

ISRU, ressources locales et première industrie martienne

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — ISRU, ressources locales et première industrie martienne: comment « La première usine doit être réparable » agit-il sur « Prospection et variabilité de la ressource », et quel repère issu de « Extraction et débit brut » permet de vérifier la décision?

Intuition. Une installation martienne qui augmente la production mais exige une pièce terrestre unique tous les trois mois ne crée pas une autonomie durable. Le design industriel doit intégrer accès, inspection, pièces d'usure, redondance, métrologie et procédures de redémarrage.

1

La première usine doit être réparable

Une installation martienne qui augmente la production mais exige une pièce terrestre unique tous les trois mois ne crée pas une autonomie durable.

2

Prospection et variabilité de la ressource

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

3

Extraction et débit brut

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Repère concret. La question opérationnelle est donc combien de kilogrammes utiles sont produits par kilowattheure disponible et pendant combien d'heures par sol le procédé peut fonctionner.

- La première usine doit être réparable — Une installation martienne qui augmente la production mais exige une pièce terrestre unique tous les trois mois ne crée pas une autonomie durable.
- Prospection et variabilité de la ressource — Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et...
- Extraction et débit brut — Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et...

CARTE DE MAÎTRISE · MODULE 28

Quatre repères à maîtriser — ISRU, ressources locales et première industrie martienne

La première usine doit être réparable

Définition

Une installation martienne qui augmente la production mais exige une pièce terrestre unique tous les trois mois ne crée pas une autonomie durable. Le design industriel doit intégrer accès, inspection, pièces d'usure, redondance, métrologie et procédures de redémarrage.

Intuition ou cas concret

La mesure finale de l'ISRU n'est donc pas seulement "kilogrammes produits".

Repère quantitatif

La question opérationnelle est donc combien de kilogrammes utiles sont produits par kilowattheure disponible et pendant combien d'heures par sol le procédé peut fonctionner.

Limite ou critère de vigilance

Une stratégie robuste peut faire fonctionner une unité robotique avant l'arrivée humaine afin d'accumuler oxygène, eau ou propulseur.

Exercice guidé — La première usine doit être réparable

Cas « La première usine doit être réparable » — La mesure finale de l'ISRU n'est donc pas seulement "kilogrammes produits". Repère: La question opérationnelle est donc combien de kilogrammes utiles sont produits par kilowattheure disponible et pendant combien d'heures par sol le procédé peut... Réserve: Une stratégie robuste peut faire fonctionner une unité robotique avant l'arrivée humaine afin d'accumuler oxygène, eau ou propulseur.

Corrigé raisonné — La première usine doit être réparable

Point de départ

Une installation martienne qui augmente la production mais exige une pièce terrestre unique tous les trois mois ne crée pas une autonomie durable. Le design industriel doit intégrer accès, inspection, pièces d'usure, redondance, métrologie et procédures de redémarrage.

Indice du cas

La question opérationnelle est donc combien de kilogrammes utiles sont produits par kilowattheure disponible et pendant combien d'heures par sol le procédé peut fonctionner.

Réserve à appliquer

Une stratégie robuste peut faire fonctionner une unité robotique avant l'arrivée humaine afin d'accumuler oxygène, eau ou propulseur.

Conclusion

Le critère de départ d'un équipage peut donc être un inventaire réellement mesuré, et non une promesse de capacité nominale.

Prospection et variabilité de la ressource

Définition

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Repère quantitatif

Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ».

Limite ou critère de vigilance

Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Exercice guidé — Prospection et variabilité de la ressource

Cas « Prospection et variabilité de la ressource » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Corrigé raisonné — Prospection et variabilité de la ressource

Point de départ

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Indice du cas

Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ».

Réserve à appliquer

Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Conclusion

Livable: données, unités, résultat, marge, décision.

Extraction et débit brut

Définition

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Repère quantitatif

Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ».

Limite ou critère de vigilance

Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Exercice guidé — Extraction et débit brut

Cas « Extraction et débit brut » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Corrigé raisonné — Extraction et débit brut

Point de départ

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Indice du cas

Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ».

Réserve à appliquer

Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Conclusion

Livable: données, unités, résultat, marge, décision.

Préparation et séparation

Définition

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Repère quantitatif

Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ».

Limite ou critère de vigilance

Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Exercice guidé — Préparation et séparation

Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Corrigé raisonné — Préparation et séparation

Point de départ

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Indice du cas

Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ».

Réserve à appliquer

Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Conclusion

Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Repères avant de commencer: modules 00 à 22 recommandés selon le sujet. Si une notion antérieure devient bloquante pour « ISRU, ressources locales et première industrie martienne », son rôle est rappelé dans le raisonnement plutôt que supposé connu.

Avant ce module: 03 — Chimie utile: de la mole aux boucles $H_2/O_2/CO_2$, 18 — Thermodynamique, fluides & contrôle thermique et 27 — ECLSS avancé: boucles fermées, qualité et modes dégradés.

Objectifs de maîtrise

- Construire une chaîne cause → observation → mesure pour « ISRU: remplacer une cargaison par une chaîne de procédés ».
- Refaire manuellement la vérification la plus utile à « MOXIE: démonstration de principe, pas usine de colonie ».
- Décrire la panne, l'incertitude ou la limite qui menace « Eau: ressource, procédé et géographie ».
- Expliquer comment « Du régolithe au matériau » modifie l'architecture ou les opérations.

1. ISRU: remplacer une cargaison par une chaîne de procédés

ISRU signifie utilisation des ressources in situ. Produire de l'oxygène à partir du CO_2 martien peut réduire la masse qu'il faut lancer depuis la Terre, mais le "gain" n'existe que si compresseur, réacteur, alimentation, purification, stockage et maintenance fonctionnent ensemble.

Chaque kilogramme économisé au lancement devient donc une obligation industrielle sur Mars.

2. MOXIE: démonstration de principe, pas usine de colonie

MOXIE sur Perseverance a démontré la production d'oxygène à partir de l'atmosphère martienne à petite échelle et dans différentes conditions. Cette réussite valide une technologie, pas la capacité propulsive d'une mission humaine.

Passer de grammes par heure à des tonnes impose de changer d'échelle sur puissance, compresseurs, thermique, durée de fonctionnement et stockage cryogénique.

3. Eau: ressource, procédé et géographie

La glace d'eau peut fournir boisson, hygiène, oxygène et hydrogène, mais l'extraction dépend de la profondeur, de la concentration, de la température et du matériau environnant. Un gisement n'est pas une ressource tant qu'une chaîne d'extraction et de purification n'est pas définie.

Le choix du site de base devient alors un compromis entre sécurité d'atterrissage, énergie, science et accès aux ressources.

4. Du régolithe au matériau

Le régolithe peut être tamisé, compacté, chauffé ou utilisé comme matière première de procédés. Mais ses propriétés varient et les perchlorates ou poussières peuvent imposer des traitements.

Une industrie crédible commence par la caractérisation: granulométrie, minéralogie, humidité, contaminants et comportement mécanique.

5. La première usine doit être réparable

Une installation martienne qui augmente la production mais exige une pièce terrestre unique tous les trois mois ne crée pas une autonomie durable. Le design industriel doit intégrer accès, inspection, pièces d'usure, redondance, métrologie et procédures de redémarrage.

La mesure finale de l'ISRU n'est donc pas seulement "kilogrammes produits". Il faut suivre énergie par kilogramme, disponibilité, pureté, maintenance et dépendances importées.

6. De la ressource au produit: l'ISRU est une chaîne de procédé

Dire qu'une ressource existe dans le régolithe ou l'atmosphère ne suffit pas. Il faut l'acquérir, la préparer, la faire entrer dans un réacteur, séparer les produits, les purifier, les stocker et contrôler les déchets. Le débit de toute la chaîne est limité par son maillon le plus lent. Une architecture ISRU doit donc afficher les rendements par étape et les pertes, pas seulement la réaction chimique centrale.

7. L'énergie est souvent le vrai débit de production

Extraction, chauffage, compression, électrolyse et liquéfaction consomment de l'énergie. La question opérationnelle est donc combien de kilogrammes utiles sont produits par kilowattheure disponible et pendant combien d'heures par sol le procédé peut fonctionner. Lorsque le réseau électrique entre en mode dégradé, l'ISRU peut devenir une charge flexible; mais interrompre un four ou un cycle thermique au mauvais moment peut endommager le procédé. La flexibilité doit être conçue, pas supposée.

8. Démarrer avant l'équipage: transformer la production en réserve vérifiée

Une stratégie robuste peut faire fonctionner une unité robotique avant l'arrivée humaine afin d'accumuler oxygène, eau ou propulseur. Mais une masse stockée n'est utile que si sa qualité, son réservoir et sa capacité de transfert sont vérifiés. Le critère de départ d'un équipage peut donc être un inventaire réellement mesuré, et non une promesse de capacité nominale. Cette logique transforme l'ISRU en condition de mission testable.

Cas industriel: toute la chaîne doit tenir

Une usine ISRU peut posséder un excellent électrolyseur et rester inutilisable si excavation, séchage, purification, compression ou stockage limite le débit. L'ingénieur suit matière et énergie de l'entrée jusqu'au produit stocké. Chaque étape possède rendement, capacité, arrêts de maintenance et consommables. Le débit global est limité par le goulot d'étranglement, pas par la performance du composant le plus spectaculaire.

9. Exemple calculé pas à pas

Une unité produit 2,0 kg d'oxygène par heure lorsqu'elle consomme 5 kW et fonctionne 10 h par sol. La production est 20 kg/sol et l'énergie 50 kWh/sol. Sur 30 sols sans panne, elle fournit 600 kg pour 1 500 kWh. Si la disponibilité réelle tombe à 80 %, la production devient 480 kg. Le dimensionnement doit donc séparer débit nominal et disponibilité opérationnelle.

10. Exercice progressif

Dimensionner une campagne visant 10 tonnes d'oxygène avant l'arrivée d'un équipage. Choisir débit horaire, heures de fonctionnement par sol, disponibilité et marge de stockage. Calculer le nombre de sols requis et l'énergie totale.

11. Solution raisonnée

Produire 30 kg d'O₂ par jour pendant 300 jours fournit 9 000 kg. À 18 kWh par kilogramme, l'énergie totale vaut 162 000 kWh, soit 162 MWh. Avec 80 % de disponibilité, la puissance nécessaire pendant les heures réellement productives doit être supérieure à celle déduite d'une division par 365 jours; disponibilité et stockage appartiennent donc au dimensionnement.

12. Mini-projet de validation

Concevoir une chaîne ISRU complète depuis l'acquisition de matière jusqu'au stockage: équipements, rendements, énergie, maintenance, contrôle qualité, réserves, déchets, seuil de départ équipage et stratégie après panne.

Approfondissement du module 28: comprendre, calculer, vérifier et décider

Objectif du module — transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Repères du passage: ordre de grandeur

1. Prospection et variabilité de la ressource

Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

Mini-leçons quantitatives canoniques — protocole V7.4

Toutes les formules quantitatives de ce module sont traitées comme de vraies mini-leçons : intuition, symboles, unités, cas numérique, contrôles, sensibilité, deux exercices corrigés et décision mission.

1. Prospection et variabilité de la ressource

$$CV = \sigma / \mu$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $CV = \sigma / \mu$ » dans « 1. Prospection et variabilité de la ressource » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 1. Prospection et variabilité de la ressource », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

CV: coefficient de variation, rapport sans dimension de dispersion relative; σ : écart-type de la grandeur échantillonnée; μ : moyenne de cette même grandeur.

4 — Formule

$$CV = \sigma / \mu$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: «CV égale sigma divisé par mu».

6 — Symboles et sens

CV: coefficient de variation, rapport sans dimension de dispersion relative; σ : écart-type de la grandeur échantillonnée; μ : moyenne de cette même grandeur.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

σ et μ dans la même unité que la grandeur étudiée; CV est sans dimension.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Le coefficient de variation rapporte l'écart-type à la moyenne de la même grandeur afin de mesurer une dispersion relative indépendante de l'unité.

11 — Hypothèses

Ne pas extrapoler CV entre périodes ou systèmes distincts sans redéfinir σ et μ . La division est aussi interdite lorsque $\mu=0$.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $CV \times \mu$ doit redonner σ . σ et μ doivent porter la même unité avant le quotient.

13 — Cas numérique

$\mu = 6.0\%$ $\sigma = 0.6$ percentage points $CV = 0.6/6.0 = 0.10 = 10\%$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le coefficient de variation rapporte l'écart-type à la moyenne de la même grandeur afin de mesurer une dispersion relative indépendante de l'unité.

15 — Vérification

Contrôle inverse: $CV \times \mu$ doit redonner σ . σ et μ doivent porter la même unité avant le quotient.

16 — Estimation mentale

La fraction suggère son propre contrôle d'échelle: numérateur beaucoup plus grand que dénominateur implique $CV \gg 1$; numérateur plus petit implique $CV < 1$.

17 — Interprétation

À l'étape «1. Prospection et variabilité de la ressource», « $CV = \sigma / \mu$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 1. Prospection et variabilité de la ressource »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le ratio est proportionnel à σ et inversement proportionnel à μ . Cette propriété permet de prévoir la direction d'un scénario perturbé.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\mu = 12$ kg/t; $\sigma = 1.8$ kg/t. Appliquez « $CV = \sigma / \mu$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\mu = 12$ kg/t; $\sigma = 1.8$ kg/t. Relation appliquée : $CV = \sigma / \mu$. Calcul et résultat : $CV = 1.8/12 = 0.15 = 15\%$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 1. Prospection et variabilité de la ressource ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 1. Prospection et variabilité de la ressource », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\mu = 6.0\%$ $\sigma = 0.6$ pourcentage points $CV = 0.6/6.0 = 0.10 = 10\%$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «1. Prospection et variabilité de la ressource», « $CV = \sigma / \mu$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

2. Extraction et débit brut

$$Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$ » dans « 2. Extraction et débit brut » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 2. Extraction et débit brut », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

$Q_{\text{extraction}}$: débit massique moyen d'extraction; m_{extrait} : masse extraite pendant l'intervalle; t : durée de cet intervalle.

4 — Formule

$$Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: « Q indice extraction égale m indice extrait divisé par t ».

6 — Symboles et sens

$Q_{\text{extraction}}$: débit massique moyen d'extraction; m_{extrait} : masse extraite pendant l'intervalle; t : durée de cet intervalle.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

m_{extrait} en kg ou t; t en h ou s; $Q_{\text{extraction}}$ en kg/h, t/h ou kg/s selon la base choisie.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Une masse divisée par sa durée d'extraction donne un débit massique moyen.

11 — Hypothèses

Ne pas extrapoler $Q_{\text{extraction}}$ entre périodes ou systèmes distincts sans redéfinir m_{extrait} et t . La division est aussi interdite lorsque $t=0$.

12 — Contrôle indépendant

$Q_{\text{extraction}} \times t$ doit redonner m_{extrait} .

13 — Cas numérique

$$m_{\text{extrait}} = 480 \text{ kg} \quad t = 8.0 \text{ h} \quad Q_{\text{extraction}} = 480/8.0 = 60 \text{ kg/h}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Une masse divisée par sa durée d'extraction donne un débit massique moyen.

15 — Vérification

$Q_{\text{extraction}} \times t$ doit redonner m_{extrait} .

16 — Estimation mentale

La fraction suggère son propre contrôle d'échelle: numérateur beaucoup plus grand que dénominateur implique $Q_{\text{extraction}} \gg 1$; numérateur plus petit implique $Q_{\text{extraction}} < 1$.

17 — Interprétation

À l'étape «2. Extraction et débit brut», « $Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 2. Extraction et débit brut »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le ratio est proportionnel à m_{extrait} et inversement proportionnel à t . Cette propriété permet de prévoir la direction d'un scénario perturbé.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 900, 15 h. Appliquez « $Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 900, 15 h. Relation appliquée : $Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$. Calcul et résultat : $Q = 900/15 = 60 \text{ kg/h}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 2. Extraction et débit brut ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 2. Extraction et débit brut », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$m_{\text{extrait}} = 480 \text{ kg}$ $t = 8.0 \text{ h}$ $Q_{\text{extraction}} = 480/8.0 = 60 \text{ kg/h}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «2. Extraction et débit brut», « $Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

3. Préparation et séparation

$$M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$ » dans « 3. Préparation et séparation » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 3. Préparation et séparation », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

M_produit: masse de produit récupérée; M_alim: masse de matière alimentant le procédé; x: fraction massique du constituant recherché dans l'alimentation; η : rendement de récupération.

4 — Formule

$$M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: «M indice produit égale M indice alim multiplié par x multiplié par éta».

6 — Symboles et sens

M_produit: masse de produit récupérée; M_alim: masse de matière alimentant le procédé; x: fraction massique du constituant recherché dans l'alimentation; η : rendement de récupération.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Exprimer M_produit et M_alim avec une unité commune de masse; x et η sans dimension entre 0 et 1.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

$M_{\text{alim}} \times x$ donne la masse théoriquement disponible du constituant; η applique le rendement réel de récupération.

11 — Hypothèses

Le produit donne M_produit sous les hypothèses de «3. Préparation et séparation». Des limites de capacité, non-linéarités ou corrélations entre facteurs peuvent nécessiter une autre relation.

12 — Contrôle indépendant

$M_{\text{produit}}/M_{\text{alim}}$ doit valoir $x\eta$.

13 — Cas numérique

$$M_{\text{alim}} = 1,000 \text{ kg} \quad x = 0.12 \quad \eta = 0.75 \quad M_{\text{produit}} = 1000 \times 0.12 \times 0.75 = 90 \text{ kg}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

$M_{\text{alim}} \times x$ donne la masse théoriquement disponible du constituant; η applique le rendement réel de récupération.

15 — Vérification

$M_{\text{produit}}/M_{\text{alim}}$ doit valoir $x\eta$.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental efficace sépare mantisses et puissances de dix des facteurs de $M_{\text{alim}} \times x \times \eta$; leur recombinaison donne l'ordre attendu pour M_produit.

17 — Interprétation

À l'étape «3. Préparation et séparation», « $M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 3. Préparation et séparation »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Une variation isolée de k sur un facteur multiplie M_produit par k. Lorsque plusieurs facteurs changent, leurs coefficients multiplicatifs doivent être combinés.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : Alimentation = 800 kg; $x = 0.10$; $\eta = 0.80$. Appliquez « $M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : Alimentation = 800 kg; $x = 0.10$; $\eta = 0.80$. Relation appliquée : $M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$. Calcul et résultat : $M = 800 \times 0.10 \times 0.80 = 64$ kg. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 3. Préparation et séparation ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 3. Préparation et séparation », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$M_{\text{alim}} = 1,000$ kg $x = 0.12$ $\eta = 0.75$ $M_{\text{produit}} = 1000 \times 0.12 \times 0.75 = 90$ kg Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «3. Préparation et séparation», « $M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

4. Eau comme ressource industrielle

$$m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$ » dans « 4. Eau comme ressource industrielle » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 4. Eau comme ressource industrielle », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

m_{eau} : masse d'eau récupérée; x_{eau} : fraction massique d'eau contenue dans le régolithe traité; $m_{\text{régolithe}}$: masse de régolithe traitée; η : rendement global de récupération de cette eau.

4 — Formule

$$m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: «m indice eau égale x indice eau multiplié par m indice régolithe multiplié par éta».

6 — Symboles et sens

m_{eau} : masse d'eau récupérée; x_{eau} : fraction massique d'eau contenue dans le régolithe traité; $m_{\text{régolithe}}$: masse de régolithe traitée; η : rendement global de récupération de cette eau.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Pour m_{eau} et $m_{\text{régolithe}}$, choisir une unité de masse identique; x_{eau} et η sans dimension, chacun compris entre 0 et 1 dans ce modèle.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

$x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}}$ donne la masse d'eau théoriquement présente; multiplier par η donne la fraction effectivement récupérée.

11 — Hypothèses

Le produit donne m_{eau} sous les hypothèses de «4. Eau comme ressource industrielle». Des limites de capacité, non-linéarités ou corrélations entre facteurs peuvent nécessiter une autre relation.

12 — Contrôle indépendant

$m_{\text{eau}}/m_{\text{régolithe}}$ doit valoir $x_{\text{eau}} \times \eta$. À $\eta=1$, la récupération ne peut dépasser la teneur massique x_{eau} du régolithe.

13 — Cas numérique

$x_{\text{eau}} = 0.08$ $m_{\text{régolithe}} = 500$ kg $\eta = 0.70$ $m_{\text{eau}} = 0.08 \times 500 \times 0.70 = 28$ kg

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

$x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}}$ donne la masse d'eau théoriquement présente; multiplier par η donne la fraction effectivement récupérée.

15 — Vérification

$m_{\text{eau}}/m_{\text{régolithe}}$ doit valoir $x_{\text{eau}} \times \eta$. À $\eta=1$, la récupération ne peut dépasser la teneur massique x_{eau} du régolithe.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental efficace sépare mantisses et puissances de dix des facteurs de $x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$; leur recombinaison donne l'ordre attendu pour m_{eau} .

17 — Interprétation

À l'étape «4. Eau comme ressource industrielle», « $m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario «4. Eau comme ressource industrielle»; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Une variation isolée de k sur un facteur multiplie m_{eau} par k . Lorsque plusieurs facteurs changent, leurs coefficients multiplicatifs doivent être combinés.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $x = 0.06$; $m_{\text{régolithe}} = 1,200$ kg; $\eta = 0.75$. Appliquez « $m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $x = 0.06$; $m_{\text{régolithe}} = 1,200$ kg; $\eta = 0.75$. Relation appliquée : $m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$. Calcul et résultat : $m = 0.06 \times 1200 \times 0.75 = 54$ kg. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour «4. Eau comme ressource industrielle».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de «4. Eau comme ressource industrielle», refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$x_{\text{eau}} = 0.08$ $m_{\text{régolithe}} = 500 \text{ kg}$ $\eta = 0.70$ $m_{\text{eau}} = 0.08 \times 500 \times 0.70 = 28 \text{ kg}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 – Décision mission

À l'étape «4. Eau comme ressource industrielle», « $m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

5. Oxygène et carburants

$$m_{\text{O}_2} = \eta \times (16 / 44) \times m_{\text{CO}_2}$$

1 – Question concrète

Que permet de calculer « $m_{\text{O}_2} = \eta \times (16 / 44) \times m_{\text{CO}_2}$ » dans « 5. Oxygène et carburants » ?

2 – Intuition sans symboles

Dans « 5. Oxygène et carburants », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 – Grandeurs

m_{O_2} : masse d'oxygène produite; η : rendement global du procédé par rapport au maximum stœchiométrique; 16/44: rapport massique idéal d'O₂ produit par masse de CO₂ traitée pour la réaction considérée; m_{CO_2} : masse de CO₂ traitée.

4 – Formule

$$m_{\text{O}_2} = \eta \times (16 / 44) \times m_{\text{CO}_2}$$

5 – Lecture

À l'oral, dire: «m indice O₂ égale éta multiplié par (16 divisé par 44) multiplié par m indice CO₂».

6 – Symboles et sens

m_{O_2} : masse d'oxygène produite; η : rendement global du procédé par rapport au maximum stœchiométrique; 16/44: rapport massique idéal d'O₂ produit par masse de CO₂ traitée pour la réaction considérée; m_{CO_2} : masse de CO₂ traitée.

7 – Prononciation

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

8 – Unités

Une même unité de masse doit servir à m_{O_2} et m_{CO_2} ; η et 16/44 sans dimension.

9 – Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 – Pourquoi cette opération

Le rapport stœchiométrique fixe le maximum théorique, puis η réduit ce maximum pour représenter le rendement réel.

11 – Hypothèses

Le produit donne m_{O_2} sous les hypothèses de «5. Oxygène et carburants». Des limites de capacité, non-linéarités ou corrélations entre facteurs peuvent nécessiter une autre relation.

12 – Contrôle indépendant

À $\eta=1$, $m_{\text{O}_2}/m_{\text{CO}_2}$ doit valoir $16/44 \approx 0,364$.

13 – Cas numérique

$$m_{\text{CO}_2} = 100 \text{ kg} \quad \eta = 0.90 \quad m_{\text{O}_2} = 0.90 \times (16/44) \times 100 \approx 32.7 \text{ kg}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le rapport stœchiométrique fixe le maximum théorique, puis η réduit ce maximum pour représenter le rendement réel.

15 — Vérification

À $\eta=1$, m_{O_2}/m_{CO_2} doit valoir $16/44 \approx 0,364$.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental efficace sépare mantisses et puissances de dix des facteurs de $\eta \times (16 / 44) \times m_{CO_2}$; leur recombinaison donne l'ordre attendu pour m_{O_2} .

17 — Interprétation

À l'étape «5. Oxygène et carburants», « $m_{O_2} = \eta \times (16 / 44) \times m_{CO_2}$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 5. Oxygène et carburants »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Une variation isolée de k sur un facteur multiplie m_{O_2} par k . Lorsque plusieurs facteurs changent, leurs coefficients multiplicatifs doivent être combinés.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\eta = 0.85$ on the même basis; autres valeurs: 220. Appliquez « $m_{O_2} = \eta \times (16 / 44) \times m_{CO_2}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\eta = 0.85$ on the même basis; autres valeurs: 220. Relation appliquée : $m_{O_2} = \eta \times (16 / 44) \times m_{CO_2}$. Calcul et résultat : théorique= $220 \times 16/44=80.0$ kg; produit= 68.0 kg. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 5. Oxygène et carburants ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 5. Oxygène et carburants », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$m_{CO_2} = 100$ kg $\eta = 0.90$ $m_{O_2} = 0.90 \times (16/44) \times 100 \approx 32.7$ kg Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «5. Oxygène et carburants», « $m_{O_2} = \eta \times (16 / 44) \times m_{CO_2}$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

6. Régolithe et matériaux de construction

$$m_{\text{pièce}} = \rho \times V$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{\text{pièce}} = \rho \times V$ » dans « 6. Régolithe et matériaux de construction » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 6. Régolithe et matériaux de construction », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

$m_{\text{pièce}}$: masse de la pièce; ρ : masse volumique du matériau; V : volume de la pièce.

4 — Formule

$$m_{\text{pièce}} = \rho \times V$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: « m indice pièce égale ρ multiplié par V ».

6 — Symboles et sens

$m_{\text{pièce}}$: masse de la pièce; ρ : masse volumique du matériau; V : volume de la pièce.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

$m_{\text{pièce}}$ en kg; ρ en kg/m^3 ; V en m^3 .

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La grandeur $m_{\text{pièce}}$ est définie par le produit des termes de $\rho \times V$. Cette écriture encode une composition multiplicative plutôt qu'une simple juxtaposition de paramètres.

11 — Hypothèses

Le produit donne $m_{\text{pièce}}$ sous les hypothèses de «6. Régolithe et matériaux de construction». Des limites de capacité, non-linéarités ou corrélations entre facteurs peuvent nécessiter une autre relation.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Un produit correct doit pouvoir être «défait»: diviser $m_{\text{pièce}}$ par un facteur non nul et retrouver la multiplication des autres termes de $\rho \times V$.

13 — Cas numérique

$$\rho = 2,700 \text{ kg/m}^3 \quad V = 0.0030 \text{ m}^3 \quad m_{\text{pièce}} = 2700 \times 0.0030 = 8.1 \text{ kg}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La grandeur $m_{\text{pièce}}$ est définie par le produit des termes de $\rho \times V$. Cette écriture encode une composition multiplicative plutôt qu'une simple juxtaposition de paramètres.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Un produit correct doit pouvoir être «défait»: diviser $m_{\text{pièce}}$ par un facteur non nul et retrouver la multiplication des autres termes de $\rho \times V$.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental efficace sépare mantisses et puissances de dix des facteurs de $\rho \times V$; leur recombinaison donne l'ordre attendu pour $m_{\text{pièce}}$.

17 — Interprétation

À l'étape «6. Régolithe et matériaux de construction», « $m_{\text{pièce}} = \rho \times V$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 6. Régolithe et matériaux de construction »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Une variation isolée de k sur un facteur multiplie $m_{\text{pièce}}$ par k . Lorsque plusieurs facteurs changent, leurs coefficients multiplicatifs doivent être combinés.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\rho = 7,800 \text{ kg/m}^3$; $V = 0.0015 \text{ m}^3$. Appliquez « $m_{\text{pièce}} = \rho \times V$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\rho = 7,800 \text{ kg/m}^3$; $V = 0.0015 \text{ m}^3$. Relation appliquée : $m_{\text{pièce}} = \rho \times V$. Calcul et résultat : $m = 11.7 \text{ kg}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 6. Régolithe et matériaux de construction ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 6. Régolithe et matériaux de construction », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\rho = 2,700 \text{ kg/m}^3$ $V = 0.0030 \text{ m}^3$ $m_{\text{pièce}} = 2700 \times 0.0030 = 8.1 \text{ kg}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «6. Régolithe et matériaux de construction», « $m_{\text{pièce}} = \rho \times V$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

7. Disponibilité des machines

$$Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$ » dans « 7. Disponibilité des machines » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 7. Disponibilité des machines », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

Q_{utile} : débit de production réellement exploitable; Q_{nom} : débit nominal de la machine; A : disponibilité de la machine, fraction du temps où elle peut produire; η : rendement utile du procédé.

4 — Formule

$$Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: « Q indice utile égale Q indice nom multiplié par A multiplié par η ».

6 — Symboles et sens

Q_{utile} : débit de production réellement exploitable; Q_{nom} : débit nominal de la machine; A : disponibilité de la machine, fraction du temps où elle peut produire; η : rendement utile du procédé.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Q_{utile} et Q_{nom} s'emploient après conversion vers une unité de débit commune; A et η sans dimension, compris entre 0 et 1 dans ce modèle. Le produit conserve donc l'unité de Q_{nom} .

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Le débit nominal est réduit une première fois par la fraction de temps disponible, puis par le rendement du procédé. Les deux coefficients sont multiplicatifs et sans dimension.

11 — Hypothèses

A et η ne sont pas des surfaces. Ils doivent être mesurés sur un périmètre et une période compatibles; leurs dépendances éventuelles à la charge ne sont pas représentées ici.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle inverse: $Q_{\text{utile}}/Q_{\text{nom}}$ doit être égal à $A \times \eta$. Si $A = 1$ et $\eta = 1$, Q_{utile} doit retrouver Q_{nom} .

13 — Cas numérique

$Q_{\text{nom}} = 100 \text{ kg/h}$ $A = 0.80$ $\eta = 0.75$ $Q_{\text{utile}} = 100 \times 0.80 \times 0.75 = 60 \text{ kg/h}$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le débit nominal est réduit une première fois par la fraction de temps disponible, puis par le rendement du procédé. Les deux coefficients sont multiplicatifs et sans dimension.

15 — Vérification

Contrôle inverse: $Q_{\text{utile}}/Q_{\text{nom}}$ doit être égal à $A \times \eta$. Si $A = 1$ et $\eta = 1$, Q_{utile} doit retrouver Q_{nom} .

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental efficace sépare mantisses et puissances de dix des facteurs de $Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$; leur recombinaison donne l'ordre attendu pour Q_{utile} .

17 — Interprétation

À l'étape «7. Disponibilité des machines», « $Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario «7. Disponibilité des machines»; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À Q_{nom} et η fixes, +10 % relatif de disponibilité entraîne +10 % relatif de Q_{utile} tant que A reste dans son domaine physique.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $Q_{\text{nom}} = 150 \text{ kg/h}$; $A = 0.70$; $\eta = 0.80$. Appliquez « $Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $Q_{\text{nom}} = 150 \text{ kg/h}$; $A = 0.70$; $\eta = 0.80$. Relation appliquée : $Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$. Calcul et résultat : $Q = 150 \times 0.70 \times 0.80 = 84 \text{ kg/h}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour «7. Disponibilité des machines».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de «7. Disponibilité des machines», refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$Q_{\text{nom}} = 100 \text{ kg/h}$ $A = 0.80$ $\eta = 0.75$ $Q_{\text{utile}} = 100 \times 0.80 \times 0.75 = 60 \text{ kg/h}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «7. Disponibilité des machines», « $Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

8. Rendement et pureté

$$R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$ » dans «8. Rendement et pureté» ?

2 — Intuition sans symboles

Dans «8. Rendement et pureté», rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

R: rendement massique global du procédé; m_{produit} : masse de produit utile obtenue; m_{alim} : masse de matière alimentée.

4 — Formule

$$R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: «R égale m indice produit divisé par m indice alim».

6 — Symboles et sens

R: rendement massique global du procédé; m_{produit} : masse de produit utile obtenue; m_{alim} : masse de matière alimentée.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Exprimer m_{produit} et m_{alim} avec une unité commune de masse; R sans dimension.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Le quotient mesure quelle fraction de la masse alimentée devient produit utile.

11 — Hypothèses

Ne pas extrapoler R entre périodes ou systèmes distincts sans redéfinir m_{produit} et m_{alim} . La division est aussi interdite lorsque $m_{\text{alim}}=0$.

12 — Contrôle indépendant

$R \times m_{\text{alim}}$ doit redonner m_{produit} .

13 — Cas numérique

$$m_{\text{produit}} = 72 \text{ kg} \quad m_{\text{alim}} = 120 \text{ kg} \quad R = 72/120 = 0.60 = 60\%$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le quotient mesure quelle fraction de la masse alimentée devient produit utile.

15 — Vérification

$R \times m_{\text{alim}}$ doit redonner m_{produit} .

16 — Estimation mentale

La fraction suggère son propre contrôle d'échelle: numérateur beaucoup plus grand que dénominateur implique $R \gg 1$; numérateur plus petit implique $R < 1$.

17 — Interprétation

À l'étape «8. Rendement et pureté», « $R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 8. Rendement et pureté »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le ratio est proportionnel à m_{produit} et inversement proportionnel à m_{alim} . Cette propriété permet de prévoir la direction d'un scénario perturbé.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : Produit = 95 kg à partir de 125 kg alimentation. Appliquez « $R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : Produit = 95 kg à partir de 125 kg alimentation. Relation appliquée : $R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$. Calcul et résultat : $Y = 95/125 = 0.76 = 76\%$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 8. Rendement et pureté ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 8. Rendement et pureté », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$m_{\text{produit}} = 72 \text{ kg}$ $m_{\text{alim}} = 120 \text{ kg}$ $R = 72/120 = 0.60 = 60\%$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «8. Rendement et pureté», « $R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

9. Énergie spécifique des procédés

$$E = e_{\text{spec}} \times m$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E = e_{\text{spec}} \times m$ » dans « 9. Énergie spécifique des procédés » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 9. Énergie spécifique des procédés », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

E: énergie; e_{spec} : énergie spécifique; m: masse.

4 — Formule

$$E = e_{\text{spec}} \times m$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: «E égale e indice spec multiplié par m».

6 — Symboles et sens

E: énergie; e_{spec} : énergie spécifique; m: masse.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Pour l'ISRU industriel, côté énergie spécifique: énergie → J, Wh ou kWh; énergie spécifique → kWh/kg ou J/kg; masse → kg.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La grandeur E est définie par le produit des termes de $e_{\text{spec}} \times m$. Cette écriture encode une composition multiplicative plutôt qu'une simple juxtaposition de paramètres.

11 — Hypothèses

Le produit donne E sous les hypothèses de «9. Énergie spécifique des procédés». Des limites de capacité, non-linéarités ou corrélations entre facteurs peuvent nécessiter une autre relation.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Un produit correct doit pouvoir être «défait»: diviser E par un facteur non nul et retrouver la multiplication des autres termes de $e_{\text{spec}} \times m$.

13 — Cas numérique

$e_{\text{spec}} = 2.5 \text{ kWh/kg}$ $m = 40 \text{ kg}$ $E = 2.5 \times 40 = 100 \text{ kWh}$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La grandeur E est définie par le produit des termes de $e_{\text{spec}} \times m$. Cette écriture encode une composition multiplicative plutôt qu'une simple juxtaposition de paramètres.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Un produit correct doit pouvoir être «défait»: diviser E par un facteur non nul et retrouver la multiplication des autres termes de $e_{\text{spec}} \times m$.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental efficace sépare mantisses et puissances de dix des facteurs de $e_{\text{spec}} \times m$; leur recombinaison donne l'ordre attendu pour E.

17 — Interprétation

À l'étape «9. Énergie spécifique des procédés», « $E = e_{\text{spec}} \times m$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario «9. Énergie spécifique des procédés»; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Une variation isolée de k sur un facteur multiplie E par k. Lorsque plusieurs facteurs changent, leurs coefficients multiplicatifs doivent être combinés.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $e_{\text{spec}} = 1.8 \text{ kWh/kg}$ for 75 kg. Appliquez « $E = e_{\text{spec}} \times m$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $e_{\text{spec}} = 1.8 \text{ kWh/kg}$ for 75 kg. Relation appliquée : $E = e_{\text{spec}} \times m$. Calcul et résultat : $E = 1.8 \times 75 = 135 \text{ kWh}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour «9. Énergie spécifique des procédés».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 9. Énergie spécifique des procédés », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$e_{\text{spec}} = 2.5 \text{ kWh/kg m} = 40 \text{ kg}$ $E = 2.5 \times 40 = 100 \text{ kWh}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «9. Énergie spécifique des procédés», « $E = e_{\text{spec}} \times m$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

10. Démarrage avant arrivée de l'équipage

$$t_{\text{campagne}} = \text{Stock_cible} / Q_{\text{utile}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{\text{campagne}} = \text{Stock_cible} / Q_{\text{utile}}$ » dans « 10. Démarrage avant arrivée de l'équipage » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 10. Démarrage avant arrivée de l'équipage », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

t_{campagne} : durée nécessaire pour produire le stock cible au débit utile; Stock_cible : masse ou quantité à accumuler; Q_{utile} : débit réellement exploitable sur la même base de temps.

4 — Formule

$$t_{\text{campagne}} = \text{Stock_cible} / Q_{\text{utile}}$$

5 — Lecture

À l'oral, dire: « t indice campagne égale Stock indice cible divisé par Q indice utile».

6 — Symboles et sens

t_{campagne} : durée nécessaire pour produire le stock cible au débit utile; Stock_cible : masse ou quantité à accumuler; Q_{utile} : débit réellement exploitable sur la même base de temps.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Pour l'ISRU industriel, côté démarrage avant: $t_{\text{campagne}} \rightarrow \text{s, min ou h}$; $\text{Stock cible} \rightarrow \text{kg/L/doses/pièces}$; même base d'inventaire; $Q_{\text{utile}} \rightarrow \text{kg/s, L/h ou m}^3/\text{h}$ sont possibles pour le débit selon le flux suivi.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La question de «10. Démarrage avant arrivée de l'équipage» exige un ratio. Stock_cible fournit la quantité à normaliser, Q_{utile} fournit la base de normalisation, et leur division détermine t_{campagne} .

11 — Hypothèses

Ne pas extrapoler t_{campagne} entre périodes ou systèmes distincts sans redéfinir Stock_cible et Q_{utile} . La division est aussi interdite lorsque $Q_{\text{utile}}=0$.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Pour vérifier t_{campagne} , reformer Stock_cible à partir de Q_{utile} . Le produit du dénominateur par le quotient doit restaurer le numérateur.

13 — Cas numérique

$\text{Stock_cible} = 1,200 \text{ kg}$ $Q_{\text{utile}} = 60 \text{ kg/h}$ $t_{\text{campagne}} = 1200/60 = 20 \text{ h}$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La question de «10. Démarrage avant arrivée de l'équipage» exige un ratio. Stock_cible fournit la quantité à normaliser, Q_{utile} fournit la base de normalisation, et leur division détermine t_{campagne} .

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Pour vérifier t_{campagne} , reformer Stock_cible à partir de Q_{utile} . Le produit du dénominateur par le quotient doit restaurer le numérateur.

16 — Estimation mentale

La fraction suggère son propre contrôle d'échelle: numérateur beaucoup plus grand que dénominateur implique $t_{\text{campagne}} \gg 1$; numérateur plus petit implique $t_{\text{campagne}} < 1$.

17 — Interprétation

À l'étape «10. Démarrage avant arrivée de l'équipage», « $t_{\text{campagne}} = \text{Stock_cible} / Q_{\text{utile}}$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 10. Démarrage avant arrivée de l'équipage »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Le ratio est proportionnel à Stock_cible et inversement proportionnel à Q_{utile} . Cette propriété permet de prévoir la direction d'un scénario perturbé.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : Target = 2,100 kg; rate = 70 kg/h. Appliquez « $t_{\text{campagne}} = \text{Stock_cible} / Q_{\text{utile}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : Target = 2,100 kg; rate = 70 kg/h. Relation appliquée : $t_{\text{campagne}} = \text{Stock_cible} / Q_{\text{utile}}$. Calcul et résultat : $t = 2100/70 = 30 \text{ h}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 10. Démarrage avant arrivée de l'équipage ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 10. Démarrage avant arrivée de l'équipage », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\text{Stock_cible} = 1,200 \text{ kg}$ $Q_{\text{utile}} = 60 \text{ kg/h}$ $t_{\text{campagne}} = 1200/60 = 20 \text{ h}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

À l'étape «10. Démarrage avant arrivée de l'équipage», « $t_{\text{campagne}} = \text{Stock_cible} / Q_{\text{utile}}$ » exprime une relation de modèle et non une vérité hors contexte. Sa valeur doit être lue avec l'unité correspondante et le périmètre réellement couvert.

11. Production ISRU vérifiée sur une campagne

$$m_{\text{vérifié}} = \dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q \times t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{\text{vérifié}} = \dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q \times t$ » dans « 11. Production ISRU vérifiée sur une campagne » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 11. Production ISRU vérifiée sur une campagne », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

$m_{\text{vérifié}}$: masse de produit qualifié réellement obtenue; $\dot{m}_{\text{nominal}}$: débit nominal de l'installation; A : disponibilité opérationnelle mesurée; q : fraction du produit qui satisfait la qualification; t : durée de campagne.

4 — Formule

$$m_{\text{vérifié}} = \dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q \times t$$

5 — Lecture

Lire « $m_{\text{vérifié}} = \dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q \times t$ » en nommant chaque opération, indice, fonction et symbole.

6 — Symboles et sens

$m_{\text{vérifié}}$: masse de produit qualifié réellement obtenue; $\dot{m}_{\text{nominal}}$: débit nominal de l'installation; A : disponibilité opérationnelle mesurée; q : fraction du produit qui satisfait la qualification; t : durée de campagne.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Si $\dot{m}_{\text{nominal}}$ est en kg/h et t en h, $m_{\text{vérifié}}$ est en kg; A et q sont sans dimension.

9 — Convention

Conserver la même frontière de système, la même base temporelle, les mêmes unités et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

Le débit nominal ne devient une production utile qu'après prise en compte du temps réellement disponible et de la fraction de produit qualifié.

11 — Hypothèses

A et q proviennent de campagnes représentatives et n'intègrent pas deux fois la même perte de performance.

12 — Contrôle indépendant

Le taux vérifié $\dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q$ multiplié par t doit reconstruire $m_{\text{vérifié}}$ et rester inférieur ou égal à la production nominale.

13 — Cas numérique

Avec $\dot{m}_{\text{nominal}} = 2,0$ kg/h, $A = 0,75$, $q = 0,90$ et $t = 100$ h : $m_{\text{vérifié}} = 2,0 \times 0,75 \times 0,90 \times 100 = 135$ kg.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le débit nominal ne devient une production utile qu'après prise en compte du temps réellement disponible et de la fraction de produit qualifié.

15 — Vérification

Le taux vérifié $\dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q$ multiplié par t doit reconstruire $m_{\text{vérifié}}$ et rester inférieur ou égal à la production nominale.

16 — Estimation mentale

Le résultat doit être inférieur au produit débit nominal $\times$ durée dès que A ou q est inférieur à 1.

17 — Interprétation

Planifier les stocks de mission sur la production vérifiée démontrée, pas sur la plaque signalétique de l'installation.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 11. Production ISRU vérifiée sur une campagne »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

À débit et qualité constants, faire passer la disponibilité de 0,75 à 0,50 réduit la production vérifiée d'un tiers.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\dot{m}_{\text{nominal}} = 1,5 \text{ kg/h}$; $A = 0,80$; $q = 0,95$; $t = 120 \text{ h}$. Appliquez « $m_{\text{vérifié}} = \dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q \times t$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\dot{m}_{\text{nominal}} = 1,5 \text{ kg/h}$; $A = 0,80$; $q = 0,95$; $t = 120 \text{ h}$. Relation appliquée : $m_{\text{vérifié}} = \dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q \times t$. Calcul et résultat : Avec $\dot{m}_{\text{nominal}} = 1,5 \text{ kg/h}$, $A = 0,80$, $q = 0,95$ et $t = 120 \text{ h}$: $m_{\text{vérifié}} = 1,5 \times 0,80 \times 0,95 \times 120 = 136,8 \text{ kg}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 11. Production ISRU vérifiée sur une campagne ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 11. Production ISRU vérifiée sur une campagne », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $\dot{m}_{\text{nominal}} = 2,0 \text{ kg/h}$, $A = 0,75$, $q = 0,90$ et $t = 100 \text{ h}$: $m_{\text{vérifié}} = 2,0 \times 0,75 \times 0,90 \times 100 = 135 \text{ kg}$. Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Planifier les stocks de mission sur la production vérifiée démontrée, pas sur la plaque signalétique de l'installation.

On injecte maintenant l'événement suivant: la teneur réelle est inférieure à la carte.

2. Extraction et débit brut

Dans ce module, extraction et débit brut sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

On injecte maintenant l'événement suivant: l'extracteur n'atteint que 60 % de disponibilité.

3. Préparation et séparation

Dans ce module, préparation et séparation sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

— « Préparation et séparation ».

On injecte maintenant l'événement suivant: la pureté du produit est hors spécification.

4. Eau comme ressource industrielle

Dans ce module, eau comme ressource industrielle sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

On injecte maintenant l'événement suivant: un consommable de procédé manque.

5. Oxygène et carburants

Dans ce module, oxygène et carburants sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

On injecte maintenant l'événement suivant: la production électrique limite le débit.

6. Régolithe et matériaux de construction

Dans ce module, régolithe et matériaux de construction sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

On injecte maintenant l'événement suivant: une unité doit être arrêtée avant l'arrivée de l'équipage.

7. Disponibilité des machines

Dans ce module, disponibilité des machines sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

On injecte maintenant l'événement suivant: la teneur réelle est inférieure à la carte.

8. Rendement et pureté

Dans ce module, rendement et pureté sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

— « Rendement et pureté ».

On injecte maintenant l'événement suivant: l'extracteur n'atteint que 60 % de disponibilité.

9. Énergie spécifique des procédés

Dans ce module, énergie spécifique des procédés sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

On injecte maintenant l'événement suivant: la pureté du produit est hors spécification.

10. Démarrage avant arrivée de l'équipage

Dans ce module, démarrage avant arrivée de l'équipage sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction, préparation, procédé, séparation, stockage, énergie et maintenance.

On injecte maintenant l'événement suivant: un consommable de procédé manque.

Exercices progressifs avec corrigés 1:1

Exercice 1: Prospection et variabilité de la ressource

Analysez prospection et variabilité de la ressource. Relation à tester: « $Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$ ». Cas dégradé: l'extracteur n'atteint que 60 % de disponibilité. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 1: Prospection et variabilité de la ressource

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 1: Prospection et variabilité de la ressource

Résultat

Corrigé — Exercice 1: Prospection et variabilité de la ressource

Exercice 2: Extraction et débit brut

Analysez extraction et débit brut. Relation à tester: « $E = e_{\text{spec}} \times m$ ». Cas dégradé: la pureté du produit est hors spécification. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 2: Extraction et débit brut

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 2: Extraction et débit brut

Résultat

Corrigé — Exercice 2: Extraction et débit brut

Exercice 3: Préparation et séparation

Relation à tester: « $M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$ ». Cas dégradé: un consommable de procédé manque. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 3: Préparation et séparation

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 3: Préparation et séparation

Résultat

Corrigé — Exercice 3: Préparation et séparation

Exercice 4: Eau comme ressource industrielle

Analysez eau comme ressource industrielle. Relation à tester: « $\text{Campagne} = \text{Stock_cible} / Q_utile$ ». Cas dégradé: la production électrique limite le débit. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 4: Eau comme ressource industrielle

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 4: Eau comme ressource industrielle

Résultat

Corrigé — Exercice 4: Eau comme ressource industrielle

Exercice 5: Oxygène et carburants

Relation à tester: « $Q_utile = Q_nom \times A \times \eta$ ». Cas dégradé: une unité doit être arrêtée avant l'arrivée de l'équipage. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 5: Oxygène et carburants

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 5: Oxygène et carburants

Résultat

Corrigé — Exercice 5: Oxygène et carburants

Exercice 6: Régolithe et matériaux de construction

Analysez régolithe et matériaux de construction. Relation à tester: « $E = e_spec \times m$ ». Cas dégradé: la teneur réelle est inférieure à la carte. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 6: Régolithe et matériaux de construction

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 6: Régolithe et matériaux de construction

Résultat

Corrigé — Exercice 6: Régolithe et matériaux de construction

Exercice 7: Disponibilité des machines

Relation à tester: « $M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$ ». Cas dégradé: l'extracteur n'atteint que 60 % de disponibilité.
Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 7: Disponibilité des machines

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 7: Disponibilité des machines

Résultat

Corrigé — Exercice 7: Disponibilité des machines

Exercice 8: Rendement et pureté

Relation à tester: « $\text{Campagne} = \text{Stock}_{\text{cible}} / Q_{\text{utile}}$ ». Cas dégradé: la pureté du produit est hors spécification.
Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 8: Rendement et pureté

Données du cas

Exercice guidé — Préparation et séparation — Cas « Préparation et séparation » — Dans ce module, prospection et variabilité de la ressource sert directement à transformer une ressource locale incertaine en produit qualifié en reliant prospection, extraction,... Repère: Une unité nominale de 100 kg/j, disponible 80 % du temps et donnant 75 % de produit utile, fournit 60 kg/j en moyenne — « Prospection et variabilité de la ressource ». Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Relation

Réserve: Accumuler 4200 kg avec 60 kg/j demande 70 jours sans marge.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 8: Rendement et pureté

Résultat

Corrigé — Exercice 8: Rendement et pureté

Mini-projet intégrateur et dossier de référence

Dimensionner une petite usine martienne de référence fonctionnant avant équipage. Fermer production d'eau ou d'oxygène, énergie, disponibilité, stocks, maintenance, contrôle qualité et critère minimum permettant d'autoriser le départ des humains.

« Exercice 8: Rendement et pureté » — hypothèses, budget, marges.

« Exercice 8: Rendement et pureté » — interfaces et causes communes.

« Exercice 8: Rendement et pureté » — calculs, limites, critères.

Verification de maîtrise du module 28

- « Exercice 8: Rendement et pureté » — unités et ordre de grandeur.
- « Exercice 8: Rendement et pureté » — cas dégradé.
- « Exercice 8: Rendement et pureté » — marge décisionnelle.
- « Exercice 8: Rendement et pureté » — mesure de contrôle.

Repères du passage: état

Repères du passage: rendement · moyenne

Repères du passage: énergie spécifique

Repères du passage: récupération

Repères du passage: pureté

Sources primaires et passerelles

- NASA JSC — In-Situ Resource Utilization
- NASA MOXIE
- NASA — MOXIE
- NASA — ISRU

Matrice de parité FR ↔ EN

Chaque mini-leçon quantitative française ci-dessous correspond à une mini-leçon canonique anglaise du même module; la parité porte sur le niveau intellectuel, les calculs, les exercices et la décision mission.

#	Mini-leçon FR	Correspondance EN	Formule canonique
1	1. Prospection et variabilité de la ressource	Coefficient of variation — compare spread with the mean	$CV = \sigma / \mu$
2	2. Extraction et débit brut	Extraction throughput — mass extracted per unit operating time	$Q_{\text{extraction}} = m_{\text{extrait}} / t$
3	3. Préparation et séparation	Recovered product from feed grade and process recovery	$M_{\text{produit}} = M_{\text{alim}} \times x \times \eta$
4	4. Eau comme ressource industrielle	Water recovered from hydrated or icy feedstock	$m_{\text{eau}} = x_{\text{eau}} \times m_{\text{régolithe}} \times \eta$
5	5. Oxygène et carburants	Oxygen from processed carbon dioxide — stoichiometric upper bound with efficiency	$m_{\text{O2}} = \eta \times (16 / 44) \times m_{\text{CO2}}$
6	6. Régolithe et matériaux de construction	Manufactured part mass from material density and finished volume	$m_{\text{pièce}} = \rho \times V$
7	7. Disponibilité des machines	Useful production throughput — derate nameplate by availability and efficiency	$Q_{\text{utile}} = Q_{\text{nom}} \times A \times \eta$
8	8. Rendement et pureté	Mass yield — useful product divided by feed mass	$R = m_{\text{produit}} / m_{\text{alim}}$
9	9. Énergie spécifique des procédés	Process energy from specific energy consumption	$E = e_{\text{spec}} \times m$
10	10. Démarrage avant arrivée de l'équipage	Campaign duration from target stock and useful production rate	$t_{\text{campagne}} = \text{Stock}_{\text{cible}} / Q_{\text{utile}}$
11	11. Production ISRU vérifiée sur une campagne	Verified ISRU campaign production	$m_{\text{vérifié}} = \dot{m}_{\text{nominal}} \times A \times q \times t$