

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

TP: Jeudi 13h30-16h30, salle TP204

AU 2022-2023



Ch. 1: Perception pour la robotique

- Introduction

Partie 1

- Classification des capteurs

Partie 2

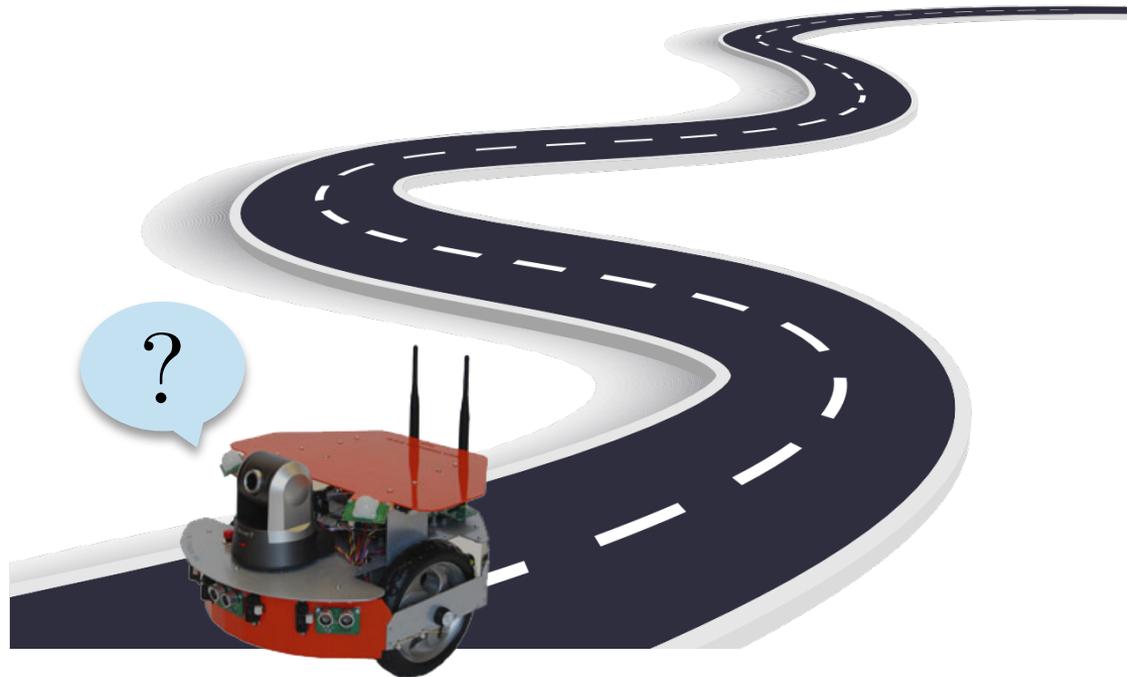
- Typologies de capteur

Partie 3

Capteurs Proprioceptifs

Odométrie: estimation de la variation de *position* et d'*orientation* d'un véhicule au fil du temps, à partir des mesures des capteurs de mouvement embarqués

Étymologie: du grec *odos*, qui signifie "route", et *metron*, qui signifie "mesure"

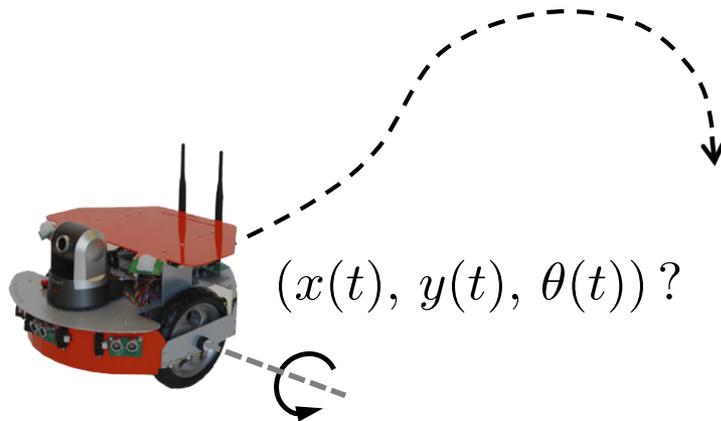


Odométrie

Robots à roues: on intègre les révolutions des roues du robot pour avoir une estimation du parcours effectué (pour la modélisation mathématique, voir le cours de *Localisation et Navigation de Robots*)

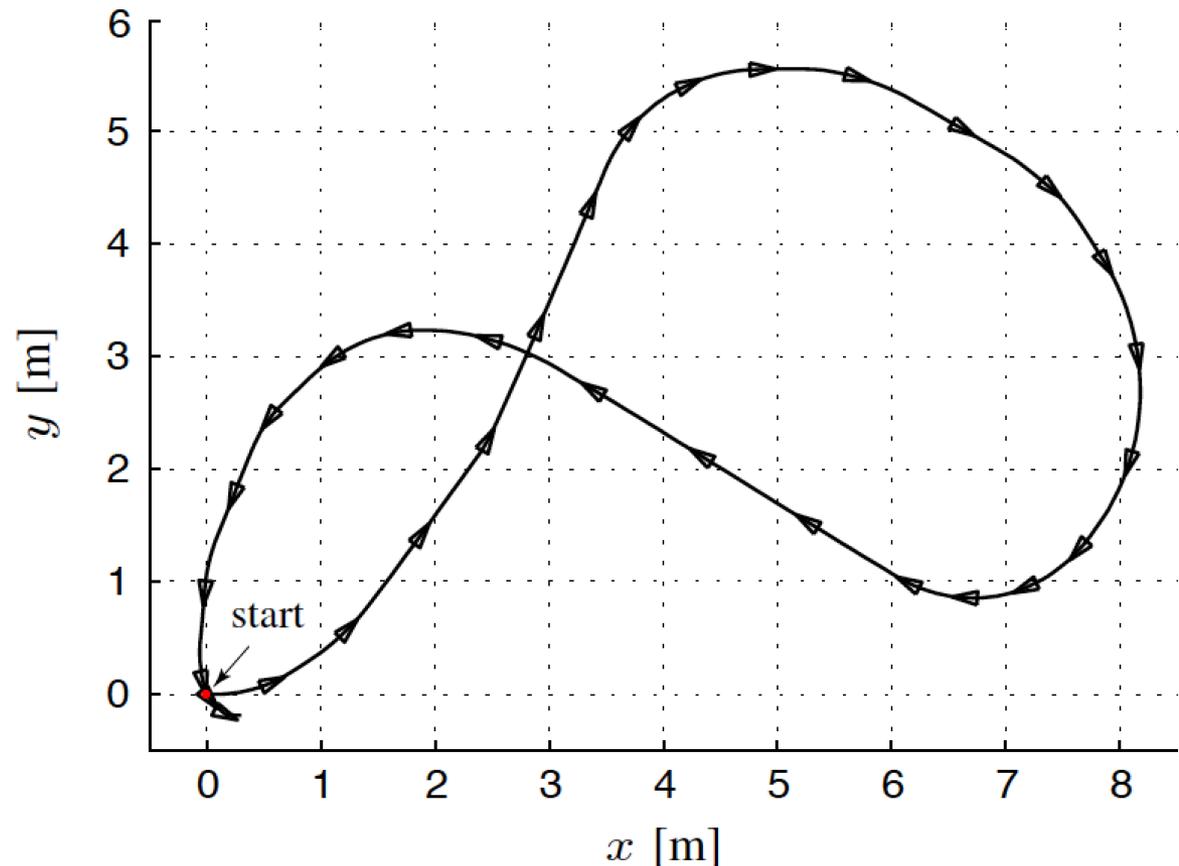
- **Inconvénient de l'odométrie**

Localement précise mais *dérive* sur des longs parcours (due au glissement des roues, au contact avec le sol non ponctuel, etc.)



Exemple sur le terrain ...

Trajectoire de 25 mètres estimée grâce à l'odométrie d'un robot mobile Pioneer 3-AT (Bois Bonvallet, Amiens, août 2016)



Encodeurs rotatifs

Un (en)codeur rotatif est un dispositif qui convertit la *position angulaire* d'un axe ou d'un arbre en code analogique ou binaire

- Résolveurs: transducteurs électromagnétiques
- Encodeurs mécaniques et **optiques** (les plus utilisés en robotique mobile, par ex. pour l'*odométrie*)

Deux types d'encodeur:

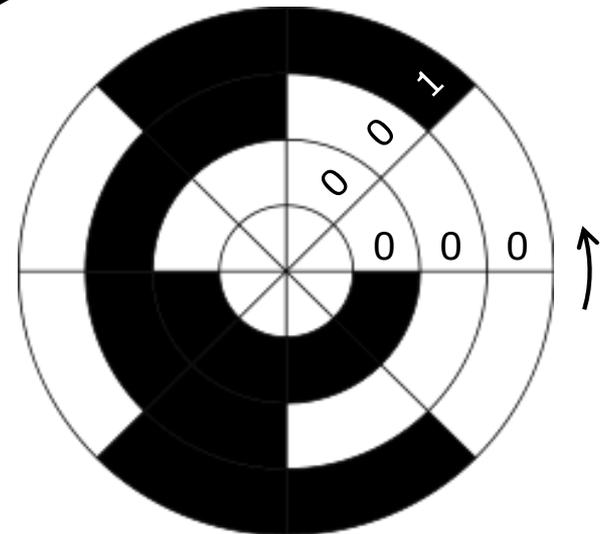
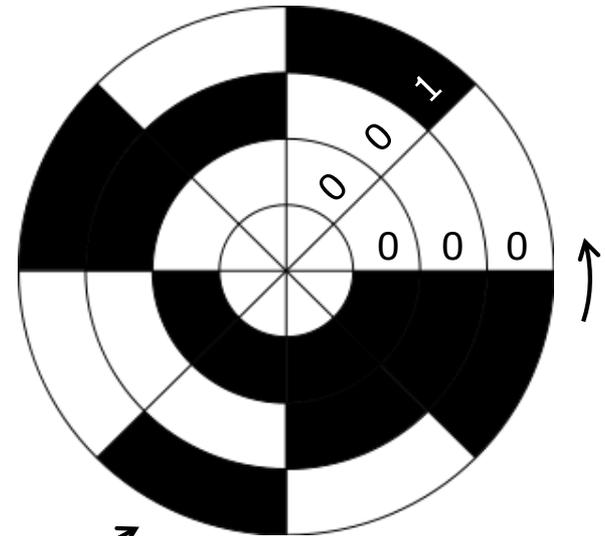
- **Absolu**: la sortie de l'encodeur indique la position courante de l'axe (transducteur d'angle). L'information *n'est pas perdue* lorsque l'alimentation est coupée: elle est disponible à nouveau lorsque l'alimentation est rétablie
- **Incrémental** (ou **relatif**): la sortie de l'encodeur nous informe du mouvement de l'axe. Cette information est normalement traitée ultérieurement pour obtenir des mesures de vitesse, de distance ou de position

Encodeurs rotatifs: exemples

- **Encodeur optique absolu** avec codage binaire (3 bits; noir 1, blanc 0)
 - Un couple émetteur/récepteur par bit

Surface transparente ("blanc")

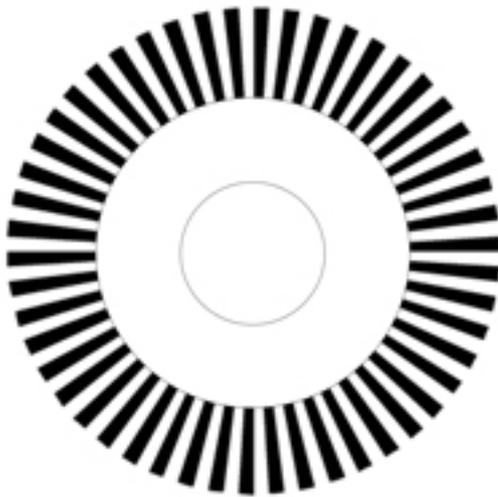
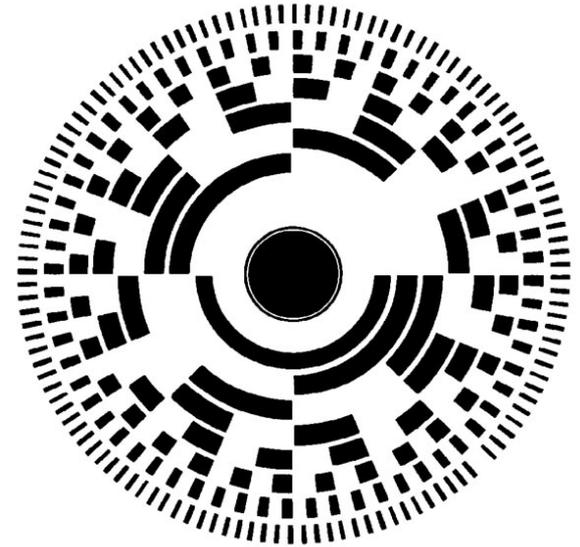
Surface opaque ("noir")



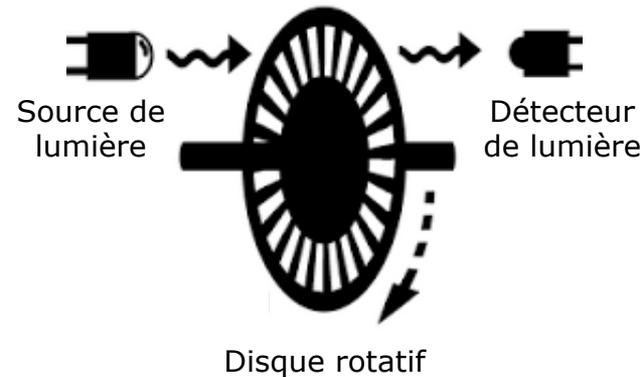
- **Encodeur optique absolu** avec codage Gray (BRGC: "binary-reflected Gray code"), (3 bits; noir 1, blanc 0)
 - Un couple émetteur/récepteur par bit

Encodeurs rotatifs: exemples

- **Encodeur optique absolu** avec codage binaire (8 bits, codage mixte sur 4 + 4 bits)
- **Encodeur optique incrémental**

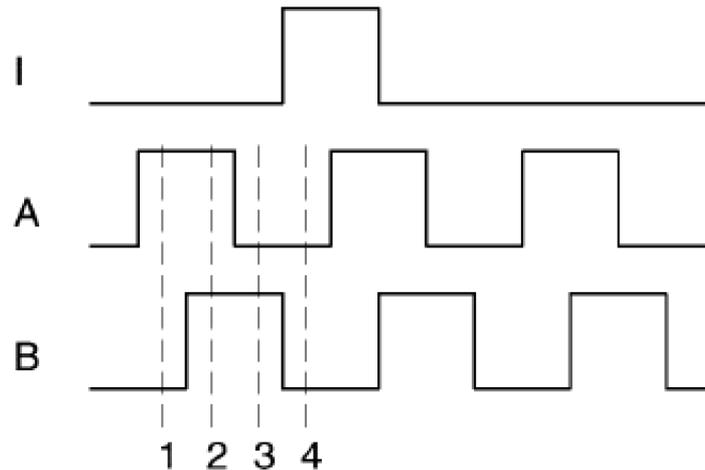
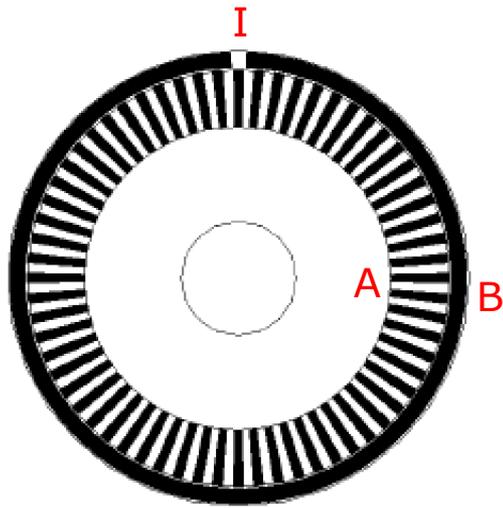


Roue codeuse



Encodeurs rotatifs: exemples

- **Encodeur optique incrémental en quadrature**
 - *Deux canaux*: la relation de phase entre les trains d'impulsions sur les canaux A et B permet de déterminer le **sens de rotation**
 - Une fente unique sur la piste externe produit une impulsion (index, I) de référence par révolution



état	Cn A	Cn B
E1	haut	bas
E2	haut	haut
E3	bas	haut
E4	bas	bas

- **Accéléromètres**

- Estimation de l'accélération sur 3 axes (x, y, z)
- Intégrés sur puce: dans les smart-phones, airbag des voitures, drones, consoles de jeu (Nintendo Wii), pacemakers, etc.

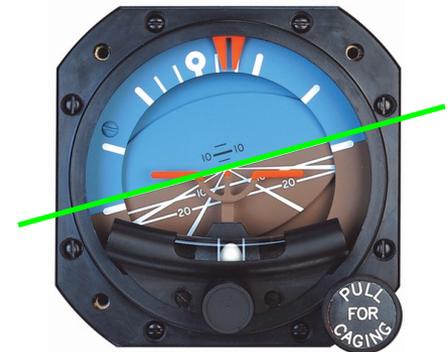
- **Gyroscopes (gyros)**

- Mesure du cap (1 DDL) ou d'attitude (3 DDL): faible coût, dérive inférieure à 1° par heure (en avionique: $0.001^\circ/h$)

- **Centrales inertielles** ou **IMU**

- **Inclinomètres** (ou **clinomètres**)

- Mesure des angles par rapport à la ligne d'horizon (horizontale)
- Très sensibles: résolution de 0.01°
- Applications: navigation des bateaux, commande de vol des avions



Gyroscopes

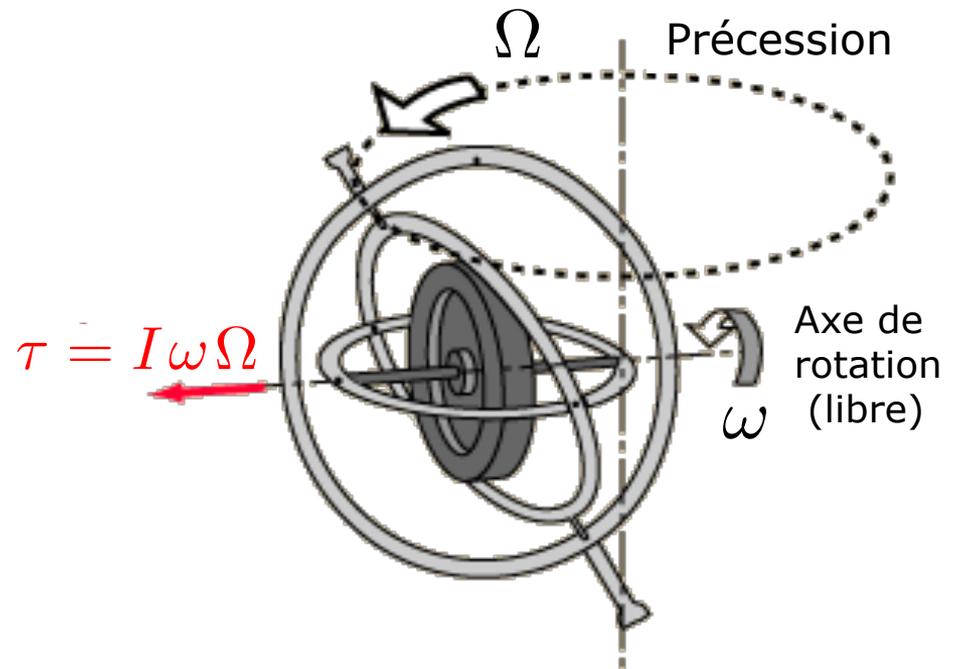
- Trois principes de fonctionnement:
 - Mécanique (il repose sur le *principe de conservation du moment angulaire*)
 - Optique (il repose sur l'*effet de Sagnac*)
 - MEMS (système micro-électromécanique; il repose sur l'effet de Coriolis)
- Deux catégories:
 - Mesure directe d'angles (rare)
 - Mesure de vitesse de rotation (gyroscopes fréquentiels)
- Inconvénient: dérive
 - Nécessité d'un recalage fréquent
 - Dérive parfois supérieure à l'exactitude requise

Gyroscopes mécaniques

- Le couple réactif τ est proportionnel à la vitesse de rotation ω de la roue disque, à la vitesse de précession Ω et à l'inertie de la roue I :

$$\tau = I \omega \Omega$$

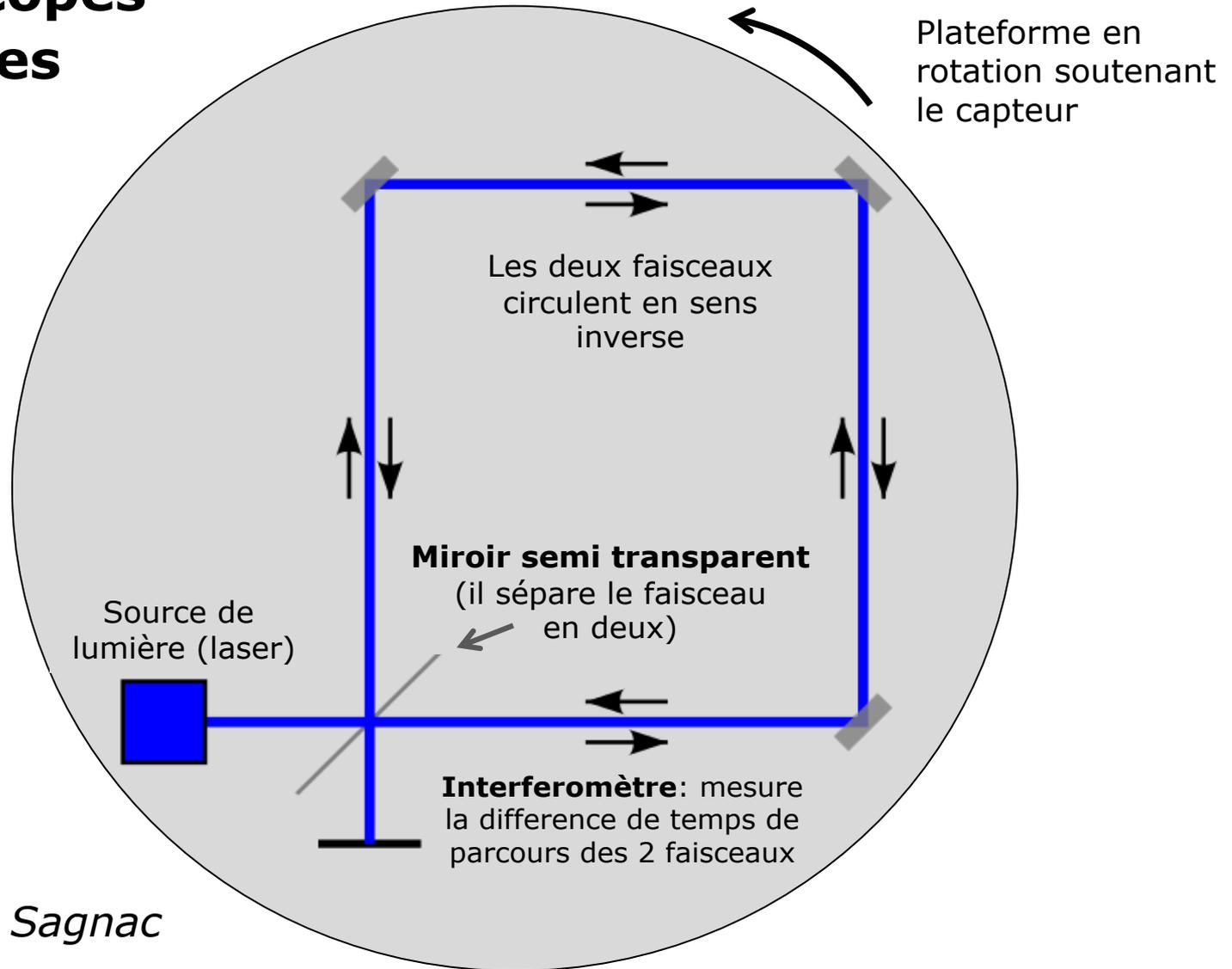
- Gyro mécanique de haute qualité:
 - 70 k€
 - Dérive: $0.02^\circ/\text{h}$
- Mécanique complexe
 - Peu utilisés en robotique mobile



Gyroscopes optiques

- Basés sur le comportement d'une onde lumineuse dans un repère en rotation (*effet de Sagnac*)
- Détection de rotation mécanique basée sur l'interférence lumineuse (voir la figure suivante):
 - Deux rayons lumineux en directions opposées
 - Le rayon voguant contre la rotation est *plus court*
 - Décalage de phase
 - L'intensité combinée dépend de la fréquence de rotation
- Résolution de l'ordre du $0.0001^\circ/\text{s}$

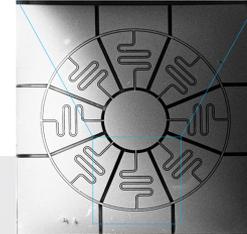
Gyroscopes optiques



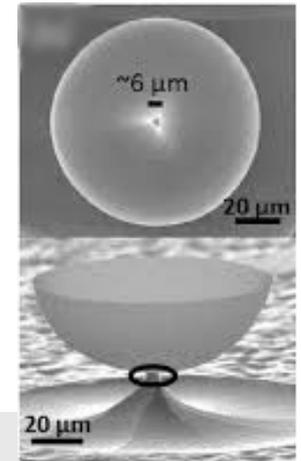
L'effet de Sagnac

Gyroscopes fréquentiels MEMS

- Éléments mécaniques vibrants (en silicium)
 - Perception de l'accélération de Coriolis (accélération apparente d'un repère en rotation)
- Plusieurs structures possibles
 - Roue vibrante
 - Résonateur hémisphérique
- Pas d'élément en rotation
- Consommation d'énergie et taille très réduite
- Excellents pour la robotique mobile



Roue vibrante

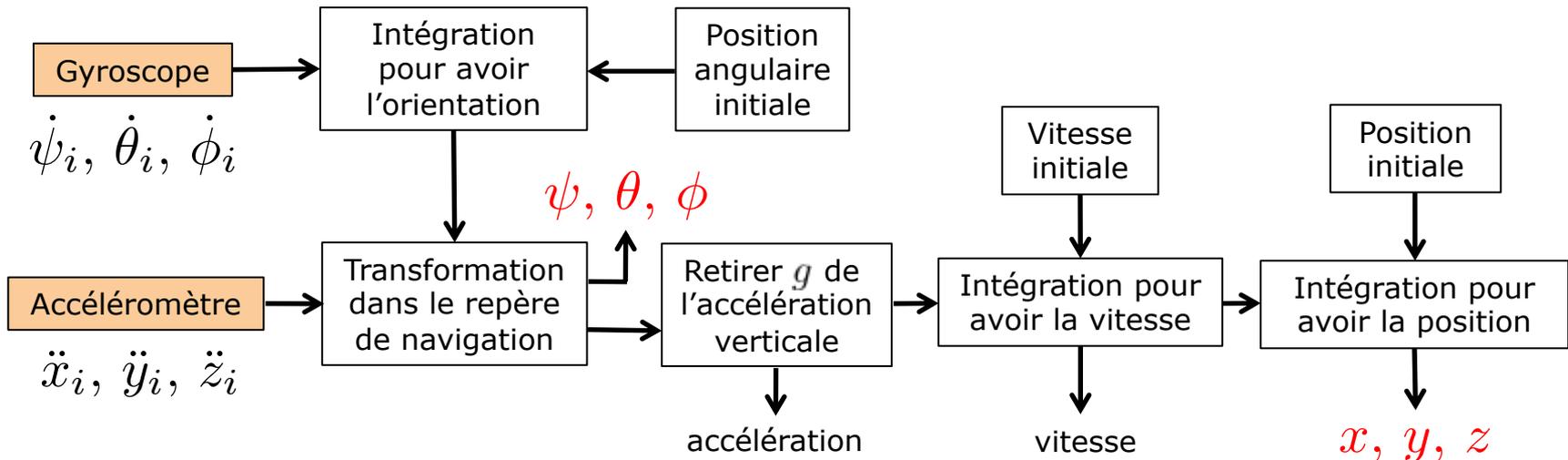


Résonateur hémisphérique



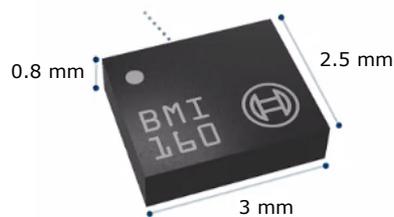
Centrale inertielle (ou IMU = "Inertial Measurement Unit")

- Typiquement: combinaison d'un *accéléromètre* et d'un *gyroscope* (mais l'inclusion d'un magnétomètre est possible aussi)
- Estimation de 6 DDL (« 6 axes »)
 - *Position* : x, y, z
 - *Orientation* : angles de lacet, tangage, roulis ψ, θ, ϕ
- Intégration en temps réel des mesures
 - Sensibilité aux erreurs de mesure



Centrale inertielle ... un exemple martien

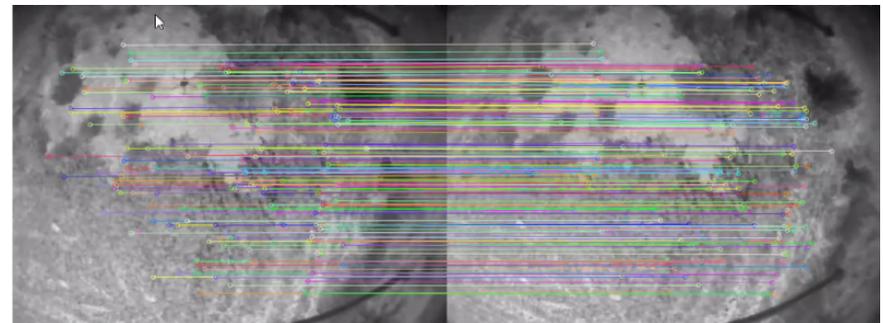
- Hélicoptère **Ingenuity** déployé par le rover *Perseverance* dans le cadre de la mission « Mars 2020 », en avril 2021
- Capteurs utilisés pour la navigation:
 - **Centrale inertielle**
 - Une caméra orientée vers le bas
 - Capteur laser (altimètre)
 - Inclinomètre
- Algorithme de navigation visuo-inertiel dédié, basé sur le suivi de « features » au sol (frame rate: 30 Hz)



Bosch BMI160 IMU
< 0.1 g



Garmin Lidar-Lite-V3
Altimeter



Features dans le sol martien

Capteurs Extéroceptifs

Capteurs extéroceptifs

Passifs

- Capteurs de contact (bumpers, capteurs d'effort)
- Magnétomètres
- Capteurs de vision
 - Technologies: linéaire, matrice CCD ou CMOS, etc.
 - Plusieurs configurations (capteur single ou multiple, par ex. stéréo) et « accessoires » (optique fisheye, miroirs, prismes, etc.)

Actifs

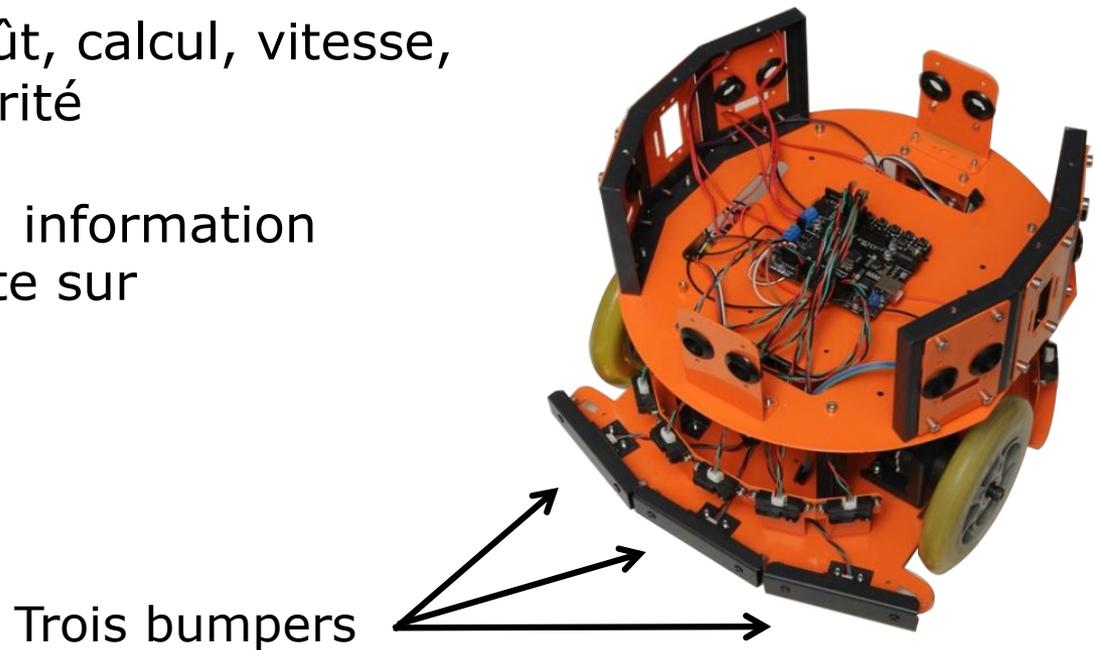
- Systèmes basés balises (localisation dans un repère fixe)
- Sonars (ultrasons)
- Télémètres lasers
- Capteurs IR (infrarouge)
- Radars (ondes radio)

Capteurs de contact

Ils informent si le robot est en contact avec un objet (par ex. obstacle)

1) Bumper: information de contact tout ou rien (fonctionnement basé sur la pression: « boutons »)

- *Avantages:* coût, calcul, vitesse, robustesse, sécurité
- *Inconvénients:* information pauvre, contrainte sur l'environnement



*Capteur d'effort
piézoélectrique*



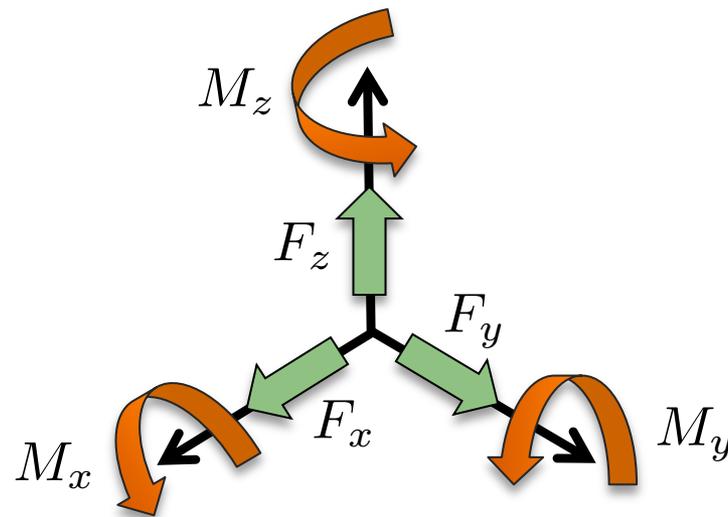
Capteurs de contact

2) Capteur d'effort

- Permet de mesurer les efforts en *force* et/ou en *couple* (par ex. sur l'effecteur d'un robot)
- *Capteur actif* : il traduit une variation de sa structure interne (en raison d'une force/couple) en signal électrique
- Inconvénients :
 - Coût élevé
 - Étalonnage
 - Fragilité
 - Plage de mesure faible

Capteurs de contact

Capteur d'effort à 6 DDL



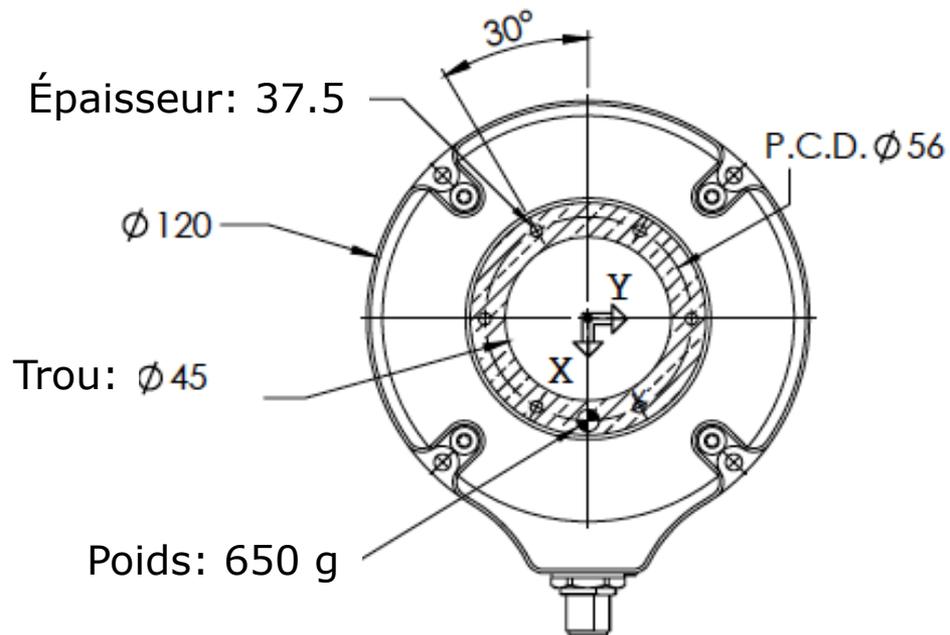
Forces

Couples

Mesure du *torseur d'effort* ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$)
(« wrench » en anglais), dans le repère du capteur

Exemple: capteur à 6 DDL FT 150 de Robotiq

- Compatibilité avec les robots Universal Robots, Yaskawa, Fanuc, Stäubli et ABB (middleware ROS)



Unité : mm



Exemple: capteur à 6 DDL FT 150 de Robotiq

Applications



Assemblage



Guidage de
mains robotiques



Finition

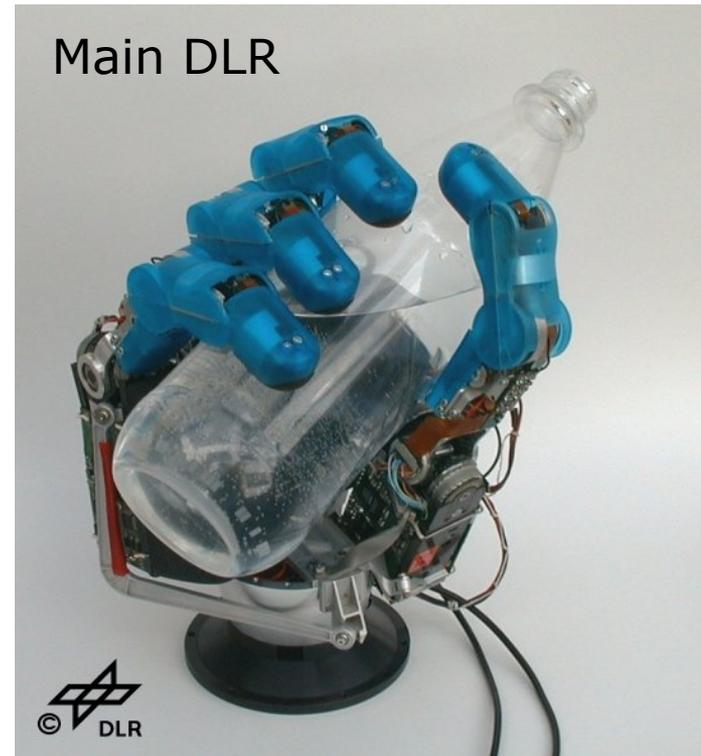
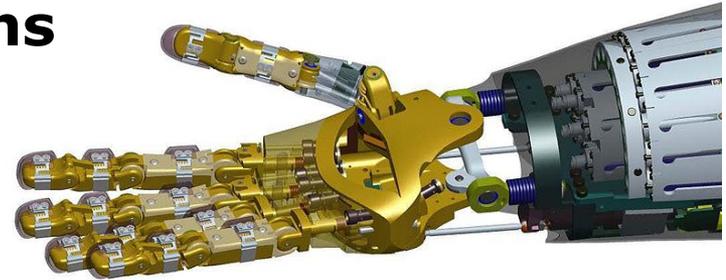
Exemple: capteur à 6 DDL FT 150 de Robotiq

Caractéristiques techniques du capteur

Plage de mesure	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	± 150 N ± 15 Nm
Résolution effective	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	± 0.2 N ± 0.02 Nm
Bruit du signal	F_x, F_y, F_z (combinées) M_x, M_y, M_z (combinées)	± 0.5 N ± 0.03 Nm
Débit de données en sortie		100 Hz
Tension d'entrée		6-28 V-DC
Puissance absorbée maximale		2 W
Interface électrique		RS-485, RS-232, USB

Capteurs d'effort: applications

1) Mains robotiques



Capteurs d'effort: applications

2) Robots industriels collaboratifs (« Cobots »)

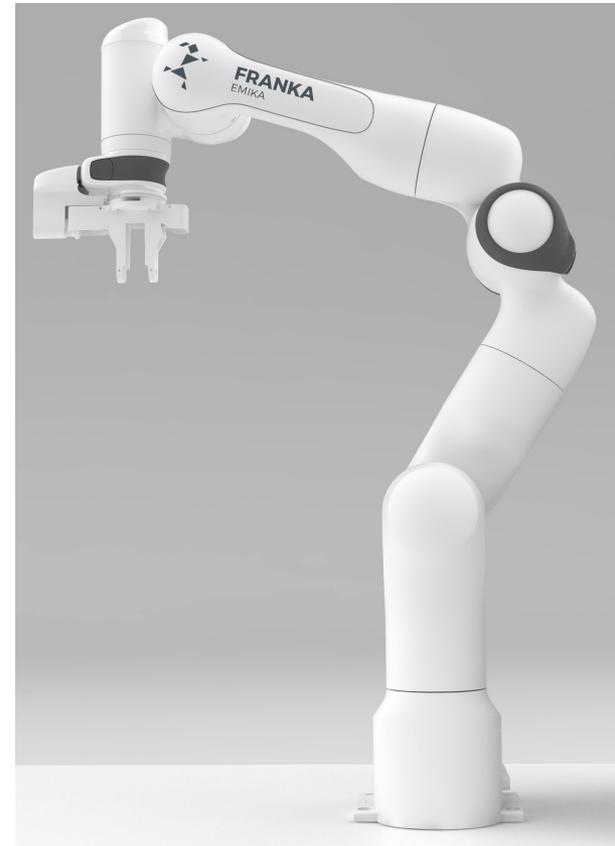


Capteurs de couple
sur les 7 articulations
du robot



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

SARA (« Safe Autonomous Robotic
Assistant ») du *DLR* (2018)



Panda de *FRANKA EMIKA*

Capteurs d'effort: applications

3) Interfaces haptiques (du grec *haptikos* = "capable d'entrer en contact avec")



Omega 7 de *Force Dimension* (7 DDL)



Sigma 7 de *Force Dimension* (7 DDL actifs) dans L'ISS (projet METERON, 2019)

Capteurs d'effort: autres applications ...

Milieu industriel



Insertion d'une bobine
dans un creux non chanfreiné



Reconnaissance
de position
et ébavurage



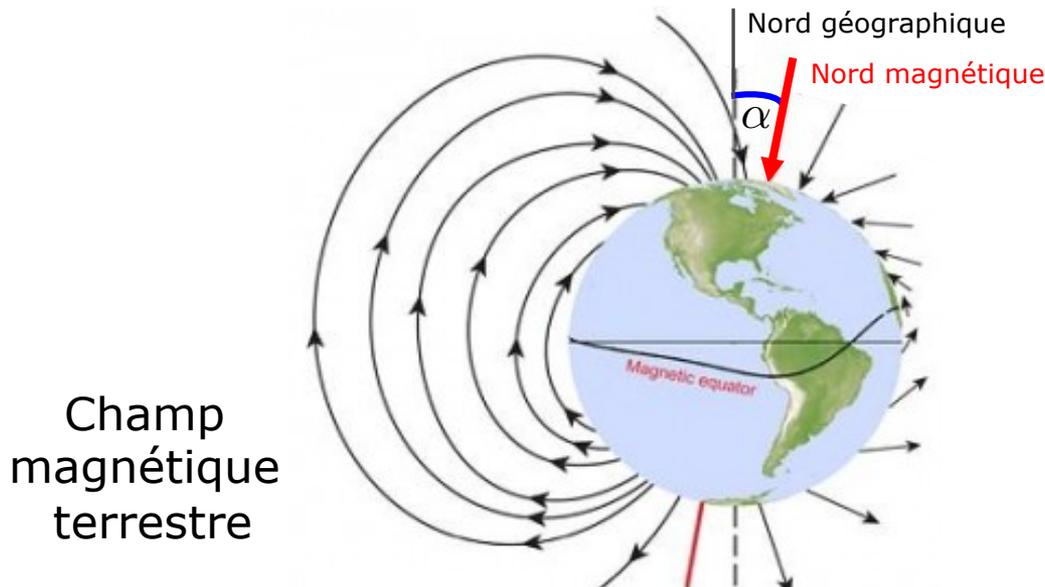
Montage d'un moteur
à pistons



Emballage de pièces électroniques
de forme irrégulière

Magnétomètres

- Mesure de l'*intensité* ou de la *direction* (boussole/compas) du champ magnétique terrestre
- Magnétomètre vectoriel: à induction magnétique (fluxmètre), à saturation (fluxgate), à effet Hall, etc.
 - En 2009, le prix d'un magnétomètre à 3 axes a chuté sous le seuil de 1\$ par appareil. Ces capteurs sont intégrés dans la plupart des smart-phones

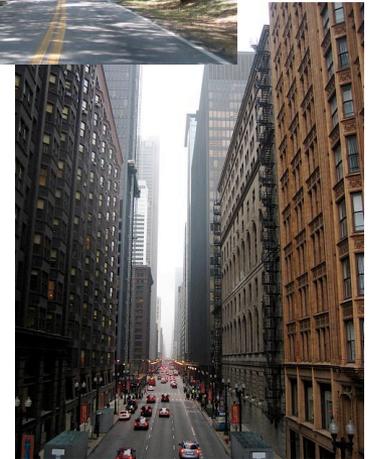


La valeur de l'induction magnétique au centre de la France est de l'ordre de $47 \mu\text{T}$ (micro Tesla)

L'axe géomagnétique fait un angle $\alpha = 11.5^\circ$ par rapport à l'axe de rotation de la Terre

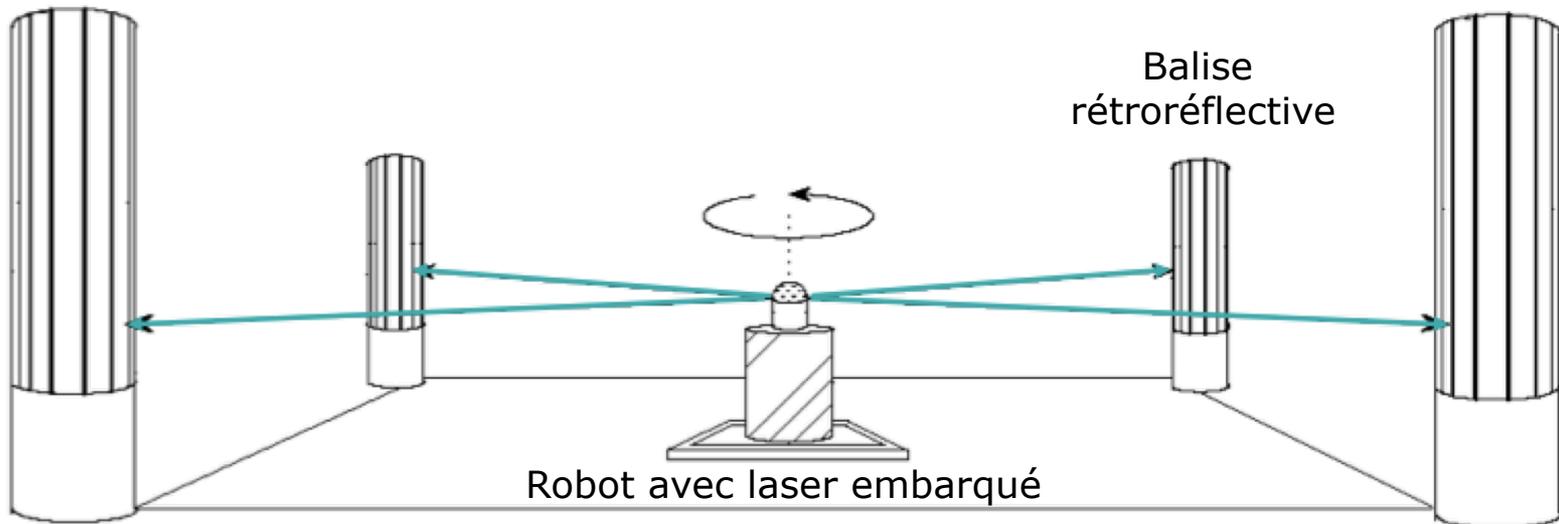
Balises ("beacons" ou "landmarks" en anglais)

- Balises à position connue précisément
- Navigation basée balises: très ancienne
 - Balises naturelles: étoiles, montagnes, soleil, etc.
 - Balises artificielles: phares
- Inconvénients des balises à l'intérieur
 - Équiper l'environnement (cher)
 - Changements de l'environnement
 - Flexibilité et adaptabilité limitées
- GPS
 - Capteur clé en robotique mobile à l'extérieur
 - Inutilisable à l'intérieur ou à l'extérieur dans des environnements fortement encombrés (canyons urbains, canopées très denses, etc.)



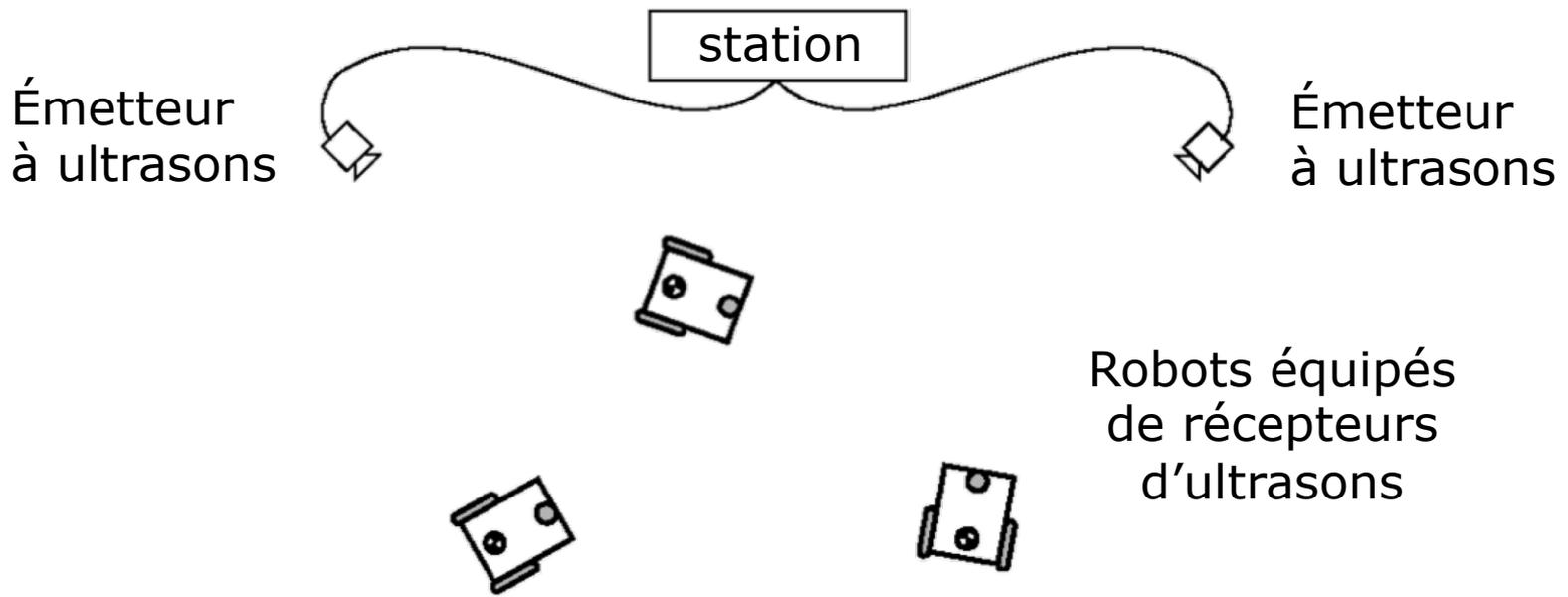
Balises optiques passives

- Balises rétro réfléchives passives de position connue
- La distance et l'orientation de deux balises au moins doit être mesurée pour déduire une position (robot avec télémètre laser embarqué)



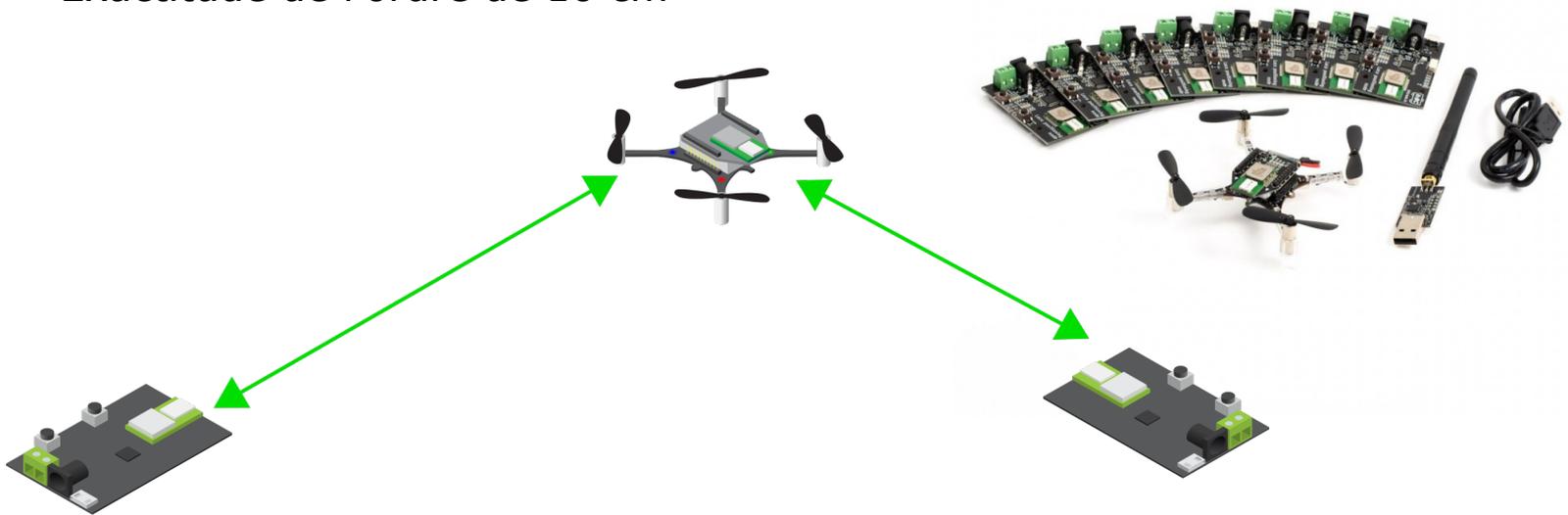
Balises actives à ultrasons

- Positions absolues des émetteurs connues
- Temps-de-vol: déduction des positions relatives
- Synchronisation nécessaire (via radio ou IR)



Balises actives radio

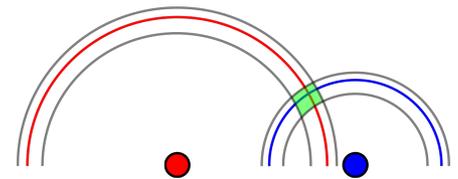
- Utilisation de signaux radio UWB (Ultra-Wide Band)
 - Transmission d'impulsions de très courte durée, souvent inférieure à la nanoseconde, et sur un large spectre de fréquence
- « Mini GPS » pour environnement intérieur
- Par ex. système « Loco Positioning » de *bitcraze*
 - Basé sur le chip DWM1000 de *Decawave*
 - Exactitude de l'ordre de 10 cm



www.bitcraze.io/documentation/system/positioning

GPS (Global Positioning System)

- Origine militaire aux É.U. (1^{er} satellite en 1978)
- Constellation de 31 satellites en orbite à 20180 km
- Garantie d'avoir toujours 6 satellites dans la ligne de visée d'un dispositif dans le monde entier
- Au moins 4 satellites pour estimer la position (x, y, z)
- Localisation basée GPS: mesure de *temps-de-vol*
 - Difficultés techniques
 - Synchronisation:
 - Entre les satellites
 - Entre les satellites et le récepteur GPS
 - Mise à jour temps-réel de la position exacte des satellites
 - Mesure précise du temps-de-vol
 - Interférences, réflexions du signal, etc.
 - **Dilution of Precision (DOP)**: elle spécifie l'effet multiplicatif de la géométrie des satellites sur la précision du GPS
- Autres systèmes de navigation basés satellites (GNSS): GLONASS (Russie), COMPASS (Chine), Galileo (U.E.)



Comparaison des orbites des satellites:

- GPS
- GLONASS
- COMPASS
- Galileo

—— avec ——

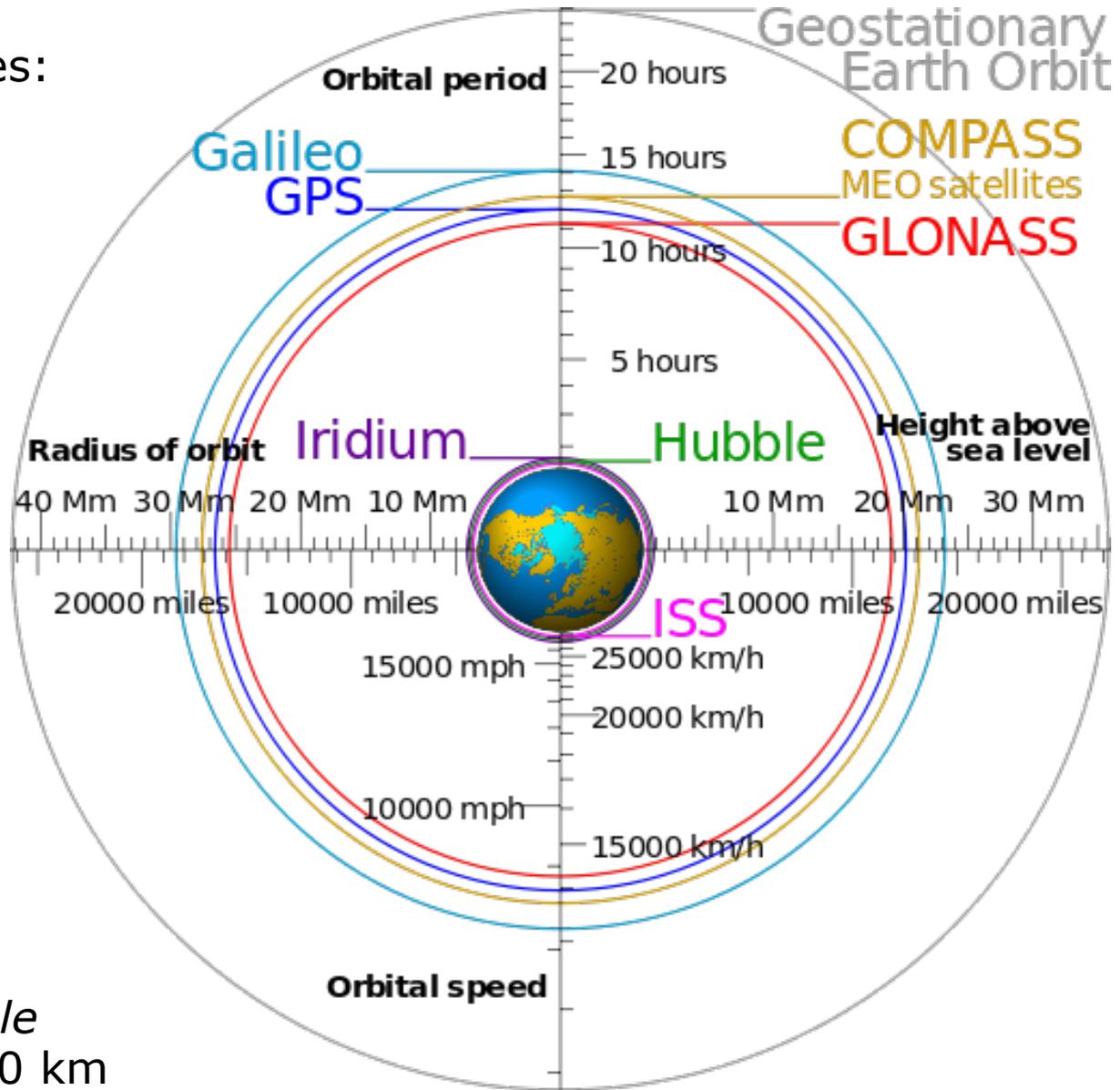
Orbite géostationnaire:
35786 km

Iridium (système global de télé-communications):
780 km

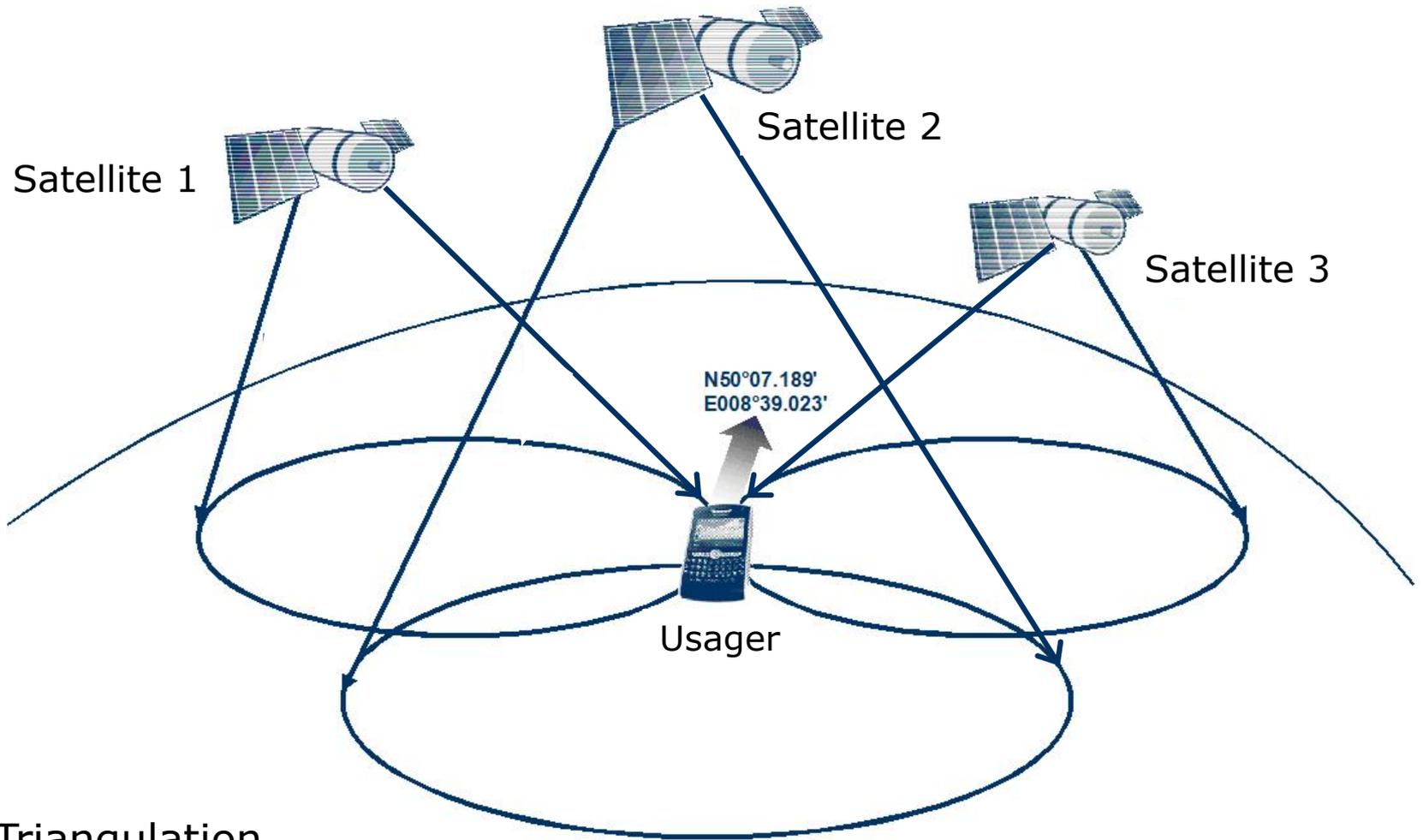
Starlink (E. Musk):
550 km

Télescope Hubble:
540 km

ISS (*Station Spatiale Internationale*): 410 km



GPS (Global Positioning System)

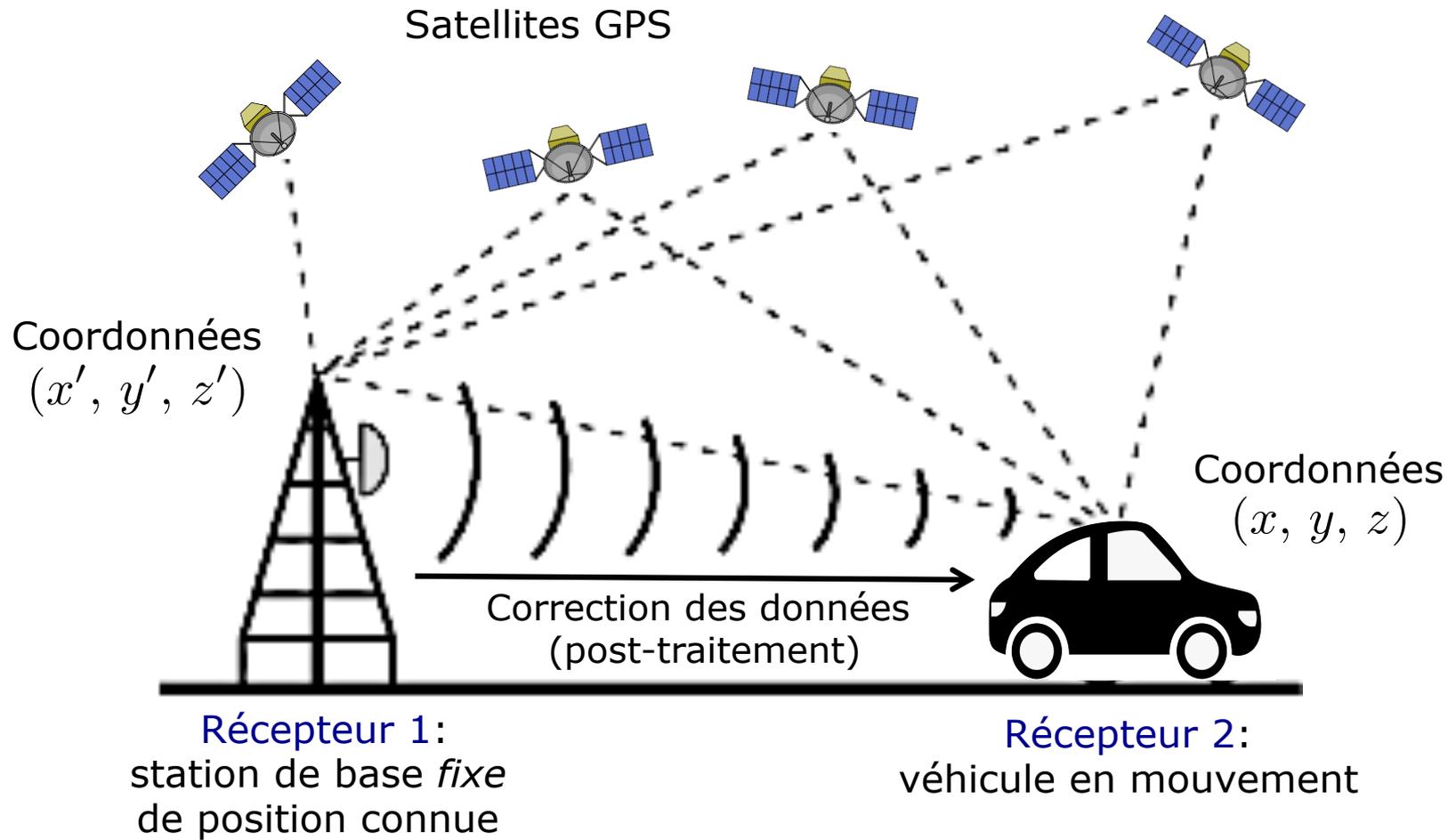


Triangulation
de satellites GPS

GPS (Global Positioning System)

- Synchronisation
 - 0.3 m/ns: exactitude de position proportionnelle à la mesure du temps
 - Horloge atomique sur chaque satellite
- Mise à jour temps-réel des positions des satellites
 - Suivi par stations au sol
 - La station principale analyse les mesures et transmet les positions courantes à chaque satellite
- Mesure exacte du temps-de-vol
 - Avec 4 satellites, identification de (x, y, z) et d'un facteur de correction de délai Δ_t
- GPS commerciaux
 - Exactitude en position:
 - 10 m dans le plan horizontal
 - 45 m selon la verticale
 - Mise à jour: entre 1 et 4 Hz
- GPS différentiel (DGPS)
 - Exactitude en position ~ 10 cm

DGPS



Pour plus de détails sur le fonctionnement du GPS, voir le ch. 8.8 du livre "Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors", J.A. Farrell, McGraw-Hill, 2008

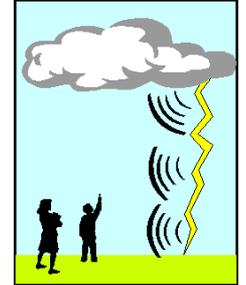
Capteurs temps-de-vol

- Information de distance, élément clé pour:
 - Évitement d'obstacles
 - Localisation et modélisation de l'environnement
- Sonars et télémètres lasers
- Exploitation de la vitesse de propagation de l'onde
- Pour une onde harmonique monochromatique (laser):

$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T}$$

- v : vitesse de propagation de l'onde
 - f, T : fréquence, période de l'onde
 - λ : longueur d'onde
- $d = \frac{1}{2} v t$: distance parcourue, où t est le temps-de-vol

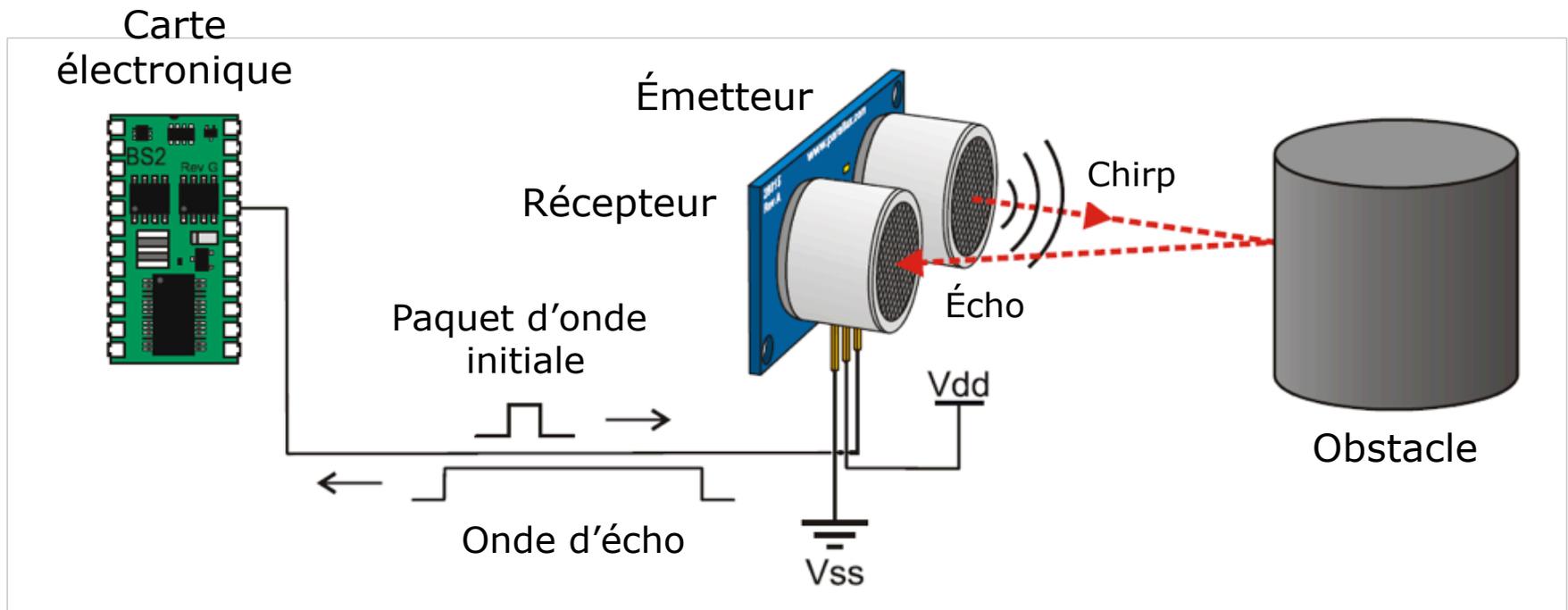
Capteurs temps-de-vol



- Caractéristiques:
 - **Vitesse du son** : 0.3 m/ms (c'est-à-dire, 300 m/s)
 - Sonar : 3 m \Leftrightarrow 10 ms
 - **Vitesse de la lumière** : 0.3 m/ns (c'est-à-dire, 300000 km/s)
 - Télémètre laser : 3 m \Leftrightarrow 10 ns
 - Besoin d'électronique très rapide
 - Télémètres lasers beaucoup plus chers et difficiles à concevoir
- La qualité dépend de:
 - Inexactitudes dans la mesure du temps-de-vol
 - Angle d'ouverture du rayon transmis (pour les sonars)
 - Interaction avec la cible (type de surface, réflexions spéculaires/diffuses)
 - Variation de la vitesse de propagation (son suivant le milieu)
 - Vitesse relative du robot par rapport à la cible

Sonar

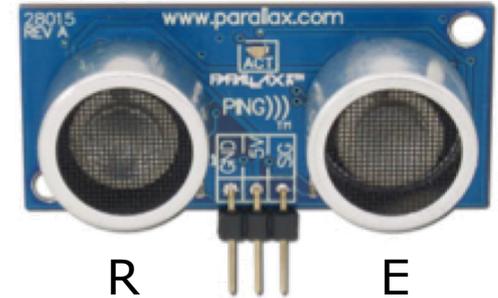
- Principe de fonctionnement



Parallax PING

Sonar

- Émission d'un paquet d'ondes d'ultrasons



- Distance de l'objet faisant écho : $d = \frac{1}{2} v t$

↑
temps-de-vol

- Vitesse du son dans un gaz parfait:

$$v = \sqrt{\gamma R T_p}$$

avec

- γ : indice adiabatique (1.4 pour l'air, 1.330 pour l'eau)
- R : constante de gaz (287 J kg⁻¹ K⁻¹ pour l'air)
- T_p : température du gaz en Kelvin [K]
(rappel que T_p [K] = T_p [°C] + 273.15)

Indice adiabatique γ pour différents gaz

Temp. °C	Gaz	γ	Temp. °C	Gaz	γ	Temp. °C	Gaz	γ
-181	H ₂	1.597	200	Air sec	1.398	20	NO	1.400
-76		1.453	400		1.393	20	N ₂ O	1.310
20		1.410	1000		1.365	-181	N ₂	1.470
100		1.404	2000		1.088	15		1.404
400		1.387	0	CO ₂	1.310	20	Cl ₂	1.340
1000		1.358	20		1.300	-115	CH ₄	1.410
2000		1.318	100		1.281	-74		1.350
20	He	1.660	400		1.235	20		1.320
20	H ₂ O	1.330	1000		1.195	15	NH ₃	1.310
100		1.324	20	CO	19	Ne	1.640	
200		1.310	-181		1.450	19	Xe	1.660
-180	Ar	1.670	-76	1.415	19	Kr	1.680	
20		1.670	20	O ₂	1.400	15	SO ₂	1.290
0	Air sec	1.403	100		1.399	360	Hg	1.670
20		1.400	200		1.397	15	C ₂ H ₆	1.220
100		1.401	400		1.394	16	C ₃ H ₈	1.130

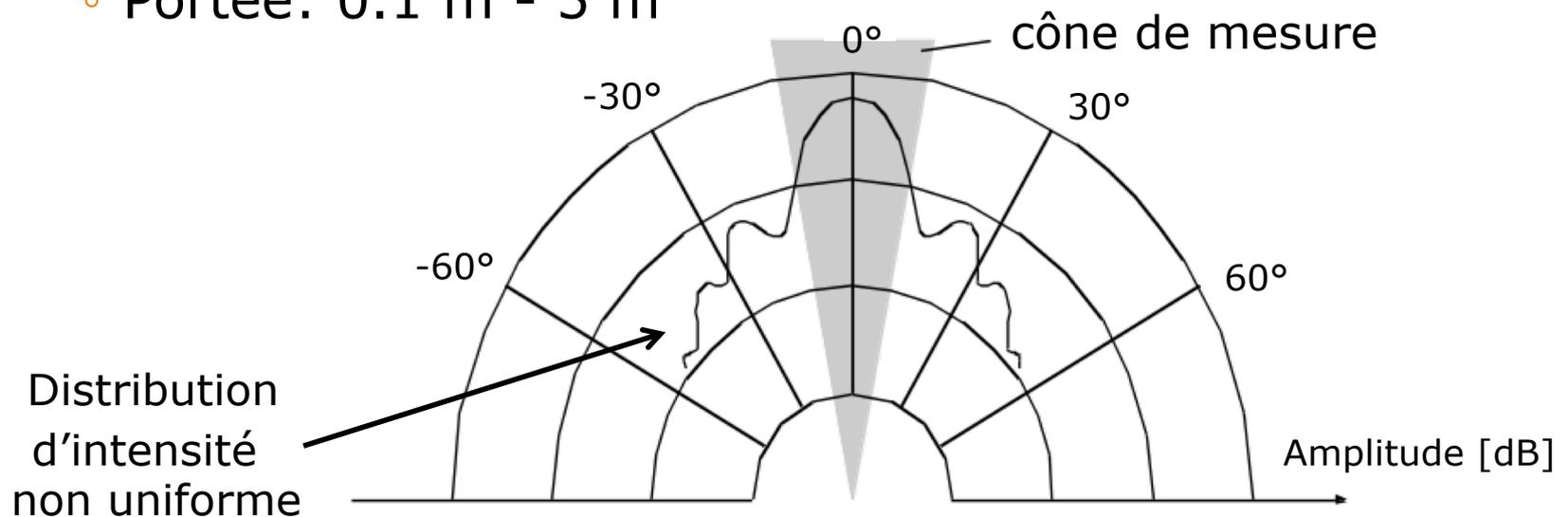
Constante universelle R des gaz parfaits

Vitesse du son dans les conditions normales de température et de pression (0° et 1 atm)

Gaz	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Matériau	[m/s]
Argon, Ar	208	Air	340
Dioxyde de carbone, CO ₂	188.9	Toluène	926
Monoxyde de carbone, CO	297	Acétone	1120
Hélium, He	2077	Xylol	1165
Dihydrogène, H ₂	4124	Alcool	1195
Méthane, CH ₄	518.3	Benzine	1202
Diazote, N ₂	296.8	Pétrole	1275
Dioxygène, O ₂	259.8	Eau	1480
Propane, C ₃ H ₈	189	Acide sulfurique	1677
Dioxyde de soufre, SO ₂	130	Béton	3100
Air	287	Acier	5600
Vapeur d'eau, H ₂ O	462	Diamant	18000

Sonar

- Fréquences typiques: 40-180 kHz
- Génération de l'onde sonore
 - Piézo-transducteur
 - Émetteur et récepteur séparés ou non
- Le rayon sonore se propage dans un cône
 - Angles d'ouverture entre 20° et 70°
 - Portée: 0.1 m - 5 m



Sonar

- Problèmes pratiques:

- a) Certaines surfaces *absorbent* le son
- b) Surface loin d'être perpendiculaire à la direction du son: réflexion spéculaire !
- c) Interprétation des mesures

