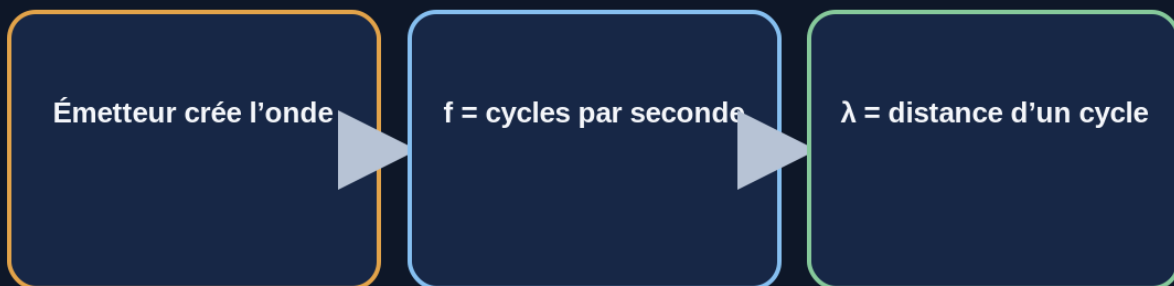


AM-10.01 — Ondes radio : fréquence, longueur d'onde et pourquoi $\lambda = c/f$

Qu'est-ce qui se propage réellement entre une antenne martienne et la Terre, et que signifient Hz, MHz, GHz et longueur d'onde ?

AM-10.01 · SPACE ACADEMY

Une onde : cycles, fréquence et longueur



Delta-Sierra · Space Academy

Fréquence et longueur d'onde décrivent deux aspects du même motif propagé à la vitesse de la lumière.

1 - Comprendre la scène

Une antenne de rover n'envoie pas des « bits » comme de petits objets matériels à travers le vide. Son émetteur transforme l'information en variations contrôlées d'une onde électromagnétique. Cette onde se propage à la vitesse de la lumière dans le vide et peut être reçue par une autre antenne des milliers ou millions de kilomètres plus loin.

Pour comprendre une liaison radio, il faut d'abord distinguer trois idées : la fréquence dit combien de cycles se répètent chaque seconde ; la longueur d'onde dit quelle distance sépare deux points équivalents du motif ; la vitesse relie les deux. Cette base permet ensuite de comprendre les antennes, les bandes UHF/X/Ka et les budgets de liaison.

2 - Vocabulaire essentiel

Onde électromagnétique - Variation couplée de champs électrique et magnétique capable de se propager dans le vide.

Cycle - Motif complet d'une onde avant qu'il se répète.

Fréquence - Nombre de cycles par seconde. Unité : hertz.

Hertz - Un hertz signifie un cycle par seconde. MHz = million de hertz ; GHz = milliard de hertz.

Longueur d'onde - Distance parcourue par l'onde pendant un cycle. Symbole courant : λ , lambda.

Bande de fréquence - Plage de fréquences à laquelle on attribue un nom ou un usage, par exemple UHF ou X-band.

3 - Mécanisme pas à pas

Le même phénomène sous deux angles

Si une onde répète son cycle très souvent chaque seconde, chaque cycle occupe moins de distance : fréquence élevée signifie longueur d'onde plus courte, puisque la vitesse de propagation reste presque constante dans le vide.

Les préfixes évitent des nombres immenses

400 MHz signifie 400 000 000 Hz. 8,4 GHz signifie 8 400 000 000 Hz. Écrire les préfixes correctement évite des colonnes de zéros et réduit le risque d'erreur.

Une bande ne décrit pas toute la liaison

Dire « X-band » précise une région de fréquence, pas le débit, la puissance, le codage, la taille d'antenne ou la qualité reçue. Ces éléments arrivent dans les cours suivants.

4 - Formules et lecture

$$\lambda = c / f$$

« lambda égale c divisé par f ». λ est la longueur d'onde, c la vitesse de la lumière dans le vide, f la fréquence.

La vitesse vaut distance par temps. Une onde de fréquence f réalise f cycles par seconde ; la distance d'un cycle est donc la distance parcourue en une seconde divisée par le nombre de cycles.

$$f = c / \lambda$$

« f égale c divisé par lambda ».

C'est la même relation réorganisée : si la longueur d'onde est connue, on peut retrouver la fréquence.

5 - Unités et vérification

La fréquence s'exprime en Hz, kHz, MHz ou GHz. La longueur d'onde s'exprime en mètres ou centimètres. Pour les calculs, convertir de préférence les préfixes avant de diviser : 400 MHz = $4,00 \times 10^8$ Hz. La vitesse de la lumière dans le vide vaut environ $2,998 \times 10^8$ m/s.

Un facteur 1000 oublié entre MHz et GHz produit une longueur d'onde mille fois fausse. Écrivez toujours l'unité à chaque ligne.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — UHF vers 400 MHz

Calculons une longueur d'onde représentative proche des liaisons UHF utilisées par les rovers avec les orbiteurs.

$$\begin{aligned} f &= 400 \text{ MHz} = 4,00 \times 10^8 \text{ Hz} \\ \lambda &= 2,998 \times 10^8 \div 4,00 \times 10^8 \\ \lambda &\approx 0,75 \text{ m} \end{aligned}$$

Conclusion: L'ordre de grandeur est trois quarts de mètre. La fréquence exacte d'une liaison réelle dépend du canal et de la mission.

Exemple 2 — X-band vers 8,4 GHz

Prenons une fréquence pédagogique de 8,4 GHz.

$$\begin{aligned} f &= 8,4 \times 10^9 \text{ Hz} \\ \lambda &= 2,998 \times 10^8 \div 8,4 \times 10^9 \\ \lambda &\approx 0,0357 \text{ m} \approx 3,57 \text{ cm} \end{aligned}$$

Conclusion: Une fréquence bien plus élevée donne une longueur d'onde bien plus courte.

Exemple 3 — Retrouver la fréquence

Une onde a $\lambda = 0,10$ m.

$$f = c \div \lambda$$

$$f \approx 2.998 \times 10^8 \div 0.10$$

$$f \approx 2.998 \times 10^9 \text{ Hz} \approx 3.0 \text{ GHz}$$

Conclusion: Dix centimètres de longueur d'onde correspondent ici à environ 3 GHz.

7 - Approfondissement

Pourquoi plusieurs bandes

Différentes fréquences offrent des compromis entre taille d'antenne, faisceau, pertes, électronique, réglementation et propagation. Une mission peut donc employer plusieurs bandes pour des fonctions différentes.

Radio et optique

Les communications optiques utilisent aussi des ondes électromagnétiques, mais à des fréquences immensément plus élevées, avec des lasers et des systèmes de pointage très fins. NASA distingue ainsi les domaines radio et optique dans SCan.

La vitesse dans un milieu

La relation simple du cours utilise c dans le vide. Dans un câble ou un matériau, la vitesse de propagation est plus faible. Pour une liaison interplanétaire libre, l'approximation par c est appropriée.

Transporter l'information

Une porteuse pure ne contient pas encore votre photo de Mars. L'émetteur modifie amplitude, phase, fréquence ou autres propriétés suivant une modulation et ajoute codage/synchronisation. Ce sera un futur cours.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

Les rovers martiens utilisent des liaisons UHF vers les orbiteurs et des liaisons X-band directes vers la Terre. Comprendre fréquence et longueur d'onde permet ensuite de comprendre pourquoi leurs antennes ont des formes, tailles et directivités différentes.

Une future colonie martienne combinera réseaux locaux, relais orbitaux et liaisons interplanétaires. Les mêmes notions de fréquence, bande et longueur d'onde apparaîtront partout, même si les puissances et distances changent radicalement.

9 - Pièges fréquents

- Confondre fréquence et débit de données.
- Croire qu'une fréquence élevée se propage plus vite dans le vide.
- Oublier de convertir MHz ou GHz en Hz.
- Dire qu'une onde radio a besoin d'air pour voyager.
- Confondre longueur physique d'antenne et longueur d'onde comme si elles étaient toujours égales.

10 - Exercices guidés

Question: Quelle est la longueur d'onde approximative à 1 GHz ?

Réponse: $\lambda \approx 2,998 \times 10^8 \div 1 \times 10^9 \approx 0,300$ m, soit environ 30 cm.

Question: 800 MHz a-t-il une longueur d'onde plus longue ou plus courte que 400 MHz ?

Réponse: Plus courte : doubler la fréquence divise la longueur d'onde par deux.

Question: Pourquoi « X-band = 8,4 GHz » n'est-il qu'un exemple et non une définition complète ?

Réponse: Parce que X-band couvre une plage de fréquences ; une mission utilise des fréquences précises à l'intérieur de cette plage.

11 - À savoir expliquer

- Définir cycle, fréquence, hertz et longueur d'onde.
- Lire correctement kHz, MHz et GHz.
- Utiliser $\lambda = c/f$ avec les unités.
- Expliquer pourquoi fréquence élevée signifie longueur d'onde plus courte.
- Distinguer bande de fréquence et débit de données.

12 - Sources NASA / JPL

NASA - Radio vs Optical Spectrum

<https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/radio-vs-optical-spectrum/>

NASA Science - Mars 2020 rover components

<https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/rover-components/>

Ressource pédagogique libre : ce cours explique les principes pour un public débutant. Il ne remplace ni la conception de mission, ni les modèles de vol opérationnels, ni les procédures, essais et validations d'une agence spatiale.