

Extraction, métallurgie, fabrication et contrôle qualité sur Mars

Passer de la ressource géologique à une pièce utilisable: excaver, séparer, transformer, fabriquer, mesurer et qualifier sans supposer qu'une imprimante 3D résout toute l'industrie.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Extraction, métallurgie, fabrication et contrôle qualité sur Mars: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « minerais », et quel repère issu de « métallurgie » permet de vérifier la décision?

Intuition. La colonie ne peut pas attendre chaque pièce depuis la Terre. Elle doit extraire une matière, la transformer, fabriquer une pièce et prouver qu'elle est assez bonne pour son usage.

1

Comprendre avant de calculer

La colonie ne peut pas attendre chaque pièce depuis la Terre.

2

minerais

Définition sans prérequis.

3

métallurgie

Définition sans prérequis.

Repère concret. Validation 32 — minerais, métallurgie, fabrication additive, contrôle non destructif.

- Comprendre avant de calculer — La colonie ne peut pas attendre chaque pièce depuis la Terre.
- minerais — Définition sans prérequis.
- métallurgie — Définition sans prérequis.

Pour aborder « Extraction, métallurgie, fabrication et contrôle qualité sur Mars », les prérequis conseillés sont modules 00 à 28 recommandés selon le sujet. Pour « Extraction, métallurgie, fabrication et contrôle qualité sur Mars », une notation technique n'est utilisée qu'après avoir été reliée à son sens physique ou opérationnel.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 32

Comprendre avant de calculer

La colonie ne peut pas attendre chaque pièce depuis la Terre. Elle doit extraire une matière, la transformer, fabriquer une pièce et prouver qu'elle est assez bonne pour son usage.

Progression du module — minerais; métallurgie; fabrication additive; contrôle non destructif.

minerais

Définition sans prérequis. Un **minerais** est une matière naturelle contenant une concentration exploitable d'un ou plusieurs constituants utiles selon un procédé et un contexte économique ou opérationnel.

Scène concrète. Un régolithe riche en oxydes ne devient pas automatiquement une source pratique de métal: extraction, énergie, pureté et déchets déterminent l'intérêt réel.

Contrôle mental. Une teneur élevée n'implique pas automatiquement une ressource exploitable: vérifiez [masse](#) totale, accessibilité, énergie d'extraction et impuretés.

Piège à éviter. Confondre présence géologique et ressource utilisable conduit à surestimer l'[autonomie](#) industrielle.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [minerai](#) » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Exercice guidé — minerai

Situation à reconnaître. Un régolithe riche en oxydes ne devient pas automatiquement une source pratique de métal: extraction, énergie, pureté et déchets déterminent l'intérêt réel.

Vérification demandée. Une teneur élevée n'implique pas automatiquement une ressource exploitable: vérifiez masse totale, accessibilité, énergie d'extraction et impuretés.

Erreur à écarter. Confondre présence géologique et ressource utilisable conduit à surestimer l'autonomie industrielle.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un minerai est une matière naturelle contenant une concentration exploitable d'un ou plusieurs constituants utiles selon un procédé et un contexte économique ou opérationnel.

Test du cas

Une teneur élevée n'implique pas automatiquement une ressource exploitable: vérifiez masse totale, accessibilité, énergie d'extraction et impuretés.

Piège exclu

Confondre présence géologique et ressource utilisable conduit à surestimer l'autonomie industrielle.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « minerai » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Termes du corrigé. [observation](#)

Quantification

minerai: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

métallurgie

Définition sans prérequis. La [métallurgie](#) regroupe les opérations permettant d'extraire, purifier, élaborer, mettre en forme et traiter les métaux et alliages.

Scène concrète. Après réduction d'un oxyde, le matériau peut encore nécessiter affinage, fusion, alliage et traitement thermique.

Contrôle mental. Le bilan matière doit conserver les éléments entre minerai, métal, scories et pertes; une récupération supérieure à la quantité initialement présente est impossible.

Piège à éviter. Produire un métal n'est pas produire une pièce qualifiée: microstructure, défauts et propriétés doivent être contrôlés.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [métallurgie](#) » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Exercice guidé — métallurgie

Situation à reconnaître. Après réduction d'un oxyde, le matériau peut encore nécessiter affinage, fusion, alliage et traitement thermique.

Vérification demandée. Le bilan matière doit conserver les éléments entre minerai, métal, scories et pertes; une récupération supérieure à la quantité initialement présente est impossible.

Erreur à écarter. Produire un métal n'est pas produire une pièce qualifiée: microstructure, défauts et propriétés doivent être contrôlés.

Corrigé raisonné

Sens précis

La métallurgie regroupe les opérations permettant d'extraire, purifier, élaborer, mettre en forme et traiter les métaux et alliages.

Test du cas

Le bilan matière doit conserver les éléments entre minerai, métal, scories et pertes; une récupération supérieure à la quantité initialement présente est impossible.

Piège exclu

Produire un métal n'est pas produire une pièce qualifiée: microstructure, défauts et propriétés doivent être contrôlés.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « métallurgie » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Quantification

métallurgie: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

fabrication additive

Définition sans prérequis. La [fabrication additive](#) construit une pièce couche par couche à partir d'un fichier et d'une matière préparée. Elle peut réduire l'outillage mais impose des contraintes de procédé et de qualification.

Scène concrète. Une pièce imprimée peut avoir la bonne forme mais contenir porosités, anisotropie ou contraintes résiduelles.

Contrôle mental. Une pièce géométriquement correcte n'est pas forcément qualifiée: vérifiez matière, [porosité](#), anisotropie, dimensions et propriétés mécaniques avant usage critique.

Piège à éviter. Le terme « imprimé » ne signifie pas automatiquement rapide, local ou sûr pour une fonction critique.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [fabrication additive](#) » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Exercice guidé — fabrication additive

Situation à reconnaître. Une pièce imprimée peut avoir la bonne forme mais contenir porosités, anisotropie ou contraintes résiduelles.

Vérification demandée. Une pièce géométriquement correcte n'est pas forcément qualifiée: vérifiez matière, porosité, anisotropie, dimensions et propriétés mécaniques avant usage critique.

Erreur à écarter. Le terme « imprimé » ne signifie pas automatiquement rapide, local ou sûr pour une fonction critique.

Corrigé raisonné

Sens précis

La fabrication additive construit une pièce couche par couche à partir d'un fichier et d'une matière préparée. Elle peut réduire l'outillage mais impose des contraintes de procédé et de qualification.

Test du cas

Une pièce géométriquement correcte n'est pas forcément qualifiée: vérifiez matière, porosité, anisotropie, dimensions et propriétés mécaniques avant usage critique.

Piège exclu

Le terme « imprimé » ne signifie pas automatiquement rapide, local ou sûr pour une fonction critique.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « fabrication additive » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Termes du corrigé. [vérification](#)

Quantification

fabrication additive: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

fabrication additive: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

contrôle non destructif

Définition sans prérequis. Le [contrôle non destructif](#) cherche des défauts sans détruire la pièce, à l'aide de méthodes adaptées au matériau et au défaut recherché.

Scène concrète. Ultrasons, radiographie ou courants de Foucault peuvent révéler certains défauts internes selon la géométrie.

Contrôle mental. Un contrôle ne prouve pas l'absence absolue de défaut; comparez la taille minimale détectable au défaut critique que la structure doit exclure.

Piège à éviter. Une méthode NDT n'est pas universelle: chaque technique a une sensibilité, une résolution et des zones aveugles.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [contrôle non destructif](#) » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Exercice guidé — contrôle non destructif

Situation à reconnaître. Ultrasons, radiographie ou courants de Foucault peuvent révéler certains défauts internes selon la géométrie.

Vérification demandée. Un contrôle ne prouve pas l'absence absolue de défaut; comparez la taille minimale détectable au défaut critique que la structure doit exclure.

Erreur à écarter. Une méthode NDT n'est pas universelle: chaque technique a une sensibilité, une résolution et des zones aveugles.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le contrôle non destructif cherche des défauts sans détruire la pièce, à l'aide de méthodes adaptées au matériau et au défaut recherché.

Test du cas

Un contrôle ne prouve pas l'absence absolue de défaut; comparez la taille minimale détectable au défaut critique que la structure doit exclure.

Piège exclu

Une méthode NDT n'est pas universelle: chaque technique a une sensibilité, une résolution et des zones aveugles.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « contrôle non destructif » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer.

Quantification

contrôle non destructif: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

contrôle non destructif: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Étude intégrée — Extraction, métallurgie, fabrication et contrôle qualité sur Mars

Situation à analyser. La colonie ne peut pas attendre chaque pièce depuis la Terre. Elle doit extraire une matière, la transformer, fabriquer une pièce et prouver qu'elle est assez bonne pour son usage.

- **minerais:** Un régolithe riche en oxydes ne devient pas automatiquement une source pratique de métal: extraction, énergie, pureté et déchets déterminent l'intérêt réel. Contrôle attendu: Une teneur élevée n'implique pas automatiquement une ressource exploitable: vérifiez masse totale, accessibilité, énergie d'extraction et impuretés.
- **métallurgie:** Après réduction d'un oxyde, le matériau peut encore nécessiter affinage, fusion, alliage et traitement thermique. Contrôle attendu: Le bilan matière doit conserver les éléments entre minerai, métal, scories et pertes; une récupération supérieure à la quantité initialement présente est impossible.
- **fabrication additive:** Une pièce imprimée peut avoir la bonne forme mais contenir porosités, anisotropie ou contraintes résiduelles. Contrôle attendu: Une pièce géométriquement correcte n'est pas forcément qualifiée: vérifiez matière, porosité, anisotropie, dimensions et propriétés mécaniques avant usage critique.
- **contrôle non destructif:** Ultrasons, radiographie ou courants de Foucault peuvent révéler certains défauts internes selon la géométrie. Contrôle attendu: Un contrôle ne prouve pas l'absence absolue de défaut; comparez la taille minimale détectable au défaut critique que la structure doit exclure.

Le diagnostic ne doit pas confondre « minerai » et « métallurgie ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Un régolithe riche en oxydes ne devient pas automatiquement une source pratique de métal: extraction, énergie, pureté et déchets déterminent l'intérêt réel. Le second doit être contrôlé autrement: Le bilan matière doit conserver les éléments entre minerai, métal, scories et pertes; une récupération supérieure à la quantité initialement présente est impossible.

Une seconde vérification croise « fabrication additive » et « contrôle non destructif ». Gardez comme alerte « Le terme « imprimé » ne signifie pas automatiquement rapide, local ou sûr pour une fonction critique. »; pour « contrôle non destructif », utilisez plutôt ce test: Un contrôle ne prouve pas l'absence absolue de défaut; comparez la taille minimale détectable au défaut critique que la structure doit exclure.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Extraction, métallurgie, fabrication et contrôle qualité sur Mars », classez les indices selon « minerai » (Une teneur élevée n'implique pas automatiquement une ressource exploitable: vérifiez masse totale, accessibilité, énergie d'extraction et impuretés.), « métallurgie » (Le bilan matière doit conserver les éléments entre minerai, métal, scories et pertes; une récupération supérieure à la quantité initialement présente est impossible.), « fabrication additive » (Une pièce géométriquement correcte n'est pas forcément qualifiée: vérifiez matière, porosité, anisotropie, dimensions et propriétés mécaniques avant usage critique.), « contrôle non destructif » (Un contrôle ne prouve pas l'absence absolue de défaut; comparez la taille minimale détectable au défaut critique que la structure doit exclure.) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour minerai, Dans ce module, une erreur sur « minerai » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer. Le garde-fou principal est: Confondre présence géologique et ressource utilisable conduit à surestimer l'autonomie industrielle. Pour métallurgie, Dans ce module, une erreur sur « métallurgie » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer. Le garde-fou principal est: Produire un métal n'est pas produire une pièce qualifiée: microstructure, défauts et propriétés doivent être contrôlés. Pour fabrication additive, Dans ce module, une erreur sur « fabrication additive » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer. Le garde-fou principal est: Le terme « imprimé » ne signifie pas automatiquement rapide, local ou sûr pour une fonction critique. Pour contrôle non destructif, Dans ce module, une erreur sur « contrôle non destructif » peut produire une pièce apparemment correcte mais impropre à la charge, ou gaspiller une ressource locale difficile à remplacer. Le garde-fou principal est: Une méthode NDT n'est pas universelle: chaque technique a une sensibilité, une résolution et des zones aveugles.

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.

Masse brute nécessaire

$$M_{\text{raw}} = M_{\text{product}} / (\text{grade} \times \text{recovery} \times \text{yield_proc})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $M_{\text{raw}} = M_{\text{product}} / (\text{grade} \times \text{recovery} \times \text{yield_proc})$ » dans « Masse brute nécessaire » ?

2 — Intuition sans symboles

Remonter du produit final vers la ressource brute oblige à tenir compte de chaque perte de la chaîne.

3 — Grandeurs

M_{raw} : masse brute à traiter [kg]; M_{product} : masse de produit qualifié [kg]; grade: teneur utile [sans dimension]; recovery: récupération du procédé [sans dimension]; yield_proc: rendement de fabrication [sans dimension]

4 — Formule

$$M_{\text{raw}} = M_{\text{product}} / (\text{grade} \times \text{recovery} \times \text{yield_proc})$$

5 — Lecture

Lire « $M_{\text{raw}} = M_{\text{product}} / (\text{grade} \times \text{recovery} \times \text{yield_proc})$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

M_{raw} : masse brute à traiter [kg]; M_{product} : masse de produit qualifié [kg]; grade: teneur utile [sans dimension]; recovery: récupération du procédé [sans dimension]; yield_proc: rendement de fabrication [sans dimension]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

M_{raw} [kg]; M_{product} [kg]; grade [sans dimension]; recovery [sans dimension]; yield_proc [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 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 $M_{\text{product}} = 100$ kg, grade = 0.2 sans dimension, recovery = 0.8 sans dimension, yield_proc = 0.9 sans dimension: $M_{\text{raw}} = 100 / (0.2 \times 0.8 \times 0.9) = 694.44$ kg.

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 excavation et stockage sur la masse brute, pas seulement sur la masse du produit fini.

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 $M_{\text{product}} = 50$ kg, grade = 0.1 sans dimension, recovery = 0.7 sans dimension, yield_proc = 0.8 sans dimension: $M_{\text{raw}} = 50 / (0.1 \times 0.7 \times 0.8)$?

Avec $M_{\text{product}} = 50$ kg, $\text{grade} = 0.1$ sans dimension, $\text{recovery} = 0.7$ sans dimension, $\text{yield_proc} = 0.8$ sans dimension: $M_{\text{raw}} = 50 / (0.1 \times 0.7 \times 0.8) = 892.86$ kg. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{product}} = 200$ kg, $\text{grade} = 0.25$ sans dimension, $\text{recovery} = 0.85$ sans dimension, $\text{yield_proc} = 0.95$ sans dimension: $M_{\text{raw}} = 200 / (0.25 \times 0.85 \times 0.95)$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{product}} = 200$ kg, $\text{grade} = 0.25$ sans dimension, $\text{recovery} = 0.85$ sans dimension, $\text{yield_proc} = 0.95$ sans dimension: $M_{\text{raw}} = 200 / (0.25 \times 0.85 \times 0.95) = 990.71$ kg. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Dimensionner excavation et stockage sur la masse brute, pas seulement sur la masse du produit fini.

Ressource contenue

$$M_{\text{contained}} = M_{\text{raw}} \times \text{grade}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $M_{\text{contained}} = M_{\text{raw}} \times \text{grade}$ » dans « Ressource contenue » ?

2 — Intuition sans symboles

La teneur transforme une masse brute en quantité théoriquement disponible avant pertes de récupération.

3 — Grandeurs

$M_{\text{contained}}$: masse utile contenue [kg]; M_{raw} : masse brute [kg]; grade : teneur utile [sans dimension]

4 — Formule

$$M_{\text{contained}} = M_{\text{raw}} \times \text{grade}$$

5 — Lecture

Lire « $M_{\text{contained}} = M_{\text{raw}} \times \text{grade}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

$M_{\text{contained}}$: masse utile contenue [kg]; M_{raw} : masse brute [kg]; grade : teneur utile [sans dimension]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

$M_{\text{contained}}$ [kg]; M_{raw} [kg]; grade [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 $M_{\text{raw}} = 500$ kg, $\text{grade} = 0.2$ sans dimension: $M_{\text{contained}} = 500 \times 0.2 = 100$ kg.

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

Ne pas confondre ressource contenue avec ressource effectivement récupérable.

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 $M_{\text{raw}} = 800$ kg, $\text{grade} = 0.12$ sans dimension: $M_{\text{contained}} = 800 \times 0.12$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{raw}} = 800$ kg, $\text{grade} = 0.12$ sans dimension: $M_{\text{contained}} = 800 \times 0.12 = 96$ kg. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{raw}} = 1000$ kg, $\text{grade} = 0.3$ sans dimension: $M_{\text{contained}} = 1000 \times 0.3$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{raw}} = 1000$ kg, $\text{grade} = 0.3$ sans dimension: $M_{\text{contained}} = 1000 \times 0.3 = 300$ kg. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Ne pas confondre ressource contenue avec ressource effectivement récupérable.

Masse récupérée

$$M_{\text{recovered}} = M_{\text{contained}} \times \text{recovery}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $M_{\text{recovered}} = M_{\text{contained}} \times \text{recovery}$ » dans « Masse récupérée » ?

2 — Intuition sans symboles

La récupération applique le rendement réel du procédé à la quantité présente dans le minerai ou régolithe.

3 — Grandeurs

$M_{\text{recovered}}$: masse récupérée [kg]; $M_{\text{contained}}$: masse contenue [kg]; recovery : fraction récupérée [sans dimension]

4 — Formule

$$M_{\text{recovered}} = M_{\text{contained}} \times \text{recovery}$$

5 — Lecture

Lire « $M_{\text{recovered}} = M_{\text{contained}} \times \text{recovery}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

$M_{\text{recovered}}$: masse récupérée [kg]; $M_{\text{contained}}$: masse contenue [kg]; recovery : fraction récupérée [sans dimension]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

$M_{\text{recovered}}$ [kg]; $M_{\text{contained}}$ [kg]; recovery [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 $M_{\text{contained}} = 100$ kg, $\text{recovery} = 0.8$ sans dimension: $M_{\text{recovered}} = 100 \times 0.8 = 80$ kg.

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 la masse récupérée au besoin de production avant d'engager une campagne de traitement.

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 $M_{\text{contained}} = 96$ kg, $\text{recovery} = 0.75$ sans dimension: $M_{\text{recovered}} = 96 \times 0.75$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{contained}} = 96$ kg, $\text{recovery} = 0.75$ sans dimension: $M_{\text{recovered}} = 96 \times 0.75 = 72$ kg. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{contained}} = 300$ kg, $\text{recovery} = 0.9$ sans dimension: $M_{\text{recovered}} = 300 \times 0.9$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{contained}} = 300$ kg, $\text{recovery} = 0.9$ sans dimension: $M_{\text{recovered}} = 300 \times 0.9 = 270$ kg. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Comparer la masse récupérée au besoin de production avant d'engager une campagne de traitement.

Énergie de procédé

$$E_{\text{process}} = e_{\text{spec}} \times M_{\text{product}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E_{\text{process}} = e_{\text{spec}} \times M_{\text{product}}$ » dans « Énergie de procédé » ?

2 — Intuition sans symboles

Une énergie spécifique transforme la masse à produire en charge énergétique totale.

3 — Grandeurs

E_{process} : énergie de procédé [kWh]; e_{spec} : énergie spécifique [kWh/kg]; M_{product} : masse produite [kg]

4 — Formule

$$E_{\text{process}} = e_{\text{spec}} \times M_{\text{product}}$$

5 — Lecture

Lire « $E_{\text{process}} = e_{\text{spec}} \times M_{\text{product}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

E_{process} : énergie de procédé [kWh]; e_{spec} : énergie spécifique [kWh/kg]; M_{product} : masse produite [kg]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

E_{process} [kWh]; e_{spec} [kWh/kg]; M_{product} [kg]

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 $e_{\text{spec}} = 12$ kWh/kg, $M_{\text{product}} = 100$ kg: $E_{\text{process}} = 12 \times 100 = 1200$ kWh.

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

Vérifier que l'énergie de procédé peut être fournie sans dégrader les charges 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

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 $e_{\text{spec}} = 8$ kWh/kg, $M_{\text{product}} = 50$ kg: $E_{\text{process}} = 8 \times 50$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $e_{\text{spec}} = 8$ kWh/kg, $M_{\text{product}} = 50$ kg: $E_{\text{process}} = 8 \times 50 = 400$ kWh. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $e_{\text{spec}} = 20$ kWh/kg, $M_{\text{product}} = 200$ kg: $E_{\text{process}} = 20 \times 200$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $e_{\text{spec}} = 20$ kWh/kg, $M_{\text{product}} = 200$ kg: $E_{\text{process}} = 20 \times 200 = 4000$ kWh. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Vérifier que l'énergie de procédé peut être fournie sans dégrader les charges vitales.

Temps de traitement

$$t_{\text{process}} = M_{\text{raw}} / q_{\text{feed}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{\text{process}} = M_{\text{raw}} / q_{\text{feed}}$ » dans « Temps de traitement » ?

2 — Intuition sans symboles

Le débit d'alimentation convertit le tonnage brut en durée de campagne.

3 — Grandeurs

t_{process} : durée de traitement [h]; M_{raw} : masse brute [kg]; q_{feed} : débit d'alimentation [kg/h]

4 — Formule

$$t_{\text{process}} = M_{\text{raw}} / q_{\text{feed}}$$

5 — Lecture

Lire « $t_{\text{process}} = M_{\text{raw}} / q_{\text{feed}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

t_{process} : durée de traitement [h]; M_{raw} : masse brute [kg]; q_{feed} : débit d'alimentation [kg/h]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

t_{process} [h]; M_{raw} [kg]; q_{feed} [kg/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 $M_{\text{raw}} = 500$ kg, $q_{\text{feed}} = 25$ kg/h: $t_{\text{process}} = 500 / 25 = 20$ h.

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

Inclure disponibilité, maintenance et nettoyage avant de promettre un délai calendrier.

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 $M_{\text{raw}} = 800$ kg, $q_{\text{feed}} = 40$ kg/h: $t_{\text{process}} = 800 / 40$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{raw}} = 800$ kg, $q_{\text{feed}} = 40$ kg/h: $t_{\text{process}} = 800 / 40 = 20$ h. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{raw}} = 1200$ kg, $q_{\text{feed}} = 60$ kg/h: $t_{\text{process}} = 1200 / 60$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{raw}} = 1200$ kg, $q_{\text{feed}} = 60$ kg/h: $t_{\text{process}} = 1200 / 60 = 20$ h. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Inclure disponibilité, maintenance et nettoyage avant de promettre un délai calendrier.

Rendement qualité

$$Y_quality = n_accepted / n_produced$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $Y_quality = n_accepted / n_produced$ » dans « Rendement qualité » ?

2 — Intuition sans symboles

La fabrication n'est utile que si les pièces passent réellement les critères de qualification.

3 — Grandeurs

$Y_quality$: fraction acceptée [sans dimension]; $n_accepted$: pièces acceptées [part]; $n_produced$: pièces produites [part]

4 — Formule

$$Y_quality = n_accepted / n_produced$$

5 — Lecture

Lire « $Y_quality = n_accepted / n_produced$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

$Y_quality$: fraction acceptée [sans dimension]; $n_accepted$: pièces acceptées [part]; $n_produced$: pièces produites [part]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

$Y_quality$ [sans dimension]; $n_accepted$ [part]; $n_produced$ [part]

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 $n_accepted = 92$ part, $n_produced = 100$ part: $Y_quality = 92 / 100 = 0.92$.

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

Une baisse du rendement qualité doit déclencher analyse de procédé avant d'augmenter le volume.

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 $n_accepted = 45$ part, $n_produced = 50$ part: $Y_quality = 45 / 50$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $n_accepted = 45$ part, $n_produced = 50$ part: $Y_quality = 45 / 50 = 0.9$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $n_{\text{accepted}} = 180$ part, $n_{\text{produced}} = 200$ part: $Y_{\text{quality}} = 180 / 200$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $n_{\text{accepted}} = 180$ part, $n_{\text{produced}} = 200$ part: $Y_{\text{quality}} = 180 / 200 = 0.9$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Une baisse du rendement qualité doit déclencher analyse de procédé avant d'augmenter le volume.

Progression de maîtrise

1. minerais: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. métallurgie: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. fabrication additive: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. contrôle non destructif: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Extraction, métallurgie, fabrication et contrôle qualité sur Mars »: confrontez « minerais » à « métallurgie »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 32 — minerais, métallurgie, fabrication additive, contrôle non destructif. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Reconstruire avec ses propres mots le mécanisme étudié dans « Comprendre avant de calculer ».
- Vérifier par un **ordre de grandeur** le résultat utilisé dans « minerais ».
- Proposer un contrôle indépendant avant de conclure sur « métallurgie ».
- Justifier une action de mission à partir des limites observées dans « fabrication additive ».

1. Une ressource n'est pas un matériau de construction

Le **régolithe martien** contient des minéraux, mais une pelle de **sol** n'est pas directement une poutre, un câble ou un réservoir. Il faut caractériser la matière, l'excaver, la transporter, la séparer, la traiter puis contrôler les propriétés du **produit**.

Cette chaîne possède un rendement à chaque étape. Une concentration faible ou une impureté peut multiplier l'énergie nécessaire. Le bilan industriel doit donc partir du produit final et remonter jusqu'au tonnage brut à extraire.

2. Excavation: production, traction et usure

Un excavateur terrestre utilise sa masse pour créer de la traction. En gravité réduite, cette logique change. Des systèmes à tambours opposés ou d'autres architectures cherchent à réduire les forces de réaction. Sur Mars, poussière abrasive, **température** et **maintenance** influencent autant la productivité que la capacité nominale du godet.

La métrique utile est le kilogramme livré au procédé par heure de **disponibilité**, pas le volume déplacé lors d'un essai idéal.

3. Bénéficiation et séparation

Avant la métallurgie, on peut concentrer certaines fractions par taille, densité, magnétisme ou chimie. Cette étape est appelée **beneficiation** en anglais. Elle vise à éviter de chauffer ou traiter inutilement toute la masse.

Une installation martienne doit cependant rester simple et réparable. Gagner 5 % de pureté avec une machine impossible à maintenir peut être un mauvais compromis.

4. Métallurgie: énergie, température, atmosphère et déchets

Extraire un métal exige de casser des liaisons chimiques, fondre ou réduire des oxydes et contrôler l'atmosphère du procédé. Le coût énergétique peut devenir dominant. La métallurgie crée aussi des scories, gaz, poussières et chaleur qui doivent être intégrés à l'habitat industriel.

Le produit doit ensuite posséder une composition et une microstructure compatibles avec l'usage. Un métal local approximatif peut convenir à un contrepoids, mais pas forcément à une pièce de [pression](#) ou un élément de moteur.

5. Fabrication additive et soustractive

La fabrication additive dépose ou fusionne de la matière couche par couche. Elle réduit certains besoins d'outillage et permet des formes complexes, mais elle n'élimine ni l'usinage, ni le traitement thermique, ni l'inspection. Certaines surfaces et tolérances demandent encore une finition soustractive.

La vraie question n'est donc pas « peut-on imprimer la pièce? » mais « peut-on produire une pièce dont les propriétés, dimensions et défauts sont connus et acceptables? ».

6. Métrologie: mesurer avant de faire confiance

La métrologie est la science de la mesure. Une base martienne aura besoin d'étalons, de procédures de calibration et de moyens de vérifier dimensions, masse, température, pression et propriétés électriques. Sans [traçabilité métrologique](#), deux ateliers peuvent produire des pièces nominalement identiques mais incompatibles.

Les instruments de mesure eux-mêmes vieillissent. Il faut donc prévoir des contrôles croisés et des références stables.

7. Qualifier une pièce fabriquée localement

Une [pièce critique](#) doit être reliée à son lot de matière, paramètres de fabrication, opérateur ou robot, machine, mesures et essais. La qualification peut inclure inspection visuelle, dimensionnelle, ressuage, ultrasons, radiographie ou éprouvettes de matériau selon le risque.

Toutes les pièces n'ont pas besoin du même niveau de preuve. La classification par criticité permet de réserver les contrôles coûteux aux fonctions où une rupture menace l'équipage ou la mission.

8. Exemple calculé: remonter du besoin final au tonnage brut

Une base doit produire 500 kg d'un matériau. Le minerai utile représente 12 % de la masse excavée. La séparation récupère 80 % de cette fraction et la transformation métallurgique a un rendement de 70 %. Le rendement global est $0,12 \times 0,80 \times 0,70 = 0,0672$.

La masse brute requise vaut $500 / 0,0672 \approx 7\,440$ kg. Ce calcul montre qu'une petite baisse de rendement amont peut multiplier les besoins d'excavation et d'énergie.

9. Bilan matière: distinguer ressource contenue et ressource réellement récupérée

Une erreur fréquente consiste à confondre la quantité d'une ressource présente dans un matériau avec la quantité que l'installation peut effectivement récupérer. Une chaîne d'extraction possède toujours des pertes: matière non excavée, eau restant liée au solide, condensation imparfaite, fuites, [purge](#) ou rejet hors spécification.

Hypothèse pédagogique. Une unité traite une masse $M = 1\,000$ kg de régolithe. La fraction massique d'eau supposée est $f = 5\%$, c'est-à-dire 0,05. La masse d'eau théoriquement contenue vaut $M_{\text{eau,th}} = M \times f = 1\,000 \times 0,05 = \mathbf{50\text{ kg}}$. On multiplie parce que 5 % signifie cinq centièmes de la masse totale.

Supposons ensuite un rendement global de **récupération** $\eta = 70\%$, soit 0,70. La masse effectivement récupérée vaut $M_{\text{eau,réc}} = M_{\text{eau,th}} \times \eta = 50 \times 0,70 = \mathbf{35\text{ kg}}$. Les 15 kg restants ne sont pas « détruits »: ils représentent, dans ce modèle simplifié, la part de la ressource qui n'atteint pas le réservoir produit.

Traduction opérationnelle. Si la colonie a besoin de 350 kg d'eau récupérée, dix lots identiques seraient nécessaires dans ce modèle, donc 10 000 kg de régolithe traité. L'étape suivante n'est pas d'ajouter des décimales mais de demander combien d'énergie, de temps machine, de pièces d'usure et de capacité de stockage exigent ces dix tonnes.

Exercice progressif

Reprenez le calcul avec 15 % de teneur, 75 % de récupération et 85 % de rendement métallurgique pour produire 1 200 kg. Calculez aussi l'énergie si le procédé consomme 8 kWh par kilogramme de produit final.

Correction raisonnée

La fraction du minerai qui devient produit final vaut $0,15 \times 0,75 \times 0,85 = 0,095625$. Pour obtenir 1 200 kg, il faut donc traiter environ $1\,200 / 0,095625 = 12\,549$ kg de matériau entrant, soit environ 12,55 tonnes. À 8 kWh par kilogramme de produit final, l'énergie de procédé est de 9 600 kWh, soit 9,6 MWh. Ce calcul ne comprend ni excavation, concassage, pompage, chauffage auxiliaire, maintenance ni stockage. Il montre surtout pourquoi teneur, récupération et rendement se multiplient: une baisse modeste de chacun peut fortement augmenter la masse à extraire et les besoins énergétiques.

Mini-projet

Concevoir une micro-usine martienne capable de produire des pièces non pressurisées: excavation, tri, matière première, fabrication, usinage, métrologie, contrôle qualité, stockage des déchets, maintenance et critères décidant qu'une pièce doit encore venir de Terre.

Sources primaires et passerelles

- NASA JSC — In-Situ Resource Utilization
- NASA — Advanced Manufacturing Technologies
- NASA-STD-6030 — Additive Manufacturing Requirements for Spaceflight Systems

Matrice de parité FR ↔ EN

Masse brute nécessaire	Required raw mass
Ressource contenue	Contained resource
Masse récupérée	Recovered mass
Énergie de procédé	Process energy
Temps de traitement	Processing time
Rendement qualité	Quality yield

Termes de la progression. [contrôle](#)

Repères lexicaux du module. [état dégradé](#)