

Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars

Concevoir une base qui continue à fonctionner lorsque des composants vieillissent, tombent en panne et doivent être diagnostiqués, cannibalisés, réparés ou remplacés sans chaîne logistique immédiate.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « fiabilité », et quel repère issu de « MTBF » permet de vérifier la décision?

Intuition. Une flotte de rovers doit rester disponible pendant des années avec peu de pièces et des délais logistiques très longs.

1

Comprendre avant de calculer

Une flotte de rovers doit rester disponible pendant des années avec peu de pièces et des délais logistiques très longs.

2

fiabilité

Définition sans prérequis.

3

MTBF

Définition sans prérequis.

Repère concret. Un MTBF de 10 000 h ne signifie pas qu'un appareil tombera en panne précisément à 10 000 h.

- Comprendre avant de calculer — Une flotte de rovers doit rester disponible pendant des années avec peu de pièces et des délais logistiques très longs.
- fiabilité — Définition sans prérequis.
- MTBF — Définition sans prérequis.

Parcours conseillé pour « Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars »: modules 00 à 34 recommandés selon le sujet. Dans « Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars », l'objectif est de comprendre pourquoi une notion antérieure intervient dans la décision étudiée, pas d'en réciter la notation.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 35

Comprendre avant de calculer

Une flotte de rovers doit rester disponible pendant des années avec peu de pièces et des délais logistiques très longs.

Progression du module — fiabilité; maintenabilité; MTBF; cannibalisation.

fiabilité

Définition sans prérequis. La **fiabilité** est la **probabilité** qu'un élément accomplisse sa fonction sans **défaillance** pendant une durée et dans des conditions définies.

Scène concrète. Un composant très fiable sur Terre peut l'être moins sous poussière, froid, radiation ou cycles thermiques martiens.

Contrôle mental. Sur une même durée, un système plus fiable doit présenter une probabilité de survie plus élevée; vérifiez que la convention utilisée ne confond pas taux de panne et fiabilité.

Piège à éviter. Une valeur de fiabilité sans durée, environnement et définition de défaillance n'est pas interprétable.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « fiabilité » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

Exercice guidé — fiabilité

Situation à reconnaître. Un composant très fiable sur Terre peut l'être moins sous poussière, froid, radiation ou cycles thermiques martiens.

Vérification demandée. Sur une même durée, un système plus fiable doit présenter une probabilité de survie plus élevée; vérifiez que la convention utilisée ne confond pas taux de panne et fiabilité.

Erreur à écarter. Une valeur de fiabilité sans durée, environnement et définition de défaillance n'est pas interprétable.

Corrigé raisonné

Sens précis

La fiabilité est la probabilité qu'un élément accomplisse sa fonction sans défaillance pendant une durée et dans des conditions définies.

Test du cas

Sur une même durée, un système plus fiable doit présenter une probabilité de survie plus élevée; vérifiez que la convention utilisée ne confond pas taux de panne et fiabilité.

Piège exclu

Une valeur de fiabilité sans durée, environnement et définition de défaillance n'est pas interprétable.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « fiabilité » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

Quantification

fiabilité: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

maintenabilité

Définition sans prérequis. La maintenabilité décrit la facilité et la rapidité avec lesquelles une fonction peut être restaurée après panne ou dégradation.

Scène concrète. Accès aux fixations, diagnostic, outils, pièces et procédures influencent le temps de réparation d'un rover.

Contrôle mental. Un équipement plus maintenable réduit typiquement le temps ou l'effort nécessaire pour le remettre en service; mesurez la restauration de fonction, pas seulement l'accès physique.

Piège à éviter. Un équipement fiable mais impossible à réparer localement peut être un mauvais choix pour une colonie isolée.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « maintenabilité » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

Exercice guidé — maintenabilité

Situation à reconnaître. Accès aux fixations, diagnostic, outils, pièces et procédures influencent le temps de réparation d'un rover.

Vérification demandée. Un équipement plus maintenable réduit typiquement le temps ou l'effort nécessaire pour le remettre en service; mesurez la restauration de fonction, pas seulement l'accès physique.

Erreur à écarter. Un équipement fiable mais impossible à réparer localement peut être un mauvais choix pour une colonie isolée.

Corrigé raisonné

Sens précis

La maintenabilité décrit la facilité et la rapidité avec lesquelles une fonction peut être restaurée après panne ou dégradation.

Test du cas

Un équipement plus maintenable réduit typiquement le temps ou l'effort nécessaire pour le remettre en service; mesurez la restauration de fonction, pas seulement l'accès physique.

Piège exclu

Un équipement fiable mais impossible à réparer localement peut être un mauvais choix pour une colonie isolée.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « maintenabilité » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

Termes du corrigé. [observation](#)

Quantification

maintenabilité: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

MTBF

Définition sans prérequis. Le [MTBF](#) est le temps moyen entre défaillances pour certains systèmes réparables dans un modèle statistique. Il ne prédit pas la date exacte de la prochaine panne.

Scène concrète. Un MTBF de 10 000 h ne signifie pas qu'un appareil tombera en panne précisément à 10 000 h.

Contrôle mental. Le [MTBF](#) n'est pas une garantie de durée de vie d'un exemplaire: un MTBF élevé décrit un taux moyen de défaillance dans un modèle donné, pas une date certaine de panne.

Piège à éviter. Utiliser le MTBF comme durée de vie garantie est une erreur fréquente.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [mtbf](#) » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

Exercice guidé — MTBF

Situation à reconnaître. Un MTBF de 10 000 h ne signifie pas qu'un appareil tombera en panne précisément à 10 000 h.

Vérification demandée. Le MTBF n'est pas une garantie de durée de vie d'un exemplaire: un MTBF élevé décrit un taux moyen de défaillance dans un modèle donné, pas une date certaine de panne.

Erreur à écarter. Utiliser le MTBF comme durée de vie garantie est une erreur fréquente.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le MTBF est le temps moyen entre défaillances pour certains systèmes réparables dans un modèle statistique. Il ne prédit pas la date exacte de la prochaine panne.

Test du cas

Le MTBF n'est pas une garantie de durée de vie d'un exemplaire: un MTBF élevé décrit un taux moyen de défaillance dans un modèle donné, pas une date certaine de panne.

Piège exclu

Utiliser le MTBF comme durée de vie garantie est une erreur fréquente.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « [mtbf](#) » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

cannibalisation

Définition sans prérequis. La [cannibalisation](#) consiste à prélever une pièce fonctionnelle sur un équipement indisponible ou moins prioritaire pour remettre en service un autre équipement.

Scène concrète. Une colonie peut sacrifier temporairement un rover secondaire afin de restaurer un véhicule de secours.

Contrôle mental. Chaque prélèvement de pièce répare un actif mais en dégrade un autre: le bilan doit montrer combien de fonctions restent réellement disponibles après l'échange.

Piège à éviter. Sans gestion de configuration, la cannibalisation peut créer un stock fantôme et rendre impossible la reconstruction de l'état réel de la flotte.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [cannibalisation](#) » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

Exercice guidé — cannibalisation

Situation à reconnaître. Une colonie peut sacrifier temporairement un rover secondaire afin de restaurer un véhicule de secours.

Vérification demandée. Chaque prélèvement de pièce répare un actif mais en dégrade un autre: le bilan doit montrer combien de fonctions restent réellement disponibles après l'échange.

Erreur à écarter. Sans gestion de configuration, la cannibalisation peut créer un stock fantôme et rendre impossible la reconstruction de l'état réel de la flotte.

Corrigé raisonné

Sens précis

La cannibalisation consiste à prélever une pièce fonctionnelle sur un équipement indisponible ou moins prioritaire pour remettre en service un autre équipement.

Test du cas

Chaque prélèvement de pièce répare un actif mais en dégrade un autre: le bilan doit montrer combien de fonctions restent réellement disponibles après l'échange.

Piège exclu

Sans gestion de configuration, la cannibalisation peut créer un stock fantôme et rendre impossible la reconstruction de l'état réel de la flotte.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « cannibalisation » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente.

Termes du corrigé. [vérification](#)

Quantification

cannibalisation: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

Étude intégrée — Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars

Situation à analyser. Une flotte de rovers doit rester disponible pendant des années avec peu de pièces et des délais logistiques très longs.

- **fiabilité:** Un composant très fiable sur Terre peut l'être moins sous poussière, froid, radiation ou cycles thermiques martiens. Contrôle attendu: Sur une même durée, un système plus fiable doit présenter une probabilité de survie plus élevée; vérifiez que la convention utilisée ne confond pas taux de panne et fiabilité.
- **maintenabilité:** Accès aux fixations, diagnostic, outils, pièces et procédures influencent le temps de réparation d'un rover. Contrôle attendu: Un équipement plus maintenable réduit typiquement le temps ou l'effort nécessaire pour le remettre en service; mesurez la restauration de fonction, pas seulement l'accès physique.
- **MTBF:** Un MTBF de 10 000 h ne signifie pas qu'un appareil tombera en panne précisément à 10 000 h. Contrôle attendu: Le MTBF n'est pas une garantie de durée de vie d'un exemplaire: un MTBF élevé décrit un taux moyen de défaillance dans un modèle donné, pas une date certaine de panne.

- **cannibalisation:** Une colonie peut sacrifier temporairement un rover secondaire afin de restaurer un véhicule de secours. Contrôle attendu: Chaque prélèvement de pièce répare un actif mais en dégrade un autre: le bilan doit montrer combien de fonctions restent réellement disponibles après l'échange.

Le diagnostic ne doit pas confondre « fiabilité » et « maintenabilité ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Un composant très fiable sur Terre peut l'être moins sous poussière, froid, radiation ou cycles thermiques martiens. Le second doit être contrôlé autrement: Un équipement plus maintenable réduit typiquement le temps ou l'effort nécessaire pour le remettre en service; mesurez la restauration de fonction, pas seulement l'accès physique.

Une seconde vérification croise « MTBF » et « cannibalisation ». Gardez comme alerte « Utiliser le MTBF comme durée de vie garantie est une erreur fréquente. »; pour « cannibalisation », utilisez plutôt ce test: Chaque prélèvement de pièce répare un actif mais en dégrade un autre: le bilan doit montrer combien de fonctions restent réellement disponibles après l'échange.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars », classez les indices selon « fiabilité » (Sur une même durée, un système plus fiable doit présenter une probabilité de survie plus élevée; vérifiez que la convention utilisée ne confond pas taux de panne et fiabilité.), « maintenabilité » (Un équipement plus maintenable réduit typiquement le temps ou l'effort nécessaire pour le remettre en service; mesurez la restauration de fonction, pas seulement l'accès physique.), « MTBF » (Le MTBF n'est pas une garantie de durée de vie d'un exemplaire: un MTBF élevé décrit un taux moyen de défaillance dans un modèle donné, pas une date certaine de panne.), « cannibalisation » (Chaque prélèvement de pièce répare un actif mais en dégrade un autre: le bilan doit montrer combien de fonctions restent réellement disponibles après l'échange.) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour fiabilité, Dans ce module, une erreur sur « fiabilité » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente. Le garde-fou principal est: Une valeur de fiabilité sans durée, environnement et définition de défaillance n'est pas interprétable. Pour maintenabilité, Dans ce module, une erreur sur « maintenabilité » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente. Le garde-fou principal est: Un équipement fiable mais impossible à réparer localement peut être un mauvais choix pour une colonie isolée. Pour MTBF, Dans ce module, une erreur sur « mtbf » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente. Le garde-fou principal est: Utiliser le MTBF comme durée de vie garantie est une erreur fréquente. Pour cannibalisation, Dans ce module, une erreur sur « cannibalisation » peut immobiliser une flotte faute de pièce, de temps de réparation ou de stratégie de cannibalisation cohérente. Le garde-fou principal est: Sans gestion de configuration, la cannibalisation peut créer un stock fantôme et rendre impossible la reconstruction de l'état réel de la flotte.

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.

Disponibilité intrinsèque

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$ » dans « Disponibilité intrinsèque » ?

2 — Intuition sans symboles

La disponibilité dépend à la fois de la rareté des pannes et de la vitesse de remise en service.

3 — Grandeurs

A: disponibilité intrinsèque [sans dimension]; MTBF: temps moyen entre défaillances [h]; MTTR: temps moyen de réparation [h]

4 — Formule

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

5 — Lecture

Lire « $A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

A: disponibilité intrinsèque [sans dimension]; MTBF: temps moyen entre défaillances [h]; MTTR: temps moyen de réparation [h]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

A [sans dimension]; MTBF [h]; MTTR [h]

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 MTBF = 1000 h, MTTR = 10 h: $A = 1000 / (1000 + 10) = 0.9901$.

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

Améliorer la maintenabilité peut être aussi important qu'augmenter le MTBF lorsque l'arrêt est critique.

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 MTBF = 500 h, MTTR = 20 h: $A = 500 / (500 + 20)$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec MTBF = 500 h, MTTR = 20 h: $A = 500 / (500 + 20) = 0.9615$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec MTBF = 2000 h, MTTR = 5 h: $A = 2000 / (2000 + 5)$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec MTBF = 2000 h, MTTR = 5 h: $A = 2000 / (2000 + 5) = 0.9975$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Améliorer la maintenabilité peut être aussi important qu'augmenter le MTBF lorsque l'arrêt est critique.

Défaillances attendues

$N_{\text{fail}} = \text{fleet_hours} / \text{MTBF}$

- 1 — Question concrète
Que permet de calculer « $N_{\text{fail}} = \text{fleet_hours} / \text{MTBF}$ » dans « Défaillances attendues » ?
- 2 — Intuition sans symboles
Les heures cumulées de flotte rapportées au MTBF donnent un ordre de grandeur des événements à traiter.
- 3 — Grandeurs
 N_{fail} : défaillances attendues [failure]; fleet_hours: heures de fonctionnement cumulées [h]; MTBF: temps moyen entre défaillances [h/failure]
- 4 — Formule
$$N_{\text{fail}} = \text{fleet_hours} / \text{MTBF}$$
- 5 — Lecture
Lire « $N_{\text{fail}} = \text{fleet_hours} / \text{MTBF}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.
- 6 — Symboles et sens
 N_{fail} : défaillances attendues [failure]; fleet_hours: heures de fonctionnement cumulées [h]; MTBF: temps moyen entre défaillances [h/failure]
- 7 — Prononciation
Dire explicitement les indices, puissances, parenthèses et lettres grecques afin de reconstruire la relation sans voir la page.
- 8 — Unités
 N_{fail} [failure]; fleet_hours [h]; MTBF [h/failure]
- 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 fleet_hours = 5000 h, MTBF = 1000 h/failure: $N_{\text{fail}} = 5000 / 1000 = 5$ failure.
- 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
Dimensionner équipe et rechanges sur l'exposition totale de la flotte plutôt que sur une seule unité.
- 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 fleet_hours = 2400 h, MTBF = 800 h/failure: $N_{\text{fail}} = 2400 / 800$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec fleet_hours = 2400 h, MTBF = 800 h/failure: $N_{\text{fail}} = 2400 / 800 = 3$ failure. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec fleet_hours = 10000 h, MTBF = 2000 h/failure: $N_{\text{fail}} = 10000 / 2000$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $\text{fleet_hours} = 10000 \text{ h}$, $\text{MTBF} = 2000 \text{ h/failure}$: $N_{\text{fail}} = 10000 / 2000 = 5 \text{ failure}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Dimensionner équipe et rechanges sur l'exposition totale de la flotte plutôt que sur une seule unité.

Charge de maintenance

$$H_{\text{maint}} = N_{\text{fail}} \times \text{MTTR}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $H_{\text{maint}} = N_{\text{fail}} \times \text{MTTR}$ » dans « Charge de maintenance » ?

2 — Intuition sans symboles

Chaque panne mobilise du temps de réparation; leur produit donne une première charge de maintenance.

3 — Grandeurs

H_{maint} : heures de maintenance [h]; N_{fail} : défaillances attendues [failure]; MTTR: temps moyen de réparation [h/failure]

4 — Formule

$$H_{\text{maint}} = N_{\text{fail}} \times \text{MTTR}$$

5 — Lecture

Lire « $H_{\text{maint}} = N_{\text{fail}} \times \text{MTTR}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

H_{maint} : heures de maintenance [h]; N_{fail} : défaillances attendues [failure]; MTTR: temps moyen de réparation [h/failure]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

H_{maint} [h]; N_{fail} [failure]; MTTR [h/failure]

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 $N_{\text{fail}} = 5 \text{ failure}$, $\text{MTTR} = 8 \text{ h/failure}$: $H_{\text{maint}} = 5 \times 8 = 40 \text{ h}$.

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

Comparer cette charge au temps de technicien réellement disponible avant d'accepter le plan de flotte.

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 $N_{\text{fail}} = 3$ failure, $MTTR = 12$ h/failure: $H_{\text{maint}} = 3 \times 12$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $N_{\text{fail}} = 3$ failure, $MTTR = 12$ h/failure: $H_{\text{maint}} = 3 \times 12 = 36$ h. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $N_{\text{fail}} = 10$ failure, $MTTR = 4$ h/failure: $H_{\text{maint}} = 10 \times 4$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $N_{\text{fail}} = 10$ failure, $MTTR = 4$ h/failure: $H_{\text{maint}} = 10 \times 4 = 40$ h. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Comparer cette charge au temps de technicien réellement disponible avant d'accepter le plan de flotte.

Couverture du stock de rechanges

$$t_{\text{spares}} = N_{\text{spares}} / \lambda_{\text{fail}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{\text{spares}} = N_{\text{spares}} / \lambda_{\text{fail}}$ » dans « Couverture du stock de rechanges » ?

2 — Intuition sans symboles

Un stock de rechanges devient une durée lorsqu'il est comparé au rythme moyen de consommation.

3 — Grandeurs

t_{spares} : durée de couverture [d]; N_{spares} : rechanges disponibles [spare]; λ_{fail} : consommation moyenne de rechanges [spare/d]

4 — Formule

$$t_{\text{spares}} = N_{\text{spares}} / \lambda_{\text{fail}}$$

5 — Lecture

Lire « $t_{\text{spares}} = N_{\text{spares}} / \lambda_{\text{fail}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

t_{spares} : durée de couverture [d]; N_{spares} : rechanges disponibles [spare]; λ_{fail} : consommation moyenne de rechanges [spare/d]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

t_{spares} [d]; N_{spares} [spare]; λ_{fail} [spare/d]

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 $N_{\text{spares}} = 12$ spare, $\lambda_{\text{fail}} = 0.5$ spare/d: $t_{\text{spares}} = 12 / 0.5 = 24$ day.

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

Réapprovisionner ou produire localement avant que la couverture tombe sous le délai logistique réaliste.

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 $N_{\text{spares}} = 8$ spare, $\lambda_{\text{fail}} = 0.25$ spare/d: $t_{\text{spares}} = 8 / 0.25$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $N_{\text{spares}} = 8$ spare, $\lambda_{\text{fail}} = 0.25$ spare/d: $t_{\text{spares}} = 8 / 0.25 = 32$ day. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $N_{\text{spares}} = 20$ spare, $\lambda_{\text{fail}} = 1$ spare/d: $t_{\text{spares}} = 20 / 1$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $N_{\text{spares}} = 20$ spare, $\lambda_{\text{fail}} = 1$ spare/d: $t_{\text{spares}} = 20 / 1 = 20$ day. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Réapprovisionner ou produire localement avant que la couverture tombe sous le délai logistique réaliste.

Disponibilité de flotte

$$A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$ » dans « Disponibilité de flotte » ?

2 — Intuition sans symboles

La flotte disponible est celle qui peut réellement être engagée maintenant.

3 — Grandeurs

A_{fleet} : fraction prête [sans dimension]; n_{ready} : unités prêtes [unit]; n_{total} : unités totales [unit]

4 — Formule

$$A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$$

5 — Lecture

Lire « $A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

A_{fleet} : fraction prête [sans dimension]; n_{ready} : unités prêtes [unit]; n_{total} : unités totales [unit]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

A_{fleet} [sans dimension]; n_{ready} [unit]; n_{total} [unit]

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 $n_{\text{ready}} = 9$ unit, $n_{\text{total}} = 10$ unit: $A_{\text{fleet}} = 9 / 10 = 0.9$.

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

Suspendre les tâches non critiques si la fraction prête menace les redondances vitales.

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 $n_{\text{ready}} = 14$ unit, $n_{\text{total}} = 16$ unit: $A_{\text{fleet}} = 14 / 16$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $n_{\text{ready}} = 14$ unit, $n_{\text{total}} = 16$ unit: $A_{\text{fleet}} = 14 / 16 = 0.875$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $n_{\text{ready}} = 6$ unit, $n_{\text{total}} = 8$ unit: $A_{\text{fleet}} = 6 / 8$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $n_{\text{ready}} = 6$ unit, $n_{\text{total}} = 8$ unit: $A_{\text{fleet}} = 6 / 8 = 0.75$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Suspendre les tâches non critiques si la fraction prête menace les redondances vitales.

Fiabilité d'une chaîne série

$$R_{\text{series}} = R_1 \times R_2 \times R_3$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $R_{\text{series}} = R_1 \times R_2 \times R_3$ » dans « Fiabilité d'une chaîne série » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans une chaîne série, chaque fonction doit réussir; les fiabilités se multiplient.

3 — Grandeurs

R_{series} : fiabilité de la chaîne [sans dimension]; R_1 : fiabilité composant un [sans dimension]; R_2 : fiabilité composant deux [sans dimension]; R_3 : fiabilité composant trois [sans dimension]

4 — Formule

$$R_{\text{series}} = R_1 \times R_2 \times R_3$$

5 — Lecture

Lire « $R_{\text{series}} = R_1 \times R_2 \times R_3$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

R_{series} : fiabilité de la chaîne [sans dimension]; R_1 : fiabilité composant un [sans dimension]; R_2 : fiabilité composant deux [sans dimension]; R_3 : fiabilité composant trois [sans dimension]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

R_{series} [sans dimension]; R_1 [sans dimension]; R_2 [sans dimension]; R_3 [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 $R_1 = 0.99$ sans dimension, $R_2 = 0.98$ sans dimension, $R_3 = 0.97$ sans dimension: $R_{series} = 0.99 \times 0.98 \times 0.97 = 0.9411$.

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

Identifier le maillon qui domine la perte et éviter de masquer une faiblesse par la moyenne des autres.

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 $R_1 = 0.95$ sans dimension, $R_2 = 0.95$ sans dimension, $R_3 = 0.95$ sans dimension: $R_{series} = 0.95 \times 0.95 \times 0.95$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $R_1 = 0.95$ sans dimension, $R_2 = 0.95$ sans dimension, $R_3 = 0.95$ sans dimension: $R_{series} = 0.95 \times 0.95 \times 0.95 = 0.8574$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $R_1 = 0.999$ sans dimension, $R_2 = 0.99$ sans dimension, $R_3 = 0.98$ sans dimension: $R_{series} = 0.999 \times 0.99 \times 0.98$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $R_1 = 0.999$ sans dimension, $R_2 = 0.99$ sans dimension, $R_3 = 0.98$ sans dimension: $R_{series} = 0.999 \times 0.99 \times 0.98 = 0.9692$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Identifier le maillon qui domine la perte et éviter de masquer une faiblesse par la moyenne des autres.

Progression de maîtrise

1. fiabilité: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. maintenabilité: appliquez le contrôle concret de sa fiche.

3. MTBF: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. cannibalisation: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars »: confrontez « fiabilité » à « maintenabilité »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 35 — fiabilité, maintenabilité, MTBF, cannibalisation. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Lire « fiabilité » comme un problème concret de « Maintenance, fiabilité de flotte et réparations sur Mars » et non comme une définition à réciter.
- Contrôler un résultat chiffré lié à « fiabilité » par une seconde méthode simple.
- Dire quelle donnée supplémentaire manque avant de trancher sur « maintenabilité ».
- Choisir une réponse opérationnelle cohérente avec « MTBF » et ses marges.

1. Fiabilité et maintenabilité ne sont pas la même chose

La fiabilité décrit la probabilité qu'un équipement accomplisse sa fonction pendant une durée donnée. La maintenabilité décrit la facilité et le temps nécessaires pour le diagnostiquer, l'ouvrir, le réparer, le tester puis le remettre en service. Un système très fiable mais irréparable peut devenir dangereux sur Mars; un système moins fiable mais modulaire, instrumenté et réparable peut offrir une meilleure disponibilité opérationnelle.

2. Concevoir pour l'accès, pas seulement pour la performance

Un filtre inaccessible derrière trois équipements peut transformer une opération de dix minutes en intervention de six heures. Les connecteurs, trappes, masses manipulables, couples de serrage, outils et zones de travail doivent être pensés dès la conception. Les interfaces communes permettent de remplacer un sous-ensemble par un autre sans reconstruire tout le système.

3. Du symptôme à la cause: diagnostic et arbre de panne

Le diagnostic commence par distinguer symptôme, mécanisme de panne et cause racine. Une chute de débit d'eau peut venir d'une pompe, d'un filtre colmaté, d'une vanne partiellement fermée, d'un capteur faux ou d'une fuite. L'équipage doit disposer de télémétrie, de points de mesure et de procédures qui évitent de remplacer au hasard des pièces saines.

4. Réparer au niveau le plus bas raisonnable

Sur Terre, on remplace souvent un module entier parce que la logistique le permet. Sur Mars, la masse de rechange est limitée. Réparer une carte, un moteur, un joint ou une pompe peut économiser des dizaines de kilogrammes de stock. Mais descendre trop bas augmente formation, outils et risque d'erreur. La bonne granularité est un compromis d'architecture.

5. Redondance, cannibalisation et dette technique

Deux équipements identiques permettent une redondance mais aussi la cannibalisation: récupérer une pièce d'un système indisponible pour en sauver un autre. Cette stratégie doit être gouvernée, car elle crée une dette technique. Chaque prélèvement doit être tracé afin que la base sache exactement quels actifs ne sont plus complets.

6. Maintenance préventive, prédictive et corrective

La maintenance préventive intervient selon un calendrier ou un nombre d'heures. La maintenance prédictive utilise tendances de vibration, [température](#), courant ou [pression](#) pour intervenir lorsque la dégradation apparaît. La corrective intervient après la panne. Sur Mars, combiner les trois réduit à la fois la masse de rechanges et le risque de panne brutale.

7. Modes de défaillance communs et indépendance réelle

Deux équipements identiques ne constituent pas automatiquement une redondance robuste. S'ils partagent le même convertisseur électrique, le même logiciel, le même capteur d'ambiance ou la même erreur de maintenance, une cause unique peut neutraliser les deux. L'analyse doit donc distinguer panne indépendante et [défaillance de cause commune](#). Pour une base martienne, l'enjeu est opérationnel: deux pompes de circulation installées côte à côte peuvent être perdues ensemble si une contamination du fluide, une surchauffe locale ou une procédure de maintenance erronée touche le sous-système entier. La redondance utile exige séparation des alimentations lorsque c'est justifié, diversité de capteurs, isolation possible, modes de repli et procédures capables de confirmer qu'un canal de secours est réellement sain avant de lui transférer la charge.

8. Concevoir le stock de rechanges à partir du risque, pas de la peur

Emporter une copie de chaque pièce semble rassurant mais devient rapidement impossible lorsque masse, volume et durée de mission augmentent. Le dimensionnement des rechanges doit combiner fréquence de panne, criticité, délai de remplacement, possibilité de réparation locale, communauté de pièces et conséquences d'une rupture de stock. Un joint léger et spécifique peut mériter plusieurs exemplaires; une structure lourde très fiable peut relever d'une stratégie de réparation plutôt que d'un remplacement complet. Le mainteneur doit aussi regarder les consommables cachés: lubrifiants, filtres, connecteurs, fixations, adhésifs, produits de nettoyage et moyens de test. La logistique de maintenance devient ainsi un problème quantitatif lié à la fiabilité et non une liste construite après la conception.

9. Fermer la boucle: panne, retour d'expérience et modification de configuration

Une base qui répare sans apprendre accumule les mêmes défaillances. Chaque incident significatif doit produire une trace exploitable: symptômes initiaux, données de télémétrie, hypothèses testées, cause retenue, pièces remplacées, état après réparation et éventuelle modification de procédure. Si la même panne réapparaît, l'équipe doit décider si le problème vient de la maintenance, de l'environnement ou de la conception. Toute modification permanente doit ensuite être contrôlée par la gestion de configuration afin que schémas, logiciels, stocks et procédures décrivent encore le système réellement présent sur Mars. La maintenance devient donc un moteur d'amélioration continue, pas seulement une activité de remise en état.

10. Exemple calculé: disponibilité d'une fonction critique

Supposons un équipement qui fonctionne en moyenne 2 000 h entre pannes et demande 20 h de réparation. Une approximation de disponibilité vaut $A = \text{MTBF}/(\text{MTBF} + \text{MTTR}) = 2\,000/(2\,000 + 20) \approx 0,9901$, soit 99,01 %. Si le temps de réparation monte à 200 h faute d'accès ou de pièces, A tombe à 90,9 %. La maintenabilité peut donc coûter presque dix points de disponibilité sans changer la fiabilité intrinsèque.

Approfondissement: dimensionner la disponibilité plutôt que compter seulement les pannes

Un système vital peut tomber rarement en panne et rester pourtant indisponible trop longtemps si sa réparation est lente. La disponibilité relie donc deux grandeurs différentes: le temps moyen de bon fonctionnement et le temps moyen nécessaire pour remettre le système en service. La [NASA](#) traite fiabilité et maintenabilité comme deux disciplines liées mais distinctes. Pour Mars, cette distinction devient concrète parce qu'un atelier, un technicien ou un rechange peuvent eux-mêmes être indisponibles. [NASA — Reliability and Maintainability](#)

Exemple calculé. Supposons un compresseur dont le temps moyen entre pannes est de 2 000 heures et dont la réparation moyenne demande 20 heures. La disponibilité intrinsèque simplifiée vaut $A = \text{MTBF} \div (\text{MTBF} + \text{MTTR})$. Ici, $A = 2\,000 \div (2\,000 + 20) = 2\,000 \div 2\,020 \approx 0,9901$, soit environ 99,01 %. Cela paraît excellent. Mais sur une année de 8 760 heures, 0,99 % d'indisponibilité représente encore environ 86,7 heures. Pour une fonction vitale, il faut donc regarder ce que le système alimente, la redondance et le [mode dégradé](#), pas seulement le pourcentage.

La même formule permet de voir où agir. Si la fiabilité du compresseur ne change pas mais que l'atelier, les procédures et les rechanges font passer le MTTR de 20 heures à 5 heures, $A = 2\,000 \div 2\,005 \approx 99,75\%$. Le gain vient ici de la maintenabilité. Une colonie doit donc investir dans l'accès aux composants, le diagnostic, la standardisation, les outils et la formation autant que dans la [robustesse](#) initiale du matériel. [NASA NTRS — Supportability Concepts](#)

11. Exercice progressif

Une base possède trois pompes identiques. Deux sont nécessaires au fonctionnement nominal; la troisième est une réserve. Proposez une stratégie de rotation, de contrôle de vibration et de pièces communes. Expliquez ce qui change si le joint principal a 30 % de probabilité de défaillir sur 500 jours.

Correction raisonnée

Une stratégie possible fait tourner périodiquement A, B et C afin que la réserve ne reste pas des centaines de jours sans être sollicitée: deux pompes en service, la troisième contrôlée puis réintroduite selon un calendrier fondé sur les heures de fonctionnement et l'état. Les tendances vibratoires doivent être enregistrées avec le [débit](#), la température et le courant moteur pour distinguer usure mécanique et changement de charge. Si chaque joint avait indépendamment 30 % de probabilité de défaillir sur 500 jours, l'espérance serait 0,9 défaillance sur trois pompes et la probabilité d'au moins une défaillance serait $1 - 0,7^3 \approx 65,7\%$. Cela justifie des joints de rechange, l'outillage de remplacement et une surveillance renforcée; un mode commun rendrait l'hypothèse d'indépendance encore trop optimiste.

Mini-projet

Construire le plan de supportabilité d'un atelier martien: inventaire des fonctions critiques, niveaux de réparation, outils, documentation hors ligne, pièces communes, critères de cannibalisation, essais de remise en service et indicateurs de disponibilité.

Sources primaires et passerelles

- [NASA — Reliability and Maintainability](#)
- [NASA-STD-8729.1 — Reliability and Maintainability](#)
- [NASA NTRS — Supportability Concepts for Crewed Deep Space Exploration](#)

Matrice de parité FR ↔ EN

Disponibilité intrinsèque	Intrinsic availability
Défaillances attendues	Expected failures
Charge de maintenance	Maintenance workload
Couverture du stock de rechanges	Spare-stock coverage
Disponibilité de flotte	Fleet availability
Fiabilité d'une chaîne série	Series-chain reliability