

LES RÉFÉRENCES DE FRÉQUENCE

POUR LE SOL ET L'ESPACE

Nicolas Vorobyev

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

SOMMAIRE

- 01 Introduction
- 02 Références de Fréquence
- 03 Qualification Spatiale
- 04 Cas d'Usage
- 05 Conclusions

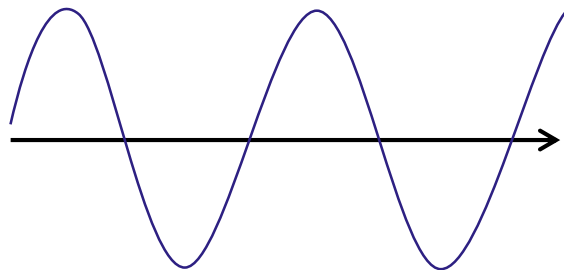
OSCILLATEUR



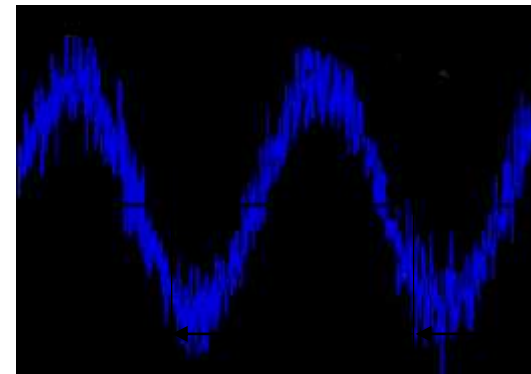
L'oscillateur est une fonction fondamentale en positionnement, navigation, timing (PNT) et en télécommunication ...



Cas idéal



Réalité



← Instabilité d'amplitude

← Instabilité de phase

← Instabilité de fréquence

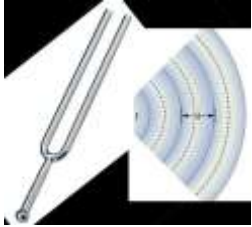
STABILITÉ DE FRÉQUENCE



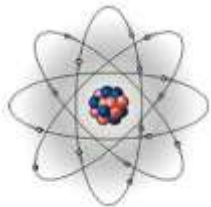
- Stabilité [$\sigma_y(\tau)$]: Capacité à maintenir la même fréquence moyenne au fil du temps.
 - Dans le domaine temporel
 - Statistiques sur y sur une durée τ
 - Déviation d'Allan $\sigma_y(\tau) \Rightarrow$ pour les fluctuations lentes/à long terme
 - Dans le domaine spectral
 - Bruit de phase $S_\phi(f) \Rightarrow$ pour les fluctuations rapides
- Exactitude [$\sigma(\varepsilon)$]
 - Proximité de l'accord entre le résultat d'une mesure et la vraie valeur du mesurande. Généralement caractérisée par l'incertitude globale de la valeur mesurée.



TECHNOLOGIE OSCILLATEUR



Les oscillateurs à résonateurs acoustiques sont avantageux en termes de stabilité sur les temps courts



Les oscillateurs à transition atomique sont plus performants sur le long terme

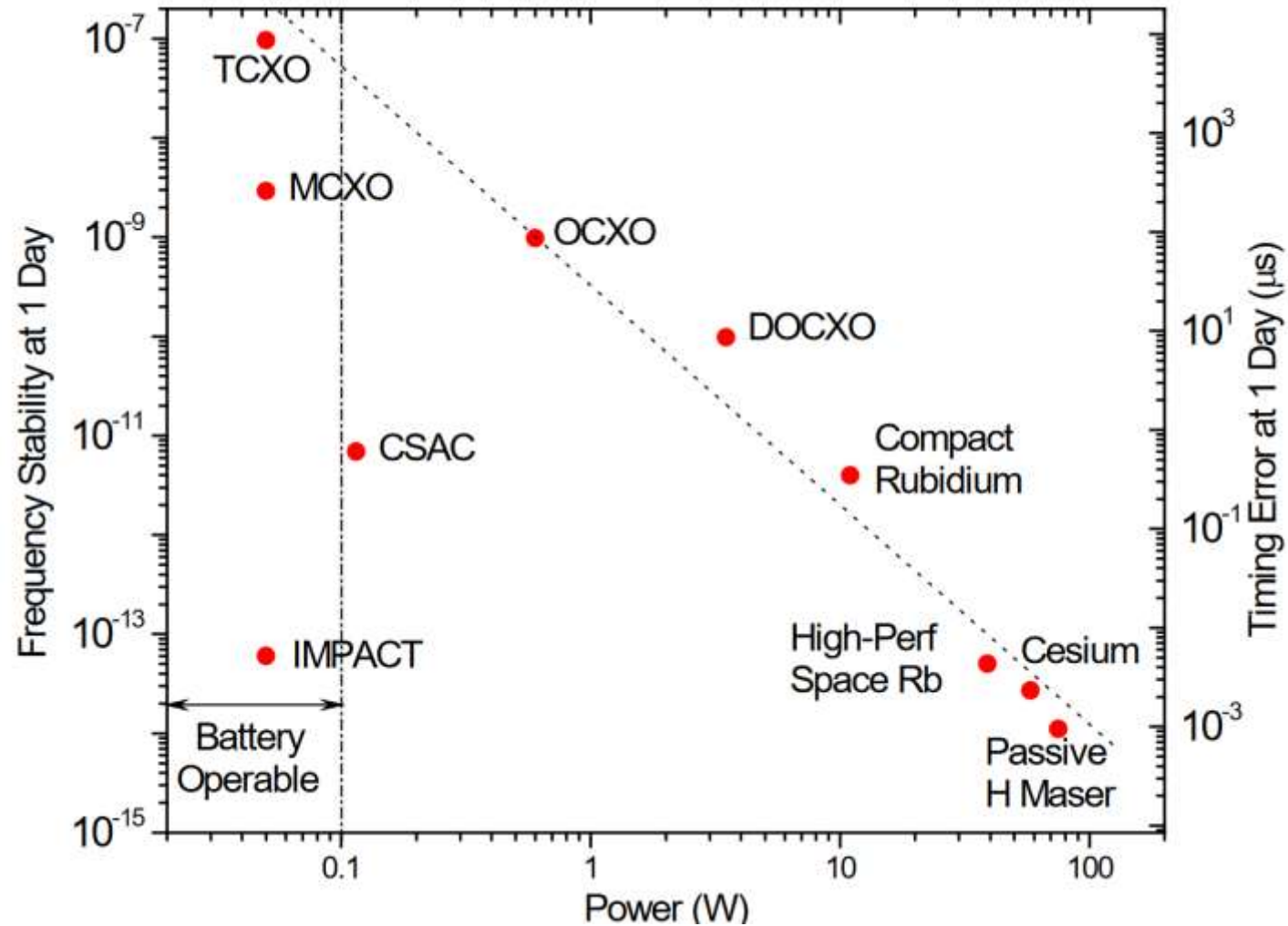


TYPES D'OSCILLATEUR

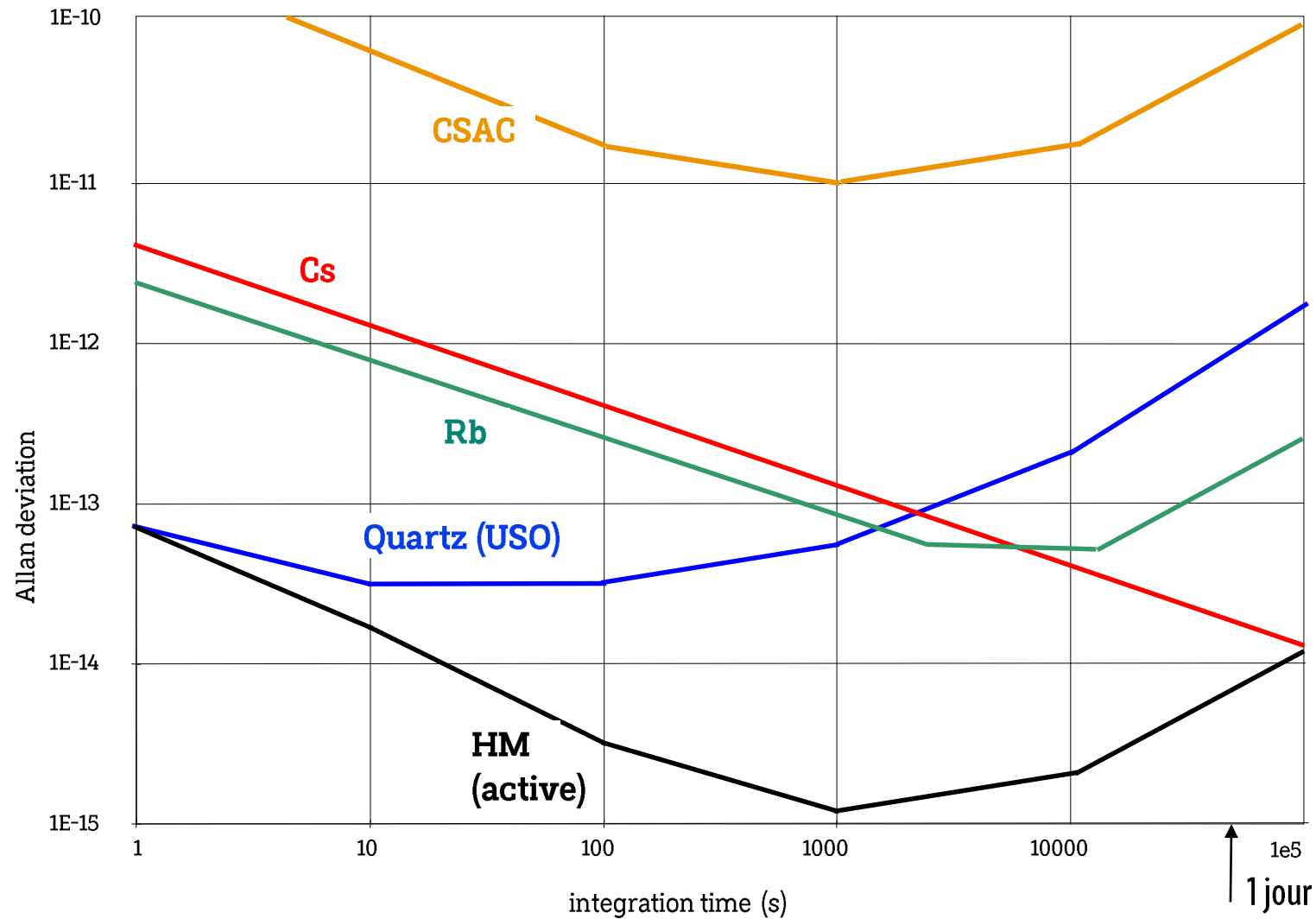


Technologie	Volume annuel	Marché	Prix moyen (sol)	Version Spatiale
Quartz (BAW, SAW)	~10-15 Md	Électronique de grande consommation	0,1\$-10\$-80k\$	
MEMS	~0,5-1 Md	Dispositifs portables, IoT	1-100\$	
Chip-Scale Atomic Clocks (CSAC, mRO-50...)	~2000-8000	Applications militaires, navigation de haute précision	2k-5k\$	
Horloges au Rubidium (Rb)	~10000	Télécommunications, synchronisation, GNSS	3k-10k	
Horloges au Césium (Cs)	~1000	Télécommunication, métrologie, GNSS	50k-100k	
Masers Actifs et Passifs	~100	Recherche scientifique, radioastronomie, observatoires	80k-500k\$	
Horloges Optiques	Proto	Métrologie de haute précision, recherche scientifique	>500k\$	

STABILITÉ VS TECHNOLOGIE OSCILLATEUR



STABILITÉ VS TECHNOLOGIE OSCILLATEUR

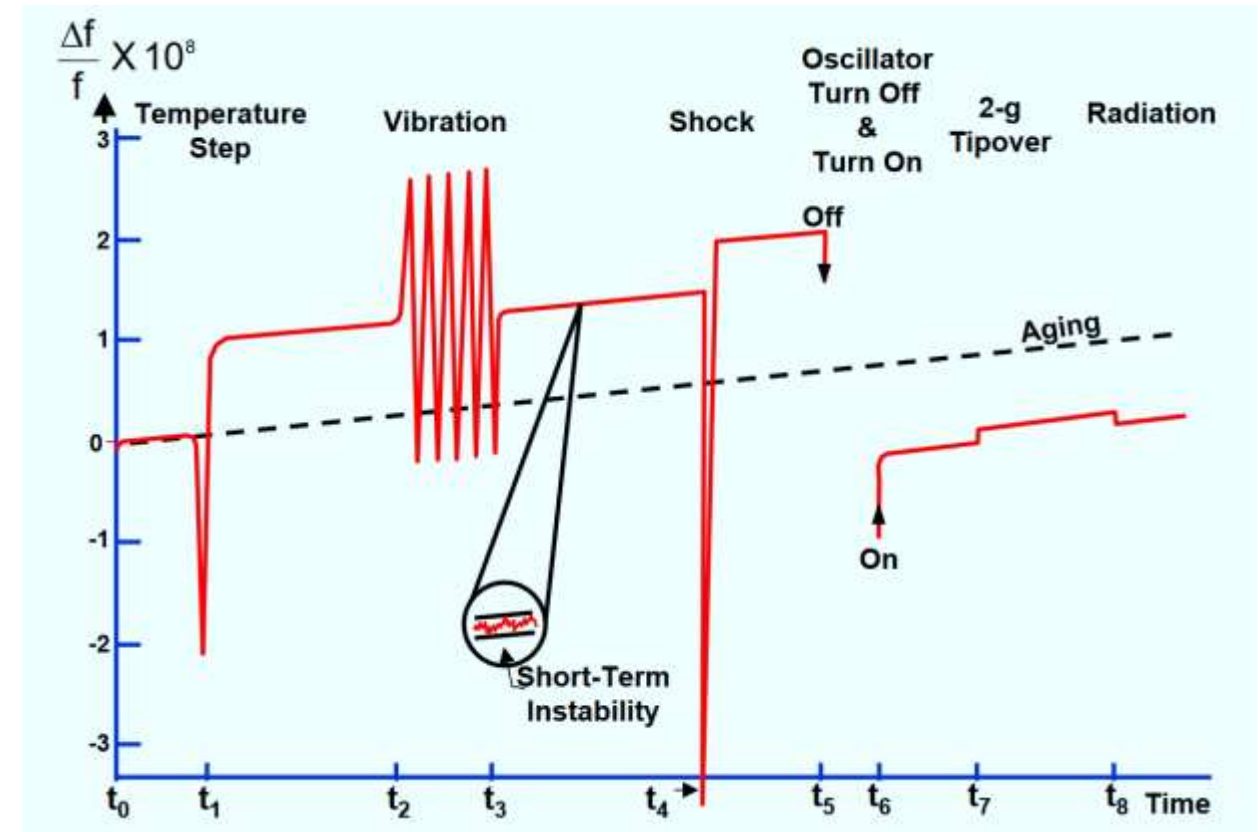


SENSIBILITÉ DE L'OSCILLATEUR



La fréquence des oscillateurs varie en fonction de :

- Conditions climatiques : température, pression, humidité
- Accélération, chocs, vibrations
- Champ magnétique / électrique
- Vieillesse des composants
- Radiations
- Retrace : extinction/allumage
- Gravité
- Contraintes
- Pollution / Fuite

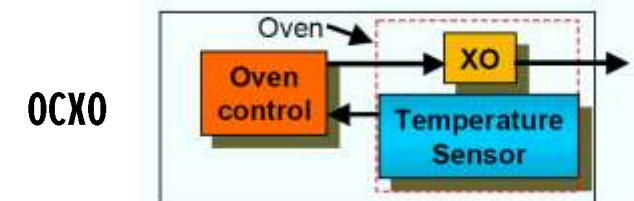
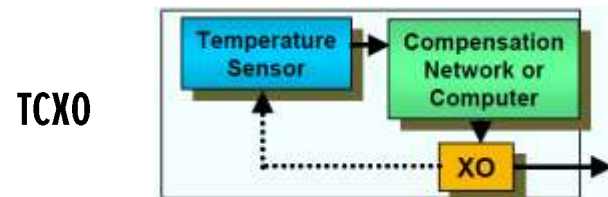
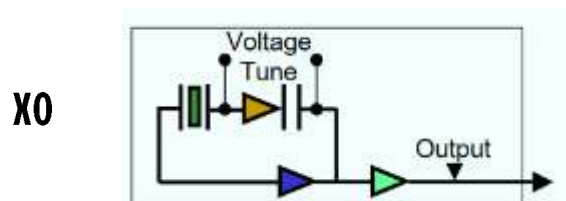
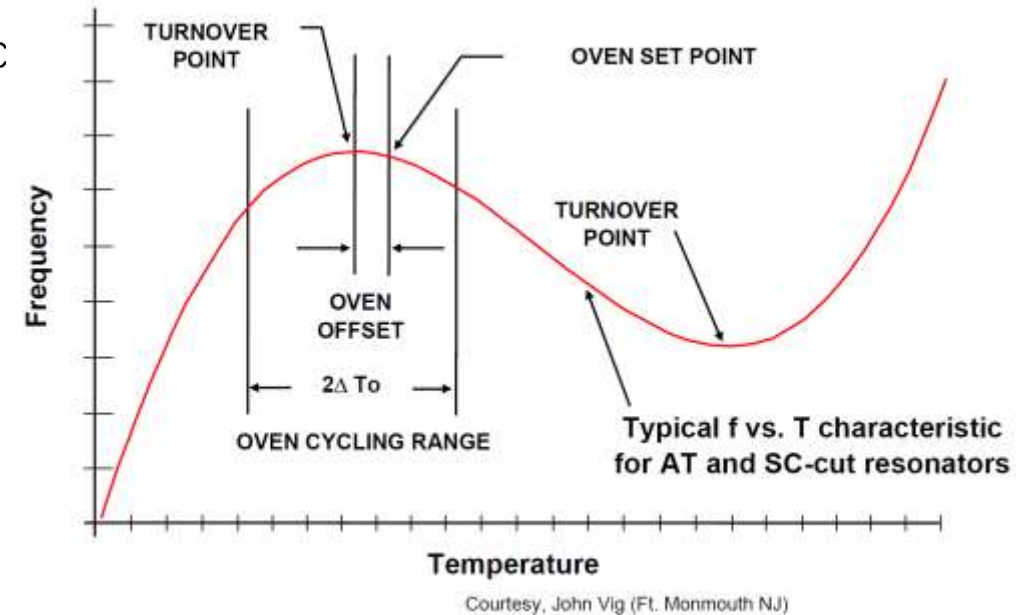


*J. R. Vig, « Quartz Crystal Resonators and Oscillators for frequency control and timing applications, a tutorial », US Army Communications-Electronics Command, January, 2001,

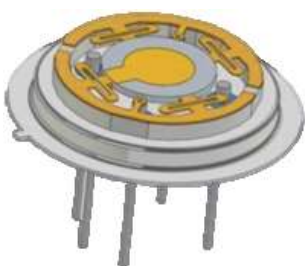
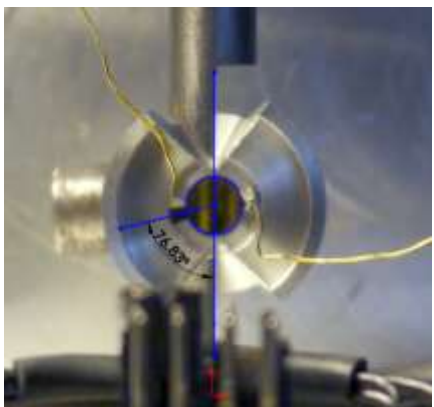
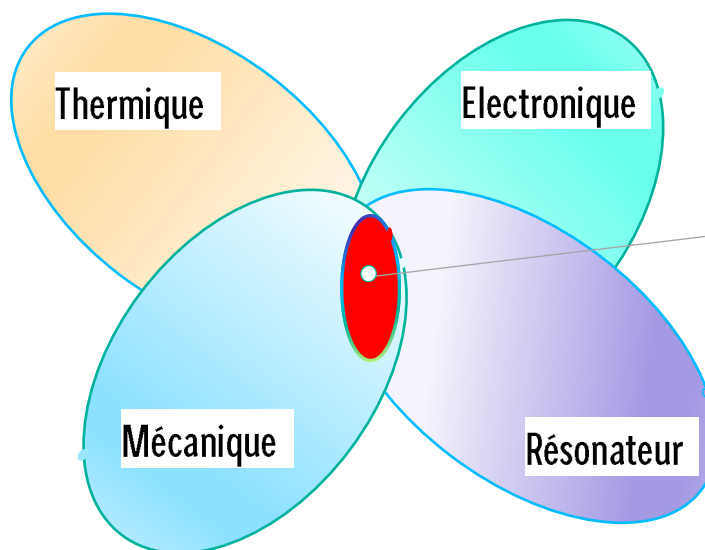
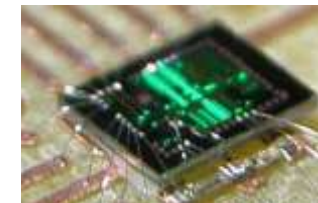
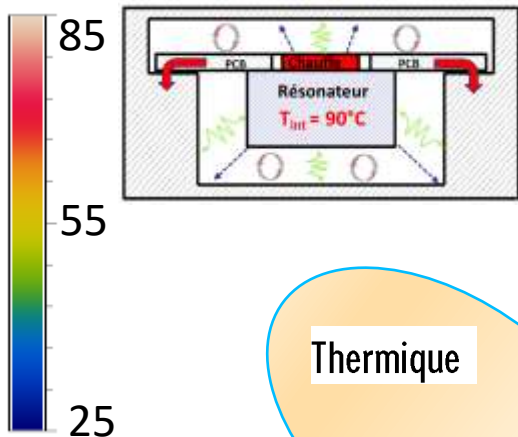
OSCILLATEUR À QUARTZ



- Oscillateur à quartz est le “workhorse” de génération de fréquence
- Pourquoi différents types d'oscillateurs ?
- Matériau piézoélectrique est très sensible à la température
 - XO Crystal Oscillator
 - TCXO..... Temperature Compensated Crystal Oscillator
 - OCXO.....Oven Controlled Crystal Oscillator



RECETTE D'UN OCXO



OSCILLATEUR À QUARTZ



- Le premier oscillateur ultra-stable (USO) dans l'espace lointain a été embarqué sur la sonde Voyager, lancée à la fin des années 1970.
- L'équipe Radio Science de Voyager a créé le terme "USO" et a collaboré étroitement avec FEI
- Large gamme de performances : stabilité de 1.10^{-8} à 1.10^{-13} de 1 à 100 s

Ground USO



800 cm³

2,4 W

6×10^{-14}

rakon

Space USO



450 cm³

1,8 W

8×10^{-14}

rakon

Space micro-OCXO



3 cm³

0,13 W

2×10^{-11}

SAFRAN

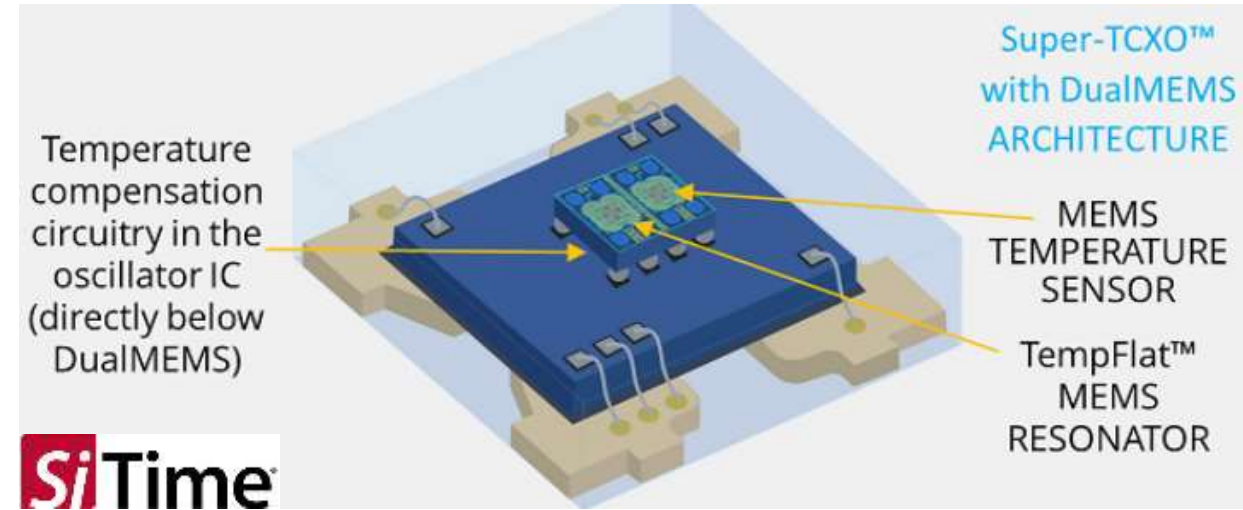
Different SWaP-C:
Size, Weight and
Power - Cost

MEMS



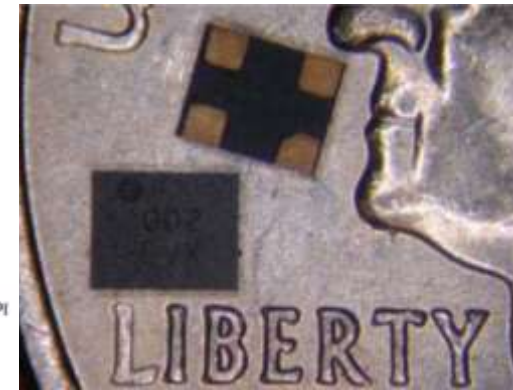
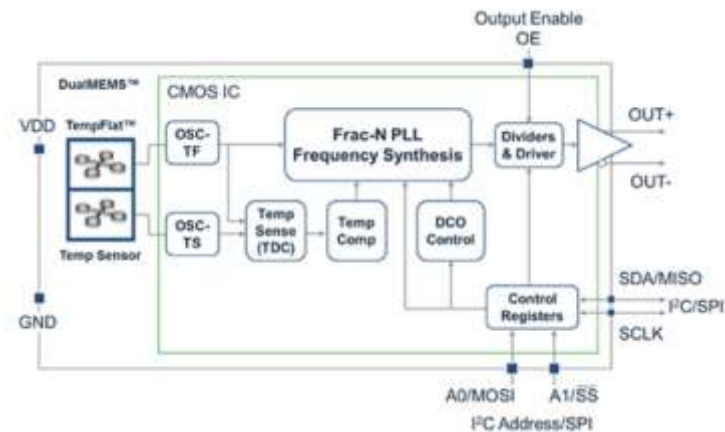
Oscillateur SiTime (CMOS): 5.0 x 3.2 x 0.95 mm³

- Sensibilité thermique : 5×10^{-7}
- Consommation : 120 mW
- Très faible sensibilité accélérométrique
- Fréquence de sortie programmable 10...120 MHz



Electronique intégrée très complexe

- ➔ très sensible aux irradiations
- ➔ pas idéal pour le spatial

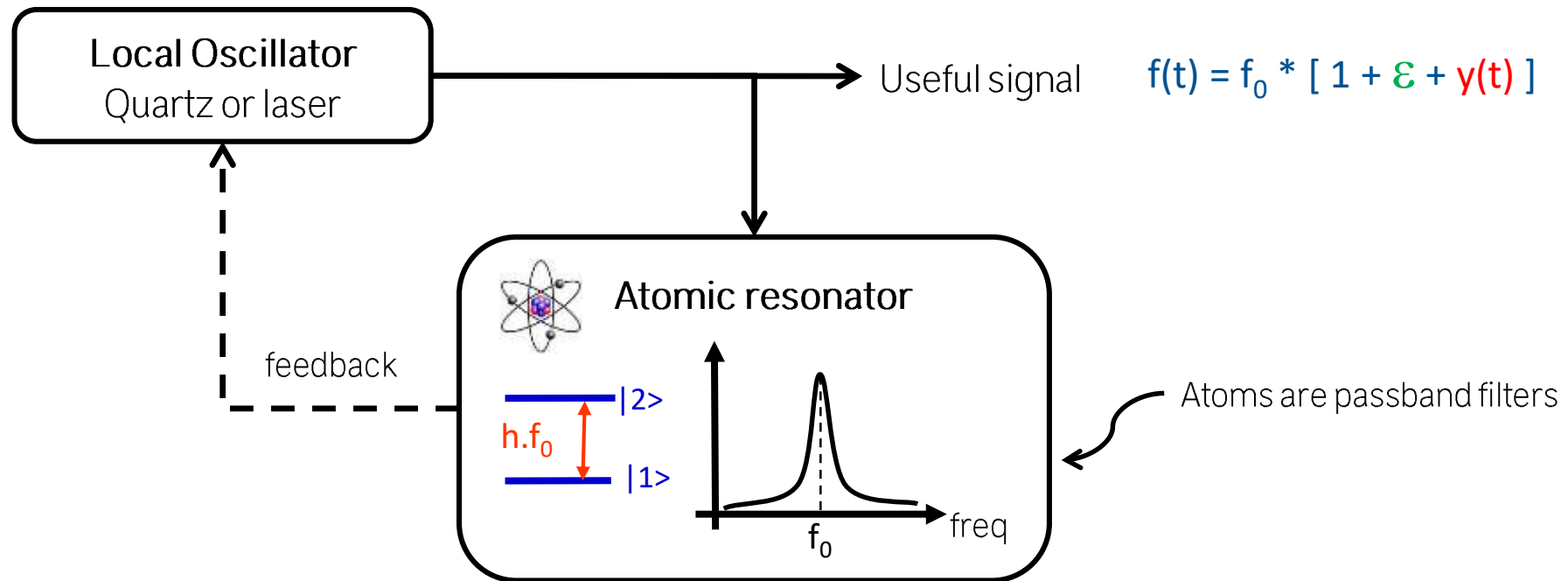


HORLOGES ATOMIQUES MINIATURES



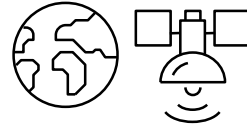
Horloge atomique = Stabiliser la fréquence d'un oscillateur en utilisant une résonance d'absorption atomique

- Les fréquences des transitions atomiques sont universelles (partout et à tout moment).
- L'environnement des atomes est bien contrôlé → stabilité et précision à long terme.
- De nombreuses horloges différentes sont basées sur le césium (9,19263177 GHz), le rubidium, l'hydrogène, etc.

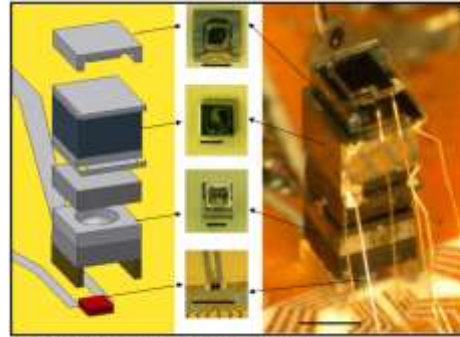


HORLOGES ATOMIQUES MINIATURES

- CSAC SA65: Premier horloge atomique (Cs) miniature



- Sensibilité thermique : 3×10^{-10}
- SWAP : 16 cm^3 , 35 g, 120 mW
- Drift 24h : $\sim 1 \text{ us}$

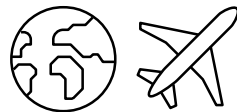


S. Knappe et al., App. Phys. Lett. 85, 1460 (2004)

- Volume: 9.5 mm^3
- Cell volume: 0.81 mm^3
- Power: 75 mW (Physics Package)
- Stability: $\dot{f}_y(1 \text{ s}) = 3 \times 10^{-10}$
Improved to $\dot{f}_y(1 \text{ s}) = 6 \times 10^{-11}$



- mRO-50 : Horloge miniature à rubidium



- Sensibilité thermique : 4×10^{-10}
- SWAP : 50 cm^3 , 75 g, 450 mW
- Drift 24h : $\sim 800 \text{ ns}$



HORLOGES AU RUBIDIUM

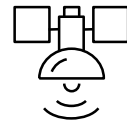
- LPFRS: Utilisation dans les serveurs de temps PTP.



- Sensibilité thermique : 1×10^{-10}
- SWAP : 0.25L, 0.29 kg, 10W
- Drift 24h : ~500 ns




- RAFS (Rubidium Atomic Frequency Standard):




- Sensibilité thermique : 2×10^{-14}
- SWAP : 3.2L, 3.4 kg, 35W
- Drift 24h : ~200 ns



HORLOGES AU CÉSIVIUM

- 5071A ou B Primary Frequency Standard: 
 - Sensibilité thermique : 1×10^{-13}
 - SWAP : 26L, 30 kg, 50W
 - Drift 24h : ~ 5 ns

- OSA 3350 (Optical Pumping cesium clock): 
 - Sensibilité thermique : 2×10^{-14}
 - SWAP : 26L, 20 kg, 50W
 - Drift 24h : ~ 3 ns



MASER ACTIVE / PASSIVE

- Maser Active (AHM): Largement utilisés comme référence dans les laboratoires TF et pour la génération des échelles de temps.



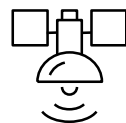
- Sensibilité thermique : 8×10^{-16}
- SWAP : 440L, 120 kg, 100W
- Drift 24h : ~20 ps

- Maser Passive (PHM):

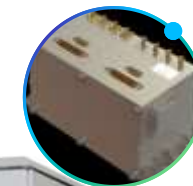
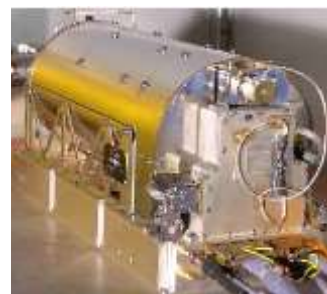


- Sensibilité thermique : 5×10^{-15}
- SWAP : 47L, 25 kg, 100W
- Drift 24h : ~0,5 ns

- Maser Passive « Space » (PHM ou SHM):



- Sensibilité thermique : 5×10^{-15}
- SWAP : 30L, 25 kg, 60W
- Drift 24h : ~0,5 ns



OSCILLATEURS EN ESPACE

95%

Oscillateurs acoustiques
XO, TCXO, VCXO, OCXO

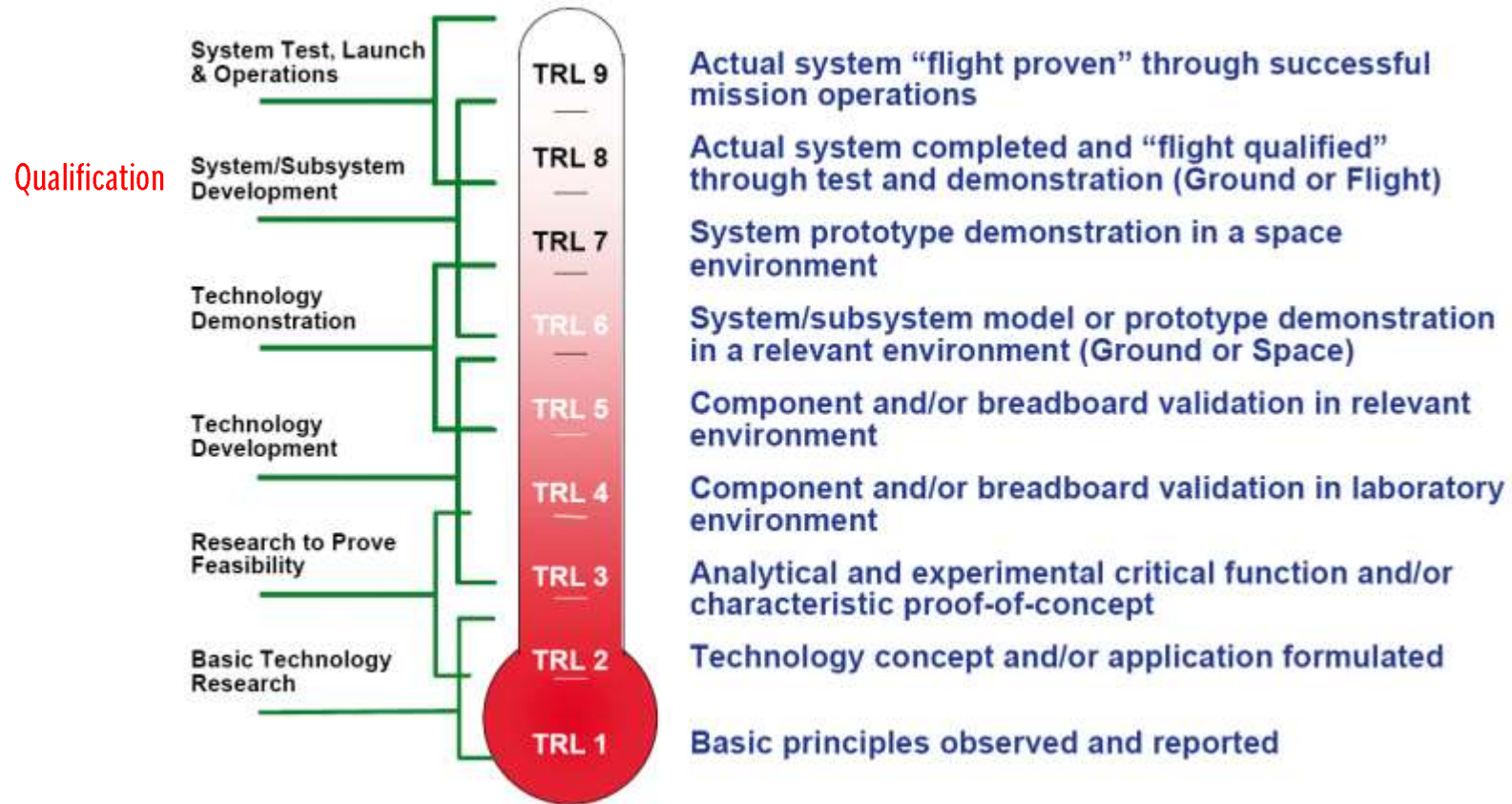
3%

Oscillateurs atomiques
RAF, Césium, Maser Passive, CSAC...

2%

Oscillateurs diélectriques
DRO, TCDRO, PLDRO...

LES TECHNOLOGY READINESS LEVELS



QUALIFICATION

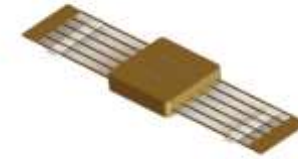
Deux type de marchés :

- Spatial classique (HiRel*) : Norme de qualification pour les oscillateurs : ESCC* 3503
 - Classe 1. Qualification maximale
 - Classe 2. Niveau de qualification de composant plus faible
 - Classe 3. Composants AEC-Q100,101,200* + qualification lot possible.
- New Space : Pas de norme ESCC
 - Il n'y pas de classe clairement identifiée
 - 3-10 ans max
 - 10krad-60krad

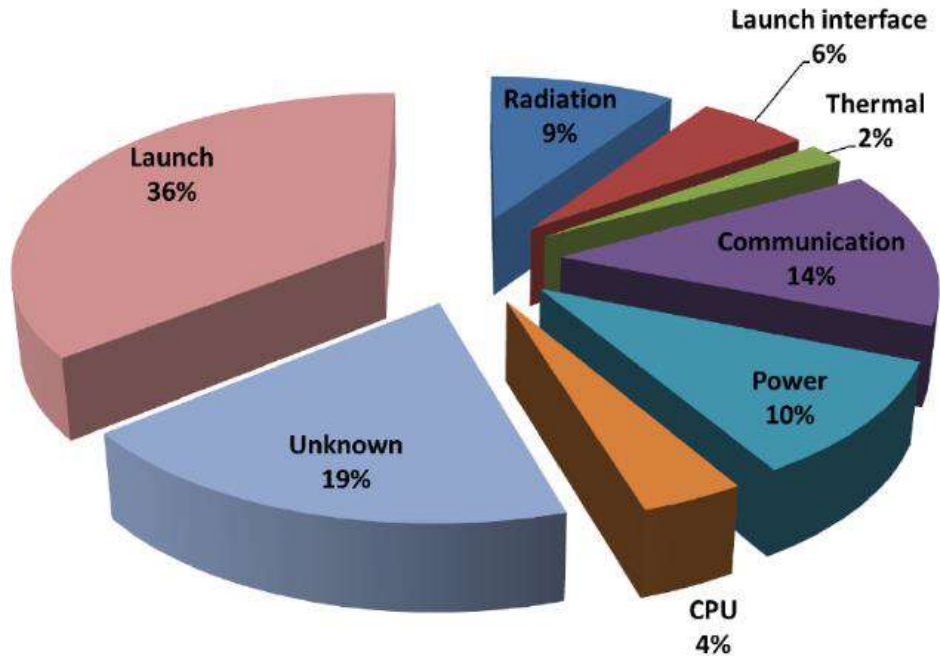
*HiRel : High Reliability

*ESCC : European Space Components Coordination

*AEC : Automotive Electronics Council



ANALYSE DE DÉFAILLANCE NANOSAT



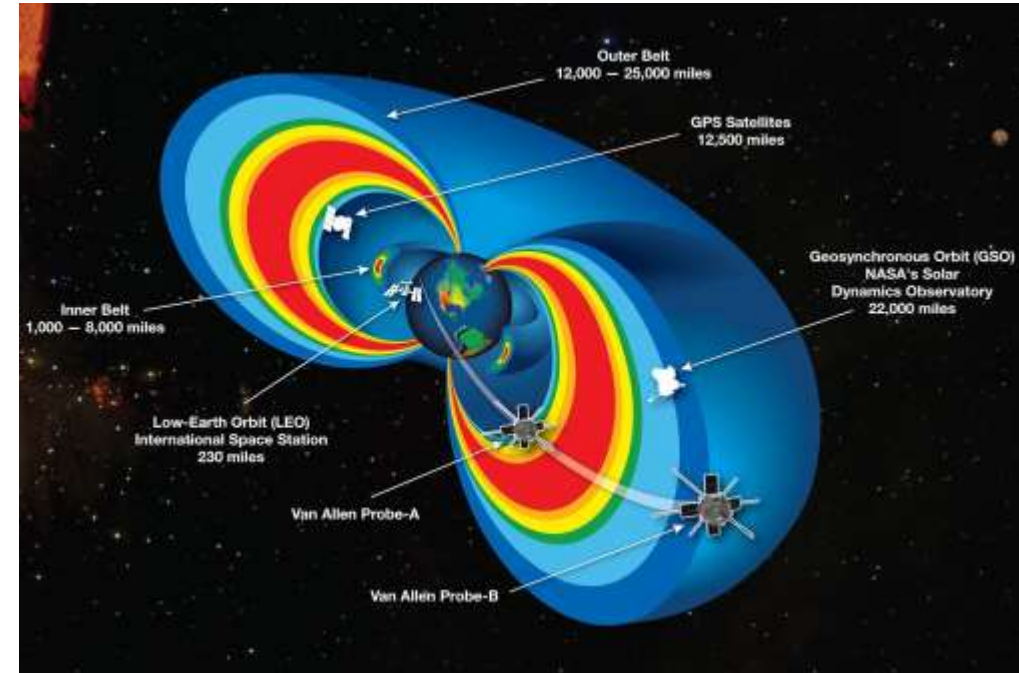
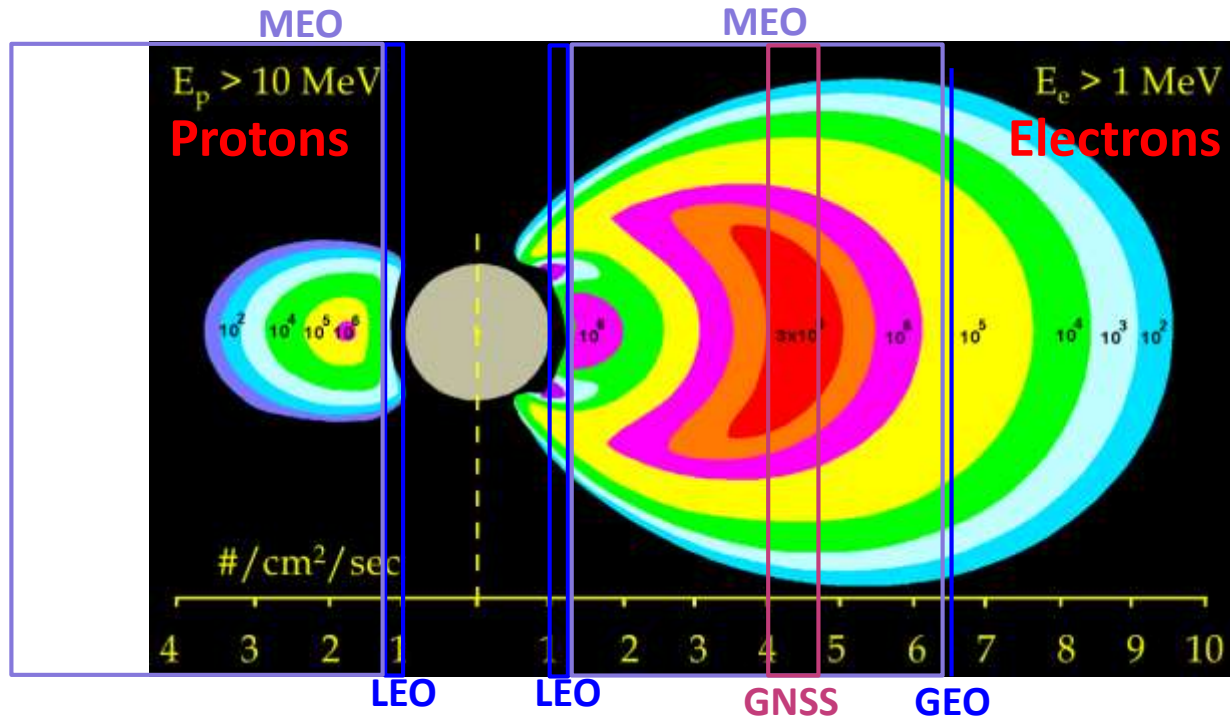
Lors de lancement, le satellite subit des fortes vibrations et des fortes chocs mécaniques.

Effets des radiations : responsables d'environ un tiers des pannes en vol !

LE MILIEU RADIATIF SPATIAL



Les ceintures de Van Allen. Electrons et protons piégés dans les lignes de champ magnétiques de la Terre



EFFETS DU RADIATION



Total Ionizing Dose (TID) en krad

- Due à l'exposition prolongée
- Effet : Dérive des paramètres : Fréquence (quartz), Gain (BJT)...

Single Event Effects

- Due à une seule particule
 - Single Event Transient (SET) → Excursion en tension résultant de la collection de la charge
 - Single Event Upset (SEU) → Basculement d'un point logique
 - Single Event Latchup (SEL) → Court-circuit

HORLOGES ET ENVIRONNEMENT SPATIAL



Besoin de mesurer la sensibilité des horloges/oscillateurs à l'environnement spatial

Temperature/Vacuum



Typ. 10^{-10} /K for USO

Magnetic field



Typ. 2×10^{-12} /G for USO

Radiations



Typ. 10^{-11} /rad for USO

Micro vibration



Typ. 5×10^{-10} /g for USO

TYPE DE MODEL



BBM – Breadbord Model. Prototype initial. Généralement simplifié, sans tenir compte des contraintes spatiales

EM – Engineering Model. Modèle fonctionnel, qui est construit pour reproduire le comportement de l'équipement réel

EQM - Engineering Qualification Model. Modèle qualifié pour tester la robustesse. Fabriqué avec des composants spatiaux ou de qualité équivalente

FM - Flight Model. Version finale de l'équipement destinée à être envoyée dans l'espace

Type de test	Model			
	BBM	EM	EQM	FM
Performance initiale à température ambiante	X	X	X	X
Vibration sinusoïdales	-	X	X	X
Vibration aléatoires	X	X	X	X
Choc mécanique	-	-	X	-
Test fonctionnelle après essais mécaniques	X	X	X	X
Teste thermique sous vide. Mesure de la performance	X	X	X	X
Test fonctionnelle après essais thermique	-	X	X	X
Test en radiation	X	-	X	-
Test fonctionnelle après irradiation	X	-	X	-
Inspection physique	-	X	X	X

TESTS DE QUALIFICATION



- Radiation
 - TID : 100 krad
- Vibration
 - Aléatoires : 25 grms @ 3 min / 6 axes
 - Sinusoïdales : 20g @ 10min / 3 axes
- Choc mécanique
 - 1500 g / 0,5ms / demis-sinus/ 6 dir
- Choc thermique
 - -55°C...+125°C. Temps de transition < 5 min
 - 50...500 cycles
- Vieillesse accéléré
 - +125°C @ 1000h
 - 50...500 cycles

TEMPS DE QUALIFICATION



~2 ans

Marché NewSpace



~5 ans

Marché Space Hireal

CAS D'USAGE



- Navigation par Satellite (GNSS):
 - Exigences en matière de stabilité de fréquence (horloges atomiques)
- Applications Scientifiques et Exploration Spatiale:
 - Utilisation d'horloges à quartz (USO) très robustes (Classe 1) pour des missions de longue durée, comme Mars ou la Lune
- Télécommunications:
 - Références de fréquence pour l'équipement de télécommunications (stabilité de fréquence) et pour les antennes actives (bruit de phase). OCXO : sorties multiples et redondance.
- Renseignement électromagnétique:
 - Radar et analyseur de spectre. Exigences pour la bruit de phase au niveau du plancher.

NAVIGATION. GNSS



Chaque satellite Galileo est équipé de 4 horloges embarquées de deux types différents

- Surveillance constante par des ensembles d'horloges au sol et mises à jour fréquentes
- Le temps du système Galileo offre une précision au niveau de la nanoseconde:

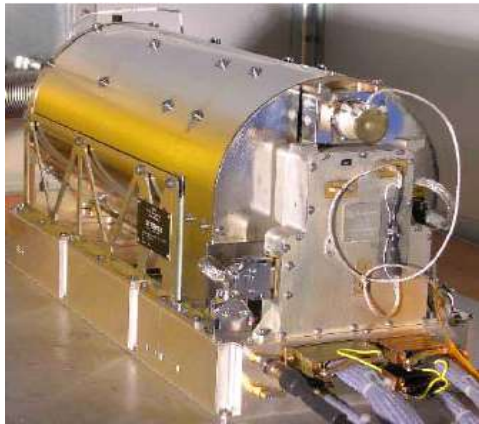
Rubidium Atomic Frequency Standard: RAFS

- Stability: $5 \cdot 10^{-14}$ and large drift
- SWAP: 2.5 L, 3.5 kg, 35 W
- Robust technology, used on most GNSS satellites



Passive Hydrogen Maser: PHM

- Stability: $5 \cdot 10^{-15}$, very small drift
- SWAP: 30 L, 25 kg, 60 W
- High maintenance



NAVIGATION. LEO-PNT



Les constellations LEO PNT n'ont généralement pas besoin d'horloges atomiques pour plusieurs raisons :

- Couverture Fréquente des Stations au Sol
- Durée de Visibilité Courte
- Environnement Orbital Moins Contraignant
- Coût et SWAP des horloges atomiques n'est pas compatible avec le marché NewSpace
- Oscillateur utilisés : OCXO haute perfo

- Rakon RK409NSAV:

- Sensibilité thermique : 5×10^{-10}
- SWAP : 115cm^3 , 125g, 2W
- ADEV @ 100s: 5×10^{-13}



- Safran LNMO:

- Sensibilité thermique : 1×10^{-9}
- SWAP : 75cm^3 , 125g, 1.5W
- ADEV @ 100s: 5×10^{-12}



POSITIONNEMENT. DORIS



DORIS = Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite

- Développé par le CNES dans les années 80 pour répondre au besoin de détermination d'orbite de haute précision et de localisation de balises.
- Utilisation initiale : détermination précise de l'orbite pour les altimètres embarqués sur des satellites (océanographie).
 - La détermination de l'orbite est réalisée par minimisation de la différence entre les mesures de vitesse radiale et le modèle orbital.
 - Précision de positionnement en temps réel : 10 cm.
 - Précision de positionnement en post-traitement (traitement au sol, précision améliorée avec un traitement plus long) : 1 cm pour 30 jours de données.
- Utilisation secondaire :
 - Localisation de balises au sol (n'appartenant pas au réseau de référence DORIS) pour une surveillance temporaire (par exemple, volcans, failles géologiques, etc.).



SCIENCE. ACES / PHARAO

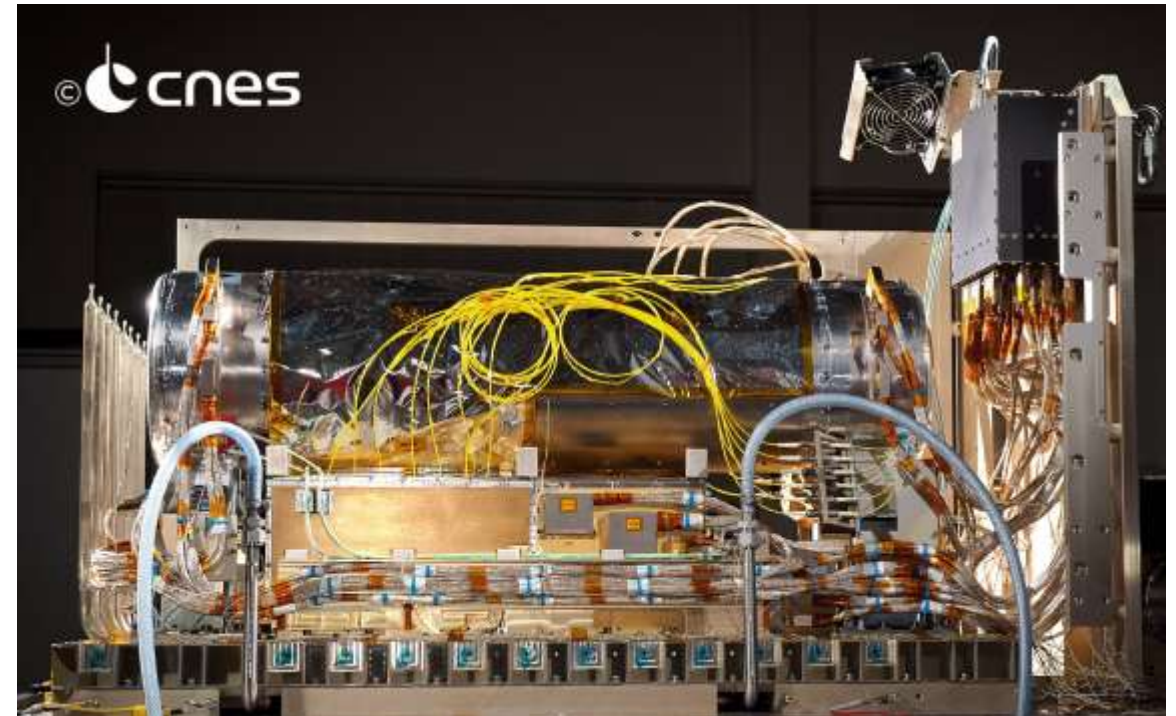


Atomic clocks for science: ACES/PHARAO

ACES = ISS payload (avril 2025) for fundamental physics (test of gravitational redshift)

- 2 atomic clocks + RF link
 - Volume 1m³
 - Mass 230 kg
 - Power 450 W

PHARAO: high accuracy clock using cold atoms



SCIENCE. RADIO-OCCULTATION. ENVISION



Études de Radio-Occultation de l'Atmosphère de Vénus

Principe : Observation de la propagation des ondes radio à travers l'atmosphère de Vénus

Paramètres Mesurés : Fréquence et amplitude du signal

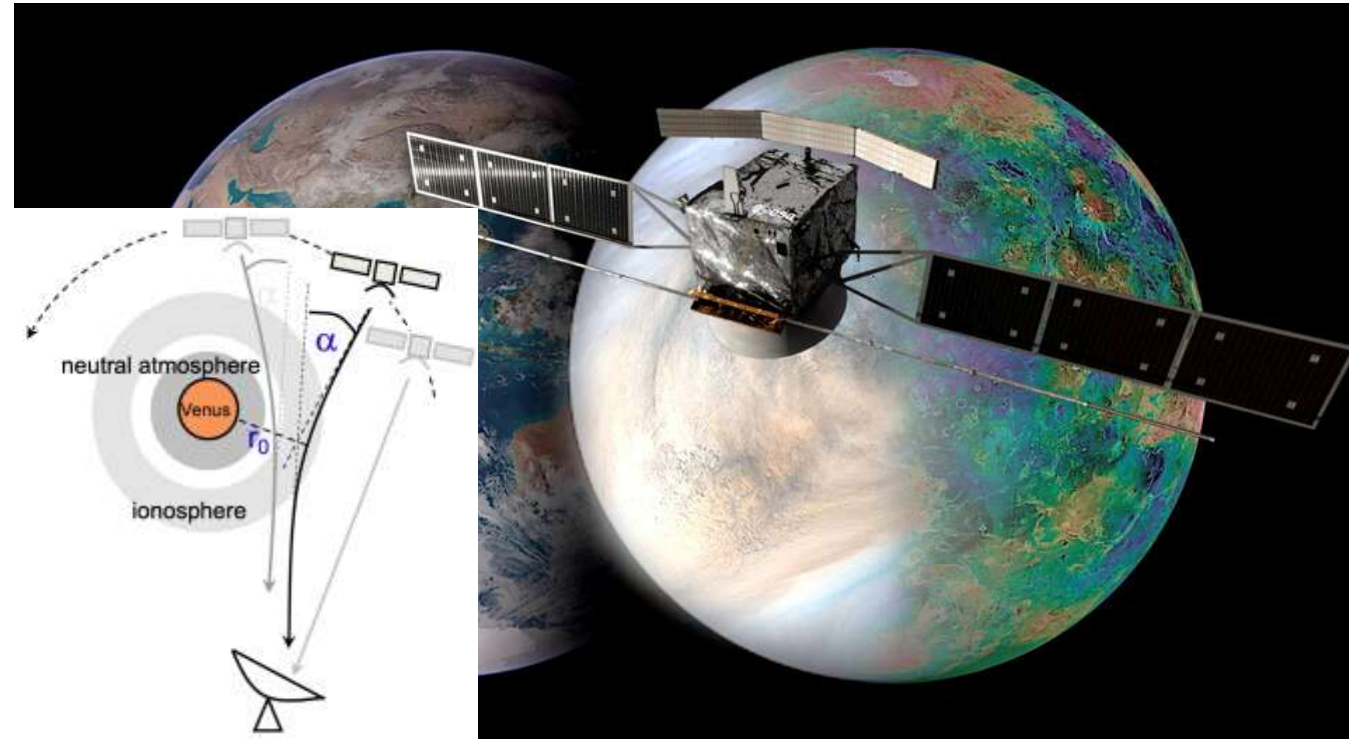
Observable:

- Profils de température, pression et densité en supposant l'équilibre hydrostatique

Défis Techniques :

- Absorption en dessous de la couche nuageuse en liaison bidirectionnelle
- Nécessité d'une liaison unidirectionnelle pour une couverture complète de l'atmosphère (35 km) et correction des effets de trajectoire multiple

Exigences pour l'Horloge de Bord :



TÉLÉCOMMUNICATION



Plusieurs besoins :

- Stabilité de l'ordre de 10^{-11} ... 10^{-13}
- Très faible bruit de phase
- Possibilité de synchronisation avec le GNSS pour les orbites LEO : MRO – Master Reference Oscillateur

- ARe nanOSTAR-SP:

- Sensibilité thermique : 5×10^{-9}
- SWAP : 4 cm^3 , 10g, 0.7W
- ADEV @ 100s: 5×10^{-12}



- Rakon MRO NS:

- Sensibilité thermique : 5×10^{-10}
- SWAP : 2 L, 2.5 kg, 3W
- ADEV @ 100s: 1×10^{-12}
- Synchronisation 1 PPS
- Redondance chaude



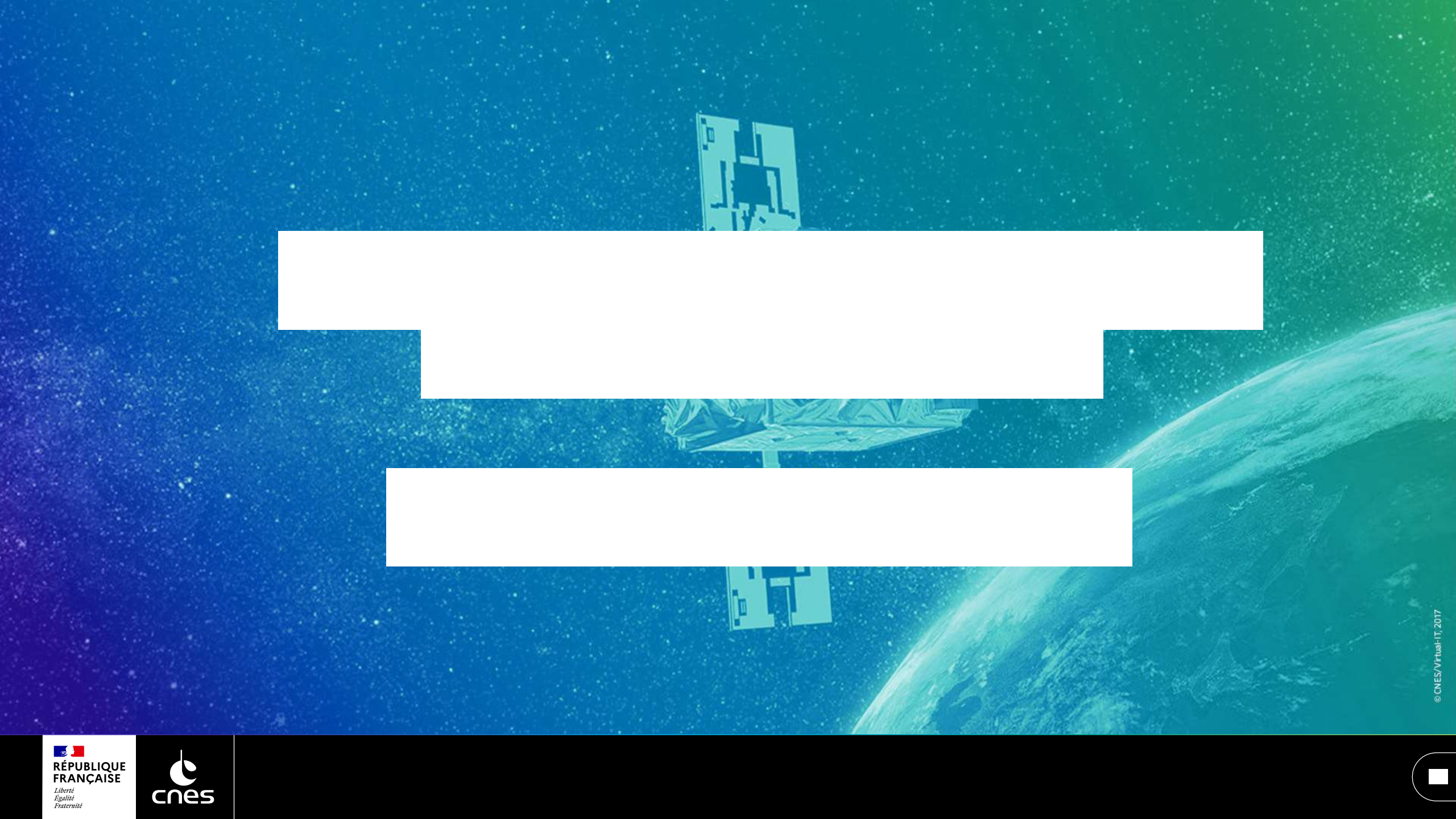
CONCLUSIONS



Les oscillateurs à quartz dominant le spatial grâce à leur fiabilité, robustesse et performances adaptées aux exigences des missions spatiales

La qualification des oscillateurs pour l'espace reste longue et complexe, ce qui ralentit l'adoption des technologies récentes

L'arrivée du marché NewSpace a accéléré l'intégration de nouvelles technologies spatiales, bien que cela soulève des défis de validation



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

