

Communications spatiales: du photon au réseau martien

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Communications spatiales: du photon au réseau martien: comment « Comprendre la puissance en décibels » agit-il sur « La distance impose une perte géométrique », et quel repère issu de « Bande passante, débit et rapport signal/bruit » permet de vérifier la décision?

Intuition. Les bilans de liaison utilisent souvent les décibels. Pour un rapport de puissances P_2/P_1 , le gain ou la perte vaut $G = 10 \log_{10}(P_2/P_1)$ en dB.

1

Comprendre la puissance en décibels

Les bilans de liaison utilisent souvent les décibels.

2

La distance impose une perte géométrique

Dans un espace libre idéal, une onde sphérique répartit son énergie sur une surface qui croît comme le carré de la distance.

3

Bande passante, débit et rapport signal/bruit

Augmenter le débit demande généralement davantage de bande, davantage de rapport signal/bruit, un codage plus efficace ou une combinaison de ces leviers.

Repère concret. Pour un rapport de puissances P_2/P_1 , le gain ou la perte vaut $G = 10 \log_{10}(P_2/P_1)$ en dB.

- Comprendre la puissance en décibels — Les bilans de liaison utilisent souvent les décibels.
- La distance impose une perte géométrique — Dans un espace libre idéal, une onde sphérique répartit son énergie sur une surface qui croît comme le carré de la distance.
- Bande passante, débit et rapport signal/bruit — Augmenter le débit demande généralement davantage de bande, davantage de rapport signal/bruit, un codage plus efficace ou une combinaison de ces leviers.

COMMUNICATIONS ET NAVIGATION SUR MARS

Rester connectés. S'orienter. Décider. Malgré la distance, avancer ensemble.

1



RÉSEAU LOCAL MARTIEN

Une toile numérique au cœur de la colonie.

- Réseau maillé sans fil entre habitats, véhicules et équipements.
- Priorité aux données vitales et à la voix.
- Fonctionne de façon autonome, même sans lien avec la Terre.

2



RELAIS ORBITAUX

Des satellites en orbite pour voir plus loin.

- Satellites de communication en orbite martienne assurent une couverture continue.
- Passerelles entre la surface et la Terre.
- Multiples orbites pour éviter les zones d'ombre et les pertes de signal.

3



LIAISON TERRE-MARS

Le lien interplanétaire.

- Communications via le Deep Space Network et stations partenaires.
- Débit adapté : données essentielles d'abord.
- Messages asynchrones et planification des échanges pour optimiser chaque contact.

4



NAVIGATION, SYNCHRONISATION ET DÉLAIS

S'orienter et agir avec précision.

- Navigation autonome avec constellations de satellites, capteurs de surface et cartes haute précision.
- Horloges atomiques pour une synchronisation fiable.
- Décisions locales éclairées : on planifie aujourd'hui pour réussir demain.

5



CONTINUITÉ, REDONDANCE ET SÉCURITÉ

La résilience est notre meilleure connexion.

- Systèmes et chemins de communication redondants.
- Surveillance continue et basculement automatique.
- Protection des données, authentification et plans de secours pour chaque scénario.



NOTRE PRINCIPE

Autonomie locale, coopération orbitale, lien terrestre.

UNE SEULE MISSION. PLUSIEURS LIENS.



À RETENIR

- ✓ Nous communiquons intelligemment.
- ✓ Nous naviguons avec précision.
- ✓ Nous restons connectés, même quand la distance nous sépare.



LE CHIFFRE CLÉ

55 à 400 Mb/s

Débit typique Terre-Mars selon la distance et l'alignement



SUR MARS, CHAQUE SIGNAL COMPTE.

CHAQUE DÉCISION NOUS RAPPROCHE DE DEMAIN.



FIABLE

Des systèmes robustes pour un lien permanent.



PRÉCIS

Navigation et temps synchronisés.



COLLABORATIF

Échanges optimisés, équipe connectée.



SÉCURISÉ

Données protégées, missions assurées.

COMMUNICATIONS ET NAVIGATION SUR MARS

Rester connectés. S'orienter. Décider. Malgré la distance, avancer ensemble.

1



RÉSEAU LOCAL MARTIEN

Une toile numérique au cœur de la colonie.

- Réseau maillé sans fil entre habitats, véhicules et équipements.
- Priorité aux données vitales et à la voix.
- Fonctionne de façon autonome, même sans lien avec la Terre.

2



RELAIS ORBITAUX

Des satellites en orbite pour voir plus loin.

- Satellites de communication en orbite martienne assurent une couverture continue.
- Passerelles entre la surface et la Terre.
- Multiples orbites pour éviter les zones d'ombre et les pertes de signal.

3



LIAISON TERRE-MARS

Le lien interplanétaire.

- Communications via le Deep Space Network et stations partenaires.
- Débit adapté : données essentielles d'abord.
- Messages asynchrones et planification des échanges pour optimiser chaque contact.

4



NAVIGATION, SYNCHRONISATION ET DÉLAIS

S'orienter et agir avec précision.

- Navigation autonome avec constellations de satellites, capteurs de surface et cartes haute précision.
- Horloges atomiques pour une synchronisation fiable.
- Décisions locales éclairées : on planifie aujourd'hui pour réussir demain.

5



CONTINUITÉ, REDONDANCE ET SÉCURITÉ

La résilience est notre meilleure connexion.

- Systèmes et chemins de communication redondants.
- Surveillance continue et basculement automatique.
- Protection des données, authentification et plans de secours pour chaque scénario.



NOTRE PRINCIPE

Autonomie locale, coopération orbitale, lien terrestre.

UNE SEULE MISSION. PLUSIEURS LIENS.



À RETENIR

- ✓ Nous communiquons intelligemment.
- ✓ Nous naviguons avec précision.
- ✓ Nous restons connectés, même quand la distance nous sépare.



LE CHIFFRE CLÉ

55 à 400 Mb/s

Débit typique Terre-Mars selon la distance et l'alignement



SUR MARS, CHAQUE SIGNAL COMPTE.

CHAQUE DÉCISION NOUS RAPPROCHE DE DEMAIN.



FIABLE

Des systèmes robustes pour un lien permanent.



PRÉCIS

Navigation et temps synchronisés.



COLLABORATIF

Échanges optimisés, équipe connectée.



SÉCURISÉ

Données protégées, missions assurées.

La communication martienne doit continuer à fonctionner localement même lorsque la Terre est lointaine, retardée ou momentanément indisponible.



Visualisation conceptuelle d'une station de communication de surface. Le cours relie géométrie, fréquence, [gain d'antenne](#), puissance, pertes et bruit: la station réelle ajoute pointage, [maintenance](#), alimentation et modes de repli.

Une communication interplanétaire commence par une question simple: le récepteur reçoit-il suffisamment d'énergie et d'information pour distinguer le signal du bruit? Elle devient ensuite un problème de réseau: quand le chemin n'existe pas, où stocker les données, qui est prioritaire et combien de temps une commande reste-t-elle valide? Ce module part du bilan de liaison et monte jusqu'au réseau martien.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 10

Comprendre avant de calculer

Un message doit voyager de Mars à la Terre avec une [puissance](#) limitée, une antenne pointée à travers des millions de kilomètres et un temps de propagation impossible à supprimer.

Progression du module — photon; fréquence; gain d'antenne; rapport signal/bruit.

photon

Définition. Un photon est le quantum de rayonnement électromagnétique; les communications radio utilisent des ondes électromagnétiques dont l'énergie et la fréquence sont liées.

Exemple. Un émetteur produit un signal radio modulé qui se propage à la [vitesse](#) de la lumière dans le vide.

Piège. Parler de photons ne dispense pas de travailler avec puissance, fréquence, bruit et antennes dans l'ingénierie de liaison.

Contrôle mental. À énergie plus élevée, la fréquence d'un [photon](#) doit être plus élevée; si la longueur d'onde augmente en même temps, la relation a probablement été inversée.

Exercice guidé — photon

Situation à reconnaître. Un photon est le quantum de rayonnement électromagnétique; les communications radio utilisent des ondes électromagnétiques dont l'énergie et la fréquence sont liées.

Vérification demandée. À énergie plus élevée, la fréquence d'un photon doit être plus élevée; si la longueur d'onde augmente en même temps, la relation a probablement été inversée.

Erreur à écarter. Parler de photons ne dispense pas de travailler avec puissance, fréquence, bruit et antennes dans l'ingénierie de liaison.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un photon est le quantum de rayonnement électromagnétique; les communications radio utilisent des ondes électromagnétiques dont l'énergie et la fréquence sont liées.

Test du cas

À énergie plus élevée, la fréquence d'un photon doit être plus élevée; si la longueur d'onde augmente en même temps, la relation a probablement été inversée.

Piège exclu

Parler de photons ne dispense pas de travailler avec puissance, fréquence, bruit et antennes dans l'ingénierie de liaison.

Conséquence opérationnelle

Pour ce point, la décision doit rester compatible avec le test suivant: À énergie plus élevée, la fréquence d'un photon doit être plus élevée; si la longueur d'onde augmente en même temps, la relation a probablement été inversée.. Une incohérence conduit à suspendre la conclusion et à contrôler unités, hypothèses ou capteurs concernés.

Quantification

photon: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

photon: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

fréquence

Définition. La fréquence indique combien de cycles d'une oscillation se produisent par seconde, en hertz.

Exemple. Les bandes X ou Ka utilisent des fréquences différentes avec des compromis d'antenne, propagation et technologie.

Piège. Une fréquence plus élevée n'implique pas automatiquement un meilleur débit de bout en bout.

Contrôle mental. Fréquence et période sont inverses: doubler la fréquence doit diviser la période par deux.

Exercice guidé — fréquence

Situation à reconnaître. La fréquence indique combien de cycles d'une oscillation se produisent par seconde, en hertz.

Vérification demandée. Fréquence et période sont inverses: doubler la fréquence doit diviser la période par deux.

Erreur à écarter. Une fréquence plus élevée n'implique pas automatiquement un meilleur débit de bout en bout.

Corrigé raisonné

Sens précis

La fréquence indique combien de cycles d'une oscillation se produisent par seconde, en hertz.

Test du cas

Fréquence et période sont inverses: doubler la fréquence doit diviser la période par deux.

Piège exclu

Une fréquence plus élevée n'implique pas automatiquement un meilleur débit de bout en bout.

Conséquence opérationnelle

Les bandes X ou Ka utilisent des fréquences différentes avec des compromis d'antenne, propagation et technologie.

Quantification

fréquence: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

fréquence: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

gain d'antenne

Définition. Le gain d'une antenne décrit sa capacité à concentrer la puissance rayonnée ou reçue dans certaines directions par rapport à une référence.

Exemple. Une grande antenne parabolique fournit un gain élevé mais exige un pointage plus précis.

Piège. Le gain ne crée pas d'énergie; il redistribue la directivité.

Contrôle mental. À géométrie comparable, une antenne plus directive concentre davantage l'énergie dans la direction utile; un gain supérieur ne signifie pas une puissance émise créée ex nihilo.

Exercice guidé — gain d'antenne

Situation à reconnaître. Le gain d'une antenne décrit sa capacité à concentrer la puissance rayonnée ou reçue dans certaines directions par rapport à une référence.

Vérification demandée. À géométrie comparable, une antenne plus directive concentre davantage l'énergie dans la direction utile; un gain supérieur ne signifie pas une puissance émise créée ex nihilo.

Erreur à écarter. Le gain ne crée pas d'énergie; il redistribue la directivité.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le gain d'une antenne décrit sa capacité à concentrer la puissance rayonnée ou reçue dans certaines directions par rapport à une référence.

Test du cas

À géométrie comparable, une antenne plus directive concentre davantage l'énergie dans la direction utile; un gain supérieur ne signifie pas une puissance émise créée ex nihilo.

Piège exclu

Le gain ne crée pas d'énergie; il redistribue la directivité.

Conséquence opérationnelle

L'usage de cette notion en mission exige un second regard: Le gain ne crée pas d'énergie; il redistribue la directivité.. Ce point transforme la notion théorique en règle de validation avant engagement du système.

Quantification

gain d'antenne: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

gain d'antenne: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

rapport signal/bruit

Définition. Le rapport signal/bruit compare la puissance utile au bruit dans la bande considérée et influence la capacité à décoder les données avec un taux d'erreur acceptable.

Exemple. Un signal extrêmement faible peut rester exploitable grâce aux grandes antennes, au codage et à l'intégration.

Piège. Une puissance reçue seule ne suffit pas: il faut connaître le bruit et la bande.

Contrôle mental. Un [rapport signal/bruit](#) plus grand signifie une détection plus robuste; si le bruit augmente à signal constant, le rapport doit diminuer.

Exercice guidé — rapport signal/bruit

Situation à reconnaître. Le rapport signal/bruit compare la puissance utile au bruit dans la bande considérée et influence la capacité à décoder les données avec un taux d'erreur acceptable.

Vérification demandée. Un rapport signal/bruit plus grand signifie une détection plus robuste; si le bruit augmente à signal constant, le rapport doit diminuer.

Erreur à écarter. Une puissance reçue seule ne suffit pas: il faut connaître le bruit et la bande.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le rapport signal/bruit compare la puissance utile au bruit dans la bande considérée et influence la capacité à décoder les données avec un taux d'erreur acceptable.

Test du cas

Un rapport signal/bruit plus grand signifie une détection plus robuste; si le bruit augmente à signal constant, le rapport doit diminuer.

Piège exclu

Une puissance reçue seule ne suffit pas: il faut connaître le bruit et la bande.

Conséquence opérationnelle

Ce principe devient opérationnel seulement si la mesure et le modèle racontent la même chose. Dans ce module, Un rapport signal/bruit plus grand signifie une détection plus robuste; si le bruit augmente à signal constant, le rapport doit diminuer.; sinon la marge ou le mode retenu doit être réévalué.

Quantification

rapport signal/bruit: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

rapport signal/bruit: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Communications spatiales : mini-leçons canoniques

Ces mini-leçons constituent la référence quantitative canonique du module. Les exemples numériques sont pédagogiques et doivent rester distingués des données de mission.

Rapport signal/bruit en décibels

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_{\text{signal}} / P_{\text{bruit}})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_{\text{signal}} / P_{\text{bruit}})$ » dans le contexte de «Rapport signal/bruit en décibels» ?

2 — Intuition sans symboles

Le rapport signal/bruit compare la puissance utile à la puissance de bruit et l'échelle logarithmique le transforme en décibels.

3 — Grandeurs

SNR_{dB} : rapport en dB ; P_{signal} : puissance du signal ; P_{bruit} : puissance de bruit.

4 — Formule

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_{\text{signal}} / P_{\text{bruit}})$$

5 — Lecture

Lire la relation « $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_{\text{signal}} / P_{\text{bruit}})$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

SNR_{dB} : rapport en dB ; P_{signal} : puissance du signal ; P_{bruit} : puissance de bruit.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Les puissances doivent être dans la même unité ; leur rapport est sans dimension ; résultat en dB.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Un rapport de puissance se convertit en dB avec $10 \log_{10}$.

11 — Hypothèses

Puissances intégrées sur la même bande et au même point de chaîne.

12 — Contrôle d'unités

Les puissances doivent être dans la même unité ; leur rapport est sans dimension ; résultat en dB. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Si $P_{\text{signal}}/P_{\text{bruit}} = 100$, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(100) = 20 \text{ dB}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Un rapport de puissance se convertit en dB avec $10 \log_{10}$.

15 — Contrôle algébrique

$10^{(\text{SNR}_{\text{dB}}/10)}$ doit redonner le rapport linéaire 100.

16 — Estimation mentale

Un rapport $100 = 10^2$ correspond exactement à 20 dB.

17 — Interprétation

Le SNR disponible doit être comparé au seuil requis par modulation et codage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

Multiplier le rapport de puissance par 10 ajoute 10 dB.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Rapport linéaire = 20.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$\text{SNR} = 10 \log_{10}(20) = 13,01 \text{ dB}$.

Exercice autonome. Rapport linéaire = 10.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$\text{SNR} = 10 \log_{10}(10) = 10,00 \text{ dB}$.

21 — Décision mission

Conserver une marge SNR au-delà du seuil de liaison, pas seulement l'égalité au minimum.

Gain ou perte d'un rapport de puissances

$$G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_2 / P_1)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_2 / P_1)$ » dans le contexte de «Gain ou perte d'un rapport de puissances» ?

2 — Intuition sans symboles

Les décibels compressent de grands rapports de puissance en additions et soustractions faciles à combiner dans un budget de liaison.

3 — Grandeurs

G_{dB} : gain/perte en dB ; P_2/P_1 : rapport de puissances.

4 — Formule

$$G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_2 / P_1)$$

5 — Lecture

Lire la relation « $G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_2 / P_1)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

G_{dB} : gain/perte en dB ; P_2/P_1 : rapport de puissances.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

P_2 et P_1 dans la même unité ; rapport sans dimension ; résultat en dB.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

La définition logarithmique transforme les multiplications de puissance en additions de dB.

11 — Hypothèses

Rapport positif de puissances comparables.

12 — Contrôle d'unités

P_2 et P_1 dans la même unité ; rapport sans dimension ; résultat en dB. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Pour $P_2/P_1 = 100$, $G_{dB} = 10 \log_{10}(100) = 20$ dB.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La définition logarithmique transforme les multiplications de puissance en additions de dB.

15 — Contrôle algébrique

$10^{(20/10)} = 100$.

16 — Estimation mentale

$\times 10$ vaut +10 dB ; $\times 100$ vaut +20 dB.

17 — Interprétation

Cette relation permet d'additionner gains et pertes dans le domaine logarithmique.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

Diviser la puissance par 2 produit environ -3,01 dB.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $P_2/P_1 = 4$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$G = 10 \log_{10}(4) = 6,02$ dB.

Exercice autonome. $P_2/P_1 = 0,1$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$G = 10 \log_{10}(0,1) = -10,00$ dB.

21 — Décision mission

Vérifier le signe de chaque terme avant de sommer un budget de liaison.

Perte de trajet en espace libre

$$L_{FS,dB} = 20 \log_{10}(4\pi d / \lambda)$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $L_{FS,dB} = 20 \log_{10}(4\pi d / \lambda)$ » dans le contexte de «Perte de trajet en espace libre» ?

2 — Intuition sans symboles

La puissance se dilue géométriquement avec la distance ; la longueur d'onde fixe aussi la taille électrique de cette propagation.

3 — Grandeurs

$L_{FS,dB}$: perte en dB ; d : distance ; λ : longueur d'onde.

4 — Formule

$$L_{FS,dB} = 20 \log_{10}(4\pi d / \lambda)$$

5 — Lecture

Lire la relation « $L_{FS,dB} = 20 \log_{10}(4\pi d / \lambda)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

$L_{FS,dB}$: perte en dB ; d : distance ; λ : longueur d'onde.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

d et λ dans la même unité ; résultat en dB.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

La perte linéaire vaut $(4\pi d / \lambda)^2$; $10 \log$ du carré devient $20 \log$.

11 — Hypothèses

Propagation idéale en espace libre sans autres pertes.

12 — Contrôle d'unités

d et λ dans la même unité ; résultat en dB. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $d = 1\,000 \text{ km} = 1 \times 10^6 \text{ m}$ et $\lambda = 0,10 \text{ m}$, $L_{FS} \approx 161,98 \text{ dB}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La perte linéaire vaut $(4\pi d / \lambda)^2$; $10 \log$ du carré devient $20 \log$.

15 — Contrôle algébrique

Doubler d doit ajouter environ 6,02 dB de perte.

16 — Estimation mentale

Une très grande distance produit rapidement des pertes supérieures à cent décibels.

17 — Interprétation

La perte espace libre n'est qu'un terme du budget ; pointage, atmosphère et matériel peuvent ajouter d'autres pertes.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

L_{FS} augmente de 6,02 dB quand d double ou quand λ est divisée par deux.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $d = 2\,000 \text{ km}$, $\lambda = 0,10 \text{ m}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$L_{FS} = 20 \log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^6 / 0,10) \approx 168,00 \text{ dB}.$$

Exercice autonome. $d = 1\,000 \text{ km}$, $\lambda = 0,05 \text{ m}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$L_{FS} = 20 \log_{10}(4\pi \times 1 \times 10^6 / 0,05) \approx 168,00 \text{ dB}.$$

21 — Décision mission

Inclure cette perte dans le budget avant de conclure sur puissance, antennes ou débit.

Temps de propagation radio

$$t_{\text{prop}} = d / c$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{\text{prop}} = d / c$ » dans le contexte de «Temps de propagation radio» ?

2 — Intuition sans symboles

Même à la vitesse de la lumière, une distance interplanétaire impose un délai incompressible.

3 — Grandeurs

t_{prop} : temps aller simple ; d : distance ; c : vitesse de la lumière.

4 — Formule

$$t_{\text{prop}} = d / c$$

5 — Lecture

Lire la relation « $t_{\text{prop}} = d / c$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

t_{prop} : temps aller simple ; d : distance ; c : vitesse de la lumière.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

t en s ; d en m ; $c = 299\,792\,458$ m/s.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Le temps est la distance divisée par la vitesse de propagation.

11 — Hypothèses

Distance géométrique représentative du trajet et propagation électromagnétique dans le vide.

12 — Contrôle d'unités

t en s ; d en m ; $c = 299\,792\,458$ m/s. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Pour $d = 225 \times 10^9$ m, $t_{\text{prop}} \approx 225 \times 10^9 / 299\,792\,458 = 750,5$ s = 12,51 min.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le temps est la distance divisée par la vitesse de propagation.

15 — Contrôle algébrique

$c \cdot t$ doit redonner environ 225 milliards de mètres.

16 — Estimation mentale

300 000 km/s pendant 750 s représente environ 225 millions de km.

17 — Interprétation

Ce délai interdit le pilotage conversationnel instantané des opérations martiennes.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

Le temps de propagation varie linéairement avec la distance.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $d = 150 \times 10^9$ m.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$t \approx 500,35$ s = 8,34 min.

Exercice autonome. $d = 75 \times 10^9$ m.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$t \approx 250,17$ s = 4,17 min.

21 — Décision mission

Dimensionner procédures et autonomie locale avec le délai aller-retour réel.

Volume de données produit ou transmis

$$V = R \times t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $V = R \times t$ » dans le contexte de «Volume de données produit ou transmis» ?

2 — Intuition sans symboles

Un débit devient un volume total de données lorsqu'on le multiplie par la durée pendant laquelle il s'applique.

3 — Grandeurs

V : volume de données ; R : débit ; t : durée.

4 — Formule

$$V = R \times t$$

5 — Lecture

Lire la relation « $V = R \times t$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

V : volume de données ; R : débit ; t : durée.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

R en bit/s ou Mbit/s ; t en s ; V dans l'unité correspondante de bits.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Un débit est une quantité par seconde ; la multiplication par le temps cumule la quantité.

11 — Hypothèses

Débit moyen représentatif sur l'intervalle.

12 — Contrôle d'unités

R en bit/s ou Mbit/s ; t en s ; V dans l'unité correspondante de bits. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

À 8 Mbit/s pendant 1 500 s, $V = 8 \times 1\,500 = 12\,000$ Mbit = 1 500 MB $\approx$ 1,5 GB avant overhead.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Un débit est une quantité par seconde ; la multiplication par le temps cumule la quantité.

15 — Contrôle algébrique

V/t doit redonner 8 Mbit/s et 8 bits = 1 octet.

16 — Estimation mentale

8 Mbit/s pendant 25 min donne environ 12 Gbit, soit 1,5 GB.

17 — Interprétation

Le volume brut doit ensuite intégrer protocole, codage, retransmissions et marges.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

V varie linéairement avec débit et durée.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. R = 2 Mbit/s pendant 5 400 s.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$V = 10\,800 \text{ Mbit} = 1\,350 \text{ MB} \approx 1,35 \text{ GB.}$$

Exercice autonome. R = 40 Mbit/s pendant deux fenêtres de 1 500 s.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$V = 40 \times 3\,000 = 120\,000 \text{ Mbit} = 15\,000 \text{ MB} \approx 15 \text{ GB.}$$

21 — Décision mission

Dimensionner stockage et calendrier de liaison sur le volume net réellement transportable.

Budget de puissance reçu

$$P_{r,\text{dBm}} = P_{t,\text{dBm}} + G_t + G_r - L_{\text{trajet}} - L_{\text{diverses}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $P_{r,\text{dBm}} = P_{t,\text{dBm}} + G_t + G_r - L_{\text{trajet}} - L_{\text{diverses}}$ » dans le contexte de «Budget de puissance reçu» ?

2 — Intuition sans symboles

Dans le domaine des décibels, gains et pertes s'additionnent algébriquement pour donner la puissance reçue.

3 — Grandeurs

P_r : puissance reçue ; P_t : puissance émise ; G_t/G_r : gains d'antennes ; L_{trajet} : perte de trajet ; L_{diverses} : pertes additionnelles.

4 — Formule

$$P_{r,\text{dBm}} = P_{t,\text{dBm}} + G_t + G_r - L_{\text{trajet}} - L_{\text{diverses}}$$

5 — Lecture

Lire la relation « $P_{r,\text{dBm}} = P_{t,\text{dBm}} + G_t + G_r - L_{\text{trajet}} - L_{\text{diverses}}$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

P_r : puissance reçue ; P_t : puissance émise ; G_t/G_r : gains d'antennes ; L_{trajet} : perte de trajet ; L_{diverses} : pertes additionnelles.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

P_t et P_r en dBm ; gains/pertes en dB.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

Les rapports multiplicatifs deviennent des sommes en dB ; les pertes entrent avec un signe négatif.

11 — Hypothèses

Tous les termes référencés au même scénario de liaison et à la même fréquence.

12 — Contrôle d'unités

P_t et P_r en dBm ; gains/pertes en dB. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $P_t = 40 \text{ dBm}$, $G_t = 30 \text{ dB}$, $G_r = 65 \text{ dB}$, $L_{\text{trajet}} = 210 \text{ dB}$ et $L_{\text{diverses}} = 5 \text{ dB}$, $P_r = -80 \text{ dBm}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Les rapports multiplicatifs deviennent des sommes en dB ; les pertes entrent avec un signe négatif.

15 — Contrôle algébrique

Réadditionner les gains aux pertes doit reconstruire la chaîne sans changer de signe.

16 — Estimation mentale

$40+30+65 = 135$; $210+5 = 215$; $135-215 = -80 \text{ dBm}$.

17 — Interprétation

La puissance reçue doit ensuite être comparée au bruit et à la sensibilité du récepteur.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

Chaque dB de perte supplémentaire diminue P_r d'un dB.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $43 + 32 + 60 - 205 - 4$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$P_r = 135 - 209 = -74 \text{ dBm.}$$

Exercice autonome. $38 + 28 + 62 - 208 - 6$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$P_r = 128 - 214 = -86 \text{ dBm.}$$

21 — Décision mission

Ne valider le débit qu'après fermeture simultanée du budget de puissance et du budget SNR.

Énergie d'un photon radio

$$E_{\text{photon}} = h f$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E_{\text{photon}} = h f$ » dans le contexte de «Énergie d'un photon radio» ?

2 — Intuition sans symboles

À fréquence plus élevée, chaque quantum électromagnétique transporte davantage d'énergie, même si une liaison radio se traite généralement en puissance et bruit collectifs.

3 — Grandeurs

E_{photon} : énergie ; h : constante de Planck ; f : fréquence.

4 — Formule

$$E_{\text{photon}} = h f$$

5 — Lecture

Lire la relation « $E_{\text{photon}} = h f$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

E_{photon} : énergie ; h : constante de Planck ; f : fréquence.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

E en J ; $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; f en Hz.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

La relation de Planck relie directement fréquence et énergie quantique.

11 — Hypothèses

Fréquence bien définie ; interprétation quantique sans confondre énergie d'un photon et puissance totale du signal.

12 — Contrôle d'unités

E en J ; $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; f en Hz. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

$$\text{À } f = 8,4 \text{ GHz, } E = 6,626 \times 10^{-34} \times 8,4 \times 10^9 \approx 5,57 \times 10^{-24} \text{ J.}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La relation de Planck relie directement fréquence et énergie quantique.

15 — Contrôle algébrique

E/f doit redonner h.

16 — Estimation mentale

Doubler la fréquence double l'énergie d'un photon.

17 — Interprétation

Cette échelle aide à relier description onde, bruit thermique et description quantique, mais ne dimensionne pas seule la liaison.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

E_{photon} varie linéairement avec f.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. f = 2,2 GHz.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$$E \approx 6,626 \times 10^{-34} \times 2,2 \times 10^9 = 1,46 \times 10^{-24} \text{ J.}$$

Exercice autonome. f = 32 GHz.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$$E \approx 2,12 \times 10^{-23} \text{ J.}$$

21 — Décision mission

Garder cette relation comme culture physique ; dimensionner la liaison avec puissance, bruit, antennes et codage.

Entraînement progressif

1. Expliquez sans équation quatre notions réellement utilisées dans « Communications spatiales: du photon au réseau martien », puis indiquez pour chacune l'observation qui permet de la reconnaître.
2. Refaire le calcul avec valeurs déjà converties.
3. Recevoir des données inutiles et choisir lesquelles utiliser — module 10 · Entraînement progressif.
4. Diagnostiquer un résultat volontairement faux.
5. Prendre une décision dans la scène mission en explicitant marge et limite — module 10 · Entraînement progressif.

Gate zéro prérequis

- Avant tout calcul de « Communications spatiales: du photon au réseau martien », vérifiez que vous pouvez nommer la grandeur recherchée, l'unité attendue et le phénomène qu'elle représente.
- Je sais lire la relation et les unités — « module 10 ».
- Je sais faire un ordre de grandeur.
- Je sais expliquer une erreur fréquente.
- Je peux refaire un exercice sans copier le résultat — « module 10 ».

1. Séparer signal, support physique et service

Une onde radio ou un faisceau laser transporte un signal. Le signal encode des symboles. Les protocoles transforment ces symboles en trames, paquets et services. Une panne peut se produire à chaque niveau: puissance insuffisante, pointage perdu, trame corrompue, route indisponible ou application mal synchronisée. Diagnostiquer exige de savoir à quel niveau on se trouve.

Une communication spatiale se décrit sur plusieurs couches. Le signal physique transporte des symboles; la liaison transforme ces symboles en trames avec modulation, codage et synchronisation; le service décide quelles données ont

priorité, quelle **latence** est acceptable et que faire quand aucun chemin n'existe. Mélanger ces couches conduit à de mauvaises conclusions: augmenter la puissance peut améliorer une liaison sans résoudre une file de données mal priorisée, tandis qu'un protocole parfait ne compense pas une antenne mal pointée. L'ingénieur doit donc pouvoir suivre une information depuis le capteur qui la produit jusqu'au destinataire qui en a besoin et identifier à quelle couche se trouve la marge ou la panne.

2. Comprendre la puissance en décibels

Les bilans de liaison utilisent souvent les décibels. Pour un rapport de puissances P_2/P_1 , le gain ou la perte vaut $G = 10 \log_{10}(P_2/P_1)$ en dB. Un facteur 10 correspond à +10 dB; un facteur 100 à +20 dB. Les dB permettent d'additionner gains et pertes au lieu de multiplier des rapports.

Exercice A — conversion simple

Une amplification multiplie la puissance par 100. Quel gain représente-t-elle en dB?

$$G = 10 \log_{10}(100) = 10 \times 2 = 20 \text{ dB.}$$

Données du cas

Le rapport de puissances vaut 100; gain demandé en décibels.

Relation

Pour un rapport de puissances, $G_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(P_2/P_1)$.

Raisonnement

Ici $P_2/P_1 = 100 = 10^2$. Donc $\log_{10}(100) = 2$ et $G_{\text{dB}} = 10 \times 2 = 20 \text{ dB}$.

Résultat

Multiplier une puissance par 100 correspond à un gain de 20 dB.

Contrôle

Chaque facteur 10 sur une puissance ajoute 10 dB; deux facteurs 10 successifs, soit $\times 100$, doivent donc ajouter 20 dB.

Interprétation

Le décibel transforme les rapports multiplicatifs en additions, ce qui simplifie les budgets de liaison où plusieurs gains et pertes s'enchaînent.

Le décibel, noté dB, transforme des rapports multiplicatifs en additions. Pour un rapport de puissance P_2/P_1 , la variation vaut $10 \log_{10}(P_2/P_1)$. Doubler la puissance donne environ +3 dB; multiplier par dix donne +10 dB. Une perte de -6 dB correspond à environ un quart de la puissance. Cette notation simplifie les budgets de liaison parce que gains et pertes s'additionnent, mais elle exige de déclarer la référence: dBW se rapporte à 1 watt, dBm à 1 milliwatt. Mélanger dB, dBW et dBm sans le dire peut créer des erreurs de plusieurs **ordres de grandeur** tout en donnant l'apparence d'un calcul propre.

3. La distance impose une perte géométrique

Dans un espace libre idéal, une onde sphérique répartit son énergie sur une surface qui croît comme le carré de la distance. La perte de trajet en espace libre s'écrit souvent $L = (4\pi d/\lambda)^2$ en rapport linéaire, où **d** est la distance et λ la longueur d'onde. En dB, on prend $10 \log_{10}(L)$. Doubler la distance ajoute environ 6 dB de perte.

La perte d'espace libre augmente avec la distance et la fréquence. Sous forme logarithmique, elle varie comme $20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$, avec une constante dépendant des unités. Doubler la distance ajoute environ 6 dB de perte, ce qui signifie qu'à antennes identiques le récepteur voit environ quatre fois moins de puissance. Une mission vers Mars subit donc une liaison très différente selon la géométrie Terre-Mars. Le budget ne peut pas être calculé une seule fois 'à la distance de Mars': il doit balayer les distances, les occultations, les angles solaires et les modes d'antenne pour identifier le vrai cas dimensionnant.

4. Le gain d'antenne concentre l'énergie

Une grande antenne directive ne crée pas de puissance; elle concentre l'énergie dans une direction et améliore aussi la sensibilité en réception. Le prix est le pointage. Plus le faisceau est étroit, plus l'erreur angulaire devient critique. Une liaison profonde est donc autant un problème de mécanique d'attitude et de connaissance de pointage qu'un problème radio.

Le gain d'antenne concentre l'énergie dans une direction. Pour une antenne parabolique, le gain augmente fortement avec le diamètre D rapporté à la longueur d'onde λ . Une grande antenne permet donc davantage de gain mais produit un faisceau plus étroit et exige un meilleur pointage. La précision **GNC** devient alors une composante du **budget de liaison**. Le compromis concerne aussi la mécanique: masse, déploiement, rigidité, thermique et zone d'exclusion. Une antenne plus petite peut être moins performante nominalement mais offrir un faisceau plus large utile en **mode dégradé**. C'est pourquoi les véhicules habités combinent souvent plusieurs antennes ou modes plutôt qu'un seul système optimisé pour le pic de débit.

5. Bande passante, débit et rapport signal/bruit

Augmenter le débit demande généralement davantage de bande, davantage de rapport signal/bruit, un codage plus efficace ou une combinaison de ces leviers. Le débit annoncé d'une technologie n'est pas automatiquement le débit utile de mission: protocoles, corrections d'erreurs, répétitions, fenêtres de contact et pertes réduisent la quantité réellement livrée.

Exercice B — volume de contact

Une liaison utile transmet 8 Mbit/s pendant 25 minutes. Quel volume maximal idéal est transféré?

25 min = 1 500 s. $V = R \times t = 8 \times 1\,500 = 12\,000$ Mbit. En divisant par 8, cela représente 1 500 MB, soit environ 1,5 GB avant les surcharges et interruptions.

Données du cas

Exercice B — volume de contact — Une liaison utile transmet 8 Mbit/s pendant 25 minutes. Quel volume maximal idéal est transféré?

Relation

25 min = 1 500 s.

Raisonnement

25 min = 1 500 s. $V = R \times t = 8 \times 1\,500 = 12\,000$ Mbit. En divisant par 8, cela représente 1 500 MB, soit environ 1,5 GB avant les surcharges et interruptions.

Résultat

25 min = 1 500 s.

Interprétation

En divisant par 8, cela représente 1 500 MB, soit environ 1,5 GB avant les surcharges et interruptions.

Le débit n'est pas indépendant de l'énergie disponible par bit. Lorsque le débit augmente à puissance reçue constante, chaque bit dispose de moins d'énergie et la marge de décodage diminue. Le rapport E_b/N_0 compare l'énergie par bit E_b à la **densité** spectrale de bruit N_0 . Le codage correcteur d'erreurs permet de fonctionner à des marges plus faibles au prix de **redondance** et de complexité. Une mission peut donc réduire son débit pour conserver la liaison lorsque la distance augmente ou que le pointage se dégrade. Le service doit savoir quelles données peuvent attendre et lesquelles justifient une modulation plus robuste ou une plus grande consommation d'énergie.

6. Radio et optique sont complémentaires

Les communications laser peuvent offrir de très grands débits avec des faisceaux étroits, tandis que la radio conserve des avantages d'acquisition, de **robustesse** et de maturité. Une architecture hybride peut utiliser plusieurs supports selon la phase, la géométrie, le pointage et la criticité. La diversité n'est réelle que si les deux voies ne dépendent pas des mêmes ressources communes.

Les liaisons radio et optiques ne sont pas des rivales absolues. L'optique peut offrir des débits élevés avec un faisceau très étroit, mais exige une précision de pointage élevée et des terminaux au **sol** sensibles aux nuages et à l'atmosphère. La radio possède une expérience opérationnelle très large, des faisceaux souvent plus tolérants et des réseaux terrestres établis, avec une bande passante limitée et des antennes potentiellement grandes. Une architecture résiliente peut utiliser l'optique pour les volumes massifs et conserver une radio robuste pour commande, sécurité ou météo défavorable au sol. La diversité n'est utile que si les deux chemins ne partagent pas toutes leurs causes communes.

7. La latence ne se compresse pas

Le temps de propagation minimal vaut $t = d/c$, avec d la distance et c la vitesse de la lumière. Aucun codec ne réduit ce temps physique. Un réseau martien doit donc être conçu pour des conversations asynchrones, des commandes datées et une autonomie locale.

La latence interplanétaire est imposée par la vitesse de la lumière. Terre et Mars peuvent être séparées d'environ quelques dizaines à plusieurs centaines de millions de kilomètres; le temps aller simple se compte alors en minutes, typiquement de l'ordre de 3 à plus de 20 minutes selon la géométrie. Aucun protocole ne peut transformer ce délai en conversation instantanée. Les opérations doivent donc décider ce qui reste sous autorité locale, quelles questions peuvent attendre et quelles informations doivent être envoyées avant même qu'elles soient demandées. La latence devient ainsi une contrainte d'organisation et d'autonomie autant qu'une propriété de la radio.

8. DTN: stocker et transmettre lorsque le chemin revient

Le [Delay/Disruption Tolerant Networking](#) accepte qu'aucun chemin de bout en bout n'existe au moment où la donnée est produite. Un nœud conserve le paquet, protège son intégrité et le transmet au prochain contact. Cette logique correspond naturellement aux relais orbitaux, occultations et interruptions interplanétaires.

Le Delay/Disruption Tolerant Networking, ou DTN, suppose que le chemin de bout en bout peut disparaître. Au lieu de jeter immédiatement les données, les nœuds stockent des 'bundles' et les transmettent lorsque le contact redevient disponible. Le dimensionnement doit alors inclure mémoire, durée d'interruption, priorité et politique d'expiration. Si une caméra produit 2 Mbit/s pendant six heures sans liaison, elle génère $2 \times 3\,600 \times 6 = 43\,200$ Mbit, soit environ 5,4 Go avant overhead. Ce calcul simple transforme une coupure de réseau en [exigence](#) de stockage. La reprise doit aussi éviter qu'un ancien backlog bloque les messages urgents apparus entre-temps.

9. Prioriser par conséquence et délai

Une [télémétrie](#) de sécurité de quelques kilooctets peut être plus importante qu'un téraoctet scientifique. Le réseau doit connaître classes de service, échéances, expiration, authenticité et confidentialité. Une commande périmée doit être rejetée même si elle est parfaitement signée.

Une file de données doit être priorisée par conséquence et échéance, pas seulement par taille. Une commande de sécurité de quelques centaines d'octets peut être plus importante qu'un gigaoctet scientifique. Les catégories peuvent distinguer commande critique, télémétrie de santé, [navigation](#), opérations équipage, données scientifiques et transferts différables. La politique indique aussi ce qui peut être compressé, réémis ou abandonné. Une priorité sans délai peut être trompeuse: un bulletin météo pour une EVA prévue dans deux jours n'a pas la même urgence qu'une alarme de pression, mais il devient inutile s'il arrive après la sortie. Le réseau doit donc transporter l'intention opérationnelle avec les données.

10. Scénario de panne: perte du relais principal

Le réseau local de surface continue, les données non urgentes sont mises en file, un second relais accepte le trafic prioritaire et la Terre reçoit un résumé dès la prochaine fenêtre. Le plan doit préciser combien de stockage est disponible, quel trafic expire et ce qui se passe si le second relais disparaît aussi.

La perte d'un relais principal doit être analysée comme un changement de topologie. Le véhicule peut basculer vers une liaison directe plus lente, attendre le passage d'un autre relais, modifier son attitude ou réduire le volume transmis. Chaque option consomme autre chose: énergie, temps, précision GNC ou capacité de stockage. L'équipage doit connaître la durée pendant laquelle la mémoire peut absorber les données avant saturation. La [récupération](#) inclut la vérification du nouveau chemin, la replanification des contacts et la purge ordonnée du backlog. Une architecture réseau résiliente ne promet pas que toutes les liaisons restent disponibles; elle garantit que la perte d'un chemin ne détruit pas le service vital.

Étude guidée — six heures de coupure derrière Mars

Supposons un véhicule produisant en moyenne 600 kbit/s de télémétrie et de données utiles pendant une occultation de six heures. Le volume brut vaut $600\,000 \times 21\,600 \approx 12,96 \times 10^9$ bits, soit environ 1,62 Go avant codage, métadonnées et redondance. Si seulement 1 Go de stockage est disponible pour cette file, tout ne peut pas être conservé. L'équipe doit

définir à l'avance quelles données sont résumées, quelles données tournantes peuvent être écrasées et quelles données critiques sont protégées contre toute suppression.

Au retour du contact, vider 1,62 Go à 2 Mbit/s prendrait environ 6 480 s, soit 1,8 h si aucun nouveau trafic n'était produit. En réalité, la mission continue à générer des données. Le débit de reprise doit donc dépasser le débit de production moyen ou le backlog ne disparaîtra jamais. Cette différence entre débit instantané et bilan de file est une notion de réseau fondamentale.

Le cas se termine par une panne du relais suivant. Le service reste sûr si les commandes critiques possèdent un autre chemin ou si l'[autonomie locale](#) peut attendre. La conception du réseau est jugée sur la continuité de la fonction, pas sur la [disponibilité](#) permanente de chaque liaison.

11. Mini-projet: fermer un service de communication

1. Choisissez un **flux**: voix EVA, télémétrie habitat ou imagerie scientifique.
2. Fixez débit et délai acceptable.
3. Choisissez radio, optique ou hybride.
4. Énumérez gains et pertes d'un bilan de liaison.
5. Ajoutez une coupure de 45 minutes.
6. Définissez stockage, priorité et comportement après rétablissement.

Le résultat doit décrire un service utilisable, pas seulement une fréquence et une antenne.

12. Atelier mission — fermer un bilan de liaison simplifié

Considérons une chaîne pédagogique en décibels: puissance émise **+40 dBm**, gain d'antenne émission **+30 dB**, perte de trajet **-210 dB**, gain d'antenne réception **+65 dB** et pertes diverses **-5 dB**. La puissance reçue estimée vaut **40 + 30 - 210 + 65 - 5 = -80 dBm**. Le dBm exprime une puissance relative à 1 milliwatt; le dB exprime un rapport. Le résultat ne suffit pas: il faut le comparer à la sensibilité nécessaire pour le débit et le codage choisis.

Si la sensibilité requise est -85 dBm, la marge brute de l'exemple vaut 5 dB. Cette marge doit ensuite absorber pointage, météo de station sol pour l'optique, erreur de polarisation, vieillissement et autres incertitudes pertinentes. Un bilan sérieux écrit chaque terme avec son origine afin qu'un changement d'antenne ou de fréquence puisse être propagé sans deviner.

Le même service doit ensuite être testé dans le temps. Une liaison excellente pendant huit minutes mais absente les cinquante-deux minutes suivantes peut convenir à un transfert de fichier et être inacceptable pour certaines opérations. Le calendrier de contacts fait donc partie du bilan de capacité.

13. De la liaison au réseau: panne, stockage et reprise

Imaginez un relais orbital indisponible pendant 90 min. Un habitat produit 2 Mbit/s de données non critiques pendant toute la coupure. Le volume à stocker est $V = R \times t = 2 \times 5\,400 = 10\,800$ Mbit, soit environ **1,35 GB**. Le chiffre montre que la tolérance aux coupures possède un coût de stockage local. Il faut encore ajouter redondance, métadonnées et marge.

Au rétablissement, le réseau ne doit pas forcément vider la file dans l'ordre d'arrivée. Une alerte médicale récente peut passer avant une archive scientifique plus ancienne. Les règles doivent aussi empêcher qu'une commande devenue obsolète soit exécutée après la coupure. La reprise est ainsi un problème de priorité, de temps et d'autorité, pas seulement de bande passante.

Sources et références

- NASA SCan — Communicating with Missions
- NASA — Laser Communications Relay Demonstration
- NASA SCan — Delay/Disruption Tolerant Networking

Studio d'ingénierie — gérer une dette de données

Une mission produit 120 Go de données par jour. Deux fenêtres de communication de 25 min chacune à 40 Mbit/s transportent idéalement $40 \times 10^6 \times (2 \times 1\,500) = 1,2 \times 10^{11}$ bits, soit environ 15 Go avant protocoles et pertes. Le système crée donc théoriquement environ 105 Go de dette de données par jour. Les unités doivent rester cohérentes: 1 octet = 8 bits et le débit en bit/s doit être multiplié par une durée en secondes.

L'atelier demande de concevoir une politique de file d'attente: télémétrie de sécurité, données scientifiques irremplaçables, produits compressibles et données régénérables n'ont pas la même priorité. Une fenêtre entière est ensuite supprimée. L'élève doit calculer la croissance du backlog, définir le seuil qui déclenche une compression plus agressive ou l'abandon d'un produit, et expliquer pourquoi l'autonomie de bord est indispensable quand la latence empêche la Terre de gérer chaque paquet en temps réel.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Rapport signal/bruit en décibels	Signal-to-noise ratio in decibels	PASS
02	Gain ou perte d'un rapport de puissances	Gain or loss from a power ratio	PASS
03	Perte de trajet en espace libre	Free-space path loss	PASS
04	Temps de propagation radio	Radio propagation time	PASS
05	Volume de données produit ou transmis	Data volume generated or transmitted	PASS
06	Budget de puissance reçu	Received-power link budget	PASS
07	Énergie d'un photon radio	Radio-photon energy	PASS