

GNSS/SBAS

GÉNÉRALITÉS ET ASPECTS TEMPS-FRÉQUENCE

Jérôme Delporte

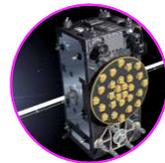
GRENOBLE - WORKSHOP : DISTRIBUTION SÉCURISÉE DU TEMPS ET SYSTÈMES SPATIAUX
14/11/2024

SOMMAIRE

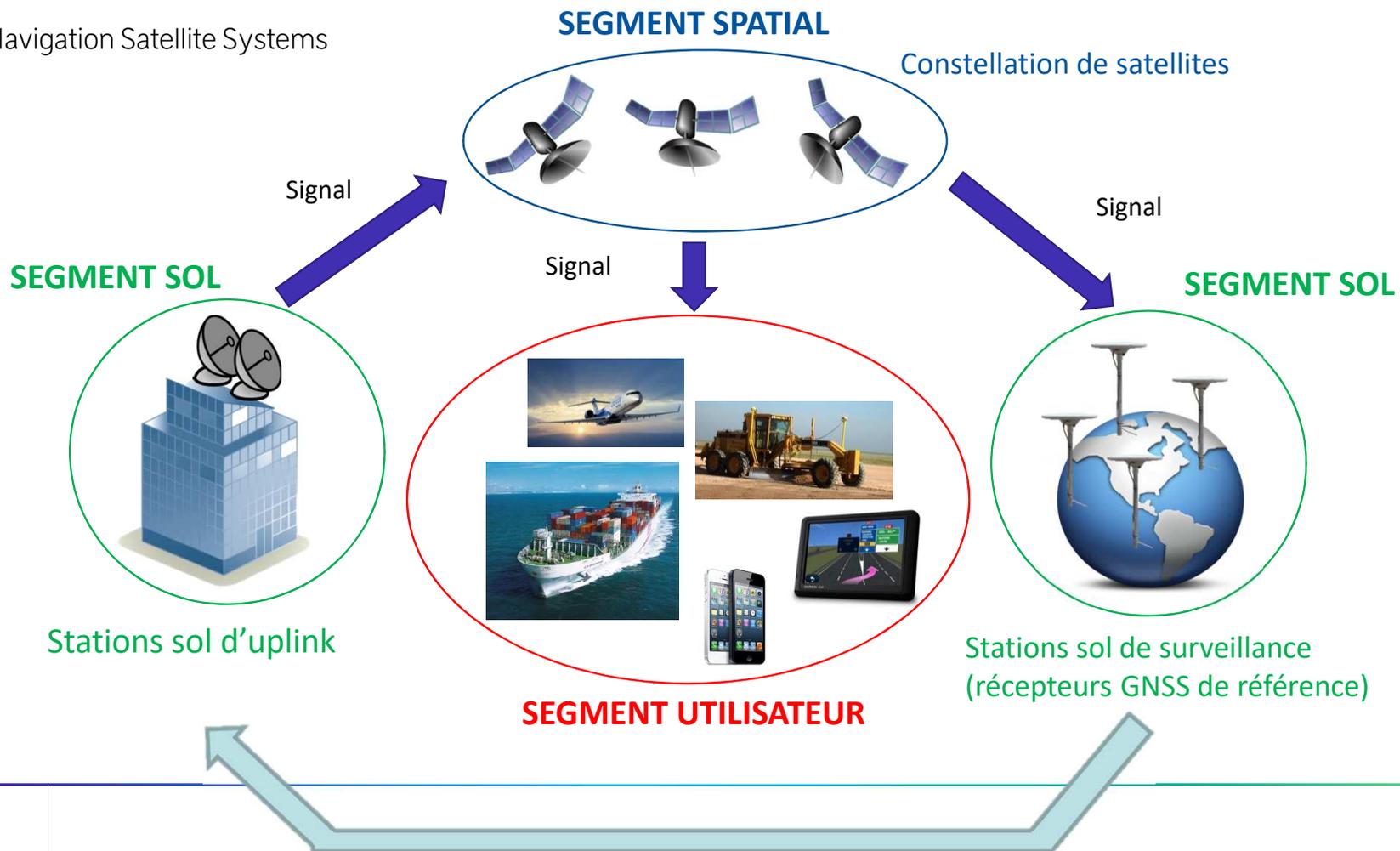


- **01** Systèmes mondiaux (GNSS)
- **02** Systèmes régionaux (RNSS)
- **03** Augmentations (SBAS)
- **04** LEO-PNT
- **05** Liens avec UTC et perfos
- **06** Conclusions

LES 3 COMPOSANTES D'UN GNSS



GNSS = Global Navigation Satellite Systems



SEGMENT SOL GNSS

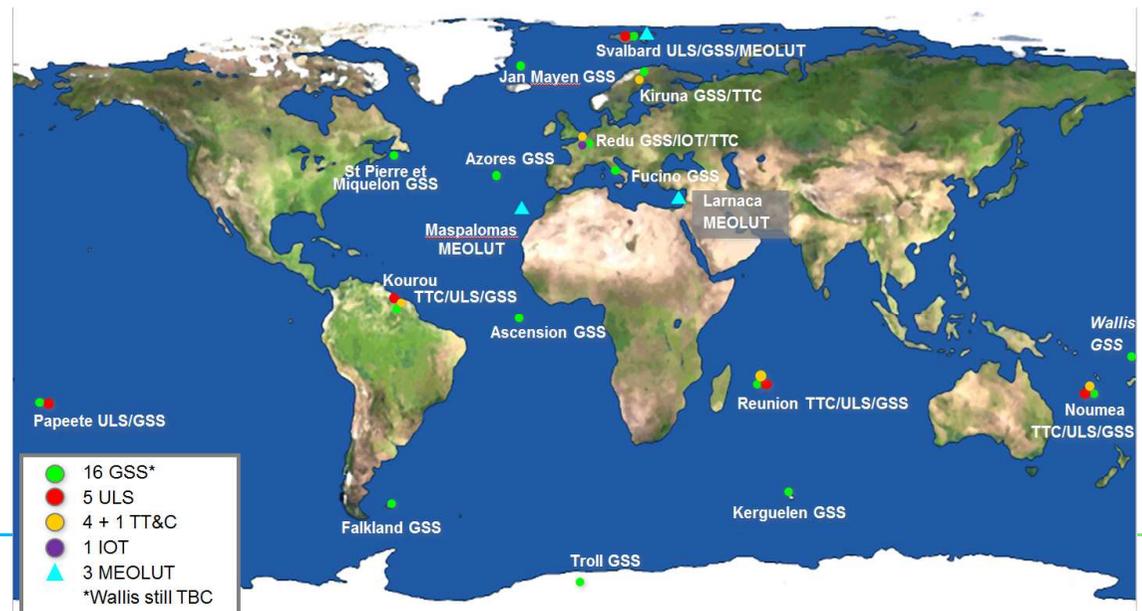


Missions du segment sol

- Contrôle de la bonne santé des satellites
- Détermination des manœuvres d'orbite : maintien des positions relatives des satellites
- Récepteurs de référence au sol, de position fixe connue, mesurant les signaux émis des satellites
- Calcul des positions et temps d'émission des satellites (éphémérides)
- Transmission des messages de navigation aux satellites qui les diffusent vers les utilisateurs

Segment sol Galileo

GSS : Galileo Sensor Station
ULS : Uplink Station
TT&C : Tracking and Control



SEGMENT SPATIAL GNSS [1/4]



Constellation MEO ou combinaison de GEO / IGSO / MEO

Exemple 1: GPS

- 24 satellites / 6 plans orbitaux espacés de 60°
- Orbites circulaires
 - Altitude 20183 km
 - Période orbitale ≈ 12 h
 - Inclinaison 55°

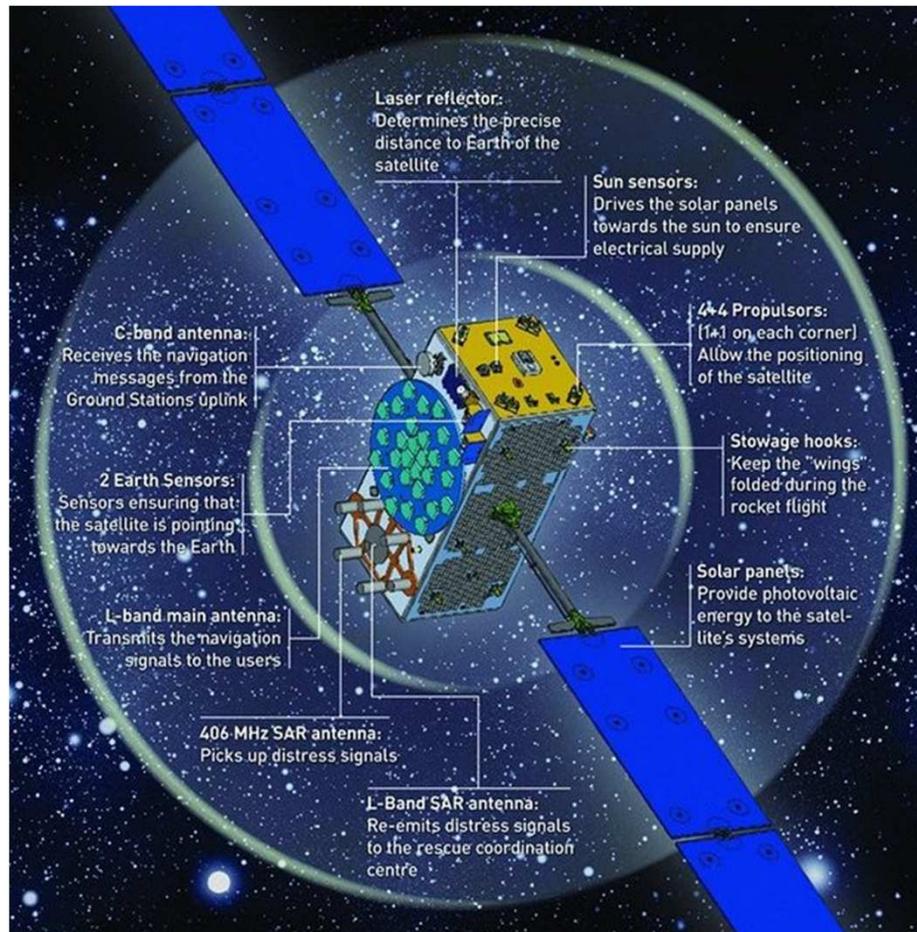
Exemple 2: Galileo

- 24 satellites / 3 plans orbitaux espacés de 120°
- Orbites circulaires
 - Altitude 23332 km
 - Période orbitale ≈ 14 h
 - Inclinaison 56°

SEGMENT SPATIAL GNSS [2/4]



Exemple de satellite : Galileo



Taille : 2.5 x 1.2 x 1.1 m³

Durée de vie > 12 ans

Masse satellite : 730 kg

Puissance totale : 2 kW

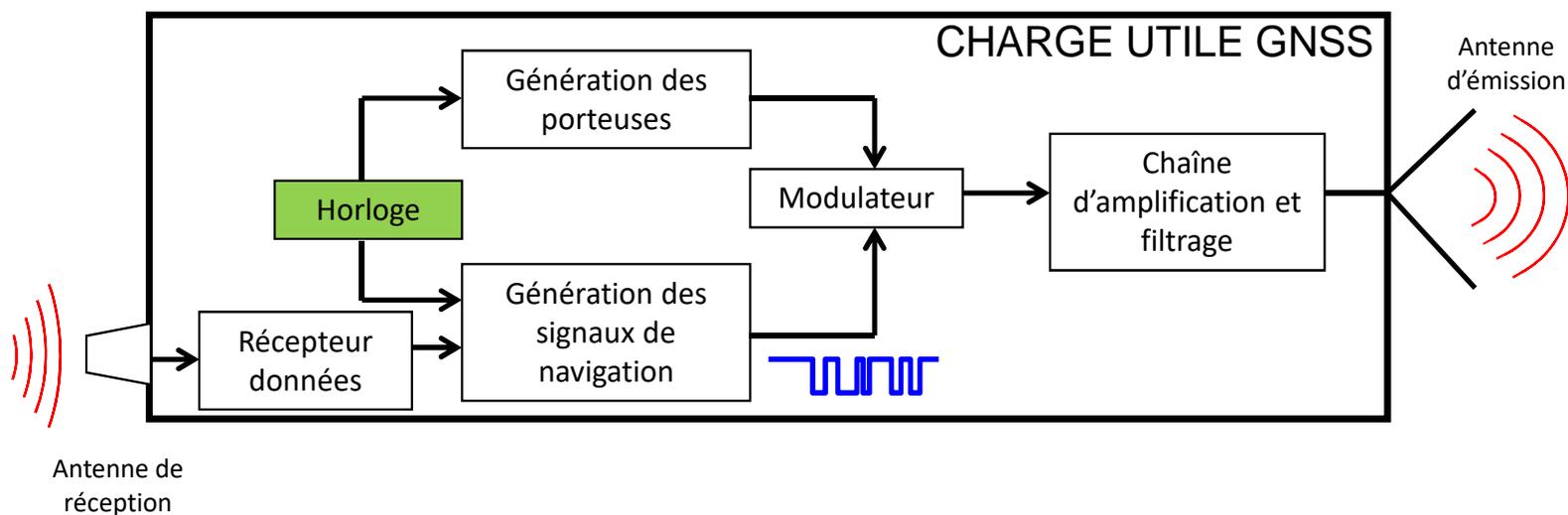
Puissance émise par bande ~50 W (47 dBm)

Source : Navipedia

SEGMENT SPATIAL GNSS [3/4]



Eléments d'une charge utile (CU) GNSS



SEGMENT SPATIAL GNSS [4/4]



Éléments critiques d'une CU GNSS :

- Horloges : haute stabilité et faible sensibilité à l'environnement
 - Rubidium, Césium ou Maser à Hydrogène passif
- Chaîne de transmission hyperfréquence : stabilité des temps de propagation (sensibilité à la thermique)
 - 3 ns de variation \approx 1 m d'erreur pour l'utilisateur
- Antenne : doit compenser les pertes d'espace libre (au mieux)
 - L'utilisateur doit recevoir la même puissance (en pratique à quelques dB près) de chaque satellite, quelle que soit son élévation

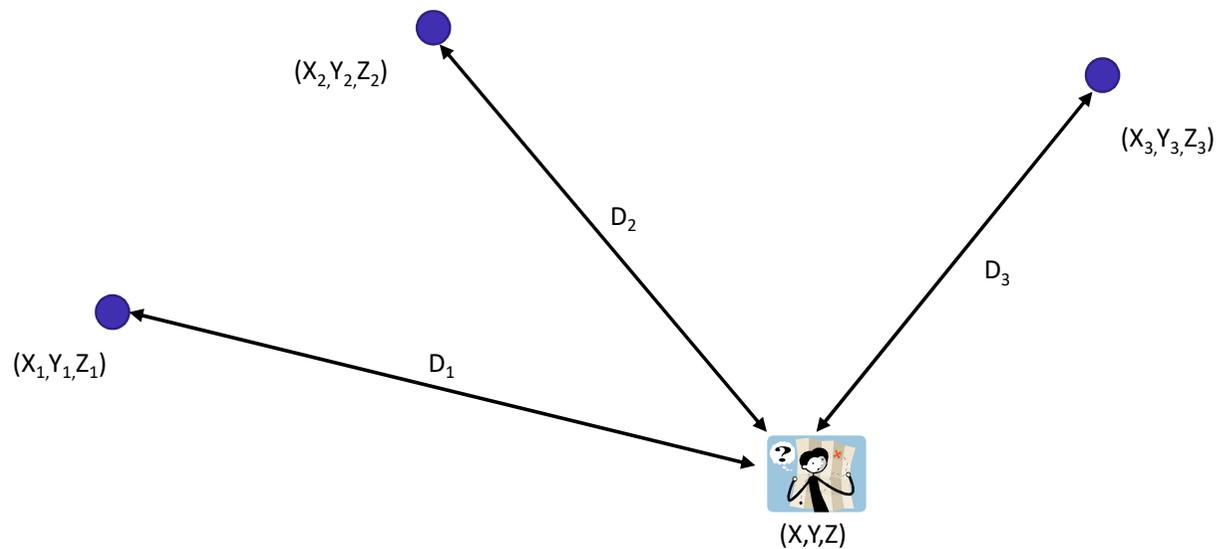


PRINCIPE DE POSITIONNEMENT GNSS [1/4]

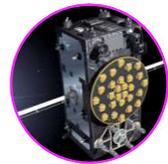


Principe de la trilatération en distance

- L'utilisateur détermine sa position dans un référentiel donné en mesurant la distance qui le sépare de plusieurs points dont les positions sont connues



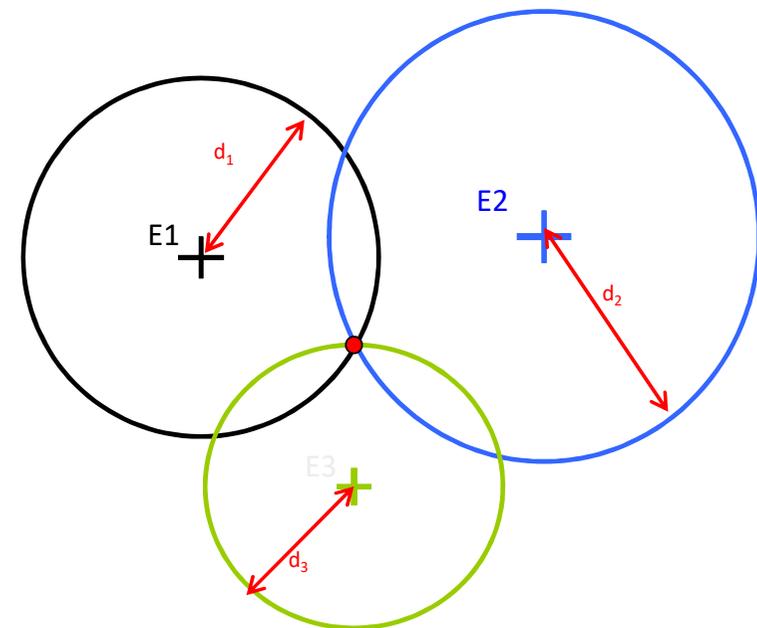
PRINCIPE DE POSITIONNEMENT GNSS [2/4]



Utilisateur situé à l'intersection de 3 cercles en 2D

Utilisateur situé à l'intersection de 4 sphères en 3D

- 3 satellites suffisants en réalité car un des points est aberrant



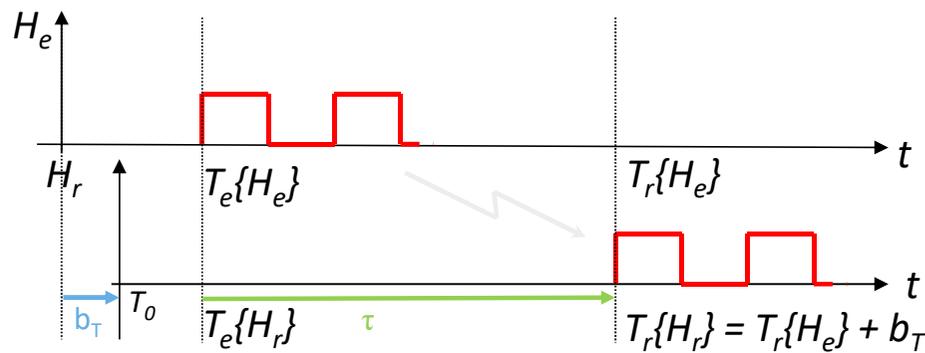
PRINCIPE DE POSITIONNEMENT GNSS [4/4]



Mesure de la pseudodistance

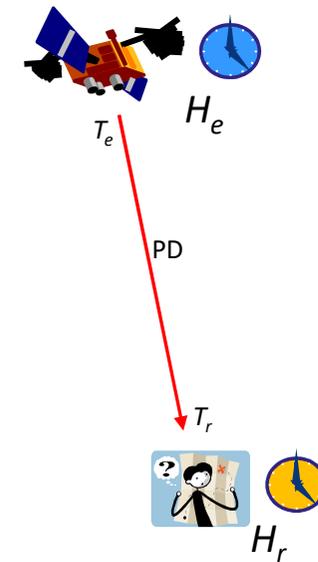
- Liaison monodirectionnelle – Emetteur et récepteur distincts

Référentiel temporel



$$PD = c.(T_r\{H_r\} - T_e\{H_e\}) = D + c.b_T$$

Déterminé par le récepteur



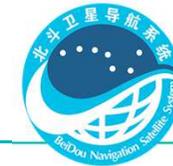
► Besoin d'une 4^{ème} mesure : il faut 4 satellites en visibilité pour déterminer X,Y,Z et T

LES 4 GNSS



	GPS (USA)	GLONASS (Russie)	Galileo (EU)	BeiDou (Chine)
Constellation	MEO (29)	MEO (24)	MEO (25)	GEO (7) MEO (27) IGSO (7)
Temps-système	GPST	GLOT	GST	BDT
UTC de référence	UTC(USNO)	UTC(SU)	UTC _{GAL}	UTC(NTSC)
Horloges bord	3 Rb	3 Rb	2 Rb + 2 PHM	2 Rb + 2 PHM

➔ Peut dépendre du bloc considéré

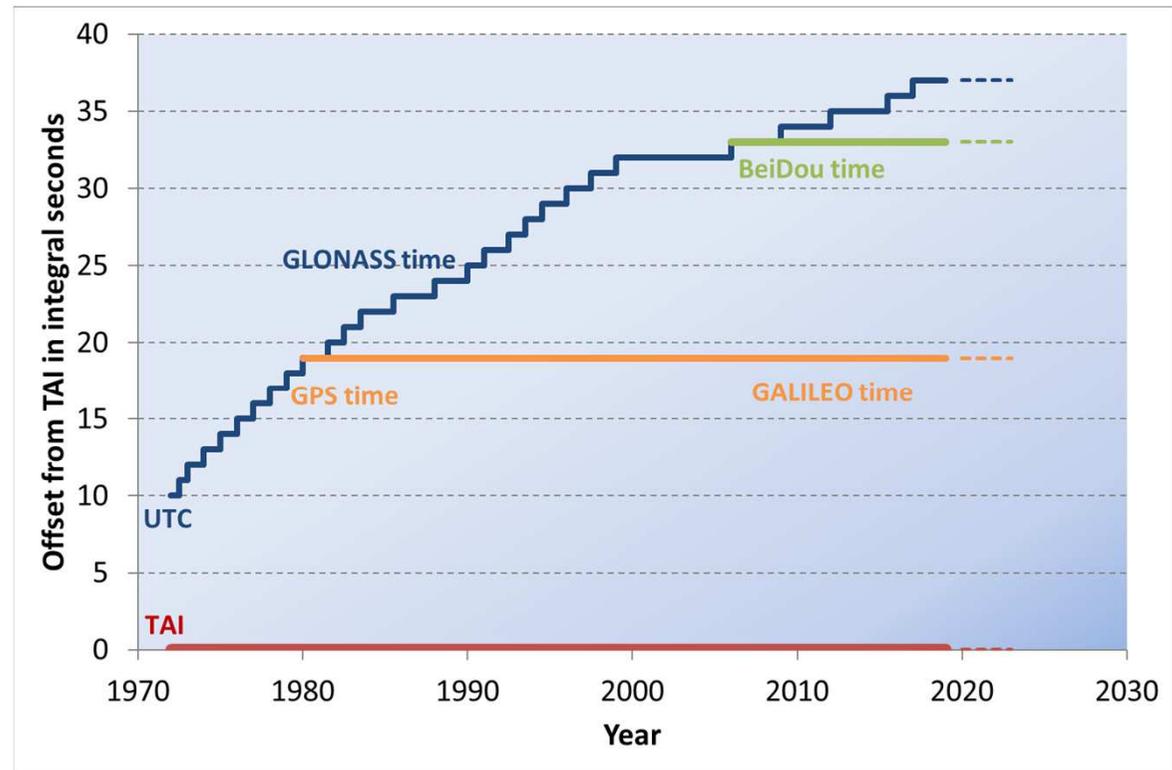


LES 4 GNSS ET LA SECONDE INTERCALAIRE



Pas de position commune !

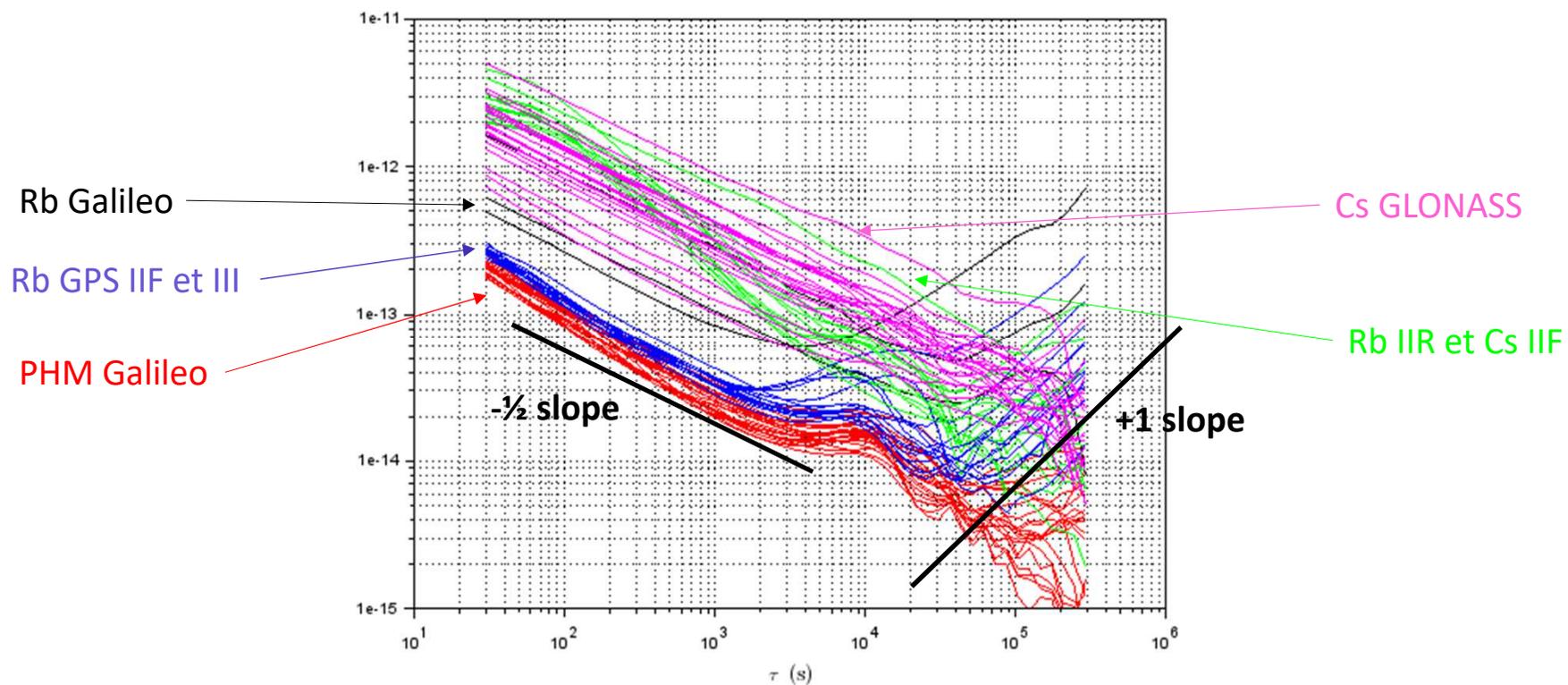
GPS	GLONASS
00:00:18	00:00:00
Galileo	BeiDou
00:00:18	00:00:04
UTC	
00:00:00	



STABILITÉ DES HORLOGES BORD



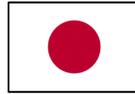
Utilisation d'un outil spécifique appelé écart-type d'Allan



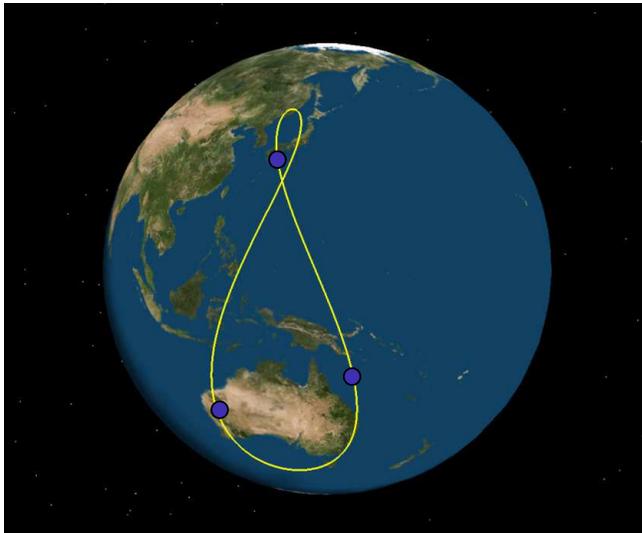
RNSS

RNSS = Regional Satellite Navigation System

Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)



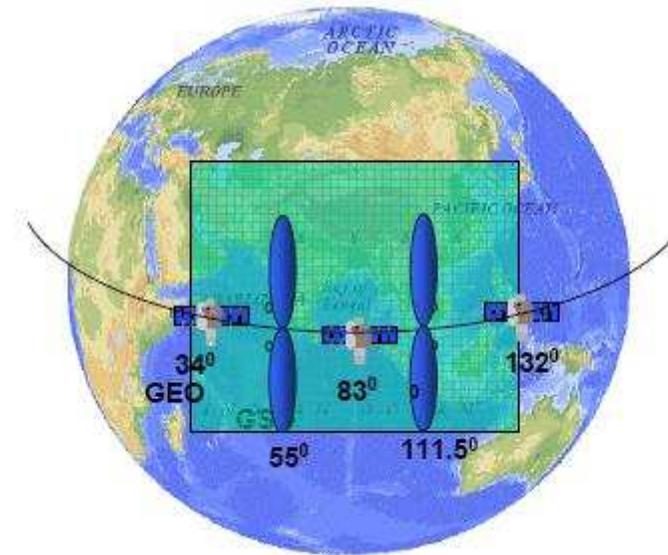
- 7 satellites sur des orbites GEO et IGSO
- Conçu pour avoir toujours un satellite au (quasi)zénith au-dessus du Japon



Navigation with Indian Constellation (NAVIC) / IRNSS



- 4 satellites en GEO
- 4 satellites en IGSO

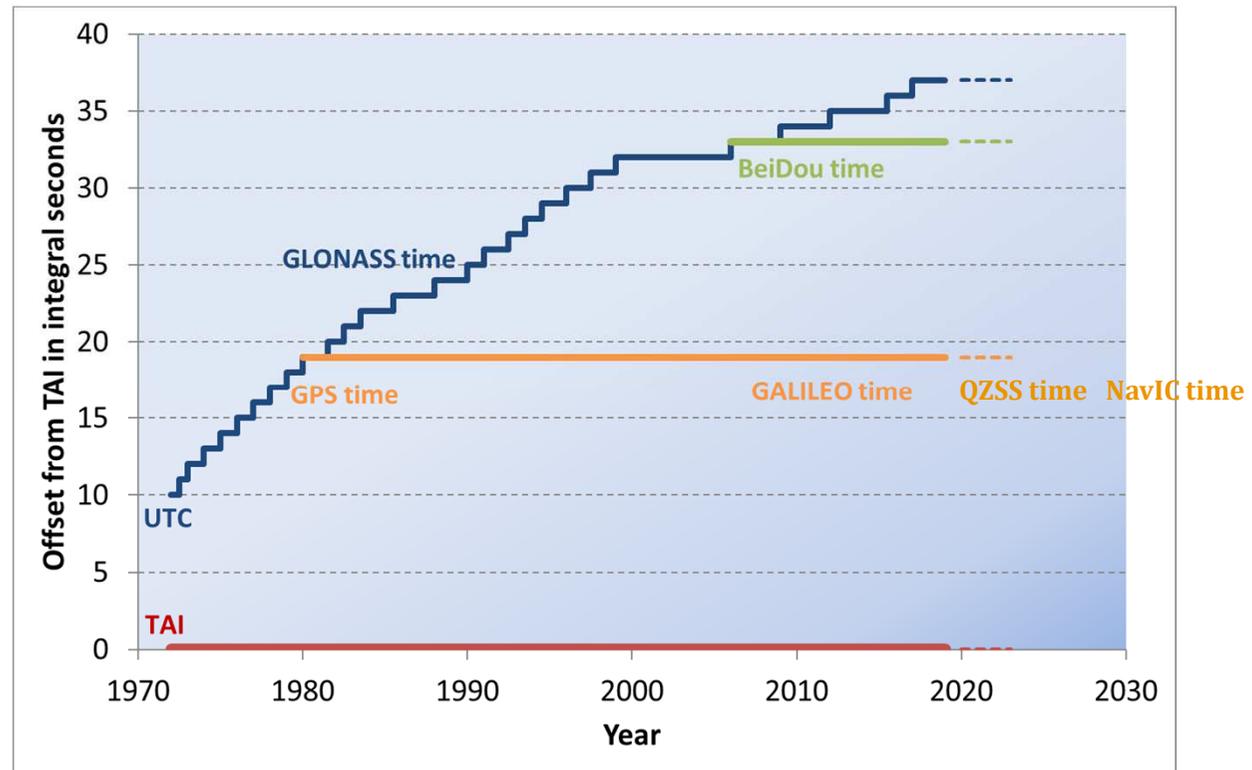
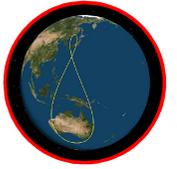


RNSS



	QZSS (Japon)	NavIC (Inde)	KPS (Corée du Sud)
Constellation	GEO (1) IGSO (3)	GEO (3) IGSO (4)	GEO (3) IGSO (5)
Temps-système	QZSST	NavIC System Time	KPS Time
UTC de référence	UTC(NICT)	UTC(NPLI)	UTC(KRISS)
Horloges bord	2 Rb	2 Rb	TBD

GNSS/RNSS ET LA SECONDE INTERCALAIRE



SBAS

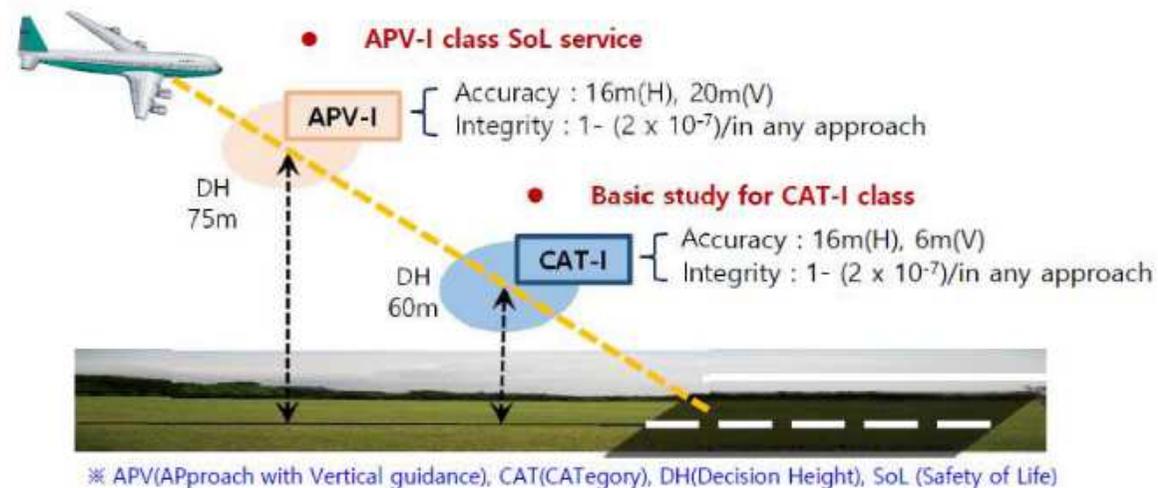


SBAS = Satellite-Based Augmentation System

Systèmes régionaux d'augmentation du GPS (pour le moment)

- EGNOS, MSAS, SDCM, WAAS, GAGAN, KASS, SouthPAN, ANGA, ...

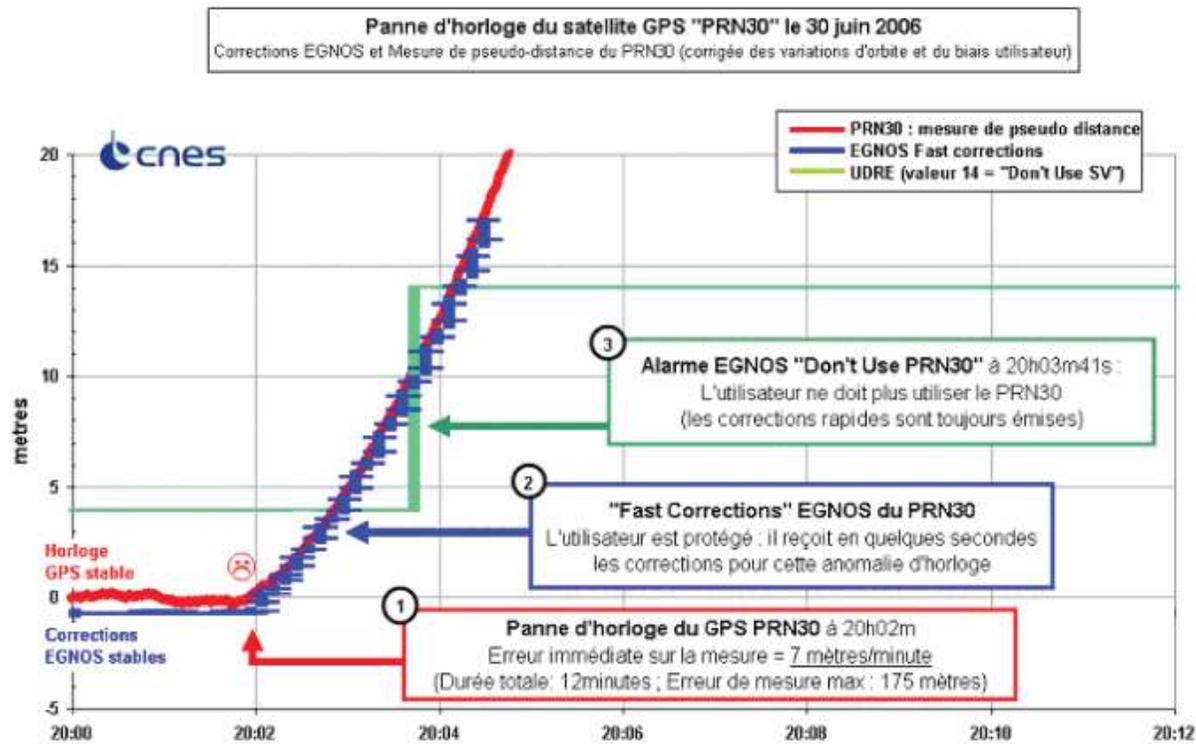
Développés initialement pour les besoins de précision et d'intégrité de l'aviation civile



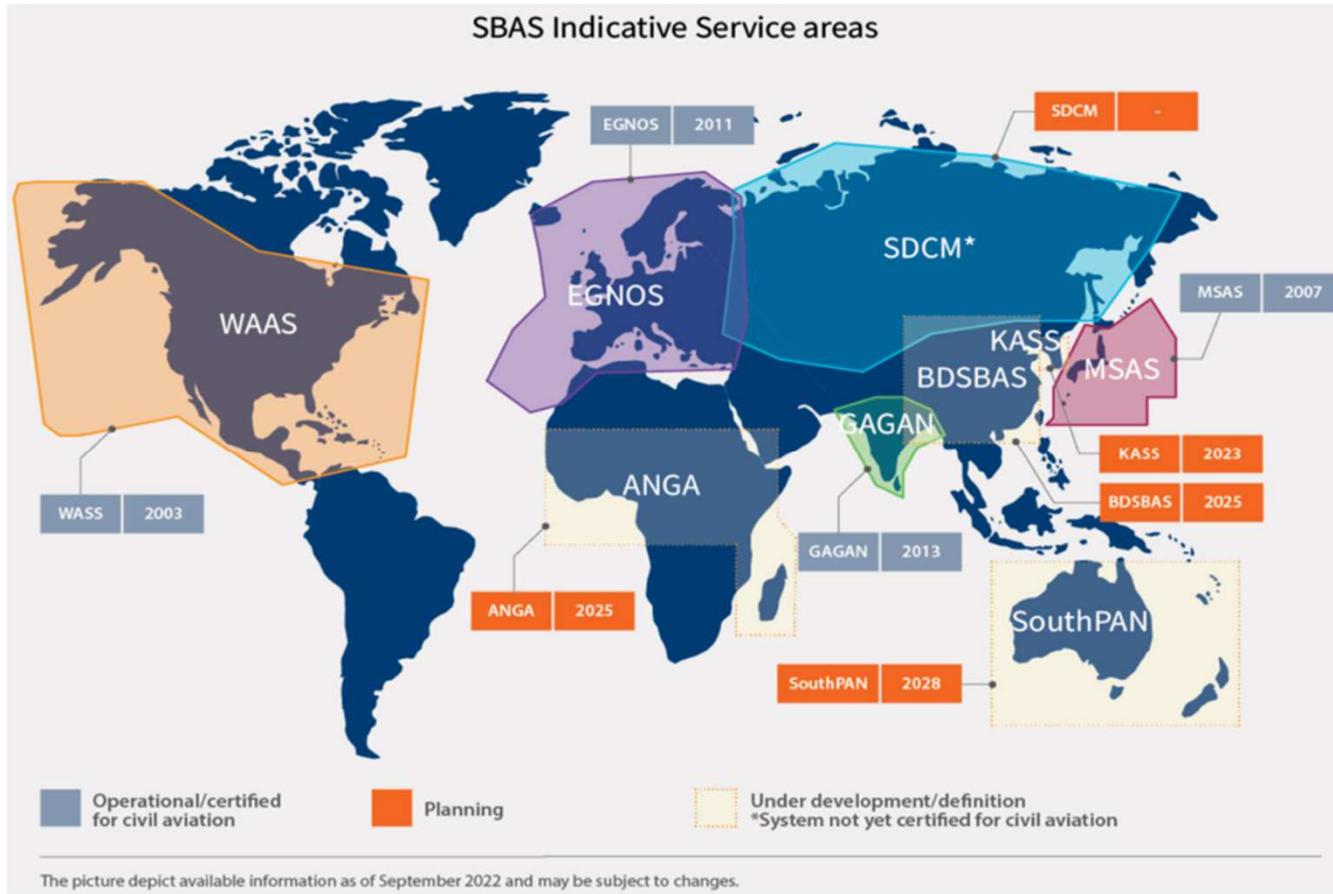
SBAS ET INTEGRITE



Notion d'intégrité essentielle pour l'aviation civile :



LES SBAS

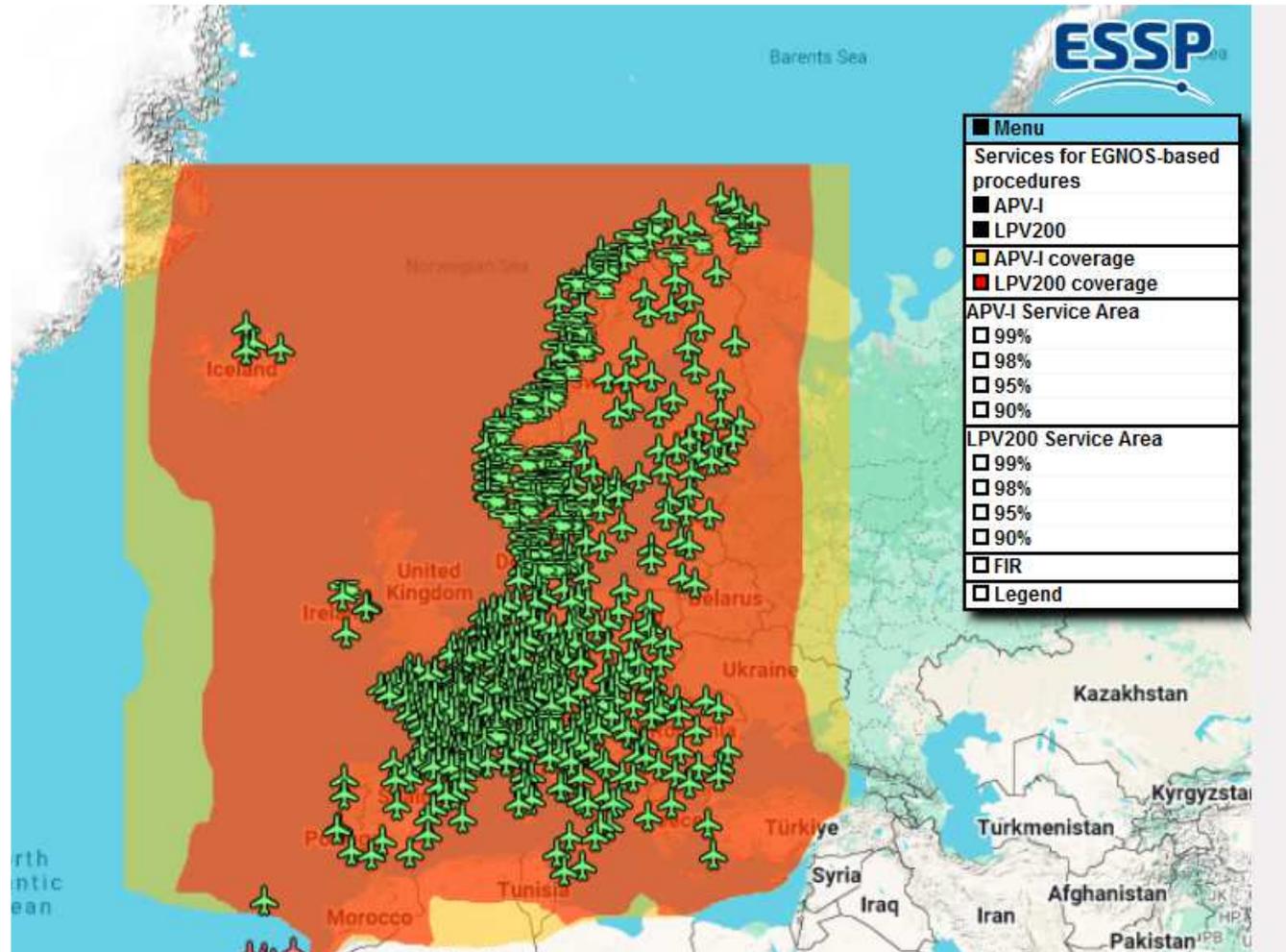


Source : ESA EGNOS web page

UTILISATION

Readiness of the LPV performance in the airports with procedures based on SBAS

LPV = Localiser Performance with Vertical guidance



Source : EUSPA web site

SBAS ET UTC



Certains SBAS diffusent un message de raccordement à UTC : le **Message Type 12**

EGNOS diffuse ainsi EGNOS Network Time – UTC(OP) grâce à une station sol dédiée installée à OP

ENT – UTC(OP) est une sortie de l'algorithme d'échelle de temps (qui n'utilise pas UTC(OP))



LEO-PNT



Tous les GNSS/RNSS/SBAS présentés jusqu'ici sont des systèmes gouvernementaux opérant depuis des orbites hautes (MEO-GEO-IGSO)

Tendance récente de développer des constellations PNT en orbite basse (LEO) pour répondre à des nouveaux besoins. Certains projets sont privés !

L'un des systèmes les + avancés est celui de Xona Space (USA)
La constellation de Xona (Pulsar) est détaillée par la suite.

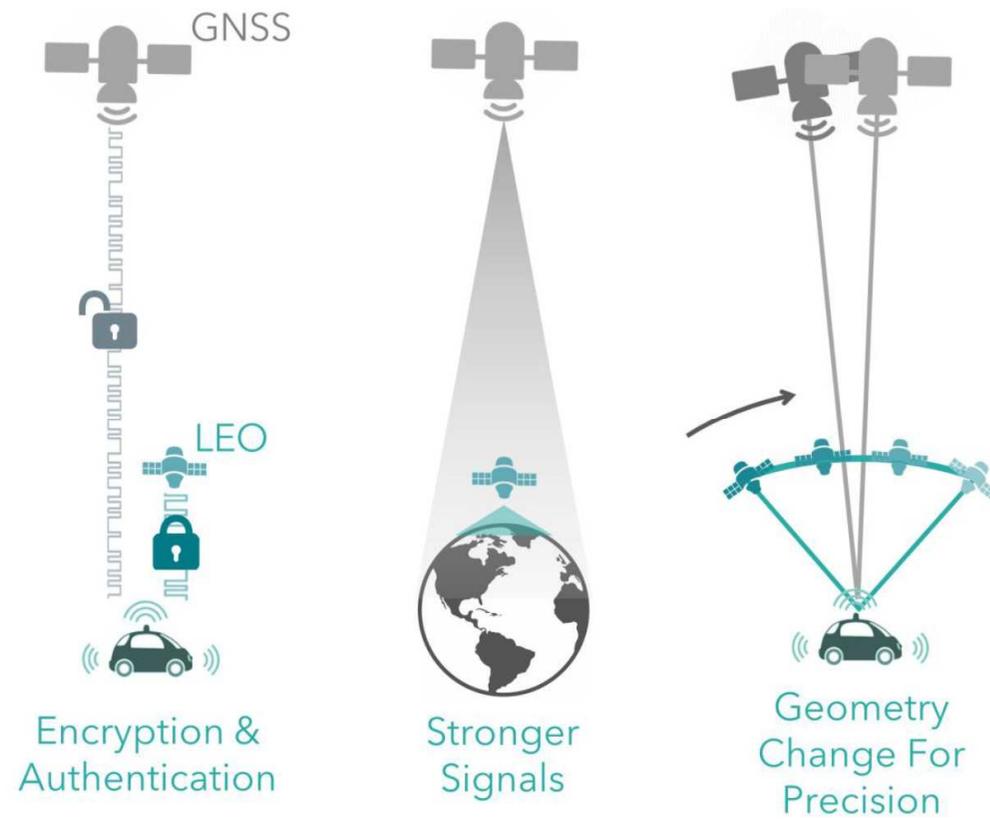
LEO = Low Earth Orbit
PNT = Position-Navigation-Temps



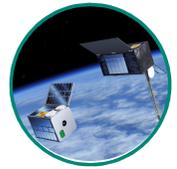
LEO-PNT



Pourquoi aller en LEO ?



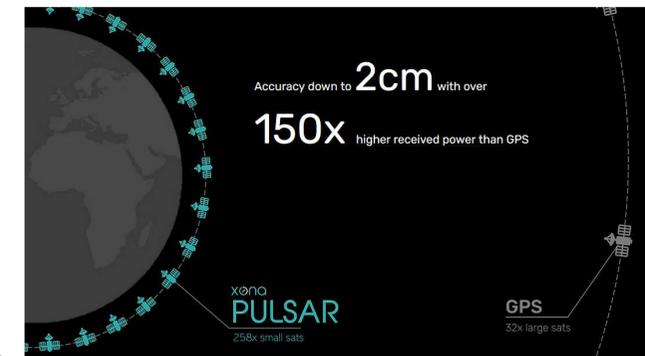
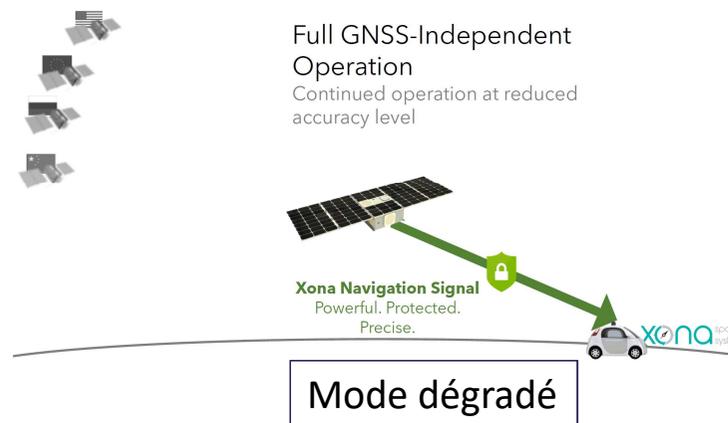
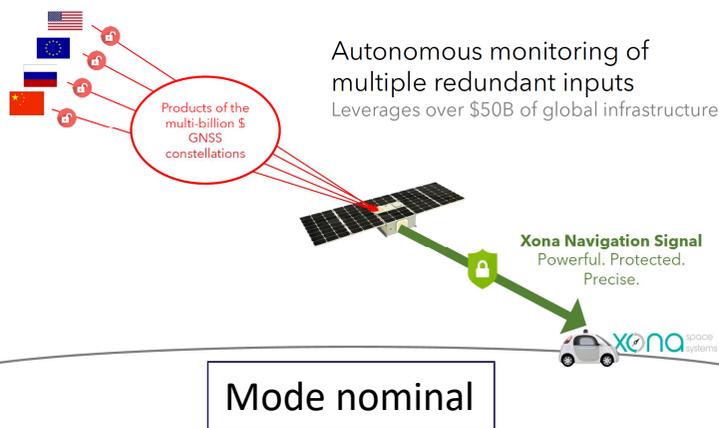
PULSAR



Xona = entreprise privée visant à développer une constellation LEO de 258 satellites (PULSAR)

PULSAR aura 2 modes de fonctionnement :

- Mode nominal : les signaux et les services des constellations MEO sont utilisées pour déterminer les orbites/horloges des satellites PULSAR (et la synchro à UTC)
- Mode dégradé : le segment sol et des liens inter-satellite (ISL) permettent d'opérer en autonomie



PERFORMANCES



Les GNSS sont des systèmes de positionnement, mais aussi de diffusion du temps

Principaux utilisateurs :

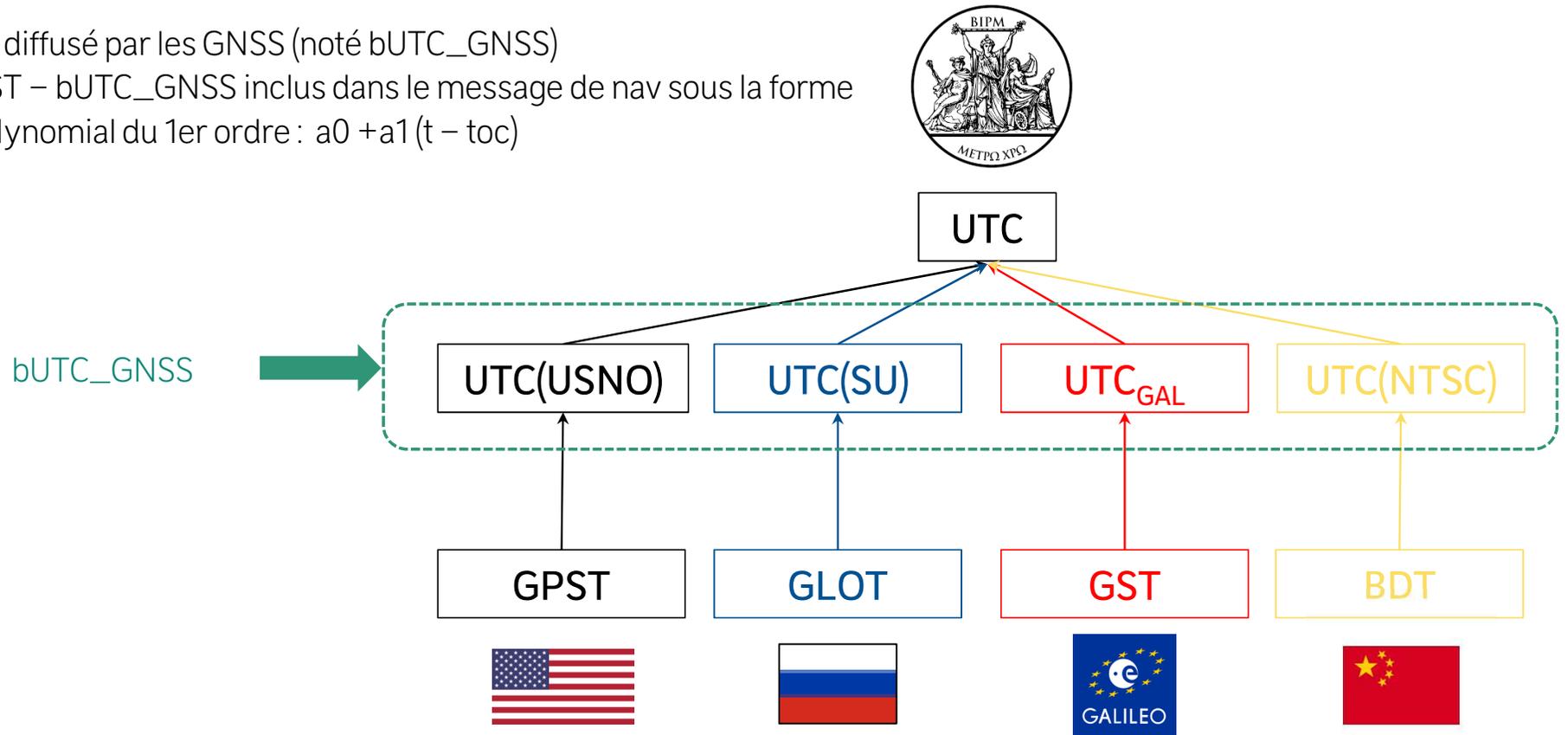
- Synchronisation des réseaux (télécoms, énergie, finance ...)
- Transports (aéronautique, rail, maritime, spatial)
- Science/météorologie
- ...



PERFORMANCES



Accès à « UTC » diffusé par les GNSS (noté bUTC_GNSS)
via l'écart GNSST – bUTC_GNSS inclus dans le message de nav sous la forme
d'un modèle polynomial du 1er ordre : $a_0 + a_1(t - t_{oc})$



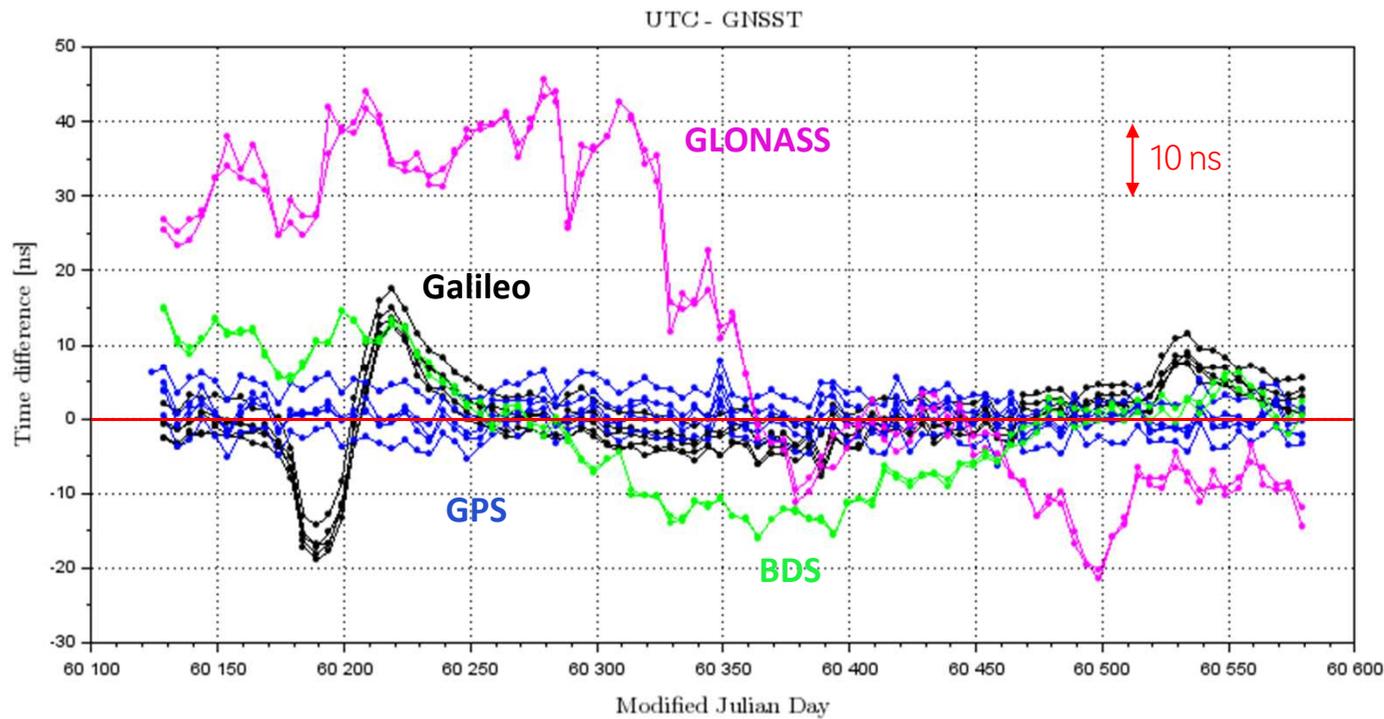
PERFORMANCES



Circulaire T (BIPM)

estimé avec un rx étalonné

Chaque GNSS a sa propre échelle de temps : $UTC - GNSST = [UTC - UTC(k)] - [GNSST - UTC(k)]$



Juillet 2023 → Septembre 2024



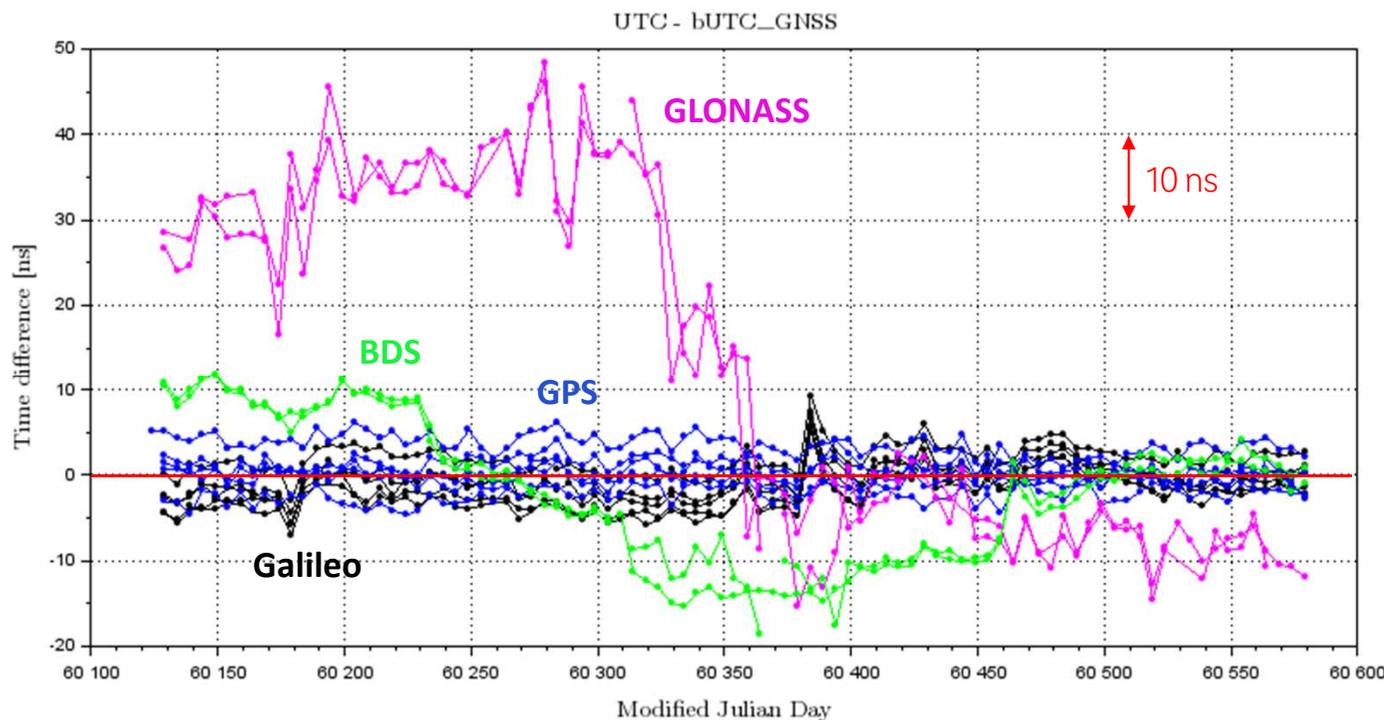
PERFORMANCES



calculé précédemment

msg de nav

Chaque GNSS diffuse son écart à « son UTC » : $UTC - bUTC_GNSS = [UTC - GNSST] + [bUTC_GNSS - GNSST]$



Juillet 2023

→ Septembre 2024



INCIDENTS GNSS



Ils peuvent se classer en 2 grandes origines :

- segment sol et spatial (altération du système)
- segment utilisateur (altération de l'environnement local)

Quelques exemples :

- Galileo : incidents juillet 2019 (interruption de 6 j) et décembre 2020 (6 h)
- GPS :
 - Forte dérive du PRN 23 en janvier 2004, satellite maintenu « healthy » pendant plusieurs heures
 - 25-26 janvier 2016, une quinzaine de satellites GPS a diffusé dans son message de nav GPS – bUTC_GPS = $-13.7 \mu\text{s}$
- GLONASS : incident avril 2014 (interruption de 11 h), mauvaises éphémérides uploadées aux satellites (maintenus « healthy »)

PERFORMANCES



La plupart des utilisateurs temps ont besoins de la μ s voire moins bien

Les GNSS sont donc des moyens de diffusion du temps très utilisés car

- très performants
- mondiaux
- gratuits

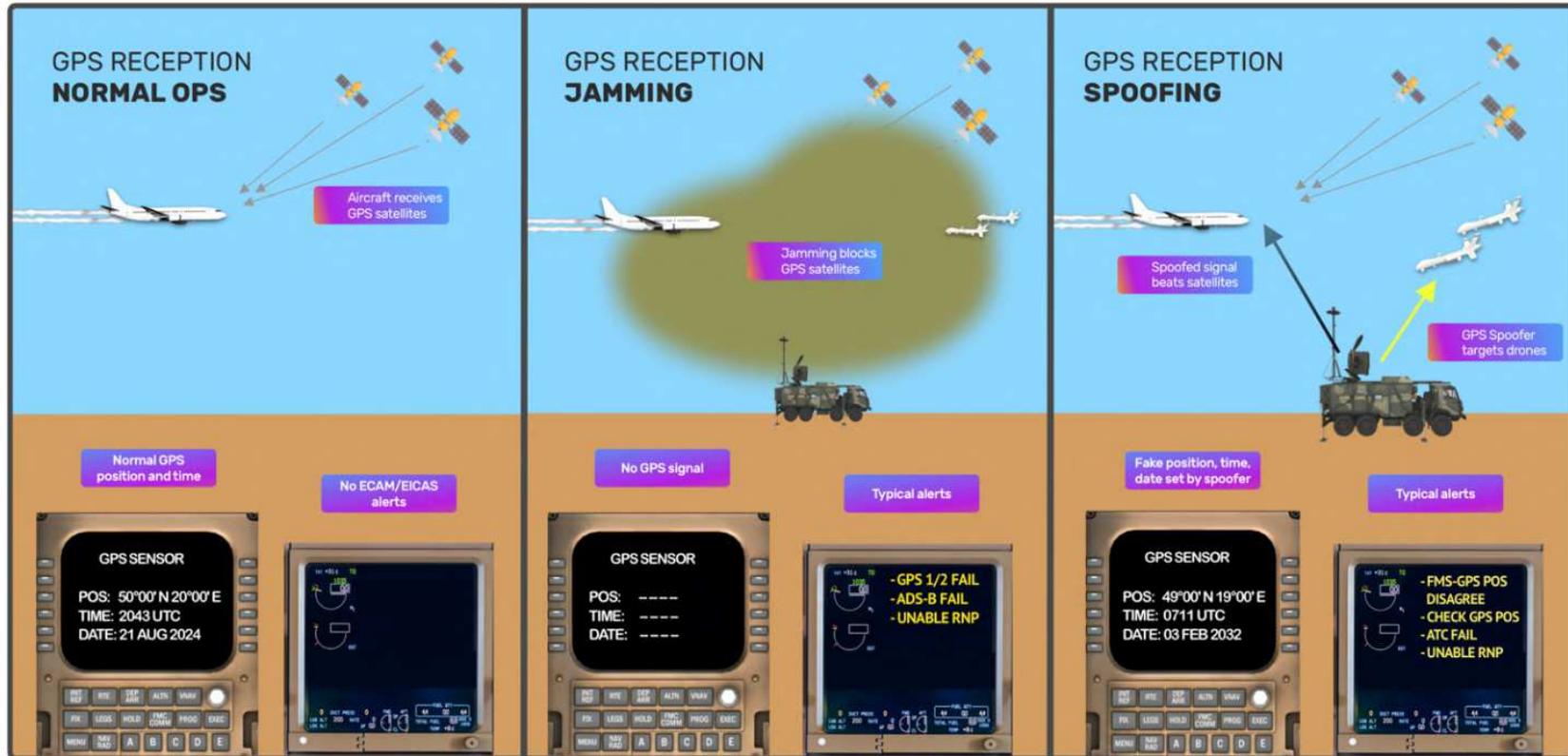
Cependant, les signaux reçus sont :

- très faibles donc très facilement brouillables (jamming)
 - connus/publics donc facilement leurrables (spoofing)
- >> des solutions existent/se développent

Ces perturbations se voient jusqu'aux récepteurs en orbite

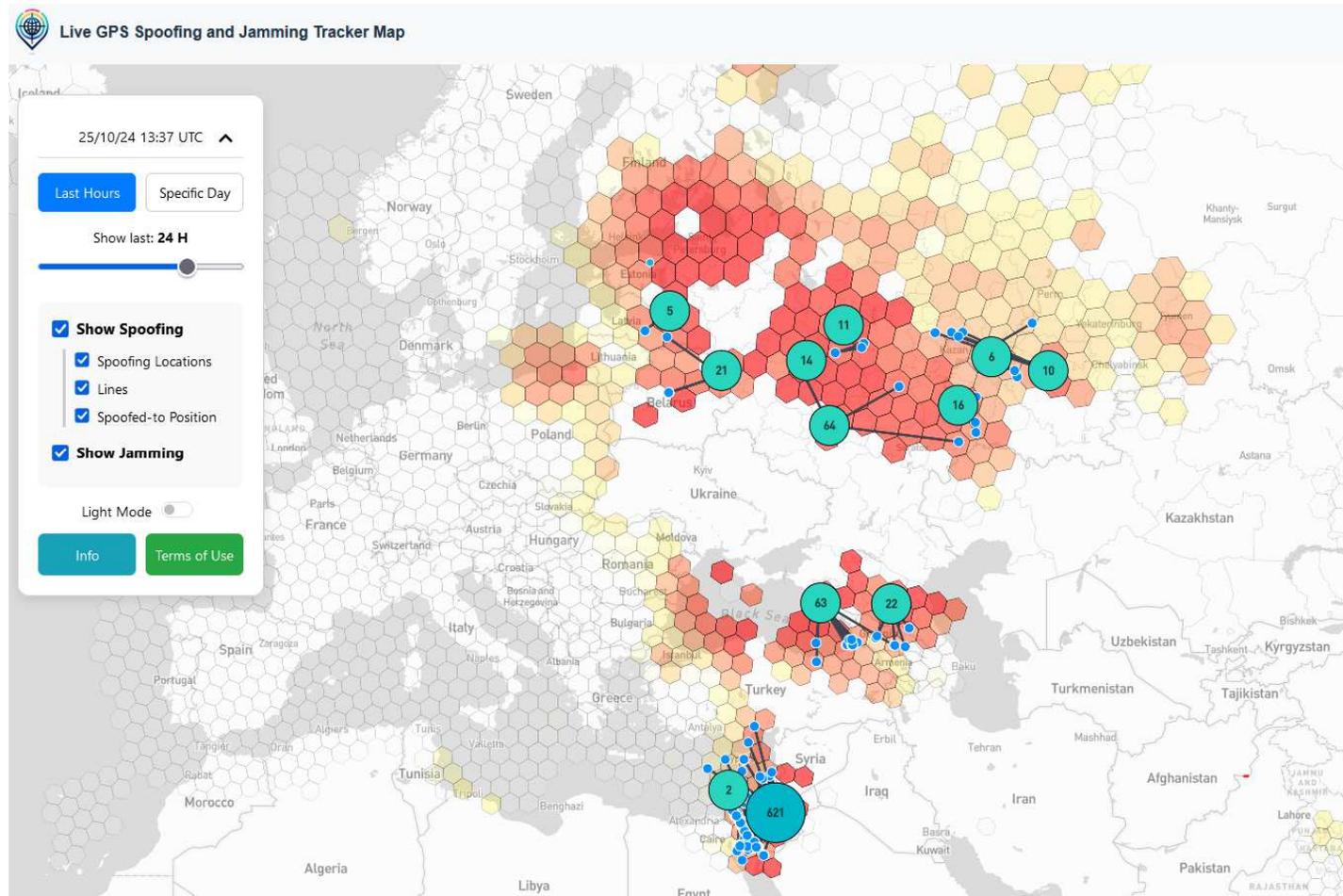


BROUILLAGE ET LEURRAGE



GPS Reception during normal ops, jamming, and spoofing. Larger version in Appendix. Image source: OPSGROUP.

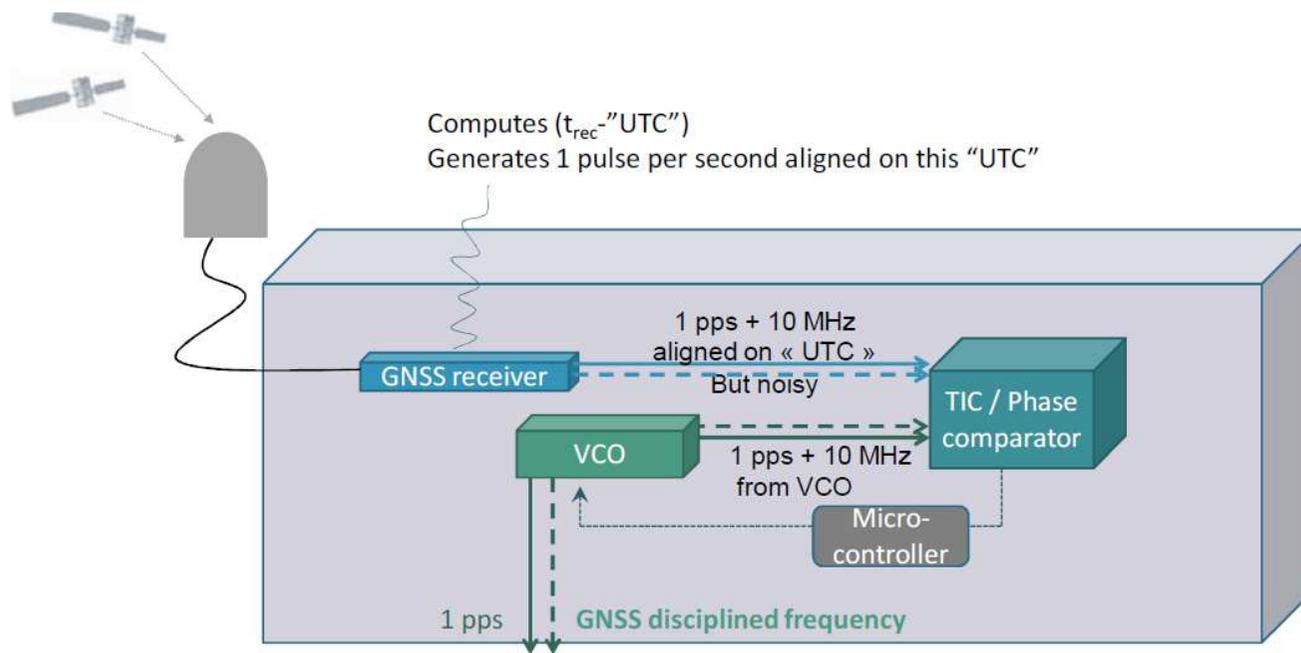
BROUILLAGE ET LEURRAGE



GNSS DO



L'immense majorité des utilisateurs de temps emploient un GNSS DO = Disciplined Oscillator



Pour apporter de la résilience, beaucoup de fabricants développent des récepteurs multi-sources (NTP/PTP, Satellites, oscillateur local ...)

CONCLUSIONS



Les systèmes de positionnement par satellite (GNSS, RNSS, SBAS, LEO PNT) ont chacun leur propre échelle de temps et la plupart diffusent leur écart à UTC

Pour les GNSS, ce rattachement est meilleur que 100 ns (hors incident), ce qui est bien au-delà des besoins de la plupart des utilisateurs

Les GNSS sont très largement utilisés pour le positionnement mais aussi pour la diffusion d'un temps précis

Ces systèmes sont vulnérables (incidents, brouillage, leurrage ...), mais il y a une vraie prise de conscience de cette vulnérabilité et des solutions se développent (par ex signaux authentifiés comme Galileo OS-NMA)



**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**

QUESTIONS ?