

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

CM, TD: Lundi et Mardi 13h30-16h00, salle CURI 8

TP: Lundi 13h30-16h30, salle TP204

AU 2025-2026



Electronique

Energie Electrique

Automatique



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"

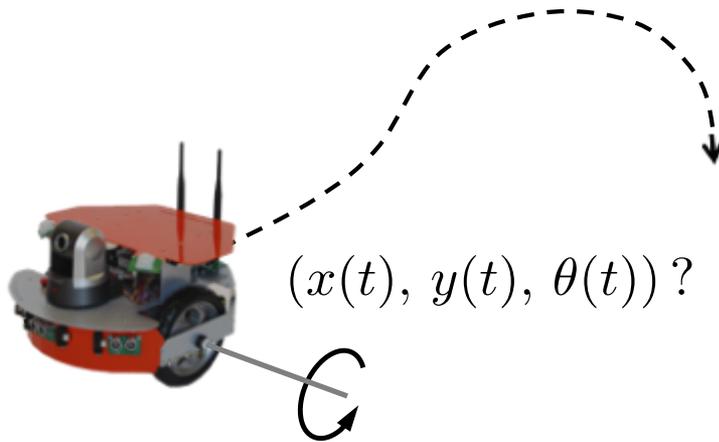


Odométrie

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 : *Localisation et Navigation de Robots*)

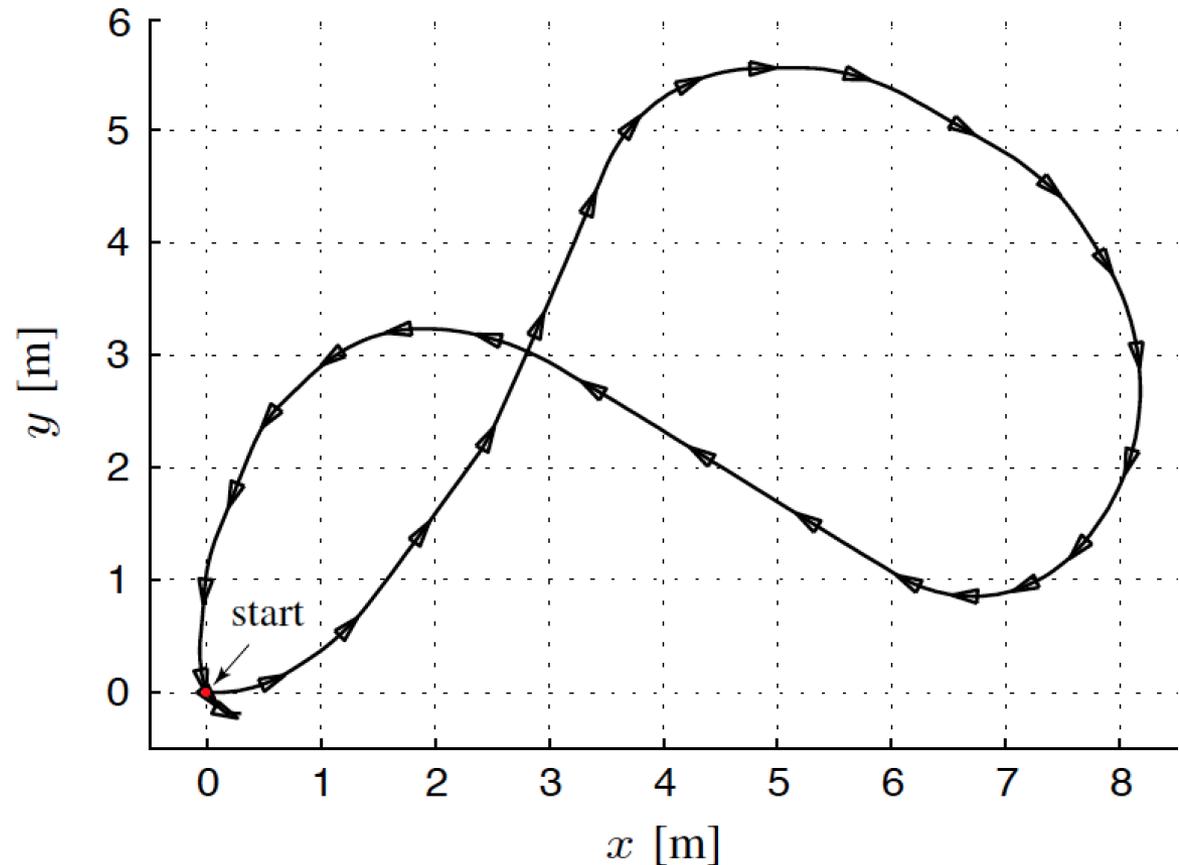
- **Inconvénient de l'odométrie**

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

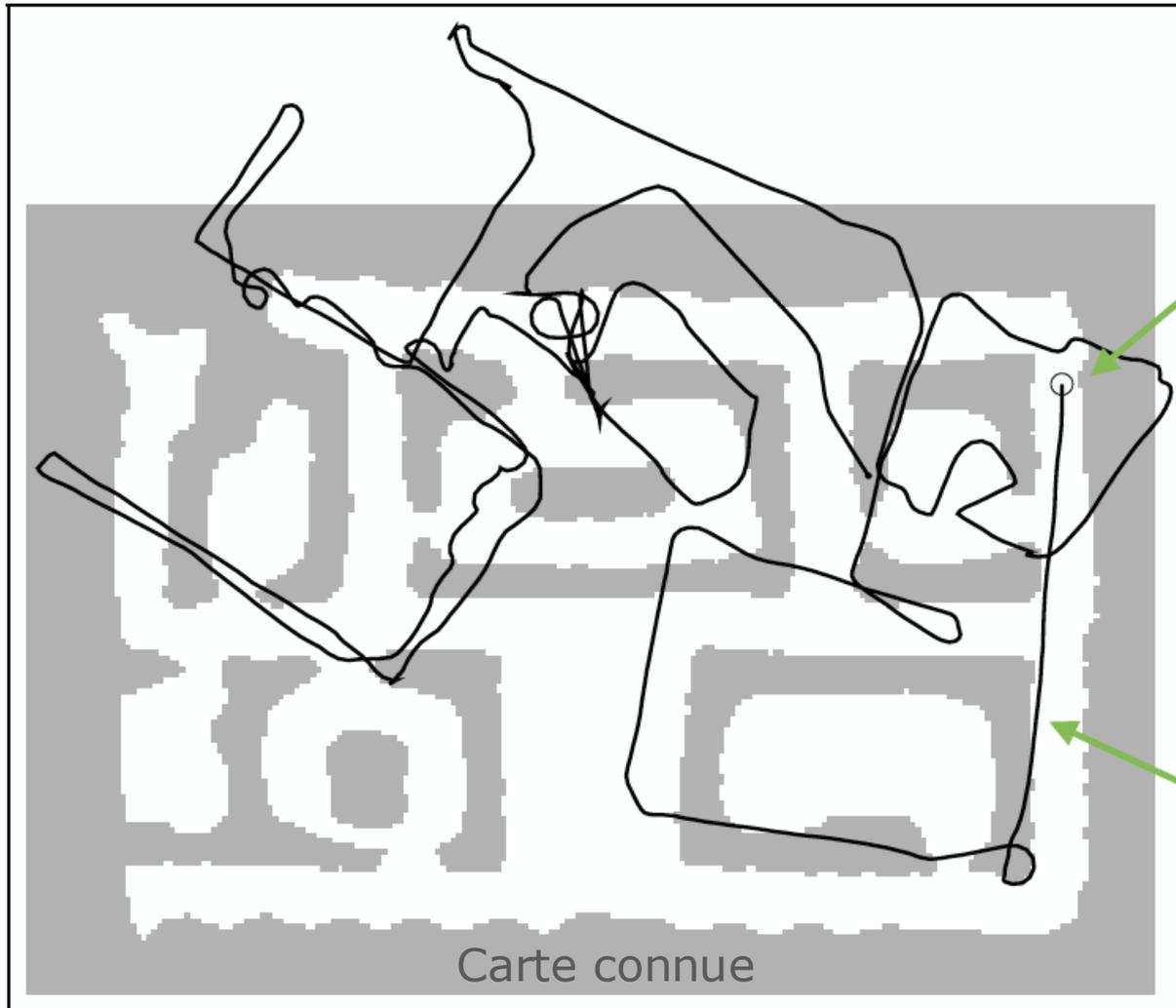


Exemple sur le terrain ...

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



Résultat typique sur des longues distances



Point de
depart du
robot

Trajectoire
reconstruite
à partir des
mesures des
encodeurs

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 :

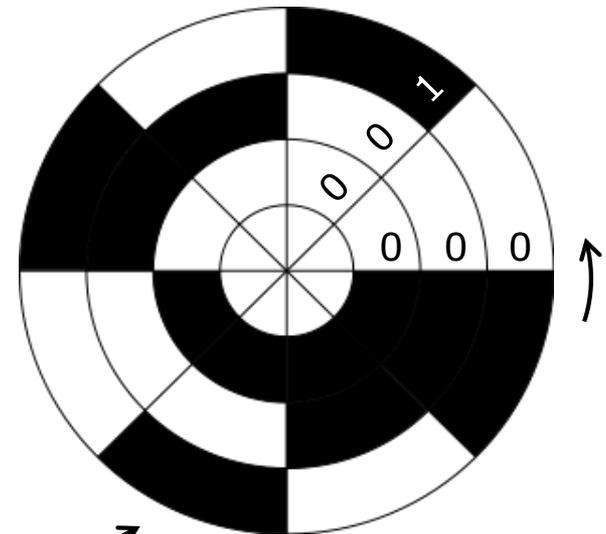
- **Absolu**: la sortie de l'encodeur indique la position courante de l'axe (transducteur d'angle). L'information *n'est pas perdue* lorsque l'alimentation est coupée: elle est disponible à nouveau lorsque l'alimentation est rétablie
- **Incrémental** (ou **relatif**): la sortie de l'encodeur nous informe 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

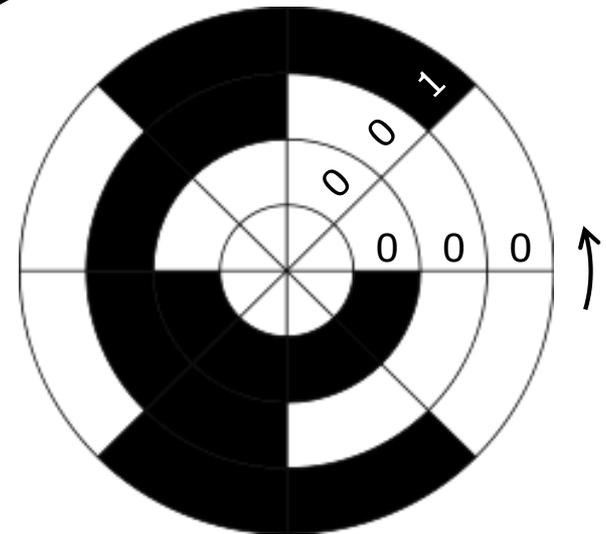
- **Encodeur optique absolu** avec codage binaire (3 bits; noir 1, blanc 0)
 - Un couple émetteur/récepteur par bit

Surface transparente ("blanc")

Surface opaque ("noir")

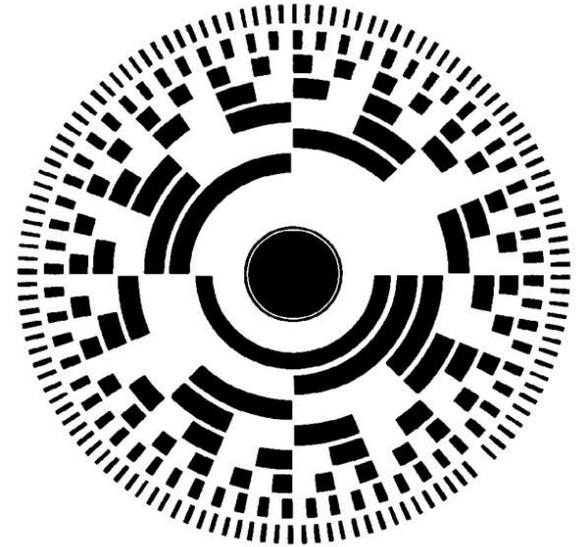


- **Encodeur optique absolu** avec codage Gray (BRGC: "binary-reflected Gray code"), (3 bits; noir 1, blanc 0)
 - Un couple émetteur/récepteur par bit

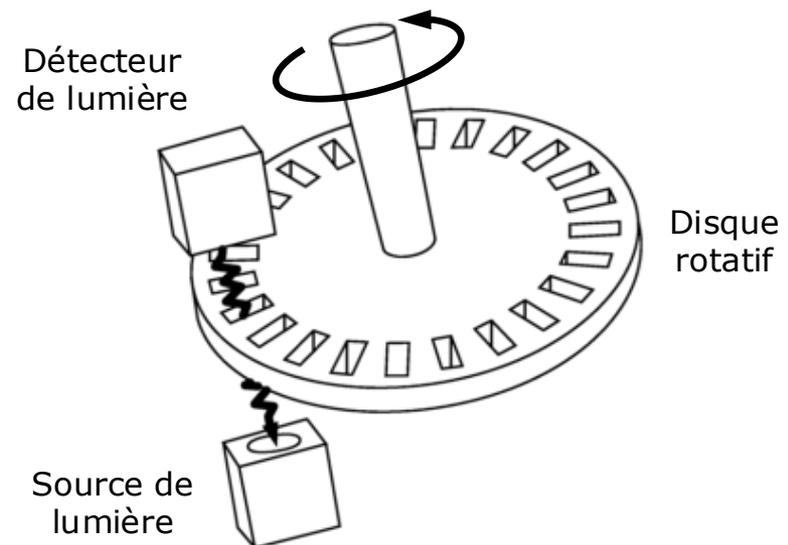


Encodeurs rotatifs: exemples

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

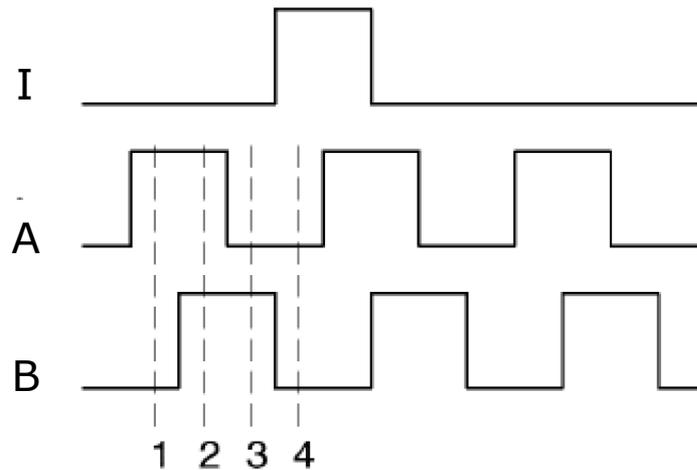
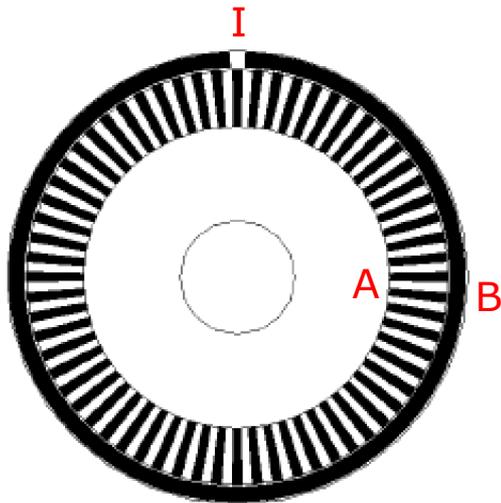


Roue codeuse



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 smartphones, airbag des voitures, drones, consoles de jeu (Nintendo Wii), pacemakers, etc.

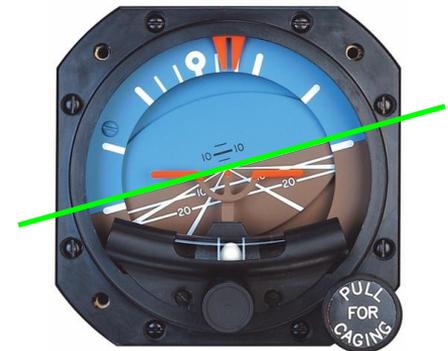
- **Gyroscopes (gyros)**

- 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

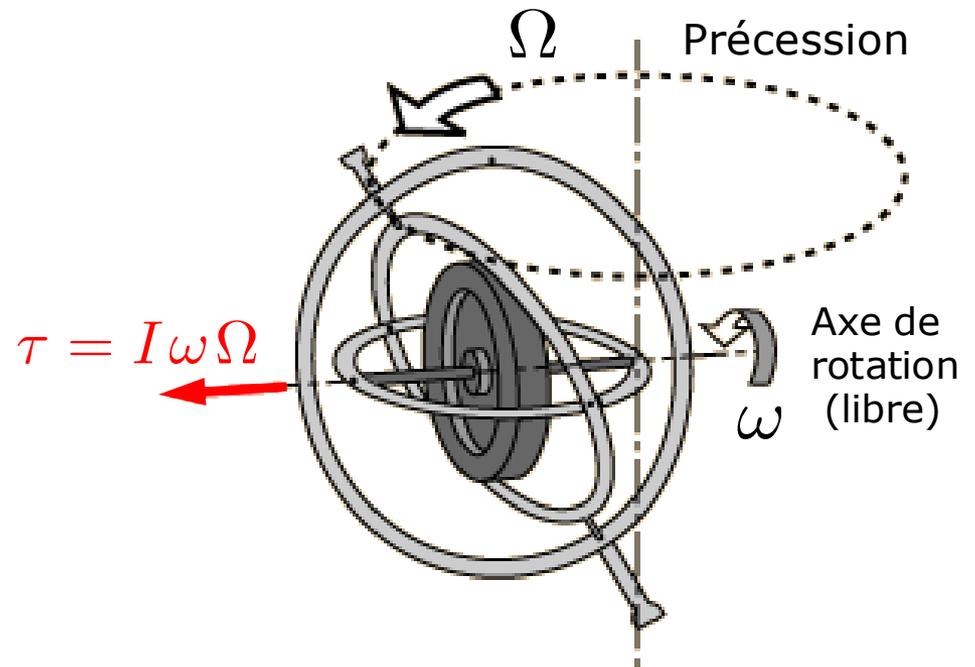
- Trois principes de fonctionnement:
 - Mécanique (il repose sur le *principe de conservation du moment angulaire*)
 - Optique (il repose sur l'*effet de Sagnac*)
 - MEMS (système micro-électromécanique: il repose sur l'*effet de Coriolis*)
- Deux catégories:
 - Mesure directe d'angles (rare)
 - Mesure 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 :

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

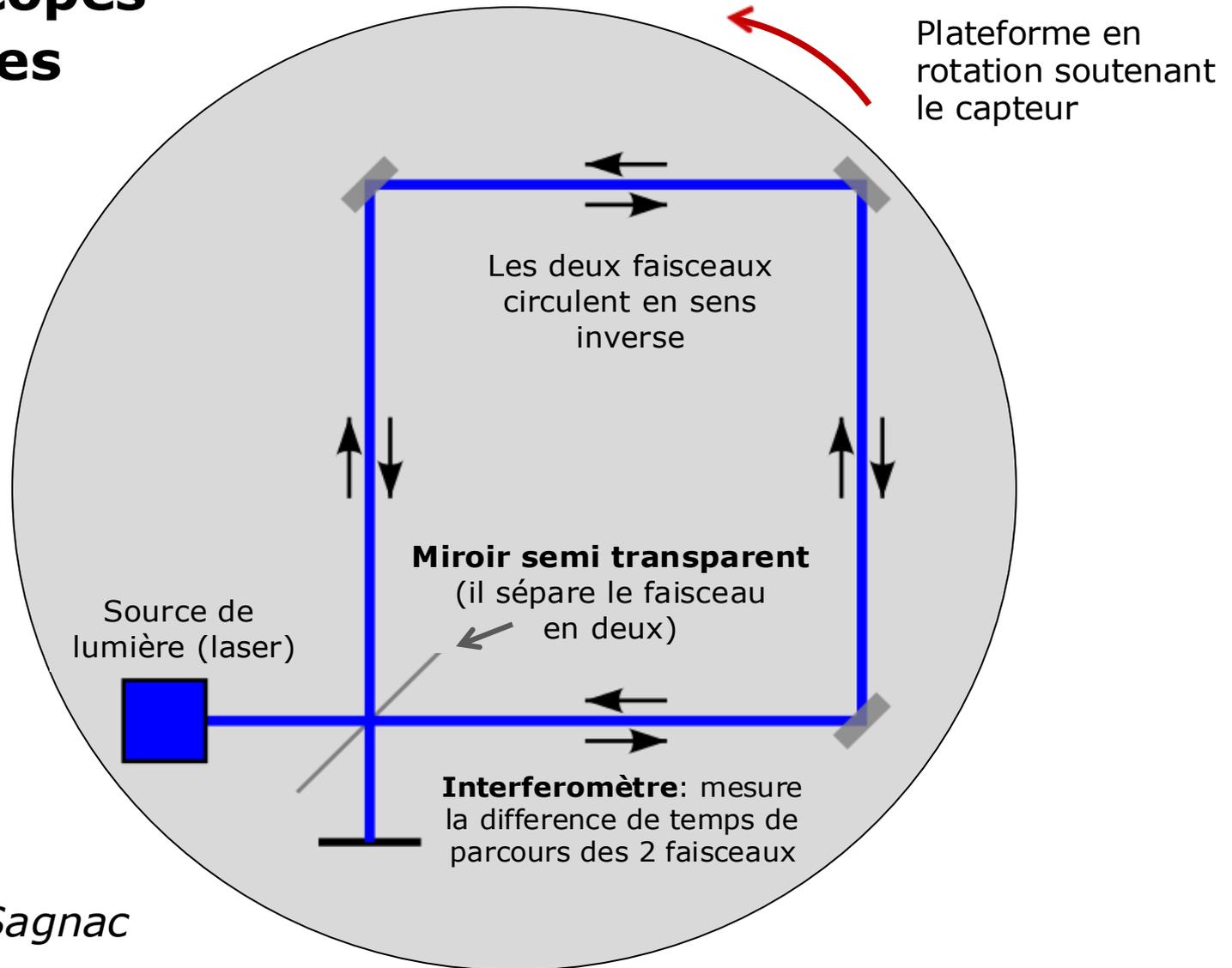
- Gyroscopie mécanique de haute qualité:
 - 70 k€
 - Dérive: $0.02^\circ/\text{h}$
- Mécanique complexe
 - Peu utilisés en robotique mobile



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 $0.0001^\circ/\text{s}$

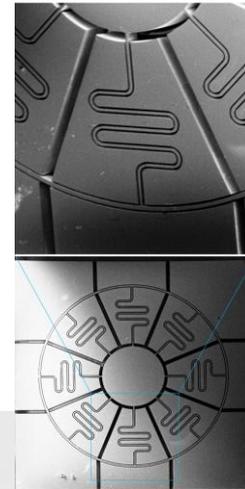
Gyroscopes optiques



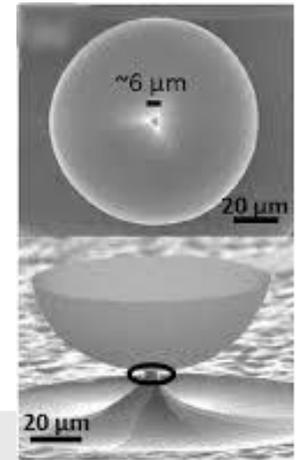
Effet de Sagnac

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 réduites
- Excellents pour la robotique mobile



Roue vibrante

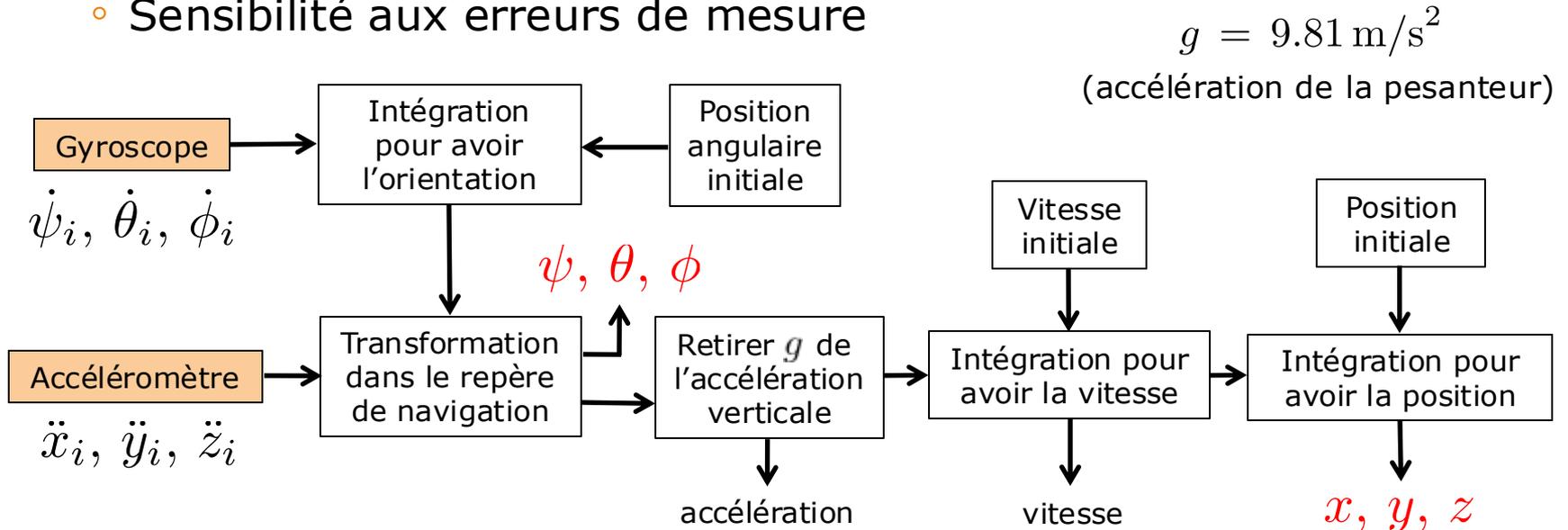


Résonateur hémisphérique



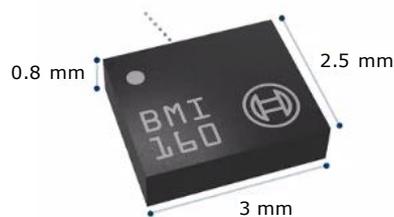
Centrale inertielle (ou IMU = "Inertial Measurement Unit")

- 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 !

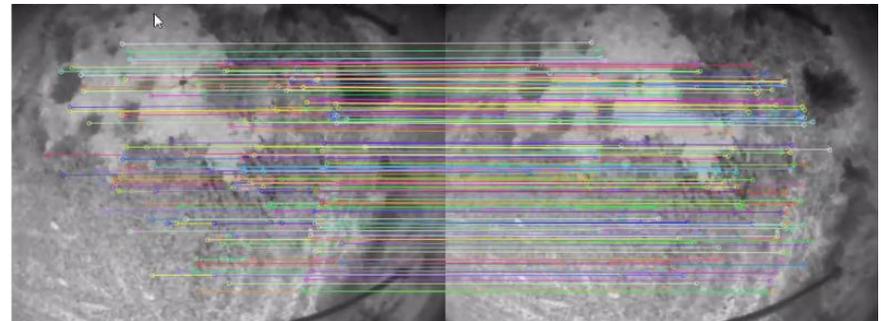
- Hélicoptère **Ingenuity** déployé par le rover *Perseverance* dans la mission Mars 2020, en avril 2021 (72^e vol en janvier 2024)
- Capteurs utilisés pour la navigation:
 - **Centrale inertielle**
 - Une caméra orientée vers le bas
 - Capteur laser (altimètre)
 - Inclinomètre
- Algorithme de navigation visuo-inertiel dédié basé sur le suivi de points d'intérêt au sol (fréquence: 30 Hz)



Bosch BMI160 IMU
< 0.1 g



Garmin Lidar-Lite-V3
Altimeter



Points d'intérêt (features) sur 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

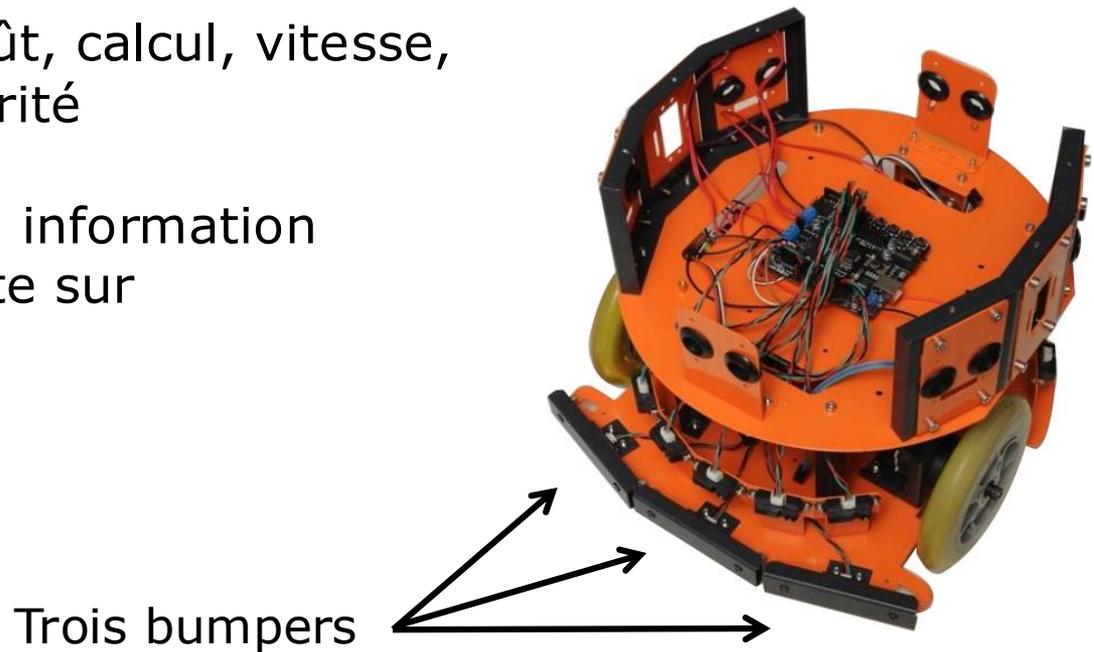
- Systèmes basés balises (localisation dans un repère fixe)
- Sonars (ultrasons)
- Télémètres lasers
- Capteurs IR (infrarouge)
- Radars (ondes radio)

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



Capteurs de contact

*Capteur d'effort
piézoélectrique*

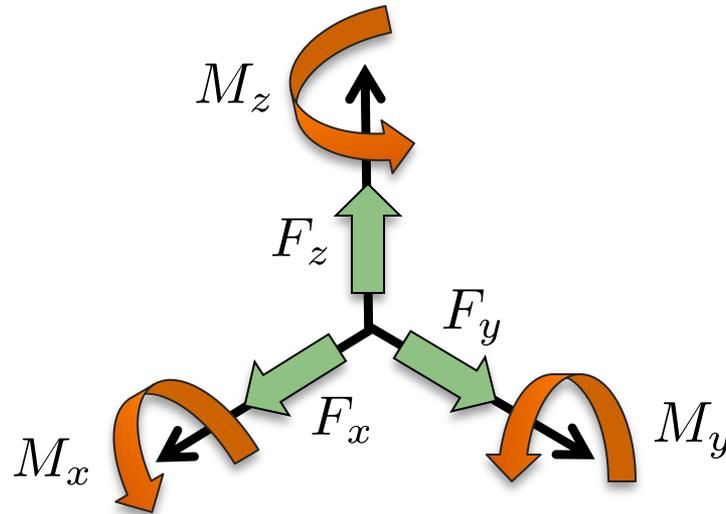
2) Capteur d'effort

- 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
 - Faible plage de mesure



Capteurs de contact

Capteur d'effort à 6 DDL



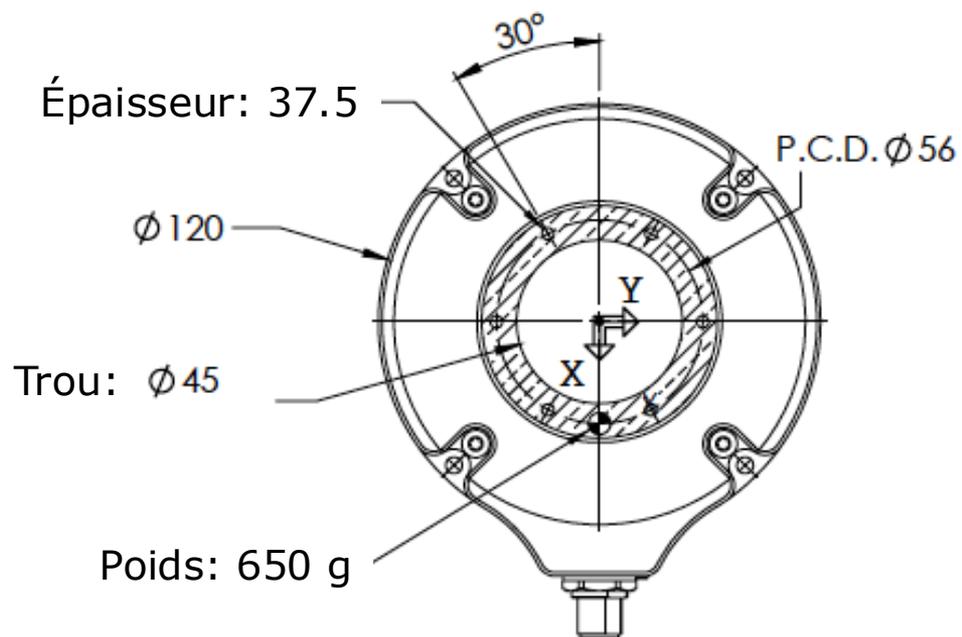
Forces

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

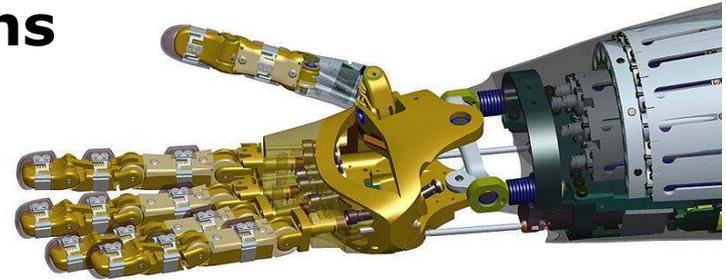
Exemple: capteur à 6 DDL FT 150 de Robotiq

Caractéristiques techniques du capteur

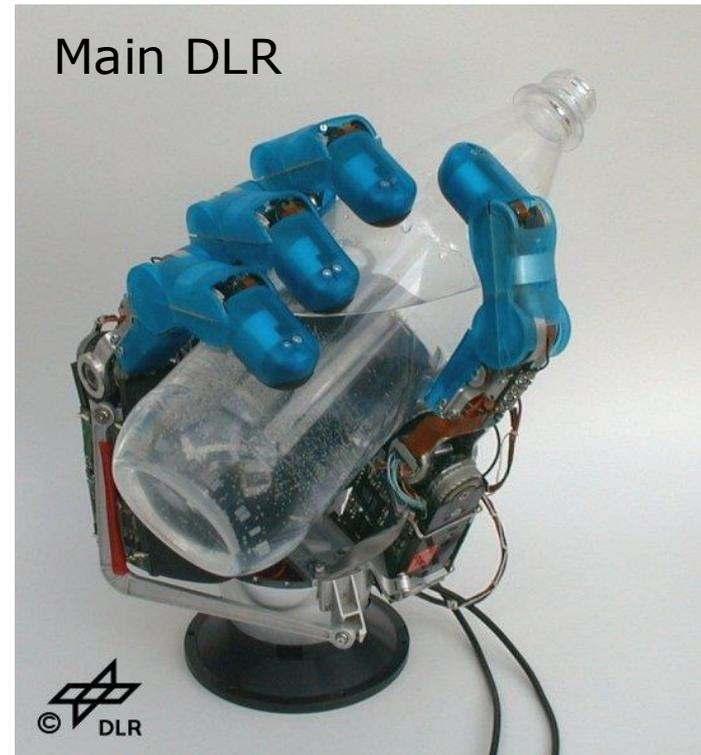
Plage de mesure	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	± 150 N ± 15 Nm
Résolution effective	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	± 0.2 N ± 0.02 Nm
Bruit du signal	F_x, F_y, F_z (combinées) M_x, M_y, M_z (combinées)	± 0.5 N ± 0.03 Nm
Débit de données en sortie		100 Hz
Tension d'entrée		6-28 V-DC
Puissance absorbée maximale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

Capteurs d'effort: applications

1) Mains robotiques



Peau flexible avec une matrice intégrée de transistors organiques



Capteurs d'effort: applications

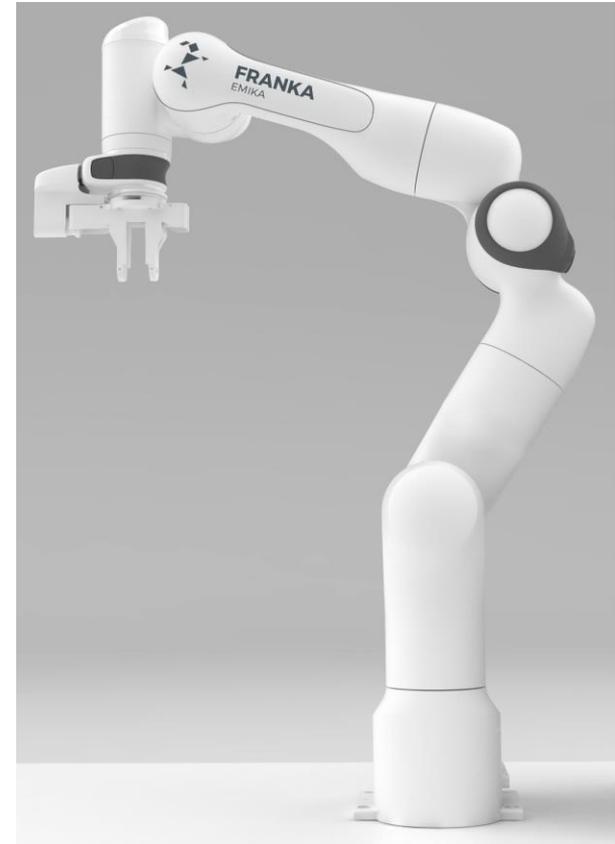
2) Robots industriels collaboratifs (« Cobots »)



Capteurs de couple
sur les 7 axes du robot



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



Panda de *FRANKA Robotics*

Capteurs d'effort: applications

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



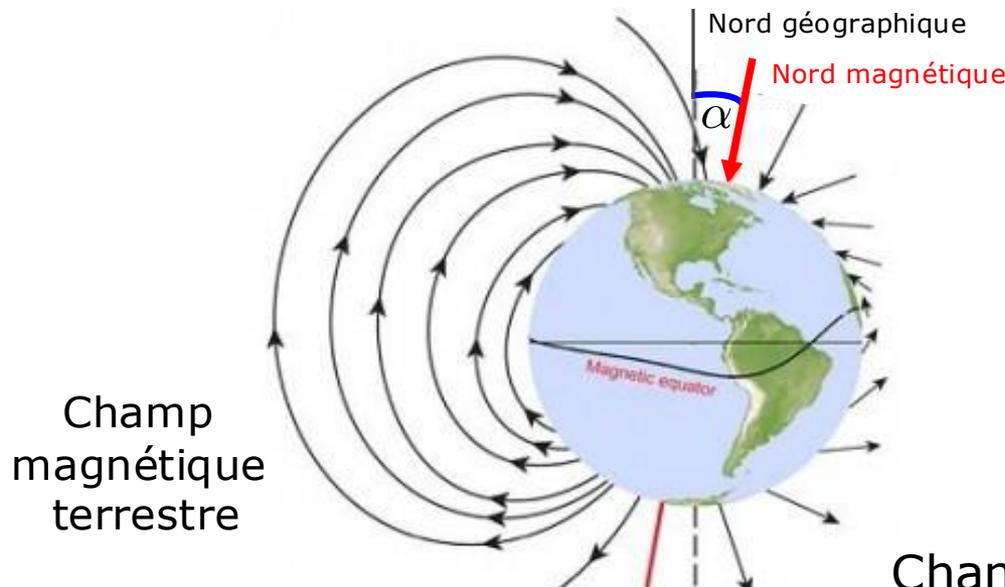
Omega 7 de *Force Dimension* (7 DDL)



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

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 smartphones



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

Champ produit par l'IRM: 1.5 T

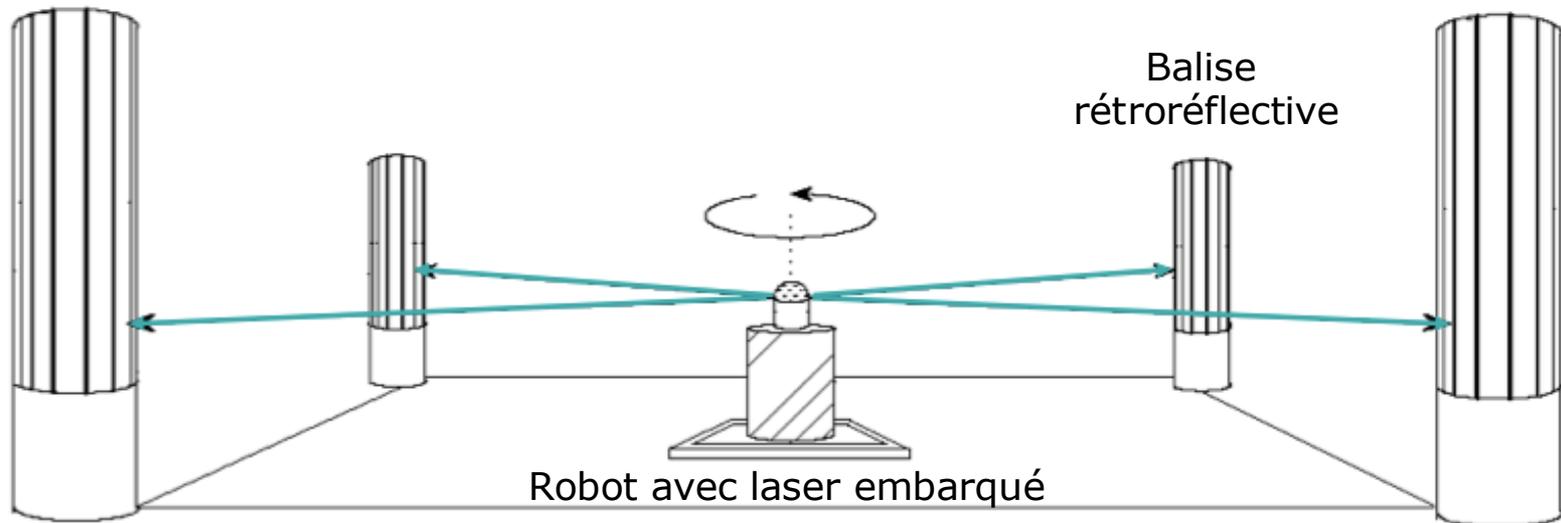
Balises ("beacons" ou "landmarks" en anglais)

- 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) ou sous l'eau



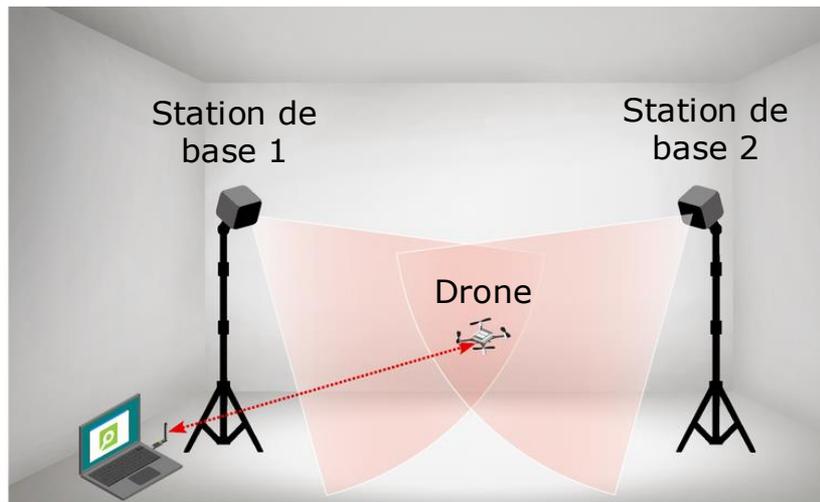
Balises passives optiques

- 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)

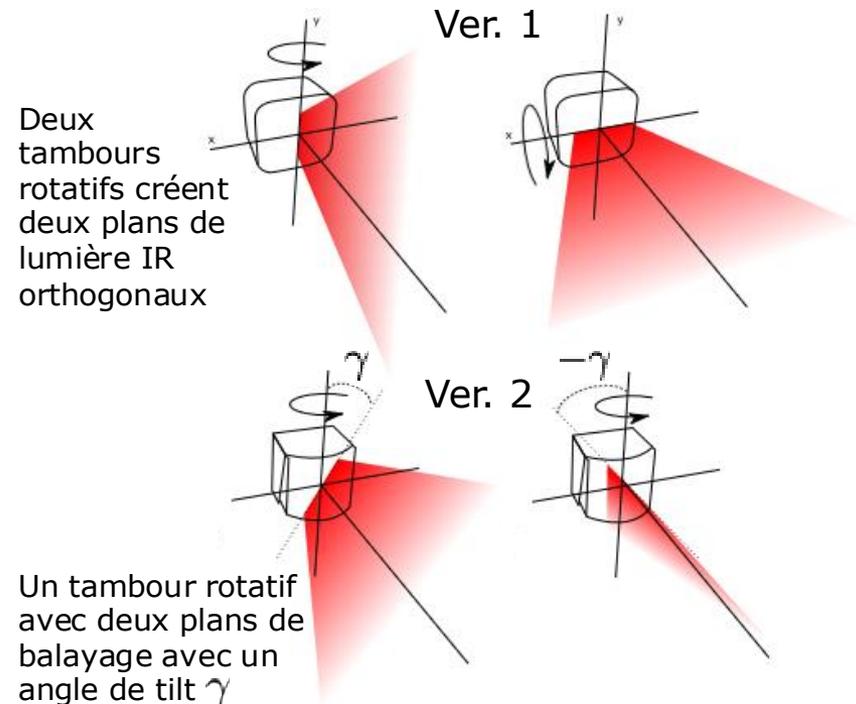


Balises actives optiques

- Par ex. *Lighthouse Positioning System* (développé par Valve et HTC Vive)
- Les stations de base émettent des faisceaux de lumière IF en rotation, encodés avec l'information de position. Un robot avec un photodiode peut détecter ces impulsions de lumière, décoder les données, et calculer son azimuth (θ) et élévation (ϕ) par rapport à la station de base
- En combinant les mesures de plusieurs stations, on peut localiser le robot en 3D

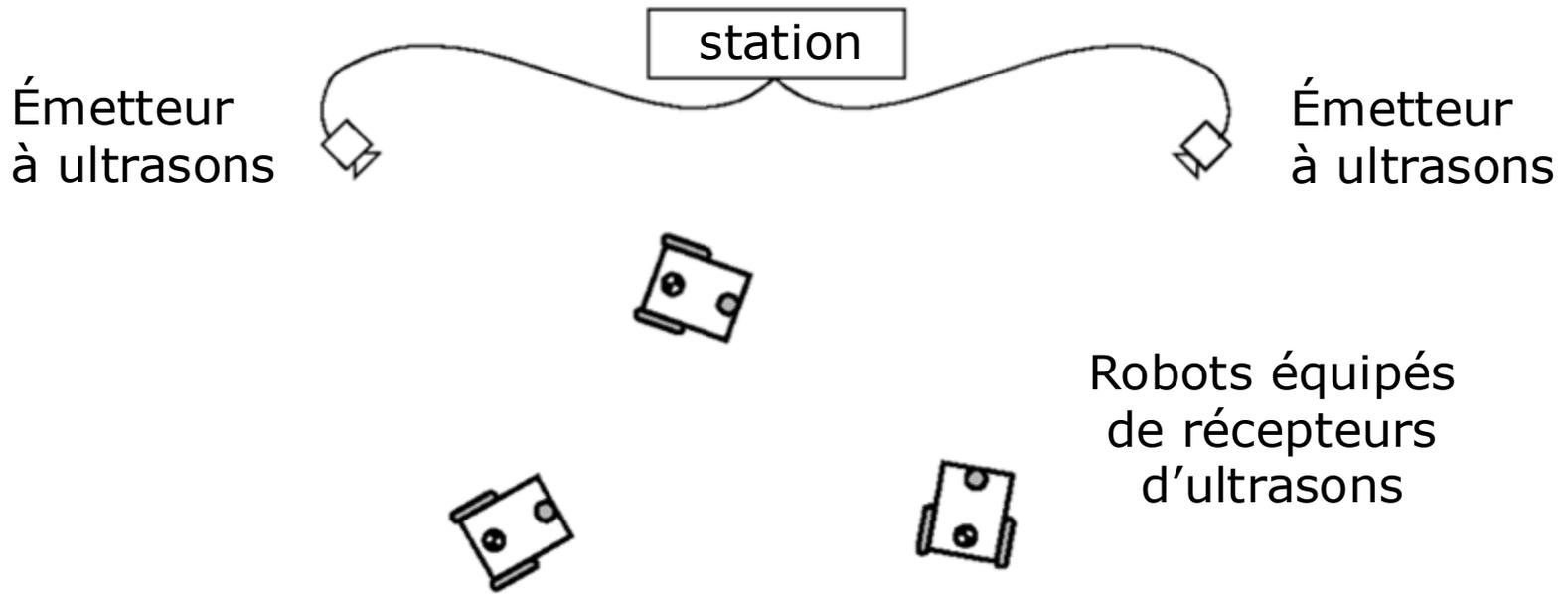


www.bitcraze.io/documentation/system/positioning/lighthouse-positioning-system/



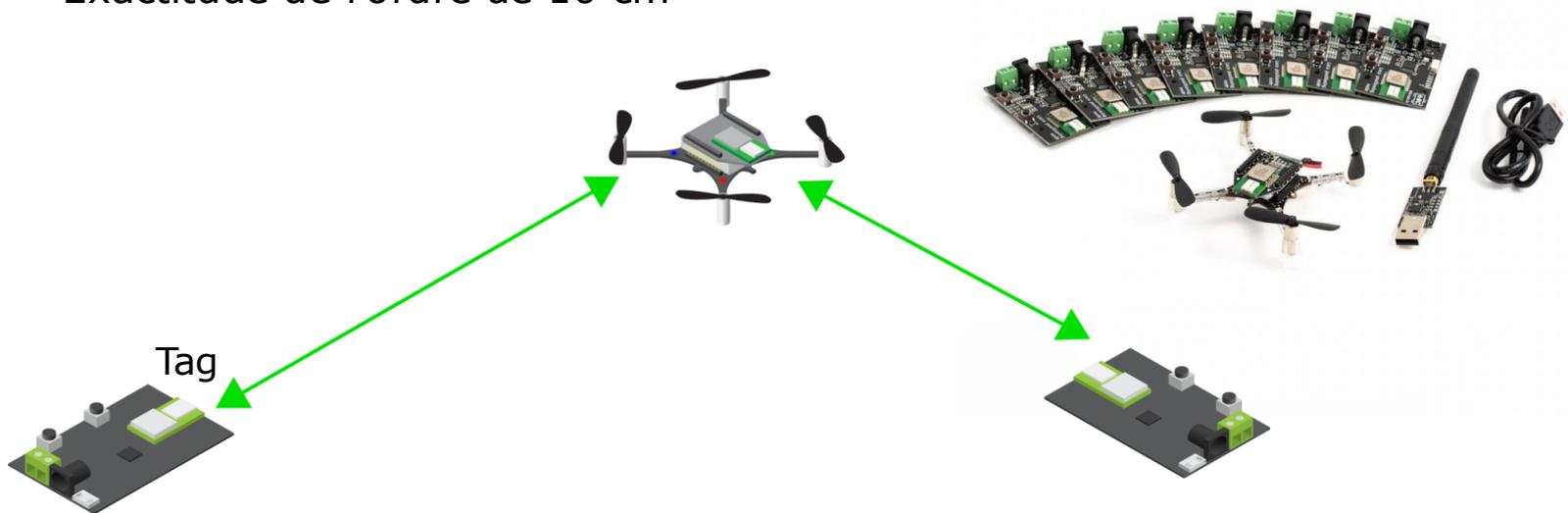
Balises actives à ultrasons

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



Balises actives radio

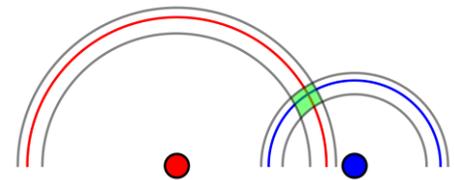
- Utilisation de signaux radio UWB (Ultra-Wide Band)
 - Transmission d'impulsions de très courte durée (souvent inférieure à la ns) et sur un large spectre de fréquence
- « Mini GPS » pour environnement intérieur
- Par ex. système « Loco Positioning » de *bitcraze*
 - Basé sur le chip DWM1000 de *Decawave*
 - 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), BeiDou/COMPASS (Chine), Galileo (U.E.)



Comparaison des orbites des satellites:

- GPS
- GLONASS
- COMPASS
- Galileo

_____ avec _____

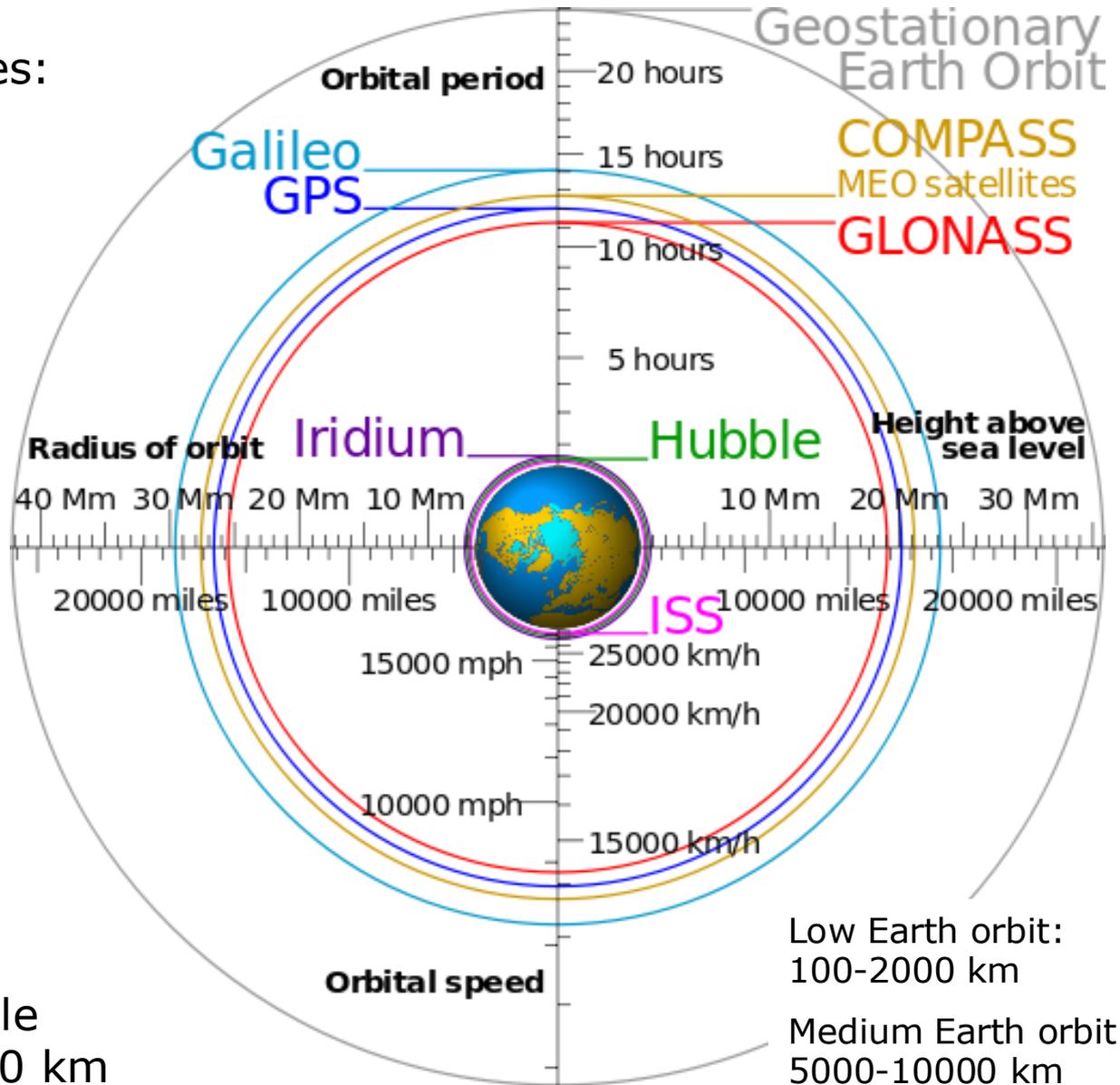
Orbite géostationnaire:
35786 km

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

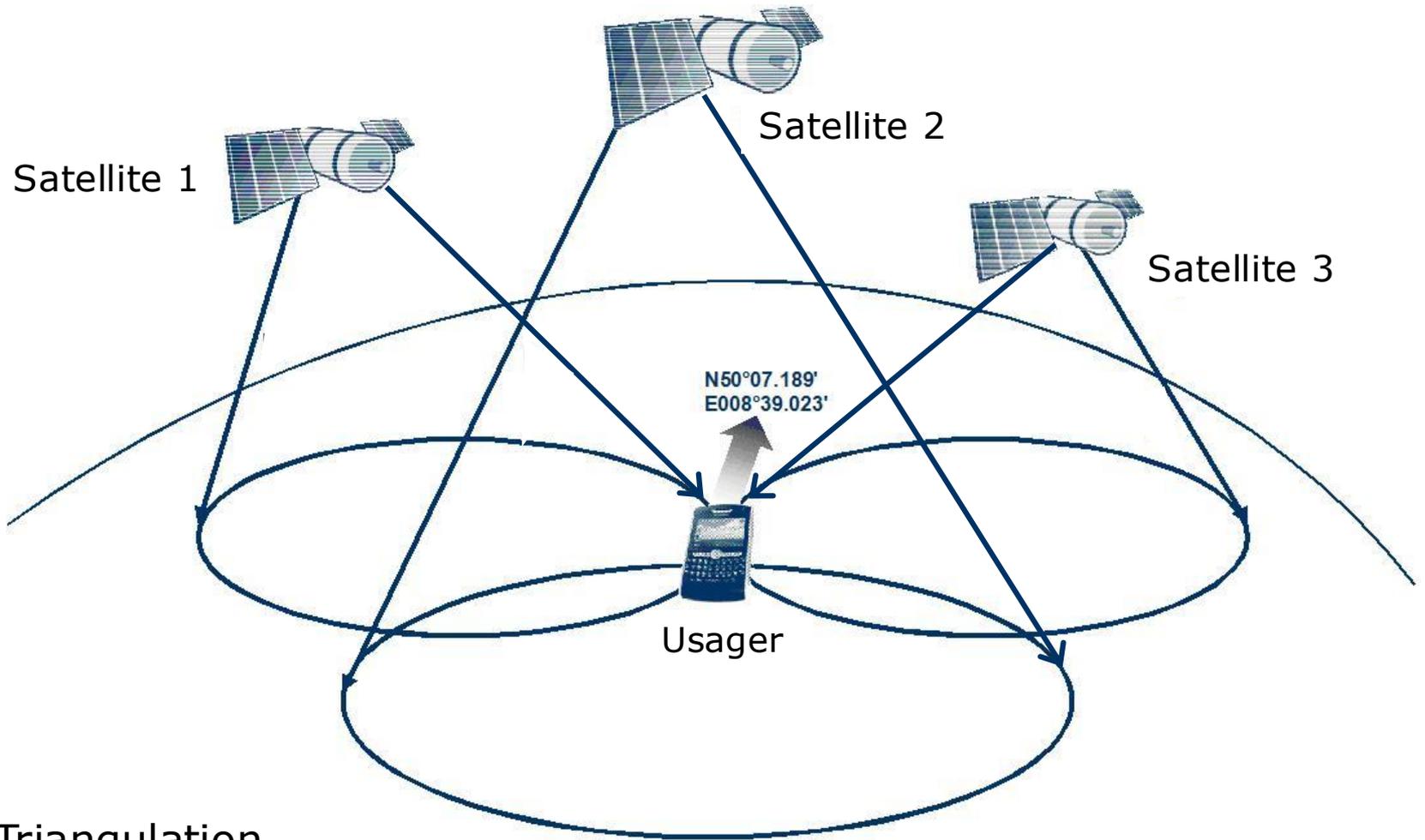
Starlink (E. Musk):
550 km

Télescope Hubble:
540 km

ISS (Station Spatiale Internationale): 410 km



GPS (Global Positioning System)

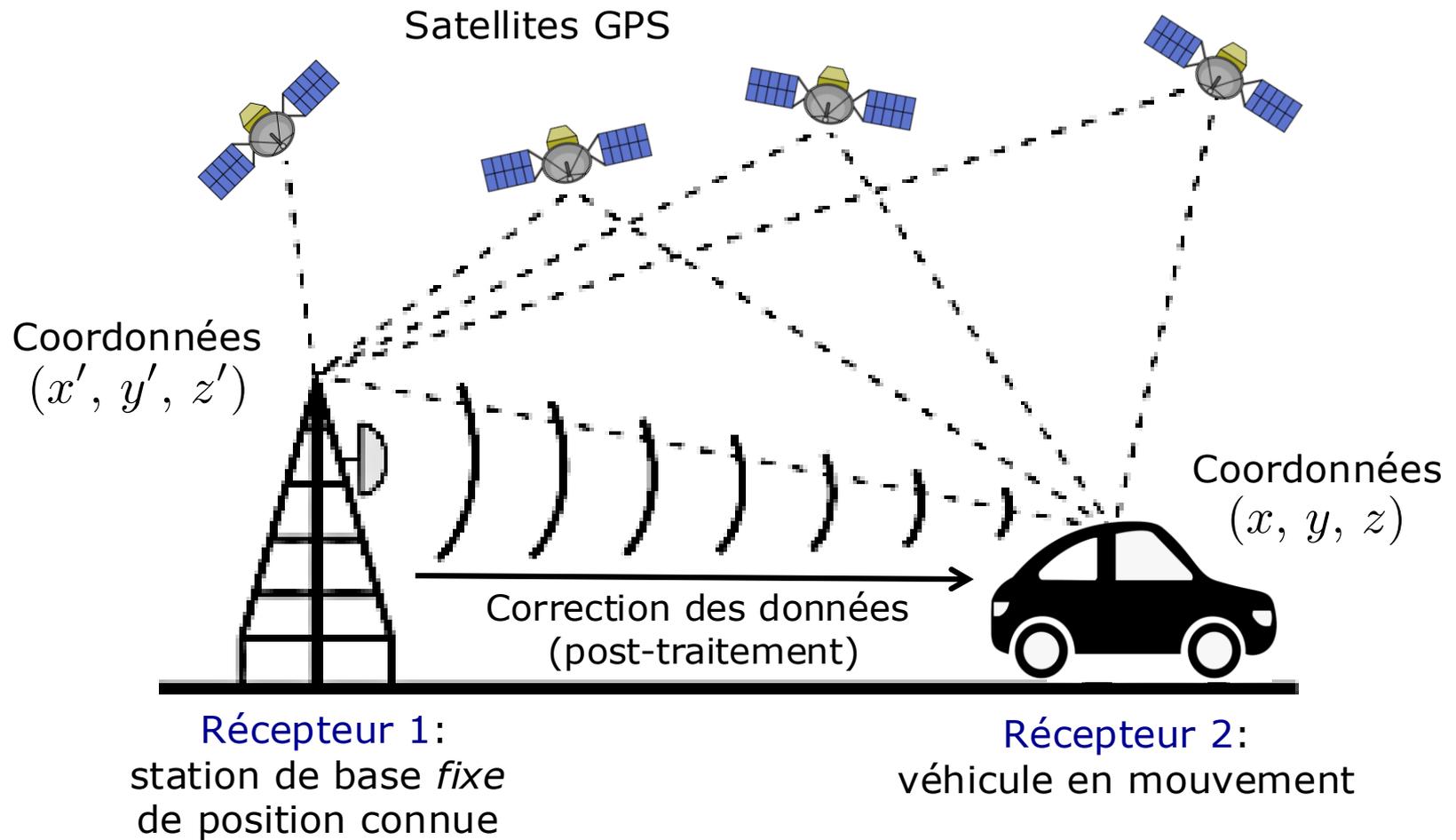


Triangulation
de satellites GPS

GPS (Global Positioning System)

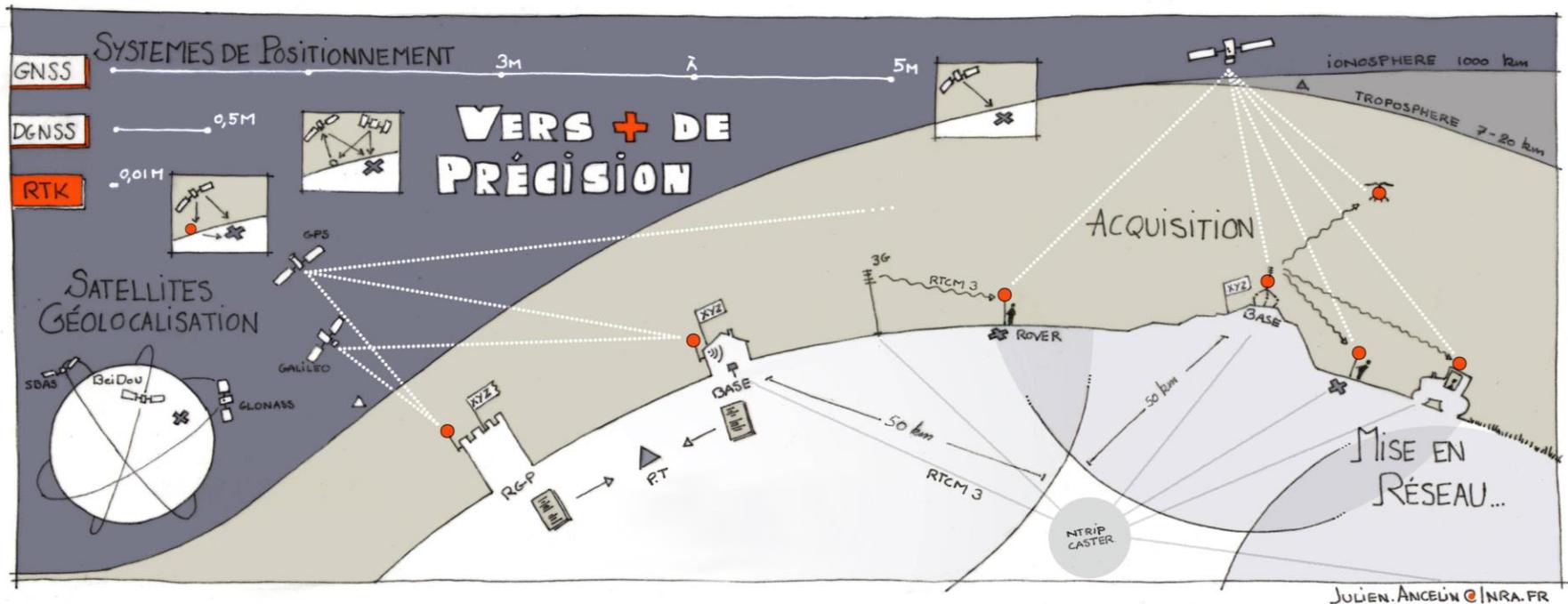
- Synchronisation
 - 0.3 m/ns: exactitude de position proportionnelle à la mesure du temps
 - Horloge atomique sur chaque satellite
- Mise à jour temps-réel des positions des satellites
 - Suivi par stations au sol
 - La station principale analyse les mesures et transmet les positions courantes à chaque 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:
 - 5 m dans le plan horizontal (GPS dans les smartphones)
 - 45 m selon la verticale
 - Mise à jour: entre 1 et 4 Hz
- GPS différentiel (DGPS)
 - Exactitude en position ~ 10 cm

DGPS: fonctionnement



D'autres variantes améliorées du GPS

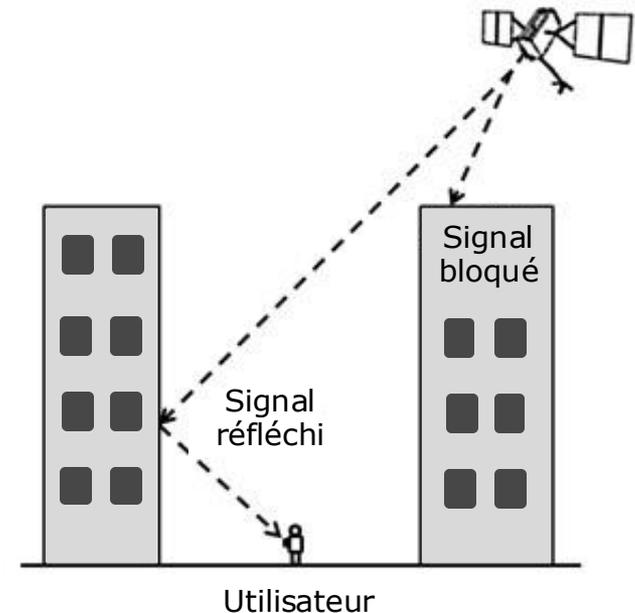
- **A-GPS** (*Assisted GPS*): Il a été introduit pour améliorer la réactivité du GPS, d'où son nom de « GPS assisté »
- **GPS RTK** (*Real Time Kinematic*): Utilisation des mesures de phase des ondes porteuses des signaux émis par le GPS (ou GLONASS, Galileo). Une station de référence fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une exactitude de l'ordre du centimètre



Facteurs qui peuvent dégrader l'exactitude en position du GPS

Causes courantes:

- Le signal du satellite est bloqué par un bâtiment, pont, arbres, etc.
- Utilisation à l'intérieur ou sous terre (par ex. tunnels)
- Le signal du satellite est réfléchi par un bâtiment ou un mur (« multi-path »)



Causes moins courantes:

- Interférence radio ou brouillage (« jamming »)
- Tempêtes solaires intenses
- Entretien/manœuvre des satellites: interruption temporaire du service

Pour plus d'informations 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

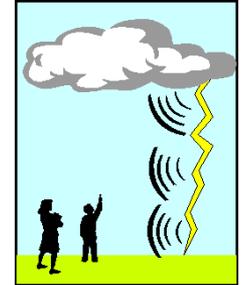
- Information de distance, élément clé pour:
 - Évitement d'obstacles
 - Localisation et modélisation de l'environnement
- Sonars et télémètres lasers
- Exploitation de la vitesse de propagation de l'onde
- Pour une onde harmonique monochromatique (laser):

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

- 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

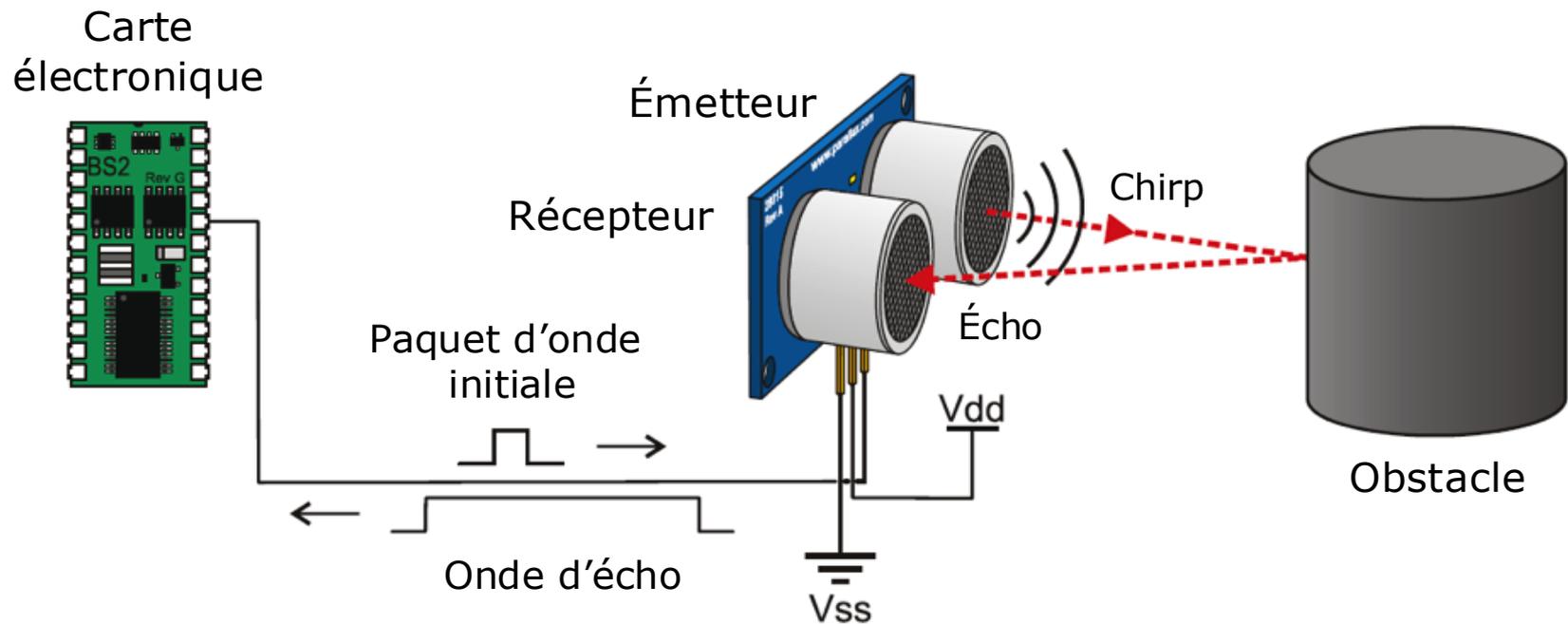
Capteurs temps-de-vol

- 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, 1.33 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	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	1.400	19	Ne	1.640
200		1.310	-181	O ₂	1.450	19	Xe	1.660
-180	Ar	1.670	-76		1.415	19	Kr	1.680
20		1.670	20		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

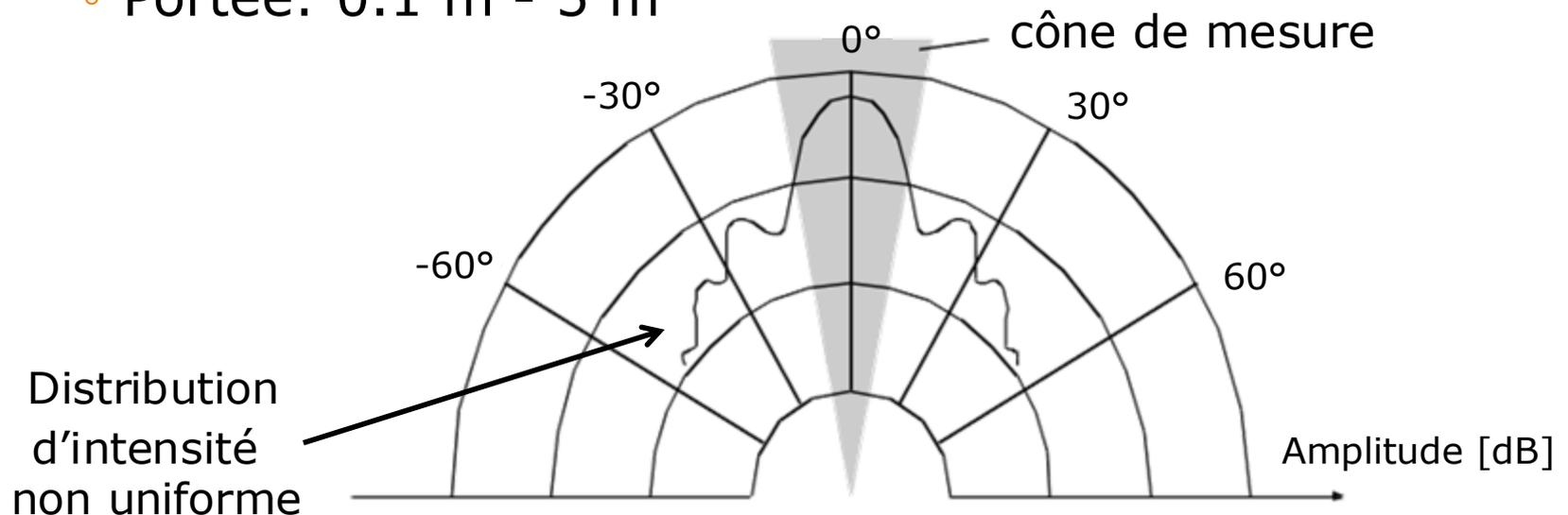
Gaz	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
Argon, Ar	208
Dioxyde de carbone, CO ₂	188.9
Monoxyde de carbone, CO	297
Hélium, He	2077
Dihydrogène, H ₂	4124
Méthane, CH ₄	518.3
Diazote, N ₂	296.8
Dioxygène, O ₂	259.8
Propane, C ₃ H ₈	189
Dioxyde de soufre, SO ₂	130
Air	287
Vapeur d'eau, H ₂ O	462

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

Matériau	[m/s]
Air	340
Toluène	926
Acétone	1120
Xylol	1165
Alcool	1195
Benzine	1202
Pétrole	1275
Eau	1480
Acide sulfurique	1677
Béton	3100
Acier	5600
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 ! Échos multiples possibles
- c) Interprétation des mesures

