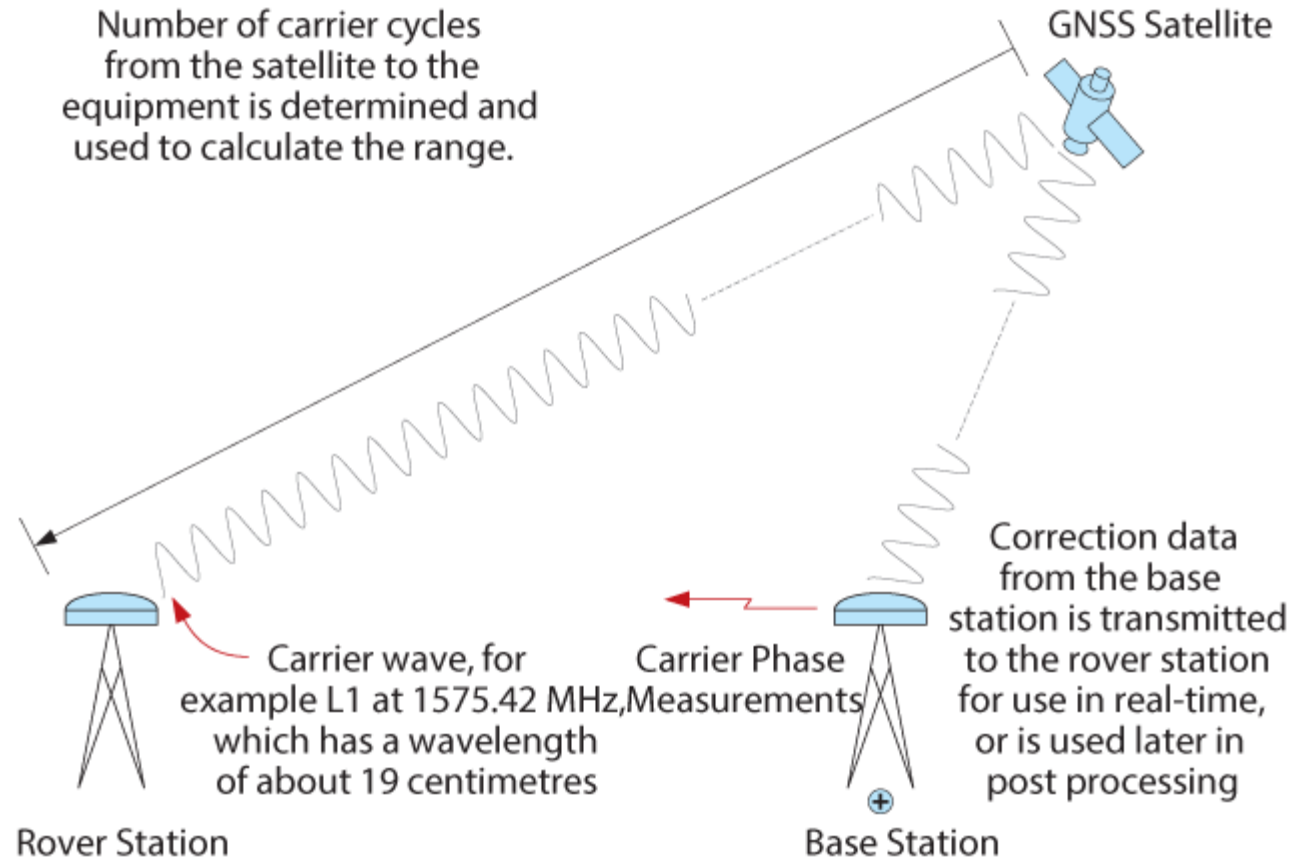
- Pour améliorer la précision, ajoute un récepteur GPS fixe avec capacité d'émission de **signaux de corrections ε**
- Basé sur le fait que les erreurs induites sur le signal GPS sont similaires, pour une région donnée.



- Précision de l'ordre du décimètre

Real-Time Kinematic (RTK)

- Basé sur *differential* GPS
- En plus, on mesure la phase de la porteuse ($\lambda=19$ cm)
- Précision ~ 2 cm
- Utilisé sur machine agricole



Capteurs inertiels

Capteurs inertiels

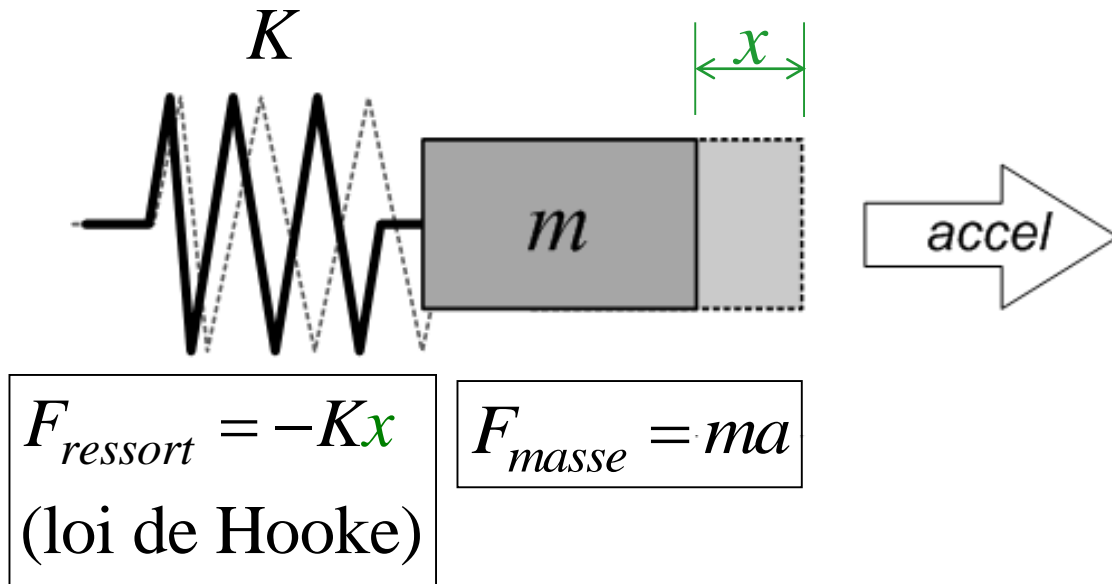
- Mesure l'*accélération* d'un système

$$\vec{a} = \frac{d}{dt} \vec{v}$$

- **Changement** du **vecteur vitesse**
 - accélération linéaire
 - rotation

Accéléromètre

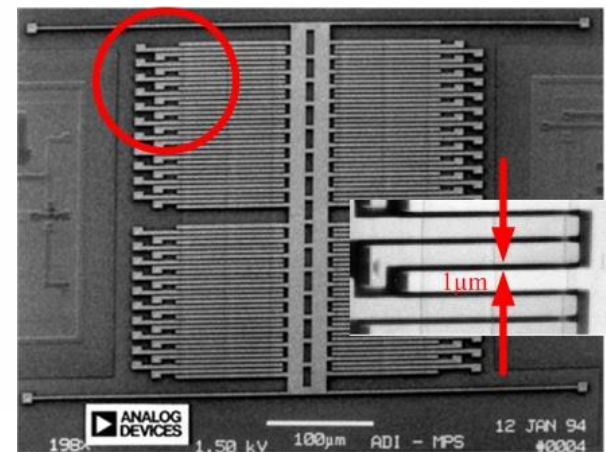
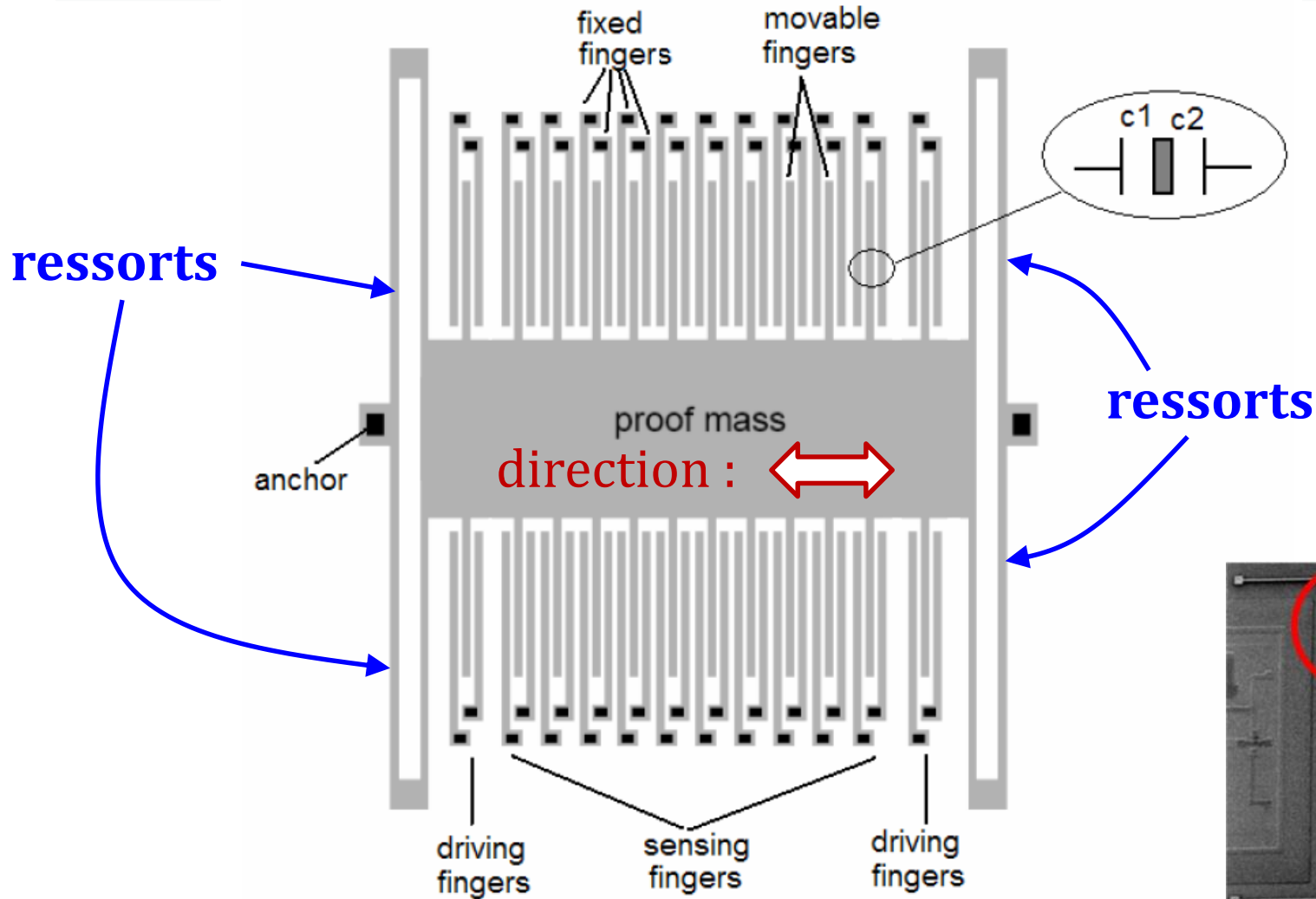
- Système mécanique masse-ressort
 - mesure distance linéaire x



avec $F_{ressort} = F_{masse}$, $Kx = -ma$

$$x = -\frac{m}{K} a$$

Accéléromètre MEMS (1 axe)



Micro-Electro-Mechanical System

Décalage (*offset*)

- Origine :
 - électrique (biais dans l'amplificateur)
 - mécanique (friction de la masse m , défauts de fabrication)
 - condition opération (température, voltage)
 - cycles allumer-fermer

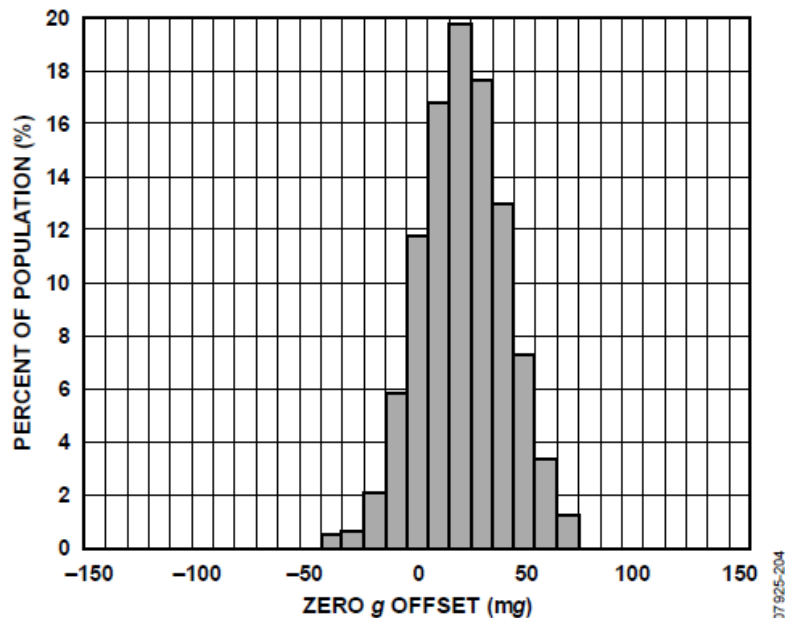


Figure 4. X-Axis Zero g Offset at 25°C, $V_S = 2.5\text{ V}$

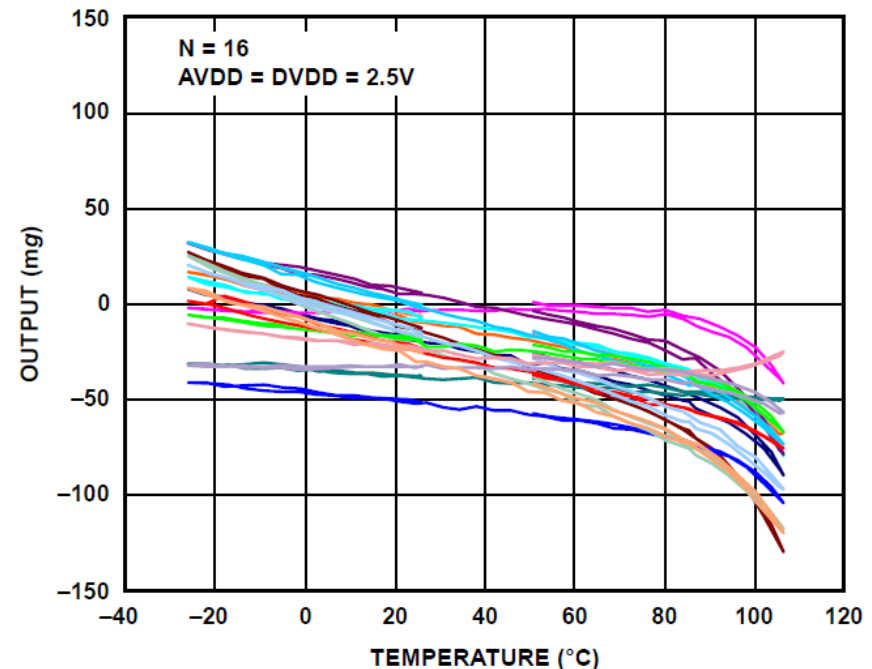


Figure 14. Y-Axis Zero g Offset vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_S = 2.5\text{ V}$

Décalage : impact sur localisation

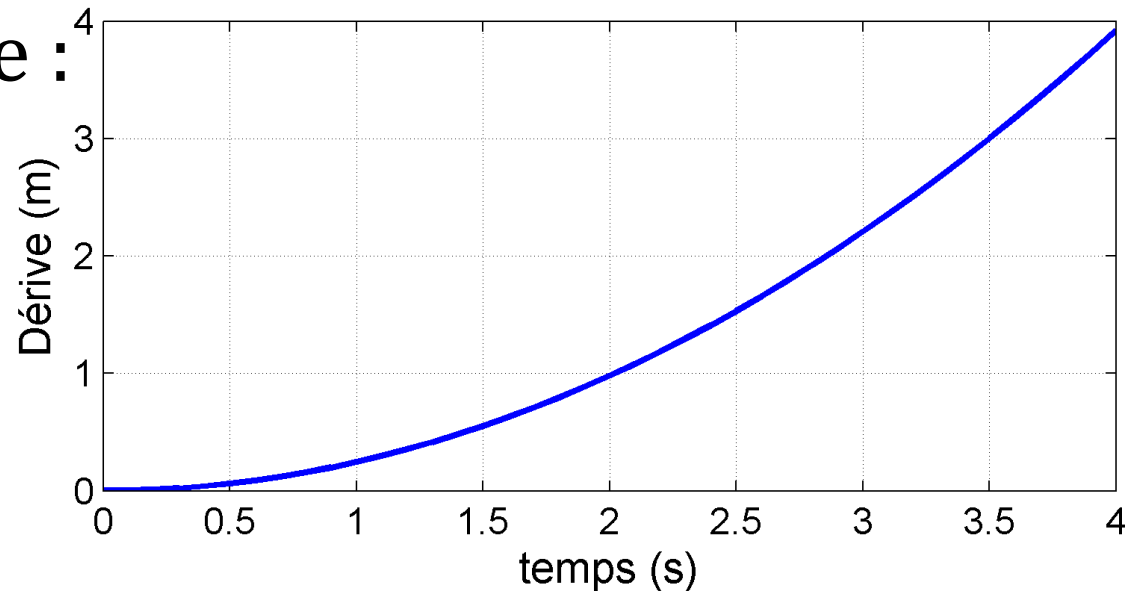
- Accéléromètre avec erreur systématique 50 *mg*

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2 \rightarrow 50 \text{ mg} = 9.8 \times 0.050 = 0.49 \text{ m/s}^2$$

$$x = \iint a \, dt^2 = \frac{at^2}{2}$$

- Dérive quadratique :

temps	dérive
10 s	24.5 <i>m</i>
1 min	882 <i>m</i>
1 heure	~3 200 <i>km</i>
1 jour	5x terre-lune

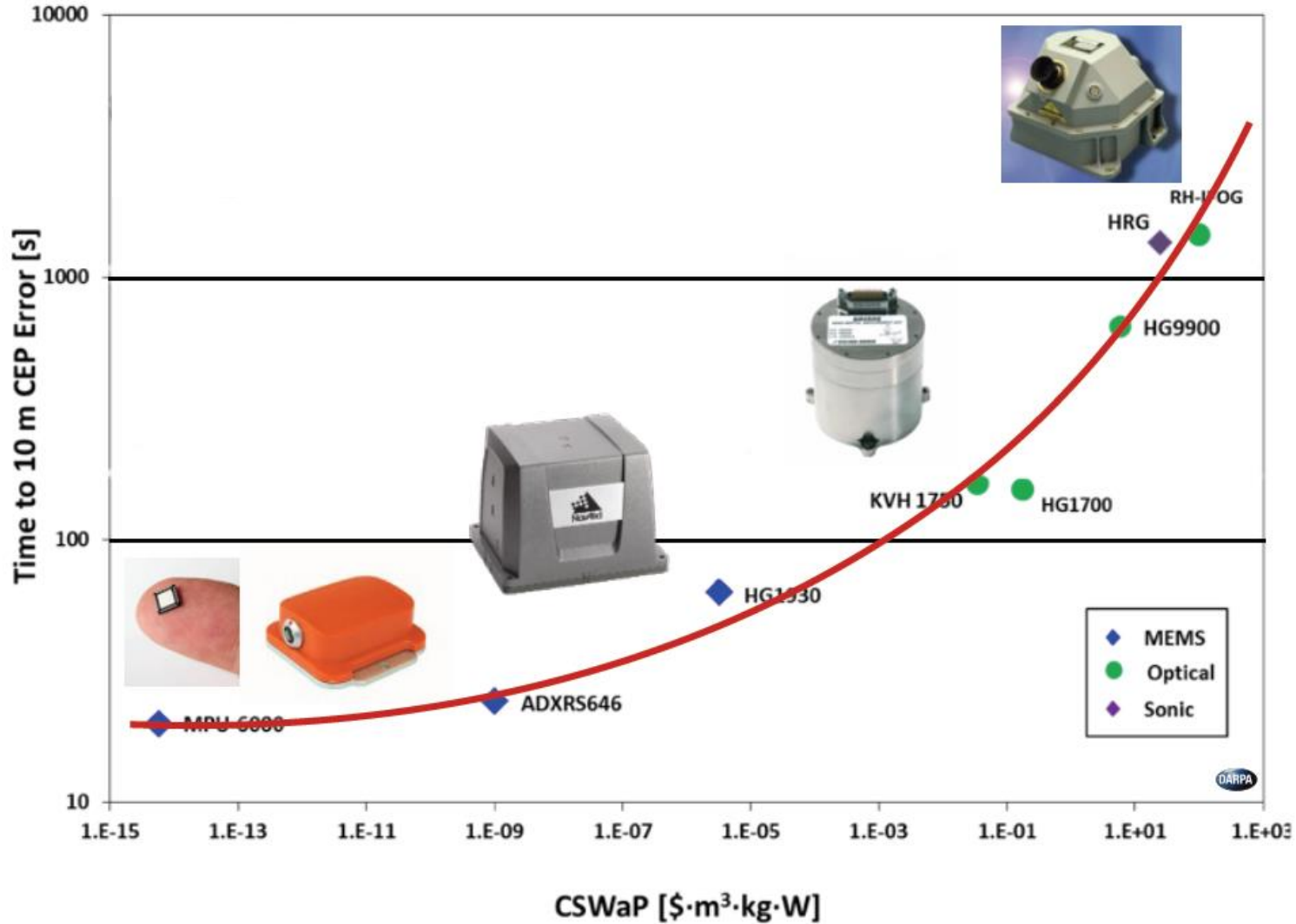


	Accelerometer Bias Error	Horizontal Position Error [m]			
Grade	[mg]	1s	10s	60s	1hr
Navigation	0.025	0.13 mm	12 mm	0.44 m	1.6 km
Tactical	0.3	1.5 mm	150 mm	5.3 m	19 km
Industrial	3	15 mm	1.5 m	53 m	190 km
Automotive	125	620 mm	60 m	2.2 km	7900 km

<https://www.vectornav.com/support/library/imu-and-ins>

Dérive de la localisation

CEP = Circular Error Probability



Gyroscopes mécanique

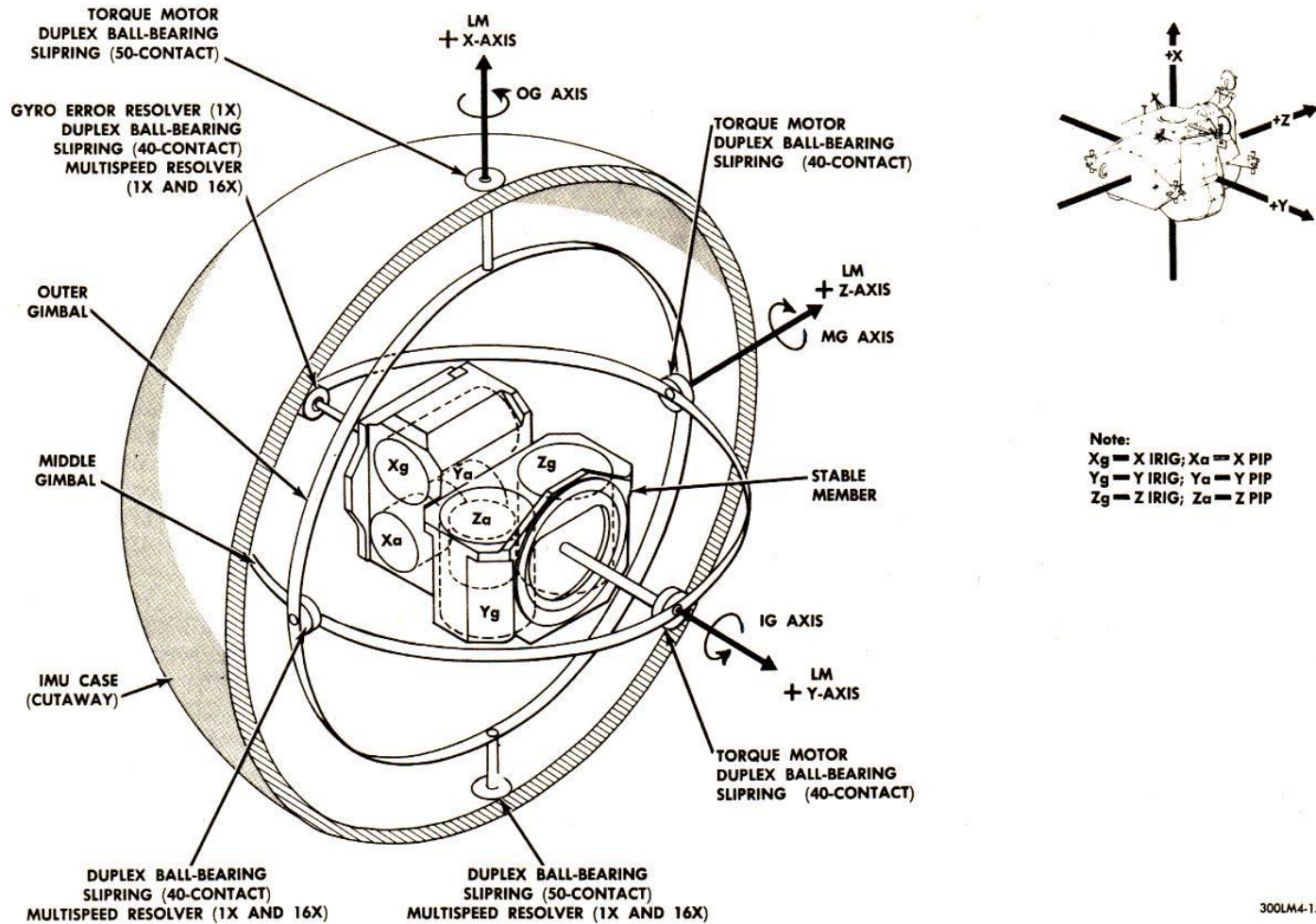
- Gyroscopie mécanique : masse tournante
 - e.g. une toupie
- Loi de la conservation de quantité de mouvement
 - masse tournante maintient son axe de rotation
 - doit forcer pour changer l'angle de l'axe de rotation
- Donne référence **absolue** en orientation :
 - référence sidérale : « pointe vers étoile polaire »
 - tenir compte rotation terre ($15^\circ/\text{h}$)!

Démonstration

- Gyroscope + cardans (gimbals)



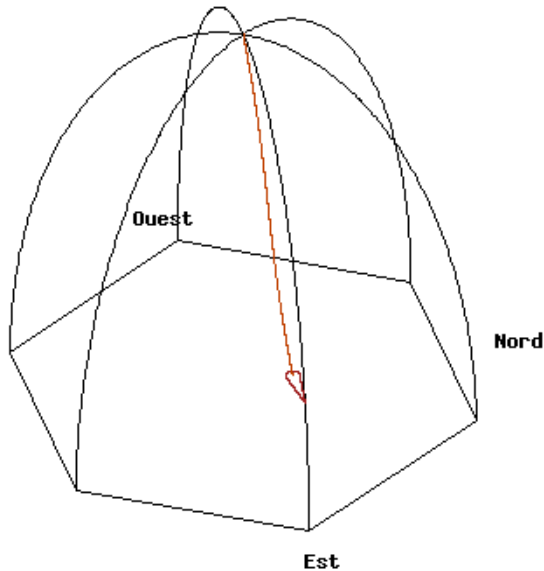
Gyroscope mécanique Apollo



GLO-4001/7021 Introduction à la robotique mobile
Figure 2.1-24. IMU Gimbal Assembly

Gyroscope par structure oscillante

- Pendule de Foucault

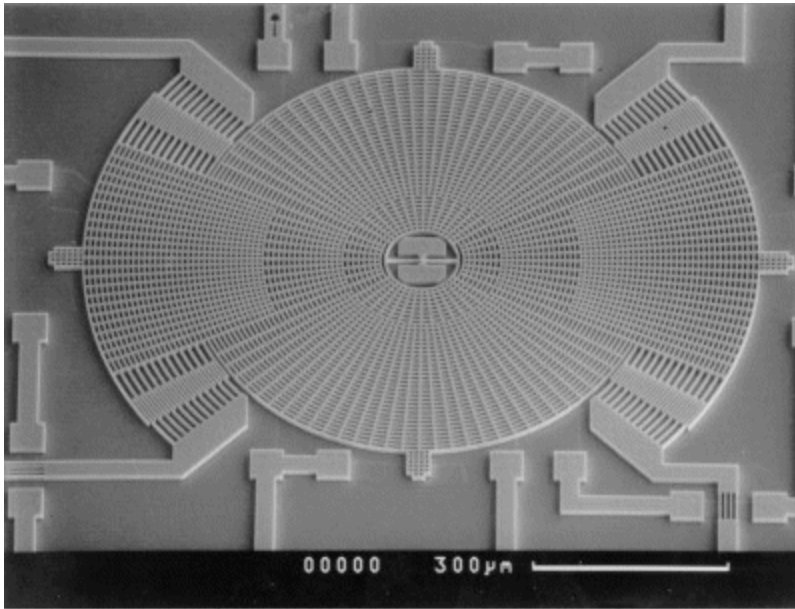


wikipedia.org

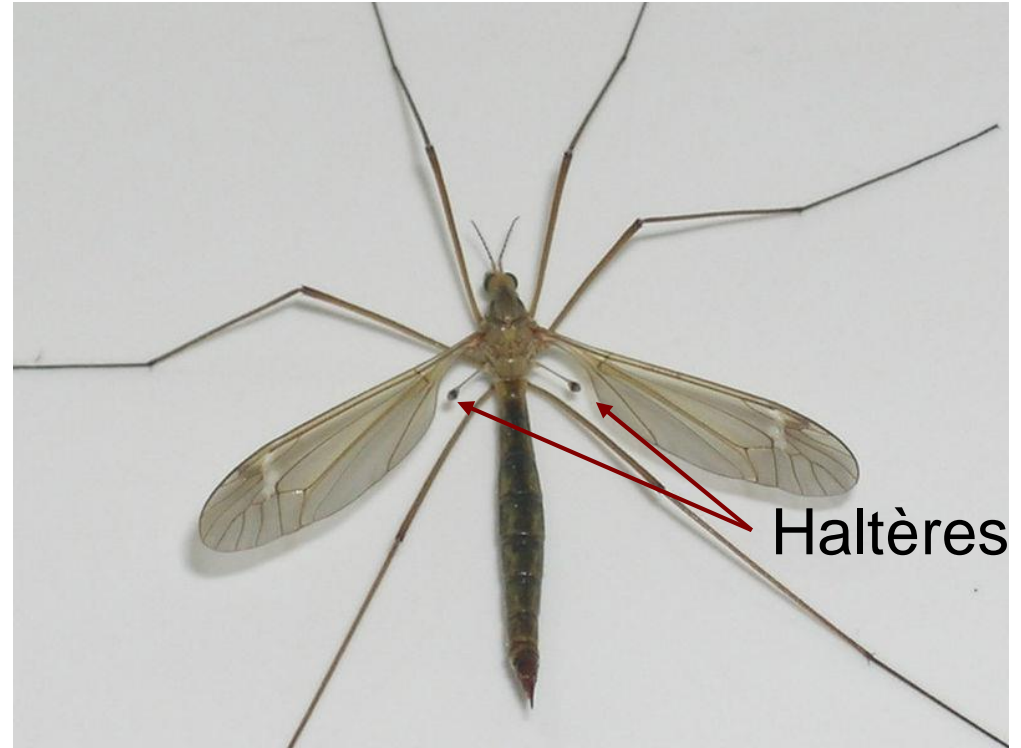


en accéléré x1000

Gyroscopes par structure oscillante



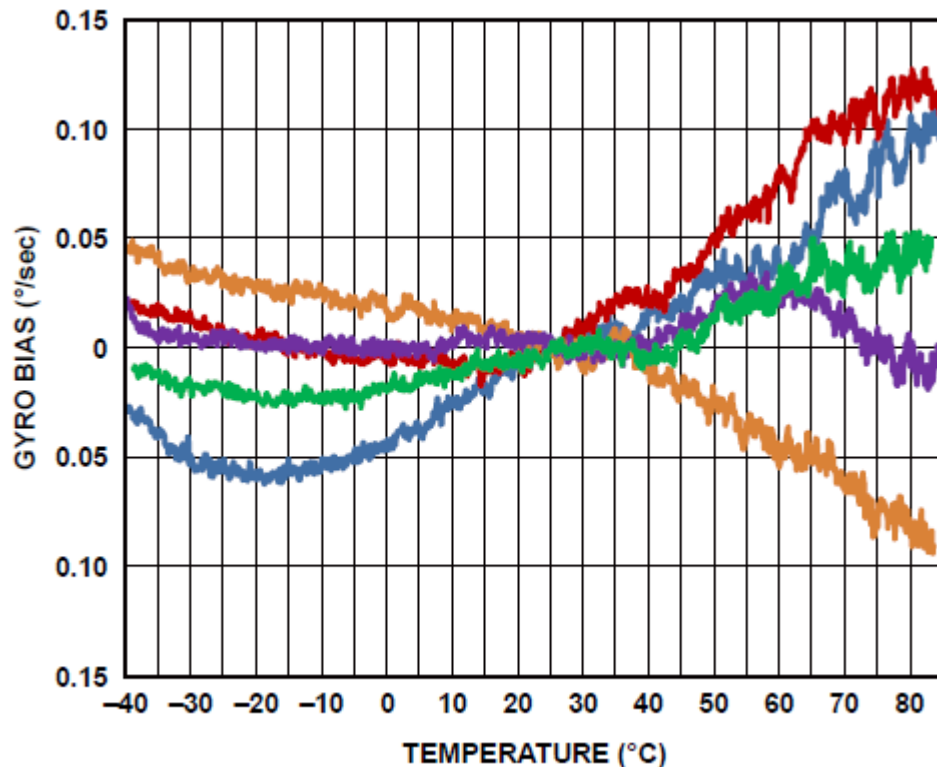
MEMS



Haltères

Gyroscope : Biais

- Gyroscope MEMS



 **ANALOG
DEVICES**

$\pm 300^\circ/\text{Sec}$

Precision Angular Rate Sensor

ADIS16135

Vous faites expérience dans un labo climatisé,
puis vous sortez à l'extérieur...

Problème de dérivation dans le temps

- Gyroscope

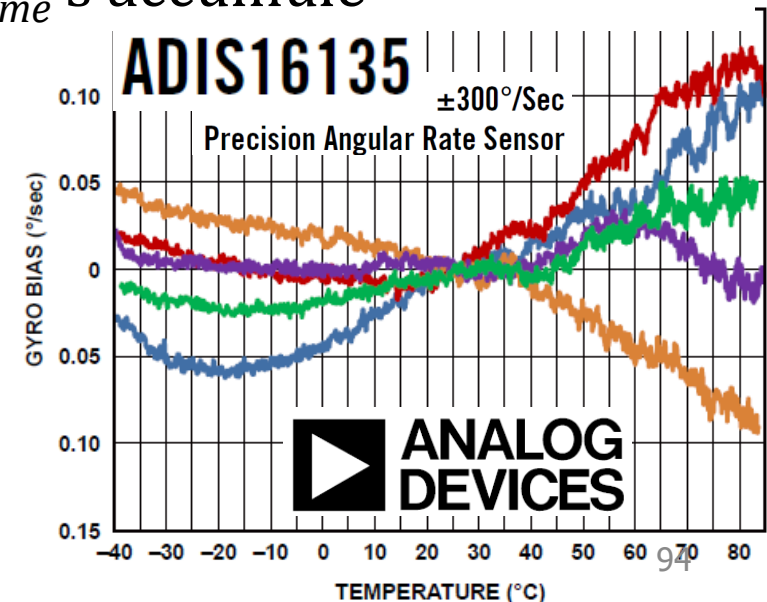
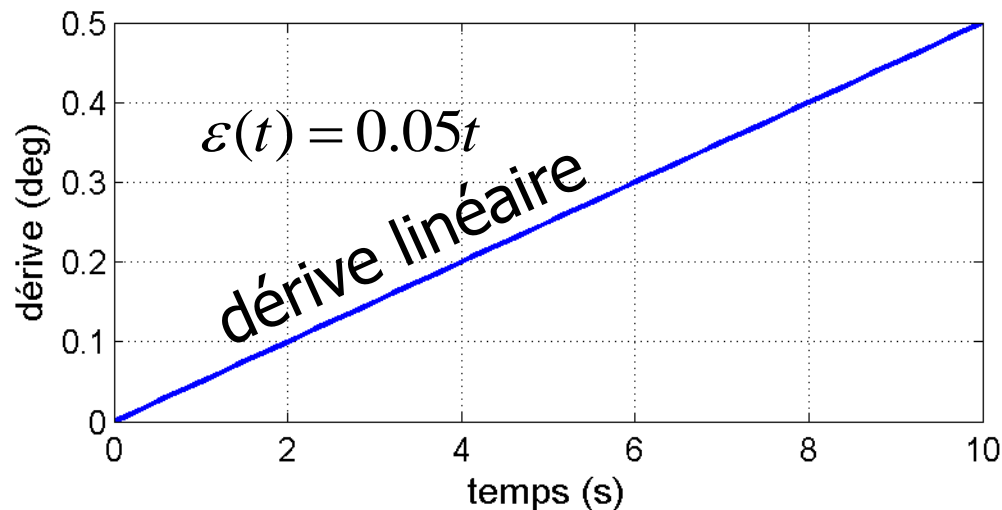
$$\omega_{réel}(t) = \frac{d}{dt} \theta_{réel}(t) \quad \text{vitesse angulaire oméga}$$

$$\omega_{mesuré}(t) = \omega_{réel}(t) + \omega_{biais}(t)$$

Pour retrouver l'angle θ , on intègre le signal du gyroscope à taux :

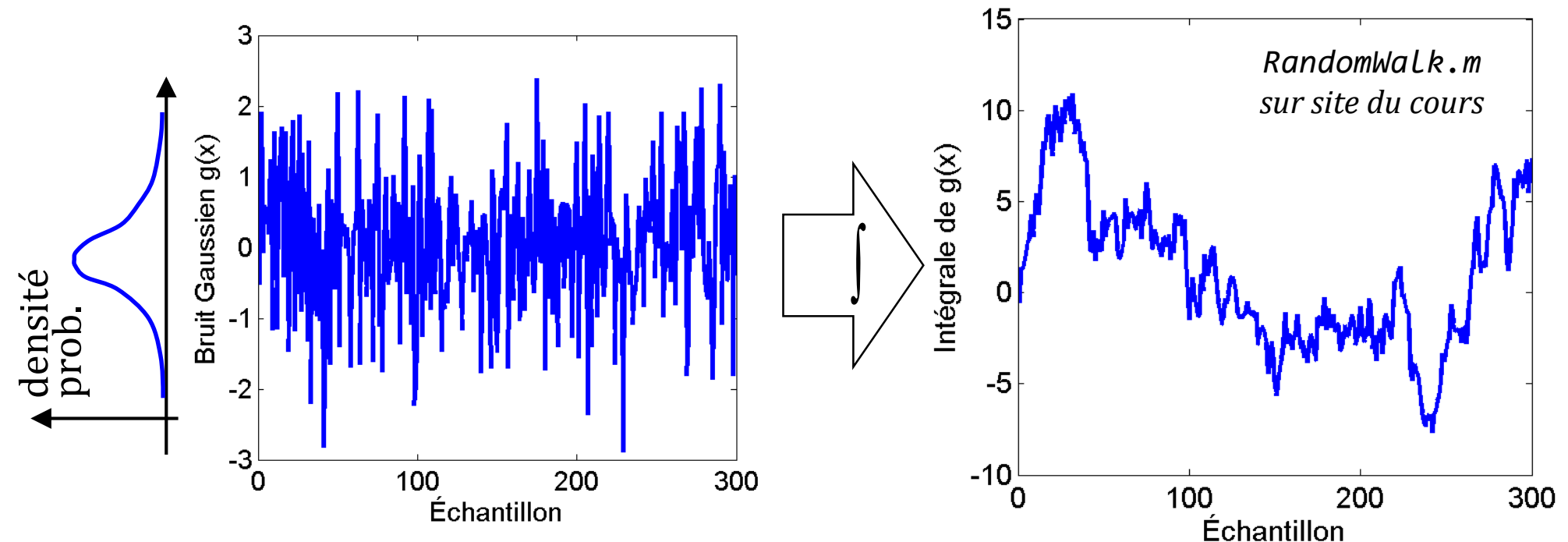
$$\theta_{estimé} = \int \omega_{mesuré}(t) dt = \int (\omega_{réel}(t) + \omega_{biais}(t)) dt = \theta_{réel} + \int \omega_{biais}(t) dt$$

Si $\omega_{biais}(t) = 0.05^\circ/s$, une erreur $\varepsilon = \theta_{réel} - \theta_{estimé}$ s'accumule



Modélisation biais (gyro & accel MEMS)

- Approximativement une marche aléatoire¹ (*Random Walk*) : mouvement Brownien
- Réalisé avec l'intégrale d'un bruit gaussien



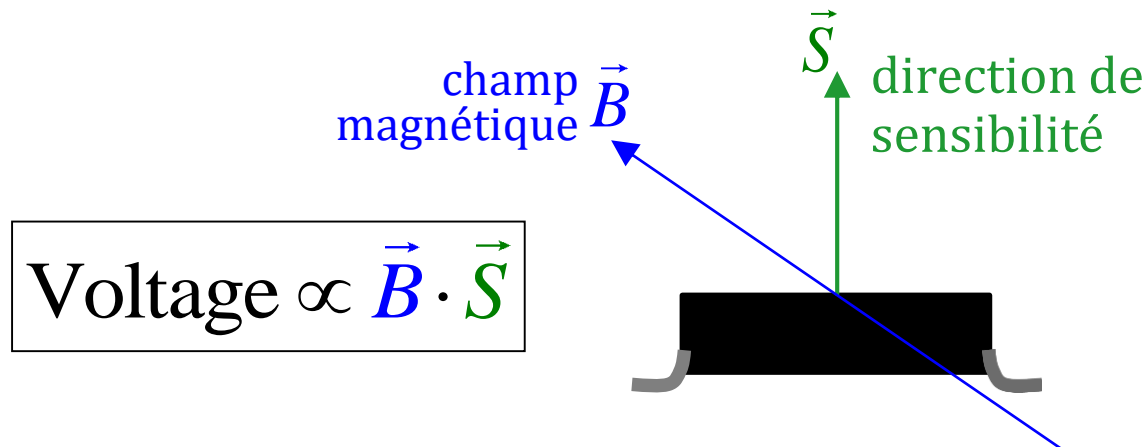
¹ Pas exact, car une marche aléatoire n'est pas bornée, mais le biais l'est. À court terme, cette approximation fonctionne bien, par contre.

Hall analogique: compas magnétique

- Capteur qui mesure une composante d'un champ magnétique via effet Hall



The AD22151 is a **linear** magnetic field **transducer**. The sensor output is a voltage proportional to a magnetic field applied perpendicularly to the package top surface.



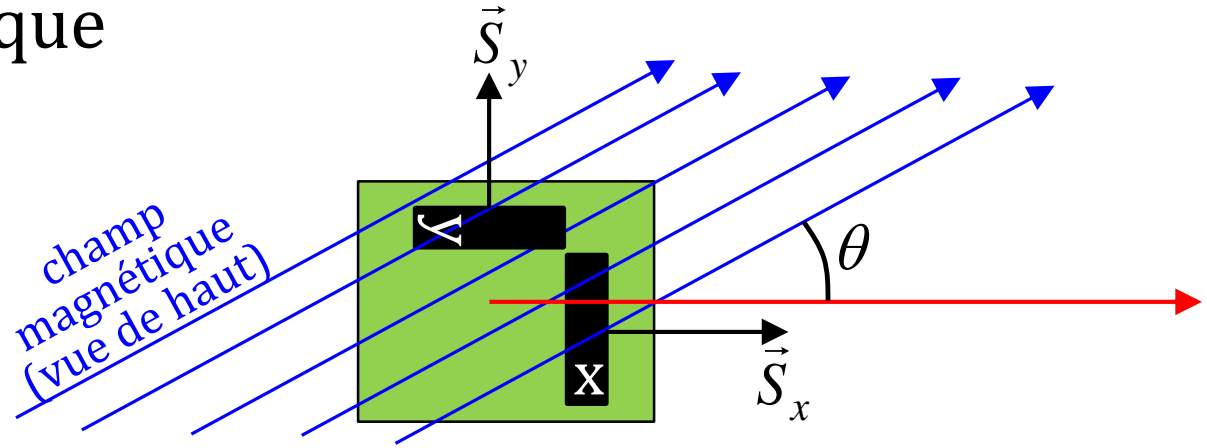
Hall analogique: compas magnétique

- On peut combiner 2 capteurs magnétique pour créer une boussole magnétique

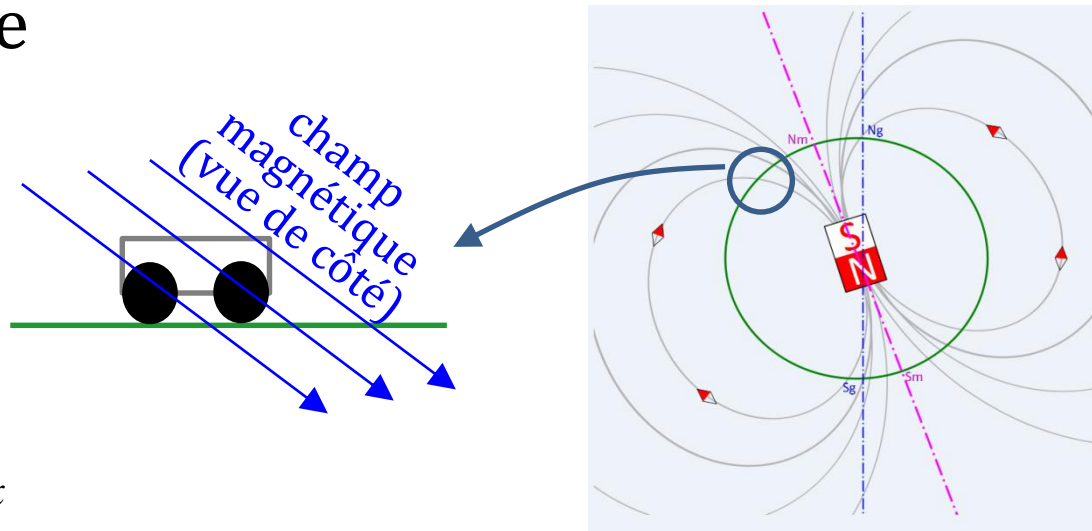
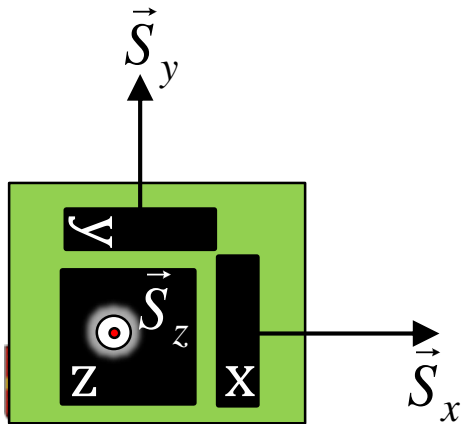
$$V_x = K_x \vec{S}_x \cdot \vec{B}$$

$$V_y = K_y \vec{S}_y \cdot \vec{B}$$

$$\theta = \text{atan2}(V_y, V_x)$$



- Ou 3 capteurs pour mesurer la direction en 3D du champ magnétique



Champs magnétiques : non-uniformes

- Champs très faible
 - champ terrestre : 25 à 65 microtesla
 - petit aimant à terre rare : >1 tesla (20,000 fois + puissant!)
- Champ non-uniforme
 - surtout à l'intérieur des édifices (poutres d'aciers...)
 - et des robots (moteurs électriques...)

INDOOR LOCATION SENSING USING GEO-MAGNETISM

Jaewoo Chung¹, Matt Donahoe¹, Chris Schmandt¹, Ig-Jae Kim¹, Pedram Razavai², Micaela Wiseman²

MIT Media Laboratory
20 Ames St.
Cambridge, MA 02139

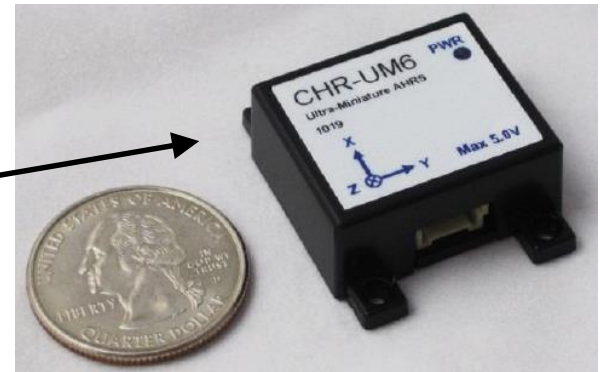
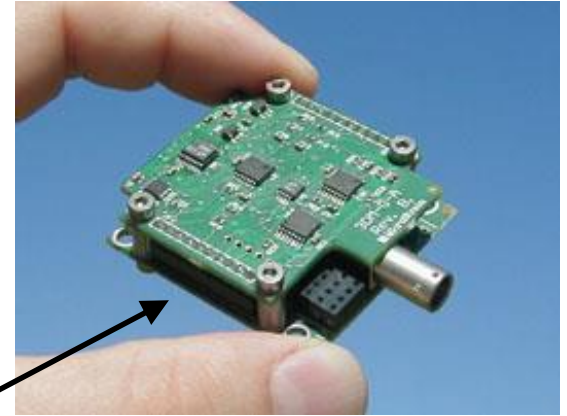
¹{jaewoo, donahoe, geek, ijkim}@media.mit.edu,

²{prazavi, wiseman}@mit.edu

Exploite la déformation du champ
magnétique terrestre pour se localiser!

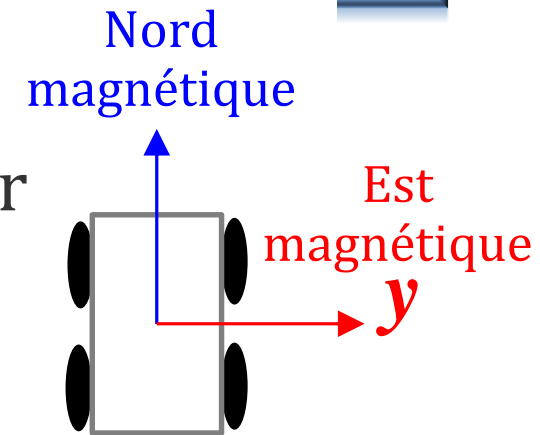
Centrales inertielle : IMU

- IMU : *Inertial Measurement Unit*
- Combine
 - Gyroscope
 - Accéléromètre
 - (Magnétomètre)
- Design typique : tri-axial
 - Microstrain™ 3DM-GX1™
 - CHR-UM6 de CHRobotics
- Processeur embarqué fait les calculs, retourne l'orientation (et possiblement toutes les sorties des capteurs)

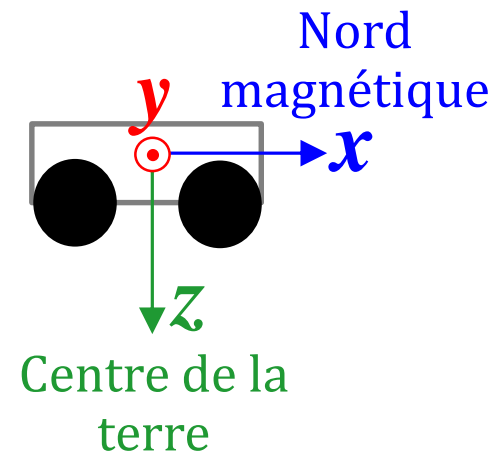


Centrales inertielles : IMU

- Magnétomètre (extéroceptif)
 - Compense les dérives des gyroscopes pour le lacet (*yaw*)



- Accéléromètre (dans son aspect extéroceptif)
 - Retrouve la direction de la gravité terrestre (quand le véhicule n'accélère pas trop)
 - Compense les dérives des gyroscopes pour le roulis (*roll*) et tangage (*pitch*)

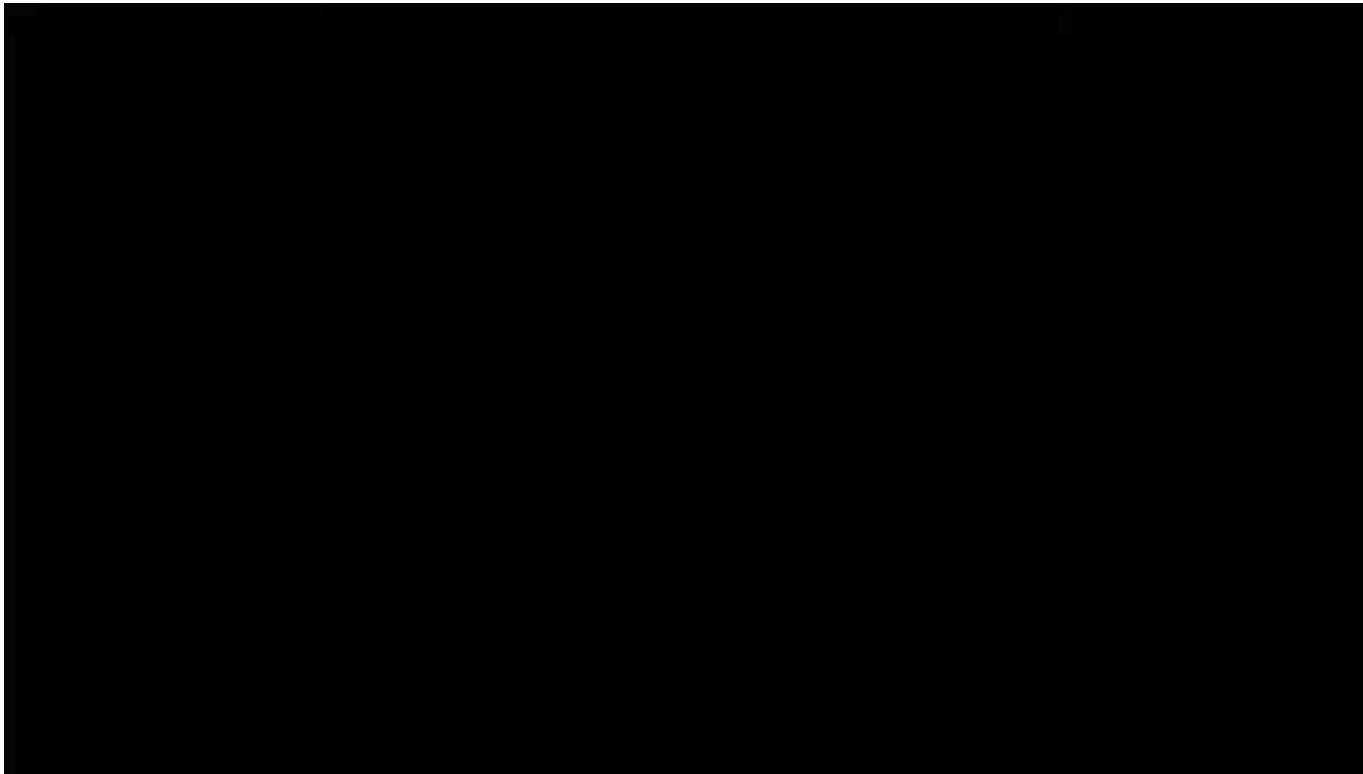


- Combinaison extéroceptif-proprioceptif
 - fusion de capteurs (à venir!)

Convention North-East-Down (NED)

Exemple avec robot AQUA

- Intégration des gyroscopes : orientation 3D
- Vecteur gravité : correction du drift pour pitch, roll



pas de
correction du
yaw pour
nord
magnétique

Note : délai provient du programme d'affichage 3D