

Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations

Comprendre comment on passe d'une liaison radio à un réseau interplanétaire capable de stocker, prioriser et acheminer des données malgré les délais, les occultations et les interruptions.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « latence », et quel repère issu de « bande passante » permet de vérifier la décision?

Intuition. Un équipage martien envoie un fichier scientifique alors qu'une occultation et un délai Terre-Mars rendent impossible l'hypothèse d'un réseau continu de type Internet terrestre.

1

Comprendre avant de calculer

Un équipage martien envoie un fichier scientifique alors qu'une occultation et un délai Terre-Mars rendent impossible l'hypothèse d'un réseau continu de type Internet terrestre.

2

latence

Définition sans prérequis.

3

bande passante

Définition sans prérequis.

Repère concret. Validation 30 — latence, bande passante, DTN, budget de liaison.

- Comprendre avant de calculer — Un équipage martien envoie un fichier scientifique alors qu'une occultation et un délai Terre-Mars rendent impossible l'hypothèse d'un réseau continu de type Internet terrestre.
- latence — Définition sans prérequis.
- bande passante — Définition sans prérequis.

Avant « Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations », utilisez modules 00 à 28 recommandés selon le sujet. Dans « Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations », une notation indispensable est redéfinie au moment où elle devient utile au raisonnement.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 30

Comprendre avant de calculer

Un équipage martien envoie un fichier scientifique alors qu'une occultation et un délai Terre-Mars rendent impossible l'hypothèse d'un réseau continu de type Internet terrestre.

Progression du module — latence; bande passante; DTN; budget de liaison.

latence

Définition sans prérequis. La [latence](#) est le temps nécessaire pour qu'une information atteigne sa destination. Entre Terre et Mars elle est dominée par le temps de propagation de la lumière et varie fortement avec la géométrie planétaire.

Scène concrète. Une commande ne peut pas être envoyée et corrigée instantanément; les opérations doivent tolérer plusieurs minutes dans chaque sens.

Contrôle mental. Une [latence](#) plus grande retarde la boucle de décision mais ne réduit pas automatiquement le volume de données transmissible; ne confondez pas délai et débit.

Piège à éviter. Une grande bande passante ne supprime pas la latence: débit et temps de propagation décrivent deux limites différentes.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [latence](#) » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Exercice guidé — latence

Situation à reconnaître. Une commande ne peut pas être envoyée et corrigée instantanément; les opérations doivent tolérer plusieurs minutes dans chaque sens.

Vérification demandée. Une latence plus grande retarde la boucle de décision mais ne réduit pas automatiquement le volume de données transmissible; ne confondez pas délai et débit.

Erreur à écarter. Une grande bande passante ne supprime pas la latence: débit et temps de propagation décrivent deux limites différentes.

Corrigé raisonné

Sens précis

La latence est le temps nécessaire pour qu'une information atteigne sa destination. Entre Terre et Mars elle est dominée par le temps de propagation de la lumière et varie fortement avec la géométrie planétaire.

Test du cas

Une latence plus grande retarde la boucle de décision mais ne réduit pas automatiquement le volume de données transmissible; ne confondez pas délai et débit.

Piège exclu

Une grande bande passante ne supprime pas la latence: débit et temps de propagation décrivent deux limites différentes.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « latence » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Termes du corrigé. [vérification](#) · [observation](#)

Quantification

latence: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

bande passante

Définition sans prérequis. La [bande passante](#) désigne ici la capacité d'un lien à transporter un débit d'information dans des conditions données.

Scène concrète. Une caméra peut produire plus de données que le lien Terre-Mars ne peut en transmettre immédiatement, imposant compression, stockage et priorités.

Contrôle mental. À efficacité et qualité de lien comparables, davantage de [bande passante](#) permet davantage de débit, mais peut aussi intégrer plus de bruit; vérifiez quel sens du terme est utilisé.

Piège à éviter. La valeur théorique d'un modem n'est pas le débit de bout en bout si [disponibilité](#), protocole, géométrie et erreurs réduisent l'utilisation réelle.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [bande passante](#) » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Exercice guidé — bande passante

Situation à reconnaître. Une caméra peut produire plus de données que le lien Terre-Mars ne peut en transmettre immédiatement, imposant compression, stockage et priorités.

Vérification demandée. À efficacité et qualité de lien comparables, davantage de bande passante permet davantage de débit, mais peut aussi intégrer plus de bruit; vérifiez quel sens du terme est utilisé.

Erreur à écarter. La valeur théorique d'un modem n'est pas le débit de bout en bout si disponibilité, protocole, géométrie et erreurs réduisent l'utilisation réelle.

Corrigé raisonné

Sens précis

La bande passante désigne ici la capacité d'un lien à transporter un débit d'information dans des conditions données.

Test du cas

À efficacité et qualité de lien comparables, davantage de bande passante permet davantage de débit, mais peut aussi intégrer plus de bruit; vérifiez quel sens du terme est utilisé.

Piège exclu

La valeur théorique d'un modem n'est pas le débit de bout en bout si disponibilité, protocole, géométrie et erreurs réduisent l'utilisation réelle.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « bande passante » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Quantification

bande passante: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

bande passante: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

DTN

Définition sans prérequis. Le Delay/Disruption Tolerant Networking est une architecture conçue pour fonctionner malgré de longs délais et des interruptions, en stockant puis relayant des paquets ou bundles lorsque le prochain lien devient disponible.

Scène concrète. Un orbiteur peut recevoir des données d'un rover, les conserver pendant une occultation puis les transmettre à la Terre plus tard.

Contrôle mental. Coupez volontairement le lien: un réseau DTN correctement conçu doit conserver les données et les retransmettre lorsque le prochain contact devient disponible.

Piège à éviter. DTN ne rend pas le lien permanent: il organise précisément le fonctionnement lorsque la connectivité n'est pas permanente.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « dtn » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Exercice guidé — DTN

Situation à reconnaître. Un orbiteur peut recevoir des données d'un rover, les conserver pendant une occultation puis les transmettre à la Terre plus tard.

Vérification demandée. Coupez volontairement le lien: un réseau DTN correctement conçu doit conserver les données et les retransmettre lorsque le prochain contact devient disponible.

Erreur à écarter. DTN ne rend pas le lien permanent: il organise précisément le fonctionnement lorsque la connectivité n'est pas permanente.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le Delay/Disruption Tolerant Networking est une architecture conçue pour fonctionner malgré de longs délais et des interruptions, en stockant puis relayant des paquets ou bundles lorsque le prochain lien devient disponible.

Test du cas

Coupez volontairement le lien: un réseau DTN correctement conçu doit conserver les données et les retransmettre lorsque le prochain contact devient disponible.

Piège exclu

DTN ne rend pas le lien permanent: il organise précisément le fonctionnement lorsque la connectivité n'est pas permanente.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « dtn » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Quantification

DTN: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

budget de liaison

Définition sans prérequis. Un **budget de liaison** additionne gains et pertes depuis l'émetteur jusqu'au récepteur afin d'estimer la puissance reçue et la **marge** de communication.

Scène concrète. Puissance d'émission, gain d'antenne, distance, pertes de trajet, pointage et performance du récepteur participent à la décision.

Contrôle mental. Additionnez gains et pertes dans la même convention logarithmique: la marge finale doit diminuer si une perte augmente ou si la puissance émise baisse.

Piège à éviter. Un résultat positif en conditions moyennes peut être insuffisant si les pires géométries ou erreurs de pointage ne sont pas incluses.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **budget de liaison** » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Exercice guidé — budget de liaison

Situation à reconnaître. Puissance d'émission, gain d'antenne, distance, pertes de trajet, pointage et performance du récepteur participent à la décision.

Vérification demandée. Additionnez gains et pertes dans la même convention logarithmique: la marge finale doit diminuer si une perte augmente ou si la puissance émise baisse.

Erreur à écarter. Un résultat positif en conditions moyennes peut être insuffisant si les pires géométries ou erreurs de pointage ne sont pas incluses.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un budget de liaison additionne gains et pertes depuis l'émetteur jusqu'au récepteur afin d'estimer la puissance reçue et la marge de communication.

Test du cas

Additionnez gains et pertes dans la même convention logarithmique: la marge finale doit diminuer si une perte augmente ou si la puissance émise baisse.

Piège exclu

Un résultat positif en conditions moyennes peut être insuffisant si les pires géométries ou erreurs de pointage ne sont pas incluses.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « budget de liaison » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Quantification

budget de liaison: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

budget de liaison: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Étude intégrée — Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations

Situation à analyser. Un équipage martien envoie un fichier scientifique alors qu'une occultation et un délai Terre-Mars rendent impossible l'hypothèse d'un réseau continu de type Internet terrestre.

- **latence:** Une commande ne peut pas être envoyée et corrigée instantanément; les opérations doivent tolérer plusieurs minutes dans chaque sens. Contrôle attendu: Une latence plus grande retarde la boucle de décision mais ne réduit pas automatiquement le volume de données transmissible; ne confondez pas délai et débit.
- **bande passante:** Une caméra peut produire plus de données que le lien Terre-Mars ne peut en transmettre immédiatement, imposant compression, stockage et priorités. Contrôle attendu: À efficacité et qualité de lien comparables, davantage de bande passante permet davantage de débit, mais peut aussi intégrer plus de bruit; vérifiez quel sens du terme est utilisé.
- **DTN:** Un orbiteur peut recevoir des données d'un rover, les conserver pendant une occultation puis les transmettre à la Terre plus tard. Contrôle attendu: Coupez volontairement le lien: un réseau DTN correctement conçu doit conserver les données et les retransmettre lorsque le prochain contact devient disponible.
- **budget de liaison:** Puissance d'émission, gain d'antenne, distance, pertes de trajet, pointage et performance du récepteur participent à la décision. Contrôle attendu: Additionnez gains et pertes dans la même convention logarithmique: la marge finale doit diminuer si une perte augmente ou si la puissance émise baisse.

Le diagnostic ne doit pas confondre « latence » et « bande passante ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Une commande ne peut pas être envoyée et corrigée instantanément; les opérations doivent tolérer plusieurs minutes dans chaque sens. Le second doit être contrôlé autrement: À efficacité et qualité de lien comparables, davantage de bande passante permet davantage de débit, mais peut aussi intégrer plus de bruit; vérifiez quel sens du terme est utilisé.

Une seconde vérification croise « DTN » et « budget de liaison ». Gardez comme alerte « DTN ne rend pas le lien permanent: il organise précisément le fonctionnement lorsque la connectivité n'est pas permanente. »; pour « budget de liaison », utilisez plutôt ce test: Additionnez gains et pertes dans la même convention logarithmique: la marge finale doit diminuer si une perte augmente ou si la puissance émise baisse.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations », classez les indices selon « latence » (Une latence plus grande retarde la boucle de décision mais ne réduit pas automatiquement le volume de données transmissible; ne confondez pas délai et débit.), « bande passante » (À efficacité et qualité de lien comparables, davantage de bande passante permet davantage de débit, mais peut aussi intégrer plus de bruit; vérifiez quel sens du terme est utilisé.), « DTN » (Coupez volontairement le lien: un réseau DTN correctement conçu doit conserver les données et les retransmettre lorsque le prochain contact devient disponible.), « budget de liaison » (Additionnez gains et pertes dans la même convention logarithmique: la marge finale doit diminuer si une perte augmente ou si la puissance émise baisse.)
Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour latence, Dans ce module, une erreur sur « latence » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars. Le garde-fou principal est: Une grande bande passante ne supprime pas la latence: débit et temps de propagation décrivent deux limites différentes. Pour bande passante, Dans ce module, une erreur sur « bande passante » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars. Le garde-fou principal est: La valeur théorique d'un modem n'est pas le débit de bout en bout si disponibilité, protocole, géométrie et erreurs réduisent l'utilisation réelle. Pour DTN, Dans ce module, une erreur sur « dtn » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars. Le garde-fou principal est: DTN ne rend pas le lien permanent: il organise précisément le fonctionnement lorsque la connectivité n'est pas permanente. Pour budget de liaison, Dans ce module, une erreur sur « budget de liaison » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars. Le garde-fou principal est: Un résultat positif en conditions moyennes peut être insuffisant si les pires géométries ou erreurs de pointage ne sont pas incluses.

Exercice de synthèse — Dans la situation de « Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations », classez les indices selon « latence » (Une latence plus grande retarde la boucle de décision mais ne réduit pas automatiquement le volume de données transmissible; ne confondez pas délai et débit.), « bande passante » (À efficacité et qualité de lien comparables, davantage de bande passante permet davantage de débit, mais peut aussi intégrer plus de bruit; vérifiez quel sens du terme est utilisé.), « DTN » (Coupez volontairemen

Raisonnement

Corrigé de synthèse Pour latence, Dans ce module, une erreur sur « latence » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars. Le garde-fou principal est: Une grande bande passante ne supprime pas la latence: débit et temps de propagation décrivent deux limites différentes. Pour bande passante, Dans ce module, une erreur sur « bande passante » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars. Le garde-fou principal est: La valeur théorique d'un modem n'est pas le débit de bout en bout si disponibilité, protocole, géométrie et erreurs réduisent l'utilisation réelle. Pour DTN, Dans ce module, une erreur sur « dtn » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars. Le garde-fou princi

Résultat

Corrigé de synthèse Pour latence, Dans ce module, une erreur sur « latence » peut faire perdre un paquet critique, saturer un lien ou planifier une interaction impossible avec le délai Terre-Mars.

Contrôle

Le garde-fou principal est: Une grande bande passante ne supprime pas la latence: débit et temps de propagation décrivent deux limites différentes.

Interprétation

Le garde-fou principal est: Un résultat positif en conditions moyennes peut être insuffisant si les pires géométries ou erreurs de pointage ne sont pas incluses.

Mini-leçons quantitatives canoniques

Ce bloc constitue la référence quantitative du module; les valeurs d'exercice sont pédagogiques et doivent être remplacées par les données de mission avant toute décision réelle.

Temps de transmission

$$t_{tx} = D / R_{\text{useful}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{tx} = D / R_{\text{useful}}$ » dans « Temps de transmission » ?

2 — Intuition sans symboles

Le temps nécessaire dépend de la quantité à envoyer et du débit réellement disponible pour les données utiles.

3 — Grandeurs

t_{tx} : temps de transmission [s]; D: quantité de données [Mb]; R_{useful} : débit utile [Mb/s]

4 — Formule

$$t_{tx} = D / R_{\text{useful}}$$

5 — Lecture

Lire « $t_{tx} = D / R_{\text{useful}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

t_{tx} : temps de transmission [s]; D: quantité de données [Mb]; R_{useful} : débit utile [Mb/s]

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses et lettres grecques afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

t_{tx} [s]; D [Mb]; R_{useful} [Mb/s]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

11 — Hypothèses

Numérateur et dénominateur doivent décrire le même scénario et le dénominateur doit rester positif.

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $D = 1200 \text{ Mb}$, $R_{\text{useful}} = 20 \text{ Mb/s}$: $t_{\text{tx}} = 1200 / 20 = 60 \text{ s}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

Comparer les ordres de grandeur du numérateur et du dénominateur permet d'anticiper le résultat.

17 — Interprétation

Ne pas engager un transfert si son temps excède la fenêtre de contact disponible.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente avec le numérateur et diminue quand le dénominateur augmente.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $D = 800 \text{ Mb}$, $R_{\text{useful}} = 10 \text{ Mb/s}$: $t_{\text{tx}} = 800 / 10$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $D = 800 \text{ Mb}$, $R_{\text{useful}} = 10 \text{ Mb/s}$: $t_{\text{tx}} = 800 / 10 = 80 \text{ s}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $D = 450 \text{ Mb}$, $R_{\text{useful}} = 15 \text{ Mb/s}$: $t_{\text{tx}} = 450 / 15$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $D = 450 \text{ Mb}$, $R_{\text{useful}} = 15 \text{ Mb/s}$: $t_{\text{tx}} = 450 / 15 = 30 \text{ s}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Ne pas engager un transfert si son temps excède la fenêtre de contact disponible.

Vidage net d'une file

$$t_{\text{drain}} = Q / (R_{\text{out}} - R_{\text{in}})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{\text{drain}} = Q / (R_{\text{out}} - R_{\text{in}})$ » dans « Vidage net d'une file » ?

2 — Intuition sans symboles

Une file ne diminue que si le débit de sortie dépasse le débit qui continue à l'alimenter.

3 — Grandeurs

t_{drain} : temps de vidage [s]; Q : file initiale [Mb]; R_{out} : débit de service [Mb/s]; R_{in} : débit entrant [Mb/s]

4 — Formule

$$t_{\text{drain}} = Q / (R_{\text{out}} - R_{\text{in}})$$

5 — Lecture

Lire « $t_{\text{drain}} = Q / (R_{\text{out}} - R_{\text{in}})$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

t_{drain} : temps de vidage [s]; Q : file initiale [Mb]; R_{out} : débit de service [Mb/s]; R_{in} : débit entrant [Mb/s]

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses et lettres grecques afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

t_{drain} [s]; Q [Mb]; R_{out} [Mb/s]; R_{in} [Mb/s]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

11 — Hypothèses

Numérateur et dénominateur doivent décrire le même scénario et le dénominateur doit rester positif.

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $Q = 600$ Mb, $R_{\text{out}} = 20$ Mb/s, $R_{\text{in}} = 5$ Mb/s: $t_{\text{drain}} = 600 / (20 - 5) = 40$ s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

Comparer les ordres de grandeur du numérateur et du dénominateur permet d'anticiper le résultat.

17 — Interprétation

Si le débit net devient nul ou négatif, il faut réduire la production ou augmenter la capacité avant le prochain contact.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente avec le numérateur et diminue quand le dénominateur augmente.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $Q = 900$ Mb, $R_{\text{out}} = 30$ Mb/s, $R_{\text{in}} = 10$ Mb/s: $t_{\text{drain}} = 900 / (30 - 10)$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $Q = 900$ Mb, $R_{\text{out}} = 30$ Mb/s, $R_{\text{in}} = 10$ Mb/s: $t_{\text{drain}} = 900 / (30 - 10) = 45$ s. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $Q = 240$ Mb, $R_{\text{out}} = 12$ Mb/s, $R_{\text{in}} = 4$ Mb/s: $t_{\text{drain}} = 240 / (12 - 4)$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $Q = 240$ Mb, $R_{\text{out}} = 12$ Mb/s, $R_{\text{in}} = 4$ Mb/s: $t_{\text{drain}} = 240 / (12 - 4) = 30$ s. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Si le débit net devient nul ou négatif, il faut réduire la production ou augmenter la capacité avant le prochain contact.

Capacité d'un contact

$C_{\text{contact}} = R_{\text{useful}} \times t_{\text{contact}}$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $C_{\text{contact}} = R_{\text{useful}} \times t_{\text{contact}}$ » dans « Capacité d'un contact » ?

2 — Intuition sans symboles

La capacité totale d'une fenêtre est le débit utile maintenu pendant sa durée exploitable.

3 — Grandeurs

C_{contact} : données transférables [Mb]; R_{useful} : débit utile [Mb/s]; t_{contact} : durée de contact [s]

4 — Formule

$$C_{\text{contact}} = R_{\text{useful}} \times t_{\text{contact}}$$

5 — Lecture

Lire « $C_{\text{contact}} = R_{\text{useful}} \times t_{\text{contact}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

C_{contact} : données transférables [Mb]; R_{useful} : débit utile [Mb/s]; t_{contact} : durée de contact [s]

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses et lettres grecques afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

C_{contact} [Mb]; R_{useful} [Mb/s]; t_{contact} [s]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent appartenir au même scénario et leurs unités doivent se combiner correctement.

12 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

13 — Cas numérique

Avec $R_{\text{useful}} = 15 \text{ Mb/s}$, $t_{\text{contact}} = 300 \text{ s}$: $C_{\text{contact}} = 15 \times 300 = 4500 \text{ Mb}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

15 — Vérification

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément chaque facteur donne rapidement l'ordre de grandeur du produit.

17 — Interprétation

Réserver une marge pour les reprises et les priorités au lieu de remplir une fenêtre à sa capacité théorique.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit si les autres restent constants.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $R_{\text{useful}} = 8 \text{ Mb/s}$, $t_{\text{contact}} = 600 \text{ s}$: $C_{\text{contact}} = 8 \times 600$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $R_{\text{useful}} = 8 \text{ Mb/s}$, $t_{\text{contact}} = 600 \text{ s}$: $C_{\text{contact}} = 8 \times 600 = 4800 \text{ Mb}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $R_{\text{useful}} = 25 \text{ Mb/s}$, $t_{\text{contact}} = 120 \text{ s}$: $C_{\text{contact}} = 25 \times 120$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $R_{\text{useful}} = 25 \text{ Mb/s}$, $t_{\text{contact}} = 120 \text{ s}$: $C_{\text{contact}} = 25 \times 120 = 3000 \text{ Mb}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Réserver une marge pour les reprises et les priorités au lieu de remplir une fenêtre à sa capacité théorique.

Temps lumière aller simple

$$t_{ow} = d / c$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{ow} = d / c$ » dans « Temps lumière aller simple » ?

2 — Intuition sans symboles

Même un signal parfait reste limité par le temps de propagation de la lumière.

3 — Grandeurs

t_{ow} : délai aller simple [s]; d: distance de propagation [km]; c: vitesse de la lumière [km/s]

4 — Formule

$$t_{ow} = d / c$$

5 — Lecture

Lire « $t_{ow} = d / c$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

t_{ow} : délai aller simple [s]; d: distance de propagation [km]; c: vitesse de la lumière [km/s]

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses et lettres grecques afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

t_{ow} [s]; d [km]; c [km/s]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

11 — Hypothèses

Numérateur et dénominateur doivent décrire le même scénario et le dénominateur doit rester positif.

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $d = 225000000$ km, $c = 299792$ km/s: $t_{ow} = 225000000 / 299792 = 750.52$ s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

Comparer les ordres de grandeur du numérateur et du dénominateur permet d'anticiper le résultat.

17 — Interprétation

Les décisions urgentes doivent être déléguables localement lorsque le délai aller simple dépasse la dynamique du problème.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente avec le numérateur et diminue quand le dénominateur augmente.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $d = 56000000$ km, $c = 299792$ km/s: $t_{ow} = 56000000 / 299792$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $d = 56000000$ km, $c = 299792$ km/s: $t_{ow} = 56000000 / 299792 = 186.8$ s. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $d = 400000000$ km, $c = 299792$ km/s: $t_{ow} = 400000000 / 299792$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $d = 400000000$ km, $c = 299792$ km/s: $t_{ow} = 400000000 / 299792 = 1334.26$ s. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Les décisions urgentes doivent être déléguables localement lorsque le délai aller simple dépasse la dynamique du problème.

Latence opérationnelle totale

$$t_{total} = t_{ow} + t_{queue} + t_{tx}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{total} = t_{ow} + t_{queue} + t_{tx}$ » dans « Latence opérationnelle totale » ?

2 — Intuition sans symboles

La réponse opérationnelle additionne propagation, attente et émission; réduire un seul terme ne supprime pas les autres.

3 — Grandeurs

t_{total} : latence totale [s]; t_{ow} : propagation [s]; t_{queue} : attente en file [s]; t_{tx} : transmission [s]

4 — Formule

$$t_{total} = t_{ow} + t_{queue} + t_{tx}$$

5 — Lecture

Lire « $t_{total} = t_{ow} + t_{queue} + t_{tx}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

t_{total} : latence totale [s]; t_{ow} : propagation [s]; t_{queue} : attente en file [s]; t_{tx} : transmission [s]

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses et lettres grecques afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

t_{total} [s]; t_{ow} [s]; t_{queue} [s]; t_{tx} [s]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

L'addition rassemble des délais ou contributions qui s'accumulent dans la même chaîne opérationnelle.

11 — Hypothèses

Les contributions doivent être exprimées dans une unité commune et sur la même frontière de système.

12 — Contrôle indépendant

Retirer un terme du total doit restituer la somme des autres.

13 — Cas numérique

Avec $t_{ow} = 750$ s, $t_{queue} = 40$ s, $t_{tx} = 60$ s: $t_{total} = 750 + 40 + 60 = 850$ s.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

L'addition rassemble des délais ou contributions qui s'accumulent dans la même chaîne opérationnelle.

15 — Vérification

Retirer un terme du total doit restituer la somme des autres.

16 — Estimation mentale

Additionner d'abord les termes dominants donne un ordre de grandeur robuste.

17 — Interprétation

Comparer la latence totale au délai acceptable par la fonction avant de choisir l'architecture réseau.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le total varie linéairement avec chaque terme si les autres restent constants.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $t_{ow} = 187$ s, $t_{queue} = 20$ s, $t_{tx} = 80$ s: $t_{total} = 187 + 20 + 80$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $t_{ow} = 187$ s, $t_{queue} = 20$ s, $t_{tx} = 80$ s: $t_{total} = 187 + 20 + 80 = 287$ s. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $t_{ow} = 1334$ s, $t_{queue} = 15$ s, $t_{tx} = 30$ s: $t_{total} = 1334 + 15 + 30$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $t_{ow} = 1334$ s, $t_{queue} = 15$ s, $t_{tx} = 30$ s: $t_{total} = 1334 + 15 + 30 = 1379$ s. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Comparer la latence totale au délai acceptable par la fonction avant de choisir l'architecture réseau.

Succès d'un chemin à deux liaisons

$$P_{path} = P_{link1} \times P_{link2}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $P_{path} = P_{link1} \times P_{link2}$ » dans « Succès d'un chemin à deux liaisons » ?

2 — Intuition sans symboles

Deux liaisons en série doivent toutes deux réussir pour que le chemin complet réussisse.

3 — Grandeurs

P_{path} : probabilité de succès du chemin [sans dimension]; P_{link1} : succès liaison un [sans dimension];

P_{link2} : succès liaison deux [sans dimension]

4 — Formule

$$P_{path} = P_{link1} \times P_{link2}$$

5 — Lecture

Lire « $P_{path} = P_{link1} \times P_{link2}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

P_{path} : probabilité de succès du chemin [sans dimension]; P_{link1} : succès liaison un [sans dimension];

P_{link2} : succès liaison deux [sans dimension]

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses et lettres grecques afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

P_{path} [sans dimension]; P_{link1} [sans dimension]; P_{link2} [sans dimension]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent appartenir au même scénario et leurs unités doivent se combiner correctement.

12 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

13 — Cas numérique

Avec $P_{\text{link1}} = 0.98$ sans dimension, $P_{\text{link2}} = 0.97$ sans dimension: $P_{\text{path}} = 0.98 \times 0.97 = 0.9506$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

15 — Vérification

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément chaque facteur donne rapidement l'ordre de grandeur du produit.

17 — Interprétation

Ajouter un chemin réellement indépendant si la probabilité obtenue ne satisfait pas le besoin de la classe de trafic.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit si les autres restent constants.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $P_{\text{link1}} = 0.95$ sans dimension, $P_{\text{link2}} = 0.9$ sans dimension: $P_{\text{path}} = 0.95 \times 0.9$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $P_{\text{link1}} = 0.95$ sans dimension, $P_{\text{link2}} = 0.9$ sans dimension: $P_{\text{path}} = 0.95 \times 0.9 = 0.855$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $P_{\text{link1}} = 0.999$ sans dimension, $P_{\text{link2}} = 0.99$ sans dimension: $P_{\text{path}} = 0.999 \times 0.99$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $P_{\text{link1}} = 0.999$ sans dimension, $P_{\text{link2}} = 0.99$ sans dimension: $P_{\text{path}} = 0.999 \times 0.99 = 0.989$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Ajouter un chemin réellement indépendant si la probabilité obtenue ne satisfait pas le besoin de la classe de trafic.

Progression de maîtrise

1. latence: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. bande passante: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. DTN: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. budget de liaison: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Communications martiennes avancées: réseaux, DTN et opérations »: confrontez « latence » à « bande passante »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 30 — latence, bande passante, DTN, budget de liaison. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Expliquer comment « Comprendre avant de calculer » se manifeste dans communications martiennes avancées: réseaux, dtn et opérations.

- Refaire un calcul ou une estimation utile pour « latence » et contrôler ses unités.
- Identifier une hypothèse fragile ou un mode dégradé associé à « bande passante ».
- Transformer le résultat en décision vérifiable pour « DTN ».

1. Une liaison n'est pas encore un réseau

Un bilan de liaison répond à une question physique: le signal reçu permet-il de transmettre des bits avec une marge suffisante? Un réseau doit résoudre un problème plus large: quels **flux** passent, par quels relais, à quel moment, avec quelle priorité et que devient l'information lorsque le chemin complet n'existe pas.

Sur Mars, habitat, rover, combinaison **EVA**, orbiteur relais, antenne de surface et Terre forment plusieurs segments. Une architecture robuste doit pouvoir continuer localement lorsque la liaison Terre est indisponible.

2. Le délai impose une autre discipline opérationnelle

La propagation radio est limitée par la **vitesse** de la lumière. Le délai Terre–Mars varie donc fortement avec la géométrie. Même lorsqu'un lien est excellent, la conversation temps réel n'existe pas. Le **système** doit séparer les décisions qui peuvent attendre du **sol** de celles qui doivent être prises localement.

Cette contrainte change la conception des procédures. Un message d'urgence doit être compréhensible sans échange de dix questions-réponses. Les équipes doivent transmettre contexte, **état**, actions déjà réalisées et prochaine décision prévue.

3. DTN: stocker puis transférer lorsque le prochain lien existe

DTN signifie Delay/Disruption Tolerant Networking. L'idée clé est le **store-and-forward**: un nœud conserve un paquet de données tant que l'étape suivante n'est pas disponible, puis le transfère lorsque le contact devient possible. Le réseau ne suppose donc pas une connexion de bout en bout permanente.

Cette logique convient à des orbiteurs qui passent périodiquement au-dessus d'une base, à une antenne terrestre indisponible pendant quelques heures ou à un relais temporairement masqué. La donnée possède aussi une durée de vie: une télémessure scientifique peut attendre, une alarme critique doit être priorisée.

4. Plan de contacts, files d'attente et capacité

Un réseau interplanétaire se planifie avec des fenêtres de contact. Chaque fenêtre possède une durée, un débit utile et parfois une **probabilité** d'interruption. Le **produit** débit × durée donne une capacité théorique, mais il faut retirer les protocoles, retransmissions et marges.

Si plusieurs producteurs envoient plus de données que le réseau ne peut écouler, le problème devient une file d'attente. L'âge du backlog, c'est-à-dire des données en attente, peut devenir un indicateur opérationnel aussi important que le débit instantané.

5. Priorités: sécurité, commande, maintenance, science, confort

Tout trafic n'a pas la même conséquence. Une architecture martienne devrait définir des classes: urgence humaine, commandes critiques, télémessure de santé système, maintenance, science, vidéo non urgente et confort. Lorsqu'une antenne ou un relais est perdu, le réseau doit dégrader le service de façon connue.

Une priorité n'est pas seulement un numéro dans un routeur. Elle doit être reliée à une politique: quelle donnée peut être supprimée, compressée, retardée ou reroutée? Qui peut changer cette politique pendant une crise?

6. Redondance et indépendance des chemins

Deux antennes alimentées par le même tableau électrique ne constituent pas deux chemins indépendants. La **résilience** doit suivre les causes communes: énergie, pointage, logiciel, météo terrestre pour l'optique, relais orbital, fréquence, disponibilité du DSN ou de réseaux partenaires.

Une colonie devrait disposer au minimum d'un réseau local autonome, de plusieurs moyens surface-orbite et de procédures de fonctionnement lorsque la Terre disparaît du réseau pendant des heures ou des jours.

7. Sécurité et intégrité des commandes

Plus le réseau devient autonome, plus l'authenticité des commandes devient critique. Le système doit distinguer une commande valide d'un paquet corrompu, rejoué ou provenant d'un nœud non autorisé. La sécurité ne doit cependant pas rendre impossible le **fonctionnement dégradé**.

La conception doit donc documenter clés, renouvellement, horloges, journalisation et procédures de **récupération** après perte d'un nœud de confiance.

8. Exemple calculé: vider une file de données

Un rover accumule 18 Gbit de données. Un passage relais offre 2,0 Mbit/s pendant 45 minutes. La capacité brute du contact est $2,0 \times 10^6 \text{ bit/s} \times 2\,700 \text{ s} = 5,4 \times 10^9 \text{ bits}$, soit 5,4 Gbit.

Si l'efficacité utile est de 75 %, la capacité réellement livrable vaut $5,4 \times 0,75 = 4,05 \text{ Gbit}$. Après un seul passage, il reste donc $18 - 4,05 = 13,95 \text{ Gbit}$. Le calcul montre pourquoi une mission doit gérer la production de données, pas seulement posséder une radio rapide.

9. Calcul d'ingénierie: pourquoi une conversation Terre–Mars ne peut pas piloter une urgence

Grandeurs. On note d la distance entre l'émetteur et le récepteur, exprimée ici en kilomètres, c la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide, soit 299 792,458 km/s, et t le temps de propagation en secondes. La relation est $t = d / c$: on divise une distance par une vitesse parce que l'on cherche la durée nécessaire pour parcourir cette distance.

Hypothèse pédagogique. Prenons une distance Terre–Mars de 225 000 000 km. Alors $t = 225\,000\,000 \text{ km} / 299\,792,458 \text{ km/s} \approx 750,5 \text{ s}$. Comme $60 \text{ s} = 1 \text{ min}$, $750,5 / 60 \approx \mathbf{12,5 \text{ min dans un seul sens}}$. Une question envoyée depuis Mars puis une réponse immédiate depuis la Terre exigent donc au minimum environ 25 min de propagation, avant même le temps humain d'analyse et de décision.

Interprétation physique. Ce nombre interdit le modèle mental du téléopérateur qui « conduit » un rover martien en direct depuis la Terre. Il impose des commandes par objectifs, des procédures locales, des systèmes capables de refuser une action dangereuse et un réseau qui conserve les messages lorsque la liaison disparaît. Le DTN n'est donc pas seulement une technologie de transmission: il est une conséquence directe de la géométrie interplanétaire.

Contrôle d'ordre de grandeur. À 300 000 km/s, la lumière parcourt environ 18 millions de kilomètres par minute. Une distance de quelques centaines de millions de kilomètres doit donc produire un délai de l'ordre de plusieurs à quelques dizaines de minutes, ce qui confirme que 12,5 min est cohérent pour l'hypothèse choisie.

Exercice progressif

Une base produit 12 Gbit/jour de télémétrie et science. Deux contacts de 30 minutes à 1,5 Mbit/s sont disponibles chaque jour avec 80 % d'efficacité. Calculez la capacité utile quotidienne et déterminez si le backlog augmente. Proposez ensuite une politique de priorité.

Correction raisonnée

Chaque contact dure 1 800 s. Deux contacts à 1,5 Mbit/s donnent $2 \times 1\,800 \times 1,5 = 5\,400$ Mbit bruts. Avec 80 % d'efficacité, la capacité utile n'est que de 4 320 Mbit, soit 4,32 Gbit par jour. La base produit 12 Gbit/jour: le backlog augmente donc de 7,68 Gbit chaque jour. Une politique raisonnable réserve d'abord la capacité aux commandes, alarmes, santé du véhicule et télémetries critiques, puis aux résumés scientifiques et enfin aux données volumineuses pouvant attendre. Le DTN doit conserver les priorités et dates d'expiration afin qu'une interruption de contact n'efface pas l'ordre opérationnel.

Mini-projet

Concevoir le réseau d'une base martienne avec trois rovers, un orbiteur relais et deux antennes de surface. Définir classes de trafic, stockage local, plan de contacts, fonctionnement sans Terre pendant 48 h, stratégie de mise à jour logicielle et reprise après perte d'un relais.

Calculateurs associés

Mettre en pratique ce module avec:

- [Calculateur simplifié de budget de liaison Terre–Mars](#)

Sources primaires et passerelles

- [NASA SCA_N — Services and Scheduling](#)
- [NASA — Delay/Disruption Tolerant Networking](#)
- [NASA — DTN Overview](#)

Matrice de parité FR ↔ EN

Temps de transmission	Transmission time
Vidage net d'une file	Net queue drain time
Capacité d'un contact	Contact capacity
Temps lumière aller simple	One-way light time
Latence opérationnelle totale	Total operational latency
Succès d'un chemin à deux liaisons	Two-link path success