

Survie & ECLSS: fermer les boucles sans cacher les pannes

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Survie & ECLSS: fermer les boucles sans cacher les pannes: comment « Oxygène, électrolyse et Sabatier » agit-il sur « Eau: comprendre le jalon des 98 % », et quel repère issu de « Incendie, dépressurisation et refuge » permet de vérifier la décision?

Intuition. L'électrolyse de l'eau produit O_2 et H_2 . Le CO_2 retiré de l'atmosphère peut réagir avec H_2 dans une unité Sabatier pour produire CH_4 et H_2O .

1

Oxygène, électrolyse et Sabatier

L'électrolyse de l'eau produit O_2 et H_2 .

2

Eau: comprendre le jalon des 98 %

La NASA a annoncé que l'ECLSS de l'ISS avait démontré environ 98 % de récupération totale d'eau avec le Brine Processor Assembly, contre environ 93–94 % avant ce système.

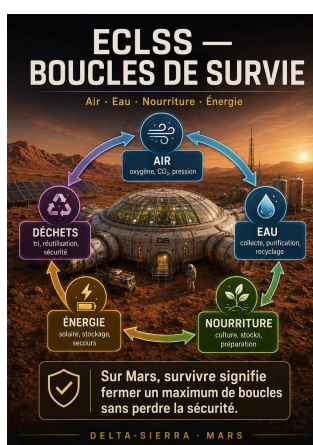
3

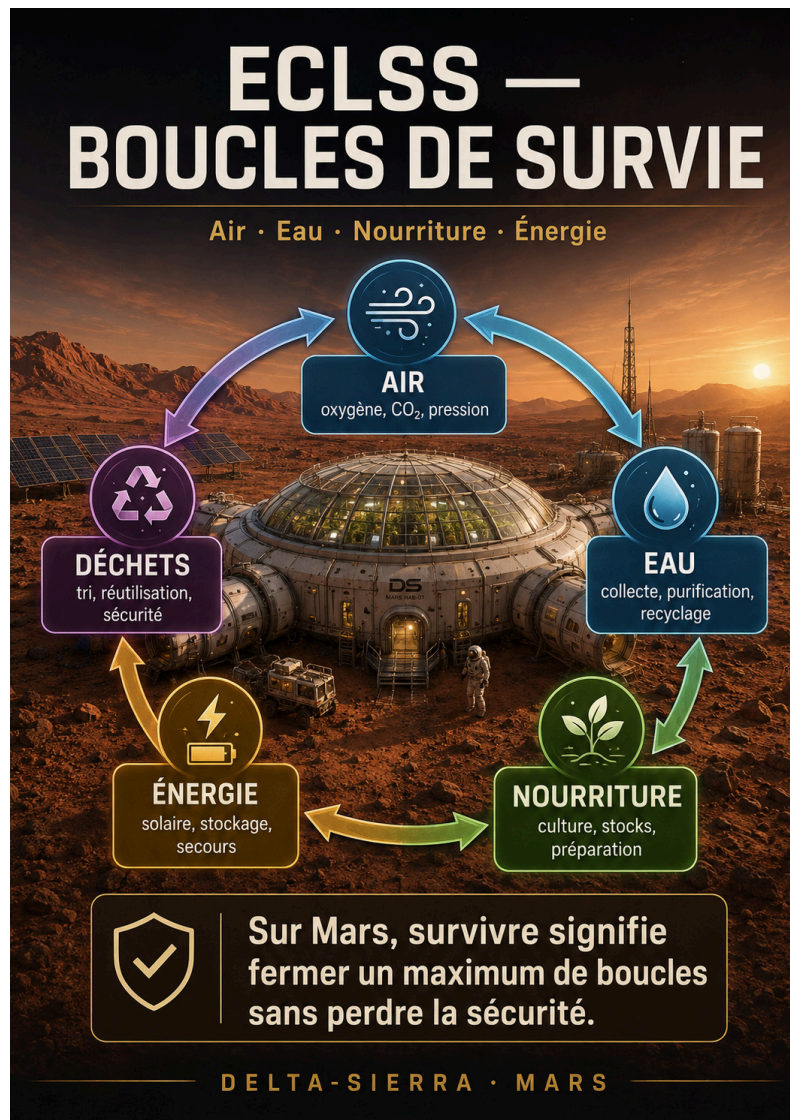
Incendie, dépressurisation et refuge

Un incendie combine chaleur, fumées et gaz toxiques; une dépressurisation combine perte d'atmosphère et risque structurel.

Repère concret. L'électrolyse de l'eau produit O_2 et H_2 .

- Oxygène, électrolyse et Sabatier — L'électrolyse de l'eau produit O_2 et H_2 .
- Eau: comprendre le jalon des 98 % — La NASA a annoncé que l'ECLSS de l'ISS avait démontré environ 98 % de récupération totale d'eau avec le Brine Processor Assembly, contre environ 93–94 % avant ce système.
- Incendie, dépressurisation et refuge — Un incendie combine chaleur, fumées et gaz toxiques; une dépressurisation combine perte d'atmosphère et risque structurel.





Un est un système de fonctions vitales, pas une machine unique. Il doit maintenir air, eau, température et qualité tout en restant contrôlable lorsqu'un composant tombe en panne.

Le module distingue performances démontrées sur l'ISS, objectifs de longue durée et scénarios pédagogiques martiens.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 12

Comprendre avant de calculer

Dans un habitat fermé, l'équipage respire, boit, produit du CO₂, de l'humidité et des eaux usées. Les boucles doivent maintenir la vie malgré pannes, pertes et

Progression du module — ECLSS; pression partielle; boucle fermée; stock tampon.

ECLSS

Exemple concret. Un habitat doit fournir oxygène, retirer CO₂, contrôler et recycler une partie de l'eau.

Piège. Un pourcentage de récupération élevé ne suffit pas si qualité, ou stockage tampon sont oubliés.

Définition sans prérequis. désigne l'ensemble des systèmes de contrôle environnemental et de support-vie: atmosphère, eau, température, déchets, détection et parfois incendie selon l'architecture.

Contrôle mental. Faites le bilan des flux vitaux: oxygène, CO₂, eau, humidité et contaminants. Si une boucle « fermée » n'a ni perte ni appoint sur une longue durée, cherchez l'hypothèse cachée.

Exercice guidé — ECLSS

Situation à reconnaître. ECLSS désigne l'ensemble des systèmes de contrôle environnemental et de support-vie: atmosphère, eau, température, déchets, détection et parfois incendie selon l'architecture.

Vérification demandée. Faites le bilan des flux vitaux: oxygène, CO₂, eau, humidité et contaminants. Si une boucle « fermée » n'a ni perte ni appoint sur une longue durée, cherchez l'hypothèse cachée.

Erreur à écarter. Un pourcentage de récupération élevé ne suffit pas si qualité, maintenance ou stockage tampon sont oubliés.

Corrigé raisonné

Sens précis

ECLSS désigne l'ensemble des systèmes de contrôle environnemental et de support-vie: atmosphère, eau, température, déchets, détection et parfois incendie selon l'architecture.

Test du cas

Faites le bilan des flux vitaux: oxygène, CO₂, eau, humidité et contaminants. Si une boucle « fermée » n'a ni perte ni appoint sur une longue durée, cherchez l'hypothèse cachée.

Piège exclu

Un pourcentage de récupération élevé ne suffit pas si qualité, maintenance ou stockage tampon sont oubliés.

Quantification

ECLSS: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

pression partielle

Exemple concret. Un même pourcentage d'oxygène à deux pressions totales différentes ne donne pas la même pression partielle.

Piège. Ne confondez pas concentration en pourcentage et pression partielle en pascals ou kilopascals.

Définition sans prérequis. La représente la contribution d'un gaz à la pression totale d'un mélange. Elle aide à raisonner sur oxygène et CO₂ au-delà du simple pourcentage volumique.

Contrôle mental. La somme des pressions partielles doit retrouver la pression totale du mélange; si elle la dépasse, les fractions ou unités sont incohérentes.

Exercice guidé — pression partielle

Situation à reconnaître. La pression partielle représente la contribution d'un gaz à la pression totale d'un mélange. Elle aide à raisonner sur oxygène et CO₂ au-delà du simple pourcentage volumique.

Vérification demandée. La somme des pressions partielles doit retrouver la pression totale du mélange; si elle la dépasse, les fractions ou unités sont incohérentes.

Erreur à écarter. Ne confondez pas concentration en pourcentage et pression partielle en pascals ou kilopascals.

Corrigé raisonné

Sens précis

La pression partielle représente la contribution d'un gaz à la pression totale d'un mélange. Elle aide à raisonner sur oxygène et CO₂ au-delà du simple pourcentage volumique.

Test du cas

La somme des pressions partielles doit retrouver la pression totale du mélange; si elle la dépasse, les fractions ou unités sont incohérentes.

Piège exclu

Ne confondez pas concentration en pourcentage et pression partielle en pascals ou kilopascals.

Quantification

pression partielle: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

pression partielle: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

boucle fermée

Exemple concret. L'eau de condensation peut être collectée, traitée puis réinjectée dans les usages compatibles.

Piège. Aucune boucle réelle n'est parfaitement fermée: purges, maintenance et pertes doivent être budgétées.

Définition sans prérequis. Une récupère une ressource après usage pour la traiter et la réutiliser, tout en gérant les pertes et les contaminants qui s'accumulent.

Contrôle mental. Une recycle une fraction du flux mais ne supprime pas les pertes: vérifiez où se trouvent purge, fuite, déchets et appoint.

Exercice guidé — boucle fermée

Situation à reconnaître. Une boucle fermée récupère une ressource après usage pour la traiter et la réutiliser, tout en gérant les pertes et les contaminants qui s'accumulent.

Vérification demandée. Une boucle fermée recycle une fraction du flux mais ne supprime pas les pertes: vérifiez où se trouvent purge, fuite, déchets et appoint.

Erreur à écarter. Aucune boucle réelle n'est parfaitement fermée: purges, maintenance et pertes doivent être budgétées.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une boucle fermée récupère une ressource après usage pour la traiter et la réutiliser, tout en gérant les pertes et les contaminants qui s'accumulent.

Test du cas

Une boucle fermée recycle une fraction du flux mais ne supprime pas les pertes: vérifiez où se trouvent purge, fuite, déchets et appoint.

Piège exclu

Aucune boucle réelle n'est parfaitement fermée: purges, maintenance et pertes doivent être budgétées.

stock tampon

Exemple concret. Un réservoir d'eau potable peut donner des heures ou jours pour réparer un processeur.

Piège. Un stock nominal n'est utile que si sa son volume réellement utilisable et son accès restent garantis pendant la panne.

Définition sans prérequis. Un découple temporairement production et consommation afin de survivre à un arrêt ou une variation de débit.

Contrôle mental. À consommation constante, un tampon plus grand doit augmenter le temps disponible avant rupture; si l'autonomie calculée diminue, inspectez le sens de la division.

Exercice guidé — stock tampon

Situation à reconnaître. Un stock tampon découple temporairement production et consommation afin de survivre à un arrêt ou une variation de débit.

Vérification demandée. À consommation constante, un tampon plus grand doit augmenter le temps disponible avant rupture; si l'autonomie calculée diminue, inspectez le sens de la division.

Erreur à écarter. Un stock nominal n'est utile que si sa qualité, son volume réellement utilisable et son accès restent garantis pendant la panne.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un stock tampon découple temporairement production et consommation afin de survivre à un arrêt ou une variation de débit.

Test du cas

À consommation constante, un tampon plus grand doit augmenter le temps disponible avant rupture; si l'autonomie calculée diminue, inspectez le sens de la division.

Piège exclu

Un stock nominal n'est utile que si sa qualité, son volume réellement utilisable et son accès restent garantis pendant la panne.

Autonomie d'un stock critique

$$t = S / q$$

1 — Question concrète	La relation «autonomie = stock utilisable / consommation par unité de temps» compare stock utilisable à consommation par unité de temps: quel est le ratio autonomie?
2 — Intuition sans symboles	On compare une réserve réellement utilisable au rythme auquel elle est consommée afin d'obtenir une durée de protection.
3 — Grandeurs	t : autonomie du stock ; S : stock utilisable et vérifié ; q : consommation de cette ressource

	par unité de temps.
4 — Formule	$t = S / q$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «autonomie égale stock utilisable divisé par consommation par unité de temps».
6 — Symboles et sens	t : autonomie du stock ; S : stock utilisable et vérifié ; q : consommation de cette ressource par unité de temps.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	stock utilisable en kg, L, doses ou pièces; consommation par unité de temps dans la même ressource par unité de temps, par exemple kg/j, L/j, doses/j ou pièces/j; autonomie dans l'unité de temps correspondante, ici typiquement jours.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Diviser une quantité disponible par un débit de consommation répond à la question «pendant combien de temps ce stock peut-il alimenter ce besoin?». Les unités se simplifient par exemple $L \div (L/j) = j$.
11 — Hypothèses	Le quotient n'est interprétable que si consommation par unité de temps $\neq 0$ et si stock utilisable et consommation par unité de temps portent sur la même définition de système. Mélanger deux frontières fausse autonomie.
12 — Contrôle d'unités	stock utilisable en kg, L, doses ou pièces; consommation par unité de temps dans la même ressource par unité de temps, par exemple kg/j, L/j, doses/j ou pièces/j; autonomie dans l'unité de temps correspondante, ici typiquement jours. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : avec un stock utilisable $S = 120$ L et une consommation $q = 8$ L/j, l'autonomie vaut $t = 120/8 = 15$ jours.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Diviser une quantité disponible par un débit de consommation répond à la question «pendant combien de temps ce stock peut-il alimenter ce besoin?». Les unités se simplifient par exemple $L \div (L/j) = j$.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: autonomie $\times$ consommation par unité de temps doit redonner le stock utilisable. Si les unités ne se ferment pas en une quantité de stock, la consommation n'a pas été exprimée sur la bonne base.
16 — Estimation mentale	Contrôle mental : exprimer le stock dans la même unité que la consommation, puis raisonner en « combien de périodes ce stock couvre-t-il ? ». Si une journée consomme environ un dixième du stock utilisable, l'autonomie est de l'ordre de dix jours ; doubler la consommation divise cette autonomie par deux.
17 — Interprétation	Pour «Corrigé raisonné», le résultat de «autonomie = stock utilisable / consommation par unité de temps» prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Le numérateur agit linéairement: doubler stock utilisable double autonomie. Le dénominateur agit en sens inverse: doubler consommation par unité de temps réduit autonomie de moitié.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Le stock utilisable augmente de 10 % tandis que la consommation reste à 8 L/j. Recalculez l'autonomie.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. Le nouveau stock est $120 \times 1,10 = 132$ L. On garde $q = 8$ L/j. Donc $t = 132/8 = 16,5$ jours. L'augmentation de 10 % du numérateur augmente ici l'autonomie de 10 %, de 15 à 16,5 jours.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Autonomie d'un stock critique» en changeant au moins deux données de $t = S / q$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $t = S / q$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Déclencher réapprovisionnement, rationnement ou réparation avant que l'autonomie n'atteigne la réserve protégée.

21 — Décision mission

Déclencher réapprovisionnement, rationnement ou réparation avant que l'autonomie n'atteigne la réserve protégée.

Progression

1. Vocabulaire sans formule.
2. Calcul avec données déjà converties.
3. Choix des données utiles.
4. Diagnostic d'une erreur volontaire.
5. Décision mission avec et limite.

Gate zéro prérequis

- Je comprends chaque mot clé.
- Je sais lire la relation.
- Je sais
- Je sais donner un ordre de grandeur.
- Je peux reprendre le corrigé de « ECLSS » et expliquer pourquoi chaque étape est nécessaire.

1. Partir des fonctions vitales

Un ECLSS n'est pas une boîte unique mais un ensemble de fonctions: atmosphère respirable, eau potable, hygiène, traitement des déchets et surveillance. Les machines peuvent changer; la fonction à maintenir reste.

Pour chaque fonction, notez stock, débit, qualité et temps avant conséquence. Une panne de capteur et une rupture de coque n'ont ni la même ni le même mode de réponse. Les constantes de temps sont donc une donnée de sûreté.

Intuition système

Un système vital doit être décrit comme une fonction mesurable avant de choisir son matériel. Pour chaque fonction, on écrit une variable contrôlée, un domaine acceptable, un capteur, une action, une voie de secours et un critère de Cette méthode évite de confondre la marque d'un équipement avec la fonction de survie qu'il assure.

Chaîne fonctionnelle de sûreté

fonction robuste : variable identifiée → limite connue → mesure → action → secours → récupération

1 — Question concrète	Comment lire la chaîne qualitative qui relie variable, limite, mesure, action, secours et récupération sans la confondre avec une addition numérique ?
2 — Intuition sans symboles	Une fonction vitale n'est robuste que si l'équipage sait quoi surveiller, quand agir, comment se secourir et comment revenir à un état sûr.
3 — Grandeurs	variable identifiée : grandeur surveillée ; limite connue : seuil explicite ; mesure : valeur observée ; action : réponse déclenchée ; secours : fonction indépendante de repli ; récupération : retour vérifié dans le domaine sûr.
4 — Formule	fonction robuste : variable identifiée → limite connue → mesure → action → secours → récupération
5 — Lecture	À dire à voix haute : « fonction robuste : variable identifiée, puis limite connue, puis mesure, puis action, puis secours, puis récupération ».
6 — Symboles et sens	variable identifiée : grandeur surveillée ; limite connue : seuil explicite ; mesure : valeur observée ; action : réponse déclenchée ; secours : fonction indépendante de repli ; récupération : retour vérifié dans le domaine sûr.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	La chaîne n'a pas d'unité globale. Une grandeur mesurée conserve sa propre unité — par exemple pression, concentration, débit ou température — et sa limite doit être exprimée dans une unité compatible. Les mots action, secours et récupération décrivent des fonctions, pas des nombres.
9 — Convention	Les valeurs éventuelles appartiennent aux capteurs, inventaires, limites de conception et procédures ECLSS réellement utilisés. La chaîne elle-même ne crée aucun chiffre et ne fournit aucun coefficient numérique. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Les flèches décrivent un ordre logique : savoir quoi surveiller, connaître la frontière acceptable, mesurer, commander une réponse, prévoir un mode de secours puis vérifier la récupération. Il ne faut donc ni additionner ces six étapes ni leur chercher une somme.
11 — Hypothèses	Cette chaîne est un aide-mémoire d'architecture fonctionnelle. Elle ne remplace ni une loi physique, ni une logique de commande détaillée, ni des seuils sourcés.
12 — Contrôle d'unités	La chaîne n'a pas d'unité globale. Une grandeur mesurée conserve sa propre unité — par exemple pression, concentration, débit ou température — et sa limite doit être exprimée dans une unité compatible. Les mots action, secours et récupération

	décrivent des fonctions, pas des nombres. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : la pression partielle d'oxygène est mesurée à 18,8 kPa alors que la limite opérationnelle déclarée est 19,5 kPa. La chaîne doit donc relier mesure < limite, alarme, action de secours, puis preuve de récupération au-dessus de 19,5 kPa.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Les flèches décrivent un ordre logique : savoir quoi surveiller, connaître la frontière acceptable, mesurer, commander une réponse, prévoir un mode de secours puis vérifier la récupération. Il ne faut donc ni additionner ces six étapes ni leur chercher une somme.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle par scénario : supprimer à tour de rôle une étape et demander si le système peut encore détecter l'écart, agir et revenir à un état sûr. Une lacune révèle une chaîne fonctionnelle incomplète.
16 — Estimation mentale	Le contrôle mental porte sur la complétude : manque-t-il une limite, une mesure fiable, une action, un secours ou une étape de récupération ? Ce n'est pas une estimation d'une somme.
17 — Interprétation	Cette chaîne sert à concevoir et auditer une fonction ECLSS. Elle aide à vérifier qu'une grandeur critique est surveillée et qu'une réponse jusqu'à la récupération est prévue.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Il n'existe pas de sensibilité $+\Delta$ de la chaîne elle-même. Si une grandeur physique varie, on réévalue uniquement sa mesure, son écart à la limite et la réponse associée selon le modèle propre à cette grandeur.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Une mesure d'oxygène passe de 20,5 kPa à 18,8 kPa pour une limite déclarée de 19,5 kPa. Décidez si la chaîne de sûreté doit s'activer et indiquez l'état attendu après récupération. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. 18,8 kPa < 19,5 kPa : le seuil est franchi, donc l'alarme et l'action de secours doivent être déclenchées. La récupération n'est pas prouvée par l'action seule : il faut une mesure vérifiée revenue au-dessus du seuil déclaré, par exemple 20,0 kPa > 19,5 kPa. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Chaîne fonctionnelle de sûreté» en changeant au moins deux données de fonction robuste : variable identifiée → limite connue → mesure → action → secours → récupération. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans fonction robuste : variable identifiée → limite connue → mesure → action → secours → récupération, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Refuser une architecture qui possède une mesure sans action, un secours sans indépendance ou une récupération sans preuve.

21 — Décision mission

Refuser une architecture qui possède une mesure sans action, un secours sans indépendance ou une récupération sans preuve.

Le même matériel peut participer à plusieurs fonctions; cette interconnexion doit être visible dans l'analyse de causes communes.

Cas de conception — fonction et secours

Prenez la fonction « retirer le CO₂ ». Écrivez successivement le capteur qui détecte la dérive, la capacité nominale de retrait, le signal de saturation, la voie de secours et le critère autorisant le retour au mode normal. Si la voie de secours utilise le même ventilateur ou le même bus électrique, elle n'est pas indépendante. Cette simple fiche transforme une liste d'équipements en architecture de survie vérifiable.

2. Atmosphère: pression plus composition

Une atmosphère habitable possède une pression totale et des pressions partielles. O₂, CO₂, vapeur d'eau et contaminants doivent être suivis; une pression totale correcte peut cacher une composition dangereuse.

La pression est aussi une charge structurale. Une différence de 70 kPa sur 1 m² correspond idéalement à 70 kN. Le même gaz est donc simultanément ressource vitale et chargement mécanique de la coque.

Bilan quantifié

Pression totale et composition ne suffisent pas séparément. Une atmosphère peut avoir une pression correcte mais une d'oxygène insuffisante, ou l'inverse. Les capteurs doivent donc distinguer pression, fractions gazeuses, température, humidité et contaminants plutôt que de réduire « l'air » à une seule lecture.

Pression partielle dans un mélange

$$p_i = y_i p_{\text{total}}$$

1 — Question concrète	Dans «Bilan quantifié», comment évaluer p_i à partir des facteurs de « $p_i = y_i p_{\text{total}}$ »?
2 — Intuition sans symboles	La part d'un gaz dans le mélange applique la même fraction à la pression totale pour donner la pression portée par ce constituant.
3 — Grandeurs	p_i : pression partielle du constituant i ; y_i : fraction molaire du constituant i , sans dimension ; p_{total} : pression totale du mélange.
4 — Formule	$p_i = y_i p_{\text{total}}$
5 — Lecture	À dire à voix haute: « p indice i égale y indice i p indice total».
6 — Symboles et sens	p_i : pression partielle du constituant i ; y_i : fraction molaire du constituant i , sans dimension ; p_{total} : pression totale du mélange.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités	pression partielle du constituant $i \rightarrow$ Pa ou kPa; fraction molaire du constituant $i \rightarrow$ sans dimension [0;1]; pression totale du mélange $\rightarrow$ Pa ou kPa.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	« $p_i = y_i p_{\text{total}}$ » n'additionne pas ses entrées: les termes de $y_i p_{\text{total}}$ se multiplient. Cette structure signifie que modifier un facteur change directement l'échelle de p_i .
11 — Hypothèses	Avant d'extrapoler p_i , vérifier que chaque facteur de $y_i p_{\text{total}}$ conserve sa définition et que les coefficients implicites restent valables dans le régime considéré.
12 — Contrôle d'unités	pression partielle du constituant $i \rightarrow$ Pa ou kPa; fraction molaire du constituant $i \rightarrow$ sans dimension [0;1]; pression totale du mélange $\rightarrow$ Pa ou kPa. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : pour $y_i = 0,21$ et $p_{\text{total}} = 70$ kPa, $p_i = 0,21 \times 70 = 14,7$ kPa.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	« $p_i = y_i p_{\text{total}}$ » n'additionne pas ses entrées: les termes de $y_i p_{\text{total}}$ se multiplient. Cette structure signifie que modifier un facteur change directement l'échelle de p_i .
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Pour tester p_i sans répéter exactement le calcul, isoler un facteur de « $p_i = y_i p_{\text{total}}$ » et le retrouver par division du résultat par le produit des autres facteurs.
16 — Estimation mentale	Le produit attendu peut être borné avec des facteurs ronds proches de ceux de $y_i p_{\text{total}}$. Si p_i sort largement de cette borne, reprendre la saisie.
17 — Interprétation	Pour «Bilan quantifié», le résultat de « $p_i = y_i p_{\text{total}}$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Pour un produit simple, la variation relative de p_i suit celle du facteur que l'on change isolément. Les perturbations simultanées se multiplient entre elles.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. La pression totale augmente de 10 %, de 70 à 77 kPa, tandis que la fraction molaire reste à 0,21. Recalculez p_i. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $p_i = y_i p_{\text{total}} = 0,21 \times 77 = 16,17$ kPa. La fraction molaire n'ayant pas changé, une hausse de 10 % de la pression totale entraîne une hausse de 10 % de la pression partielle : $14,7 \rightarrow 16,17$ kPa. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Pression partielle dans un mélange» en changeant au moins deux données de $p_i = y_i p_{\text{total}}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $p_i = y_i p_{\text{total}}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Comparer la pression partielle aux limites physiologiques et non la seule pression totale.

21 — Décision mission

Comparer la pression partielle aux limites physiologiques et non la seule pression totale.

Un changement de pression modifie toutes les pressions partielles même si les fractions molaires restent provisoirement stables.

Cas de calcul — atmosphère

Supposons 70 kPa avec 30 % d'O₂ et 0,6 % de CO₂ dans un exercice. Les pressions partielles sont 21 kPa pour O₂ et 0,42 kPa pour CO₂. Si la pression totale tombe à 60 kPa sans changement instantané de fraction, elles deviennent 18 kPa et 0,36 kPa. Le même pourcentage ne produit donc pas le même état physiologique lorsque la pression totale change.

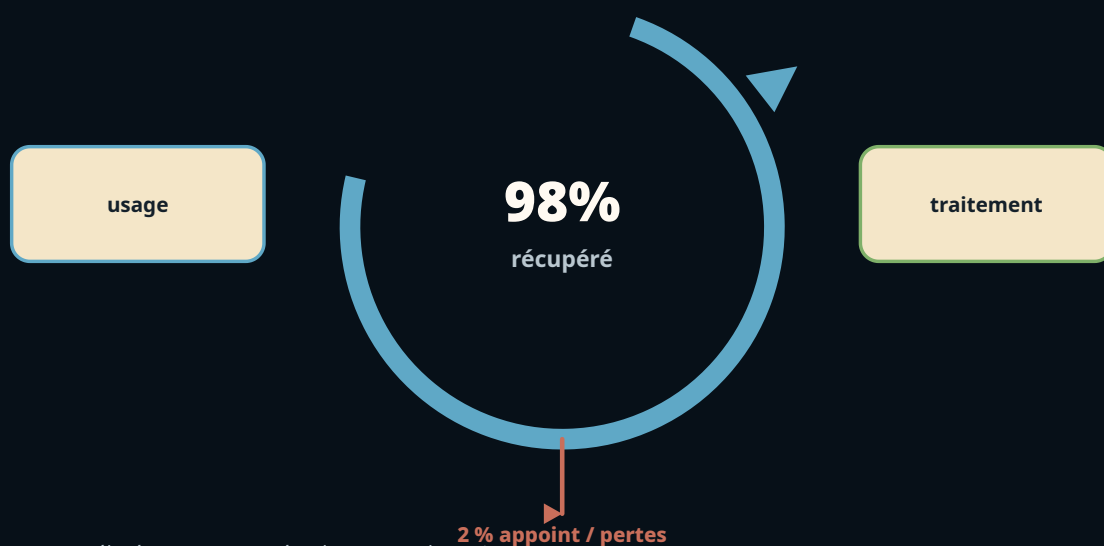
3. CO₂, humidité et contaminants s'accumulent

Le crew produit continuellement CO₂ et vapeur d'eau. Les systèmes de retrait doivent couvrir le régime nominal, les pointes d'activité, les redémarrages et certaines pannes. Le débit de traitement doit être comparé au débit de production.

La mesure est une barrière. Un absorbeur performant avec un capteur faux peut laisser dériver l'atmosphère sans alarme crédible. Étalonnage, et vérification croisée appartiennent donc à la boucle vitale.

Space Academy · 12

Fermeture de l'eau / water-loop closure



Boucle d'eau: collecte, traitement, qualification, récupération et appoint résiduel.

CO₂, vapeur d'eau et contaminants sont des flux produits en continu. Le dimensionnement doit comparer leur production maximale plausible au retrait disponible, puis ajouter les périodes de régénération, de changement de lit ou de maintenance. Une capacité nominale exactement égale à la production laisse aucune marge à une dérive ou à un membre d'équipage supplémentaire.

Bilan dynamique d'un inventaire

$$dM/dt = \text{génération} - \text{retrait}$$

1 — Question concrète	Dans «Mode dégradé», quelle différence dM/dt résulte de l'ordre imposé par « $dM/dt = \text{génération} - \text{retrait}$ »?
2 — Intuition sans symboles	Un stock augmente quand les apports dépassent les retraits et diminue dans le cas inverse.
3 — Grandeurs	dM/dt : variation du stock par unité de temps ; génération : flux entrant ou produit ; retrait : flux consommé ou extrait, exprimé sur la même frontière et la même base de temps.
4 — Formule	$dM/dt = \text{génération} - \text{retrait}$
5 — Lecture	À dire à voix haute: « dM divisé par dt égale génération moins retrait».
6 — Symboles et sens	dM/dt : variation du stock par unité de temps ; génération : flux entrant ou produit ; retrait : flux consommé ou extrait, exprimé sur la même frontière et la même base de temps.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	variation temporelle de masse → kg/s, kg/h ou kg/j selon le pas de bilan; génération → kg/s, kg/h ou kg/j, identique pour tous les flux du bilan; retrait → kg/s, kg/h ou kg/j, identique pour tous les flux du bilan.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Une différence est orientée: on part de la première quantité et l'on enlève la seconde. Le signe obtenu porte donc une information physique ou opérationnelle.
11 — Hypothèses	Une soustraction n'a de sens que pour des quantités comparables. Si l'incertitude est du même ordre que dM/dt , la conclusion sur son signe est fragile.
12 — Contrôle d'unités	variation temporelle de masse → kg/s, kg/h ou kg/j selon le pas de bilan; génération → kg/s, kg/h ou kg/j, identique pour tous les flux du bilan; retrait → kg/s, kg/h ou kg/j, identique pour tous les flux du bilan. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : une génération de 6 kg/j et un retrait de 8 kg/j donnent $dM/dt = 6 - 8 = -2$ kg/j : le stock diminue.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Une différence est orientée: on part de la première quantité et l'on enlève la seconde. Le signe obtenu porte donc une information physique ou opérationnelle.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Vérification de retour: dM/dt plus le terme retiré doit redonner la quantité de départ à l'arrondi près.

16 — Estimation mentale	Estimer d'abord lequel des deux termes est le plus grand: cette comparaison prédit le signe de dM/dt et son échelle approximative.
17 — Interprétation	Pour «Mode dégradé», le résultat de « dM/dt = génération – retrait» prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Une variation du premier terme se transmet avec signe positif; la même variation appliquée au second agit avec signe négatif.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. La génération augmente de 10 %, de 6 à 6,6 kg/j, tandis que le retrait reste à 8 kg/j. Recalculez le bilan. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $dM/dt = 6,6 - 8 = -1,4$ kg/j. Le bilan reste négatif, mais la dette de ressource diminue de 0,6 kg/j par rapport au cas initial de -2 kg/j. Il faut donc encore une action corrective si cette tendance persiste. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Bilan dynamique d'un inventaire» en changeant au moins deux données de dM/dt = génération – retrait. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans dM/dt = génération – retrait, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Traiter immédiatement un bilan négatif durable comme une dette de ressource mesurable.
21 — Décision mission	Traiter immédiatement un bilan négatif durable comme une dette de ressource mesurable.

Un stock tampon ou un volume cabine important peut ralentir la hausse de concentration sans corriger le déséquilibre de débit.

Cas de dérive — contaminant

Une boucle génère 0,25 kg/h d'un contaminant équivalent et en retire 0,24 kg/h. L'écart semble minuscule: 0,01 kg/h. Pourtant il accumule 0,24 kg en 24 h et 7,2 kg en 30 jours. L'exercice montre pourquoi le bilan de débit doit être fermé à la précision nécessaire et pourquoi une petite dérive persistante peut devenir une urgence lente.

4. Oxygène, électrolyse et Sabatier

de l'eau produit O_2 et H_2 . Le CO_2 retiré de l'atmosphère peut réagir avec H_2 dans une pour produire CH_4 et H_2O . L'eau peut revenir vers l'électrolyse, augmentant la récupération globale d'oxygène.

Stœchiométrie de Sabatier



1 — Question concrète	Pour «4. Oxygène, électrolyse et Sabatier», les atomes sont-ils conservés dans $CO_2 + 4 H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$, et quelles proportions stœchiométriques en découlent?
2 — Intuition sans symboles	La réaction réarrange les mêmes atomes entre réactifs et produits, ce qui fixe les proportions idéales de matière.
3 — Grandeurs	CO_2 : dioxyde de carbone ; H_2 : dihydrogène ; CH_4 : méthane ; H_2O : eau ; les coefficients 1, 4, 1 et 2 fixent les proportions molaires idéales.
4 — Formule	$CO_2 + 4 H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$
5 — Lecture	À dire à voix haute: « CO_2 plus 4 $H_2 \rightarrow CH_4$ plus 2 H_2O ».
6 — Symboles et sens	CO_2 : dioxyde de carbone ; H_2 : dihydrogène ; CH_4 : méthane ; H_2O : eau ; les coefficients 1, 4, 1 et 2 fixent les proportions molaires idéales.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	coefficients sans dimension; quantités en mol; masses en g ou kg après conversion par masse molaire.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Une équation chimique exprime d'abord une conservation des atomes. On équilibre les coefficients stœchiométriques, puis seulement on convertit ces rapports de moles en masses avec les masses molaires; la flèche n'est pas un signe égal arithmétique.
11 — Hypothèses	Limites: les coefficients donnent une stœchiométrie idéale. Rendement réel, pureté, réactions parasites, équilibre chimique et réactif limitant doivent être ajoutés pour prédire une production réelle.
12 — Contrôle d'unités	coefficients sans dimension; quantités en mol; masses en g ou kg après conversion par masse molaire. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Cas stœchiométrique idéal : 44 kg de CO_2 réagissent avec 8 kg de H_2 pour produire 16 kg de CH_4 et 36 kg de H_2O .
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Une équation chimique exprime d'abord une conservation des atomes. On équilibre les coefficients stœchiométriques, puis seulement on convertit ces rapports de moles en masses avec les masses molaires; la flèche n'est pas un signe égal arithmétique.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant: recompter chaque élément atome par atome des deux côtés et fermer le bilan de masse idéal avec les masses molaires; les deux tests doivent être cohérents.
16 — Estimation mentale	Le nombre total d'atomes de chaque élément doit être identique avant et après la flèche. Un bilan massique idéal doit aussi fermer à l'arrondi près.

17 — Interprétation	Pour «4. Oxygène, électrolyse et Sabatier», le résultat de $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Sensibilité stœchiométrique: si un réactif limitant augmente de 10 % et que les autres restent en excès, la quantité théorique de produit augmente de 10 %; dès qu'un autre réactif devient limitant, la branche change.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. On dispose de 48,4 kg de CO_2, soit +10 %, mais toujours de seulement 8 kg de H_2. Déterminez le réactif limitant et les produits idéaux. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. La proportion idéale exige 8 kg H_2 pour 44 kg CO_2. Avec seulement 8 kg H_2, l'hydrogène reste limitant : seuls 44 kg CO_2 peuvent réagir. Les produits restent donc 16 kg CH_4 et 36 kg H_2O, avec $48,4 - 44 = 4,4$ kg CO_2 en excès. Augmenter un réactif non limitant n'augmente pas la production. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Stœchiométrie de Sabatier» en changeant au moins deux données de $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Dimensionner les flux sur le réactif limitant et séparer rendement réel de stœchiométrie idéale.
21 — Décision mission	Dimensionner les flux sur le réactif limitant et séparer rendement réel de stœchiométrie idéale.

Le couplage crée aussi des interfaces. Une architecture sûre doit pouvoir isoler un catalyseur contaminé, un compresseur ou un séparateur sans perdre simultanément eau potable et production d'oxygène.

Lecture de sûreté

L'oxygène peut provenir d'un stock, d'électrolyse ou d'une chaîne couplée au traitement du CO_2 . Chaque voie possède des dépendances différentes en eau, énergie, compression et consommables. Une architecture sûre doit pouvoir isoler un défaillant sans contaminer ou arrêter l'ensemble de la boucle.

Couplage électrolyse–Sabatier



1 — Question concrète	Pour «Lecture de sûreté», les atomes sont-ils conservés dans $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$; $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$, et quelles proportions stœchiométriques en découlent?
2 — Intuition sans symboles	L'eau peut fournir hydrogène et oxygène, puis l'hydrogène alimente Sabatier avec le dioxyde de carbone.
3 — Grandeurs	H_2O : eau ; H_2 : dihydrogène ; O_2 : dioxygène ; CO_2 : dioxyde de carbone ; CH_4 : méthane ; les coefficients devant les espèces sont les rapports stœchiométriques idéaux.
4 — Formule	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$; $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
5 — Lecture	À dire à voix haute: « $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2$ plus O_2 ; CO_2 plus $4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$ plus $2\text{H}_2\text{O}$ ».
6 — Symboles et sens	H_2O : eau ; H_2 : dihydrogène ; O_2 : dioxygène ; CO_2 : dioxyde de carbone ; CH_4 : méthane ; les coefficients devant les espèces sont les rapports stœchiométriques idéaux.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	coefficients sans dimension; quantités en mol; masses en g ou kg après conversion par masse molaire.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Une équation chimique exprime d'abord une conservation des atomes. On équilibre les coefficients stœchiométriques, puis seulement on convertit ces rapports de moles en masses avec les masses molaires; la flèche n'est pas un signe égal arithmétique.
11 — Hypothèses	Limites: les coefficients donnent une stœchiométrie idéale. Rendement réel, pureté, réactions parasites, équilibre chimique et réactif limitant doivent être ajoutés pour prédire une production réelle.
12 — Contrôle d'unités	coefficients sans dimension; quantités en mol; masses en g ou kg après conversion par masse molaire. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Cas idéal : 36 kg d'eau donnent 4 kg de H_2 et 32 kg d' O_2 par électrolyse. Ces 4 kg de H_2 correspondent ensuite à la moitié du besoin stœchiométrique de 8 kg H_2 pour 44 kg CO_2 dans Sabatier.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Une équation chimique exprime d'abord une conservation des atomes. On équilibre les coefficients stœchiométriques, puis seulement on convertit ces rapports de moles en masses avec les masses molaires; la flèche n'est pas un signe égal arithmétique.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant: recompter chaque élément atome par atome des deux côtés et fermer le bilan de masse idéal avec les masses molaires; les deux tests doivent être cohérents.
16 — Estimation mentale	Le nombre total d'atomes de chaque élément doit être identique avant et après la flèche. Un bilan massique idéal doit aussi fermer à l'arrondi près.
17 — Interprétation	Pour «Lecture de sûreté», le résultat de « $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$; $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.

pas

19 — Sensibilité

Sensibilité stœchiométrique: si un réactif limitant augmente de 10 % et que les autres restent en excès, la quantité théorique de produit augmente de 10 %; dès qu'un autre réactif devient limitant, la branche change.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Augmentez la quantité d'eau électrolysée de 10 %, à 39,6 kg. Calculez H_2 et O_2 produits, puis la quantité de CO_2 compatible avec tout le H_2 dans Sabatier.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. $39,6/36 = 1,10$. L'électrolyse idéale fournit donc $4 \times 1,10 = 4,4$ kg H_2 et $32 \times 1,10 = 35,2$ kg O_2 . Sabatier consomme $44/8 = 5,5$ kg CO_2 par kg H_2 : $4,4 \times 5,5 = 24,2$ kg CO_2 . La production idéale associée est 8,8 kg CH_4 et 19,8 kg H_2O .

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Couplage électrolyse–Sabatier» en changeant au moins deux données de $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$; $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$; $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Ne jamais compter deux fois une même molécule recyclée dans le bilan global de matière.

21 — Décision mission

Ne jamais compter deux fois une même molécule recyclée dans le bilan global de matière.

La stœchiométrie indique les idéales; elle ne donne ni l'efficacité électrique, ni la pureté, ni la durée de vie des catalyseurs.

Cas de matière — oxygène

Dans un bilan idéal, 72 kg d'eau électrolysés donnent 8 kg d' H_2 et 64 kg d' O_2 . Si les 8 kg H_2 alimentent Sabatier avec 44 kg CO_2 , la réaction produit 36 kg d'eau et 16 kg CH_4 ; seule la moitié de l'hydrogène initial revient après ré-électrolyse de cette eau. Le circuit possède donc encore une frontière ouverte à identifier.

5. Eau: comprendre le jalon des 98 %

La NASA a annoncé que l'ECLSS de l'ISS avait démontré environ 98 % de récupération totale d'eau avec le Brine Processor Assembly, contre environ 93–94 % avant ce système. Ce chiffre agrégé ne signifie pas que chaque individuel récupère 98 %.

Scénario pédagogique: $q = 20$ kg/personne/jour de flux brut. À 100 personnes, $qN = 2\,000$ kg/j. À $R = 0,98$, appoint = 40 kg/j; à $R = 0,94$, appoint = 120 kg/j. L'écart est 80 kg/j, soit 29,2 t/an.

Besoin d'appoint avec récupération

$$M_{\text{appoint}} = q \times N \times (1 - R)$$

1 — Question concrète	Dans «5. Eau: comprendre le jalon des 98 %», comment évaluer M_{appoint} à partir des facteurs de « $M_{\text{appoint}} = q \times N \times (1 - R)$ »?
2 — Intuition sans symboles	La consommation brute de tout l'équipage est réduite par la fraction effectivement récupérée, et seule la perte doit être remplacée.
3 — Grandeurs	M_{appoint} : flux d'appoint externe ; q : besoin brut par personne et par unité de temps ; N : effectif ; R : fraction récupérée, comprise entre 0 et 1.
4 — Formule	$M_{\text{appoint}} = q \times N \times (1 - R)$
5 — Lecture	À dire à voix haute: « M indice appoint égale q multiplié par N multiplié par (1 moins R)».
6 — Symboles et sens	M_{appoint} : flux d'appoint externe ; q : besoin brut par personne et par unité de temps ; N : effectif ; R : fraction récupérée, comprise entre 0 et 1.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Si q est en $\text{kg}/(\text{personne} \cdot \text{j})$, N est un nombre de personnes et R est sans dimension, alors M_{appoint} est en kg/j . Le même raisonnement vaut pour un débit volumique si q est exprimé en $\text{L}/(\text{personne} \cdot \text{j})$.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	On calcule d'abord le besoin brut du groupe $q \times N$. La fraction récupérée vaut R ; la fraction perdue à remplacer vaut donc $1 - R$. L'appoint est exactement le produit $q \times N \times (1 - R)$, jamais une soustraction entre q , N et R .
11 — Hypothèses	q et R doivent décrire la même frontière de système et la même période; $0 \leq R \leq 1$; N est l'effectif réellement servi. Les fuites ou pertes non incluses dans R doivent être comptées séparément.
12 — Contrôle d'unités	Si q est en $\text{kg}/(\text{personne} \cdot \text{j})$, N est un nombre de personnes et R est sans dimension, alors M_{appoint} est en kg/j . Le même raisonnement vaut pour un débit volumique si q est exprimé en $\text{L}/(\text{personne} \cdot \text{j})$. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : $q = 20 \text{ kg}/(\text{personne} \cdot \text{j})$, $N = 20$ et $R = 0,98$ donnent $M_{\text{appoint}} = 20 \times 20 \times 0,02 = 8 \text{ kg}/\text{j}$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	On calcule d'abord le besoin brut du groupe $q \times N$. La fraction récupérée vaut R ; la fraction perdue à remplacer vaut donc $1 - R$. L'appoint est exactement le produit $q \times N \times (1 - R)$, jamais une soustraction entre q , N et R .
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — diviser M_{appoint} par $q \times N$: le quotient doit redonner $1 - R$. Puis vérifier que $R + M_{\text{appoint}}/(qN) = 1$, à l'arrondi près.
16 — Estimation mentale	Le produit attendu peut être borné avec des facteurs ronds proches de ceux de $q \times N \times (1 - R)$. Si M_{appoint} sort largement de cette borne, reprendre la saisie.
17 — Interprétation	Pour «5. Eau: comprendre le jalon des 98 %», le résultat de « $M_{\text{appoint}} = q \times N \times (1 - R)$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel

	périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	À q et N fixes, l'appoint est proportionnel à 1-R: si R passe de 0,90 à 0,99, la fraction perdue passe de 0,10 à 0,01 et l'appoint est divisé par dix. À R fixe, +10 % sur q ou sur N donne +10 % sur M_appoint.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez q de 10 %, de 20 à 22 kg/personne/j, en conservant N = 20 et R = 0,98. Recalculez l'appoint. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $M_{\text{appoint}} = 22 \times 20 \times (1 - 0,98) = 440 \times 0,02 = 8,8 \text{ kg/j}$. Une hausse de 10 % de la demande brute augmente ici de 10 % l'appoint, de 8 à 8,8 kg/j. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Besoin d'appoint avec récupération» en changeant au moins deux données de $M_{\text{appoint}} = q \times N \times (1 - R)$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $M_{\text{appoint}} = q \times N \times (1 - R)$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Dimensionner le stock d'appoint sur un rendement démontré en mode réel, pas sur le meilleur chiffre de laboratoire.
21 — Décision mission	Dimensionner le stock d'appoint sur un rendement démontré en mode réel, pas sur le meilleur chiffre de laboratoire.

Exercice 5

Pour 1 000 personnes, q = 20 kg/j et R = 0,98: appoint annuel?

Correction: $400 \text{ kg/j} \times 365 = 146\,000 \text{ kg} = 146 \text{ t/an}$. q est une hypothèse pédagogique.

Le résultat de 146 t/an montre pourquoi 98 % de récupération n'équivaut pas à l'autonomie. Avec 1 000 personnes, les 2 % restants deviennent une masse logistique majeure; q doit rester explicitement identifié comme hypothèse pédagogique.

Données du cas

Exercice 5 — Pour 1 000 personnes, q = 20 kg/j et R = 0,98: appoint annuel?

Relation

Correction: $400 \text{ kg/j} \times 365 = 146\,000 \text{ kg} = 146 \text{ t/an}$.

Raisonnement

Correction: $400 \text{ kg/j} \times 365 = 146\,000 \text{ kg} = 146 \text{ t/an}$. q est une hypothèse pédagogique. Le résultat de 146 t/an montre pourquoi 98 % de récupération n'équivaut pas à l'autonomie. Avec 1 000 personnes, les 2 % restants deviennent une masse logistique majeure; q doit rester explicitement identifié comme hypothèse pédagogique.

Résultat

$$400 \text{ kg/j} \times 365 = 146\,000 \text{ kg} = 146 \text{ t/an.}$$

Contrôle

q doit rester explicitement identifié comme hypothèse pédagogique.

Interprétation

Le résultat de 146 t/an montre pourquoi 98 % de récupération n'équivaut pas à l'autonomie.

Étude intégrée — l'eau à 98 % ne supprime pas les pertes

La a démontré sur l'ISS un jalon d'environ 98 % de récupération totale de l'eau, contre environ 93–94 % auparavant. Prenons un scénario pédagogique de flux brut de 20 kg/personne/jour. Pour 20 personnes, le flux brut vaut 400 kg/j. À 98 %, l'appoint idéal dû à la seule fraction non récupérée vaut 8 kg/j, soit environ 2,92 t/an. À 94 %, il vaut 24 kg/j, soit 8,76 t/an. Quatre points de récupération changent donc l'appoint annuel de 5,84 t dans cet exemple.

Le calcul ne doit pas être confondu avec une NASA sur la consommation d'un colon: 20 kg/personne/jour est une hypothèse pédagogique de flux à travers la boucle. Les fuites, pertes de maintenance, rejets de qualité, eau immobilisée dans des procédés ou nourriture et inventaire de sécurité s'ajoutent. Un chiffre global de récupération ne remplace pas le bilan détaillé des flux.

Effet du rendement de récupération

à 98 % : 8 kg/j ; à 94 % : 24 kg/j ; écart annuel = 5,84 t

1 — Question concrète	Comment enchaîner correctement les relations réunies dans « $20 \times 20 \times (1 - 0,98) = 8 \text{ kg/j}$; à 94 %: 24 kg/j ; différence annuelle = 5,84 t» pour «Exercice 5»?
2 — Intuition sans symboles	Une petite baisse du pourcentage récupéré peut multiplier fortement la masse d'appoint à transporter sur une longue durée.
3 — Grandeurs	Les nombres 98 % et 94 % sont des taux de récupération ; 8 et 24 kg/j sont les appoints correspondants dans le scénario ; 5,84 t/an est leur écart annualisé.
4 — Formule	à 98 % : 8 kg/j ; à 94 % : 24 kg/j ; écart annuel = 5,84 t
5 — Lecture	À dire à voix haute: «20 multiplié par 20 multiplié par (1 moins 0,98) égale 8 kg divisé par j; à 94 %: 24 kg divisé par j; différence annuelle égale 5,84 t».
6 — Symboles et sens	Les nombres 98 % et 94 % sont des taux de récupération ; 8 et 24 kg/j sont les appoints correspondants dans le scénario ; 5,84 t/an est leur écart annualisé.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	suivre les unités écrites dans « $20 \times 20 \times (1 - 0,98) = 8 \text{ kg/j}$; à 94 %: 24 kg/j ; différence annuelle = 5,84 t» et vérifier leur simplification jusqu'au résultat.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Chaque sous-relation produit une information qui alimente la suivante. Les hypothèses et les unités doivent être vérifiées à chaque transition.
11 — Hypothèses	Chaque relation conserve ses propres limites; si une hypothèse échoue dans une étape, toute la chaîne doit être réévaluée.
12 — Contrôle d'unités	suivre les unités écrites dans « $20 \times 20 \times (1 - 0,98) = 8 \text{ kg/j}$; à 94 %: 24 kg/j ; différence annuelle = 5,84 t» et vérifier leur simplification jusqu'au résultat. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : pour un flux brut de 400 kg/j, 98 % de récupération impose 8 kg/j d'appoint alors que 94 % impose 24 kg/j. L'écart de 16 kg/j représente 5 840 kg/an, soit 5,84 t/an.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Chaque sous-relation produit une information qui alimente la suivante. Les hypothèses et les unités doivent être vérifiées à chaque transition.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle en sens inverse: repartir du résultat final et vérifier, lorsque l'inverse existe, qu'une valeur intermédiaire connue est reconstruite.
16 — Estimation mentale	Estimer l'échelle après chaque sous-calcul afin de repérer immédiatement l'étape qui produit une valeur incohérente.
17 — Interprétation	Pour «Exercice 5», le résultat de $20 \times 20 \times (1 - 0,98) = 8$ kg/j; à 94 %: 24 kg/j; différence annuelle = 5,84 t prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Faire varier une entrée et propager son effet étape par étape montre où la chaîne amplifie ou amortit la perturbation.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Avec le même flux brut de 400 kg/j, supposez une baisse de récupération de 98 % à 97 %. Calculez le nouvel appoint et l'écart annuel par rapport à 98 %. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. À 97 %, la fraction perdue vaut 3 %, donc l'appoint est $400 \times 0,03 = 12$ kg/j. Par rapport aux 8 kg/j à 98 %, l'écart est +4 kg/j. Sur 365 jours : $4 \times 365 = 1\,460$ kg/an, soit 1,46 t/an supplémentaires. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Effet du rendement de récupération» en changeant au moins deux données de à 98 % : 8 kg/j ; à 94 % : 24 kg/j ; écart annuel = 5,84 t. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans à 98 % : 8 kg/j ; à 94 % : 24 kg/j ; écart annuel = 5,84 t, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Traiter quelques points de rendement perdus comme une conséquence logistique majeure sur une mission longue.
21 — Décision mission	Traiter quelques points de rendement perdus comme une conséquence logistique majeure sur une mission longue.

Intuition système

Le jalon ISS de 98 % est une performance de récupération globale démontrée dans une architecture précise, pas une promesse que toute boucle martienne perdra exactement 2 %. Pour apprendre à dimensionner, il faut convertir le pourcentage en masse d'appoint, puis ajouter stockage, qualité, pertes de maintenance et scénarios de panne.

Le flux q doit être défini: eau potable seule, eau totale traitée ou débit de boucle donnent des résultats radicalement différents.

Cas de logistique — eau

Pour 100 personnes, prenez un débit traité pédagogique de 20 kg/personne/jour. À 98 % de récupération, l'appoint idéal est 40 kg/j; à 94 %, 120 kg/j. Sur une année, l'écart est 29,2 tonnes. Ce calcul ne fixe pas le débit réel d'une colonie: il montre la sensibilité logistique à quelques points de récupération lorsque la population devient grande.

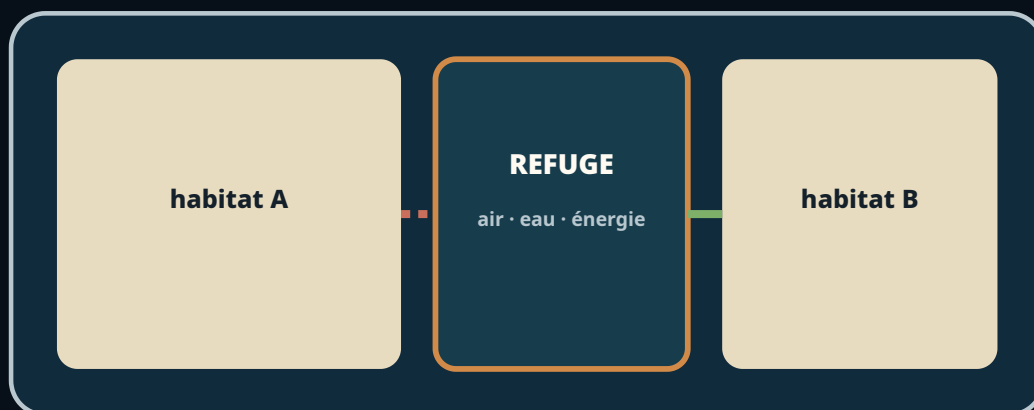
6. Récupérer l'eau ne suffit pas: il faut la qualifier

La NASA décrit une chaîne ISS comprenant filtration, traitement catalytique, capteurs de qualité et retraitement d'une eau non conforme. Une boucle de récupération est donc aussi un laboratoire permanent.

Un faux "bon" de capteur peut être plus dangereux qu'un filtre clairement arrêté. Échantillonnage, étalonnage, critères d'acceptation et stockage tampon réduisent le risque qu'une mesure unique contamine tout le réseau.

Space Academy · 12

Compartimentage et refuge / compartmentation and safe haven



Le refuge doit survivre à la perte d'une autre zone

Refuge et mode dégradé: séquencer l'isolement, les réserves, la réparation puis la remise en service.

Bilan quantifié

La qualité de l'eau est une fonction séparée du massique. Une boucle très efficace qui laisse passer un contaminant critique est inutilisable. Il faut donc définir paramètres de qualité, fréquence d'échantillonnage, capteurs, analyses de confirmation, capacité de retraitement et volume de quarantaine pour un lot douteux.

Acceptation de l'eau produite

eau acceptée = eau produite $\cap$ critères de qualité

1 — Question concrète	Au point «Bilan quantifié», comment faut-il appliquer la règle de qualification ou de dépendance eau acceptée = eau produite $\cap$ critères de qualité?
2 — Intuition sans symboles	Produire de l'eau ne suffit pas : elle ne rejoint le stock utilisable que si les critères de qualité sont satisfaits.
3 — Grandeurs	eau produite : lot issu du procédé ; critères de qualité : ensemble des seuils et preuves requis ; $\cap$ signifie que le lot n'est accepté que s'il appartient simultanément aux deux ensembles : produit et qualifié.
4 — Formule	eau acceptée = eau produite $\cap$ critères de qualité
5 — Lecture	À dire à voix haute: «eau acceptée égale eau produite $\cap$ critères de qualité».
6 — Symboles et sens	eau produite : lot issu du procédé ; critères de qualité : ensemble des seuils et preuves requis ; $\cap$ signifie que le lot n'est accepté que s'il appartient simultanément aux deux ensembles : produit et qualifié.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	la relation elle-même n'a pas de dimension physique unique; les unités restent celles des grandeurs citées
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Le symbole $\cap$ signifie ici que l'eau n'est acceptée que si elle appartient simultanément au flux produit et à l'ensemble des critères de qualité satisfaits. C'est une condition de qualification, pas une multiplication de volumes.
11 — Hypothèses	Limites: cette écriture résume une règle de qualification ou de dépendance; elle n'autorise pas à convertir automatiquement les conditions en nombres ni à supposer leur indépendance.
12 — Contrôle d'unités	la relation elle-même n'a pas de dimension physique unique; les unités restent celles des grandeurs citées Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique de qualification : un lot de 120 L respecte un seuil pédagogique de conductivité fixé à 5 μ S/cm avec 4,8 μ S/cm, mais son carbone organique total vaut 0,70 mg/L pour un seuil pédagogique de 0,50 mg/L. Le volume est suffisant, mais le lot reste refusé car un critère échoue.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Le symbole $\cap$ signifie ici que l'eau n'est acceptée que si elle appartient simultanément au flux produit et à l'ensemble des critères de qualité satisfaits. C'est une condition de

	qualification, pas une multiplication de volumes.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle par table de cas: construire au moins un cas satisfaisant toutes les conditions et un cas qui en viole une; la sortie doit changer conformément à la règle.
16 — Estimation mentale	Tester un cas manifestement conforme et un cas manifestement non conforme; la règle doit les classer dans le bon sens avant d'être appliquée au cas limite.
17 — Interprétation	Pour «Bilan quantifié», le résultat de «eau acceptée = eau produite n critères de qualité» prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Sensibilité logique: modifier une condition à la fois permet d'identifier celle qui fait basculer l'acceptation ou invalide la simplification.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Après retraitement, le même lot de 120 L mesure 4,6 $\mu\text{S/cm}$ et 0,40 mg/L pour les mêmes seuils pédagogiques. Appliquez la règle d'acceptation. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. Conductivité : $4,6 < 5 \mu\text{S/cm}$, PASS. Carbone organique total : $0,40 < 0,50 \text{ mg/L}$, PASS. Les deux critères déclarés sont satisfaits ; dans ce scénario pédagogique limité à ces deux critères, le lot peut être accepté. Le calcul ne prétend pas constituer une norme réelle de potabilité. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Acceptation de l'eau produite» en changeant au moins deux données de eau acceptée = eau produite n critères de qualité. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans eau acceptée = eau produite n critères de qualité, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Séparer physiquement et informatiquement eau produite, eau testée et eau acceptée.
21 — Décision mission	Séparer physiquement et informatiquement eau produite, eau testée et eau acceptée.

Une mesure conforme ne prouve pas que tous les contaminants possibles ont été mesurés; le plan de contrôle doit relier risque et méthode analytique.

Cas de qualification — eau

Imaginez qu'un processeur produise 500 L/j et que 2 % des lots soient temporairement hors spécification. Même avec un excellent bilan de masse, l'exploitation doit disposer d'un tampon pour isoler ces lots, les retraiter ou les analyser. Si le temps de confirmation laboratoire est 12 h, le volume tampon ne peut pas être dimensionné uniquement sur le débit moyen de consommation.

7. Nourriture et déchets: fermeture partielle

La nourriture combine calories, protéines, micronutriments, eau, durée de stockage et acceptabilité. Les cultures peuvent fournir du frais et contribuer à certains échanges gazeux, sans supprimer immédiatement la logistique alimentaire.

Les déchets contiennent encore eau, carbone, azote, phosphore et matériaux. Les récupérer demande énergie, réacteurs, contrôles sanitaires et maintenance. Une boucle optimale peut accepter une perte résiduelle lorsque le coût de fermeture supplémentaire devient supérieur à sa valeur.

Mode dégradé

La nourriture introduit un compromis entre masse expédiée, eau contenue, stabilité nutritionnelle, temps équipage, cultures fraîches et déchets. Les végétaux peuvent fournir variété et micronutriments sans que l'habitat devienne automatiquement autosuffisant en calories. Le bilan doit compter énergie lumineuse, eau, nutriments, volume, maintenance et pertes de récolte.

Masse d'un aliment humide

$$m_{\text{aliment}} = m_{\text{sec}} / (1 - f_{\text{eau}})$$

1 — Question concrète	La relation « $m_{\text{aliment}} = m_{\text{sec}} / (1 - f_{\text{eau}})$ » compare m_{sec} à $(1 - f_{\text{eau}})$: quel est le ratio m_{aliment} ?
2 — Intuition sans symboles	La matière sèche représente seulement la fraction non aqueuse de l'aliment ; retrouver la masse totale impose de tenir compte de la part d'eau.
3 — Grandeurs	m_{aliment} : masse totale de l'aliment humide ; m_{sec} : masse de matière sèche ; f_{eau} : fraction massique d'eau, entre 0 et 1.
4 — Formule	$m_{\text{aliment}} = m_{\text{sec}} / (1 - f_{\text{eau}})$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «m indice aliment égale m indice sec divisé par (1 moins f indice eau)».
6 — Symboles et sens	m_{aliment} : masse totale de l'aliment humide ; m_{sec} : masse de matière sèche ; f_{eau} : fraction massique d'eau, entre 0 et 1.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	$m_{\text{aliment}} \rightarrow \text{kg}$; $m_{\text{sec}} \rightarrow \text{kg}$; $f_{\text{eau}} \rightarrow$ sans dimension [0;1].
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.

10 — Pourquoi cette opération	La matière sèche représente la fraction $1-f_{\text{eau}}$ de la masse totale. Donc $m_{\text{sec}} = m_{\text{aliment}}(1-f_{\text{eau}})$; isoler m_{aliment} impose de diviser m_{sec} par $1-f_{\text{eau}}$.
11 — Hypothèses	Le quotient n'est interprétable que si $(1-f_{\text{eau}}) \neq 0$ et si m_{sec} et $(1-f_{\text{eau}})$ portent sur la même définition de système. Mélanger deux frontières fausse m_{aliment} .
12 — Contrôle d'unités	$m_{\text{aliment}} \rightarrow \text{kg}$; $m_{\text{sec}} \rightarrow \text{kg}$; $f_{\text{eau}} \rightarrow$ sans dimension $[0;1]$. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : avec $m_{\text{sec}} = 6 \text{ kg}$ et $f_{\text{eau}} = 0,60$, $m_{\text{aliment}} = 6/(1 - 0,60) = 15 \text{ kg}$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	La matière sèche représente la fraction $1-f_{\text{eau}}$ de la masse totale. Donc $m_{\text{sec}} = m_{\text{aliment}}(1-f_{\text{eau}})$; isoler m_{aliment} impose de diviser m_{sec} par $1-f_{\text{eau}}$.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: $m_{\text{aliment}} \times (1-f_{\text{eau}})$ doit redonner m_{sec} . Si f_{eau} augmente à masse sèche constante, la masse totale humide doit augmenter.
16 — Estimation mentale	Contrôle mental : $1-f_{\text{eau}}$ est la fraction de matière sèche. Si l'aliment contient 80 % d'eau, cette fraction vaut 0,20 et la masse totale doit être environ cinq fois la masse sèche. Pour $0 < f_{\text{eau}} < 1$, m_{aliment} doit donc rester supérieur à m_{sec} .
17 — Interprétation	Pour «Mode dégradé», le résultat de « $m_{\text{aliment}} = m_{\text{sec}} / (1-f_{\text{eau}})$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Le numérateur agit linéairement: doubler m_{sec} double m_{aliment} . Le dénominateur agit en sens inverse: doubler $(1-f_{\text{eau}})$ réduit m_{aliment} de moitié.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez la fraction d'eau de 10 % relativement, de 0,60 à 0,66, en gardant 6 kg de matière sèche. Recalculez la masse totale. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $1 - 0,66 = 0,34$. Donc $m_{\text{aliment}} = 6/0,34 = 17,65 \text{ kg}$ environ. L'eau supplémentaire augmente la masse humide alors que la matière sèche reste 6 kg : $15,0 \rightarrow 17,65 \text{ kg}$. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Masse d'un aliment humide» en changeant au moins deux données de $m_{\text{aliment}} = m_{\text{sec}} / (1 - f_{\text{eau}})$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $m_{\text{aliment}} = m_{\text{sec}} / (1 - f_{\text{eau}})$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Distinguer masse nutritionnelle sèche et masse logistique totale avant de dimensionner stocks et déchets.
21 — Décision	Distinguer masse nutritionnelle sèche et masse logistique totale avant de dimensionner

Une réduction de masse d'aliment peut déplacer la charge vers l'eau ou l'énergie; l'optimum se juge au niveau du système.

Cas de système — nourriture

Une ration préemballée de 2,0 kg/j à 46 % d'eau contient 1,08 kg de matière sèche. À 30 % d'eau, conserver la même matière sèche donnerait 1,54 kg/j. La masse expédiée diminue d'environ 0,46 kg/j, mais la boucle d'eau doit fournir davantage lors de la consommation. Il faut donc déplacer la frontière du bilan plutôt que compter deux fois le gain.

8. Incendie, dépressurisation et refuge

Un incendie combine chaleur, fumées et gaz toxiques; une combine perte d'atmosphère et risque structurel. Dans les deux cas, il faut pouvoir abandonner localement le mode nominal: compartiments, portes, masques, extincteurs, réserves et

Un refuge possède son propre budget d'air, eau, et communications pour une durée définie. Cette durée doit couvrir détection, isolement, diagnostic et réparation, pas seulement rassurer. Les consommables de secours doivent être physiquement indépendants du défaut contre lequel ils protègent.

Scénario refuge — 72 heures sans ressource externe

Imaginez un compartiment refuge pour 6 personnes pendant 72 h. Au lieu de commencer par une masse arbitraire, dressez la liste des fonctions: pression, oxygène, retrait du CO₂, eau potable, température, puissance de contrôle, éclairage minimal, communication, soins et toilettes. Chaque fonction reçoit un stock ou une capacité, une marge et un critère de sortie. Le refuge n'est pas seulement « une pièce renforcée »; c'est un mini-système vital isolable.

Pour l'eau potable, si le scénario pédagogique retient 4 kg/personne/jour de besoin direct, la base arithmétique vaut $6 \times 4 \times 3 = 72$ kg avant marge. Ajouter 25 % donne 90 kg. Cette masse n'inclut pas l'eau de lutte incendie ni les usages médicaux. Pour l'électricité, une charge critique moyenne de 1,5 kW pendant 72 h exige 108 kWh utiles; avec 85 % de chaîne de stockage, il faut environ 127 kWh stockés en amont. Deux fonctions, deux budgets, deux hypothèses clairement séparées.

Refuge autonome pendant trois jours

$$M_{\text{eau}} = N q t k ; E_{\text{stock}} = P t / \eta$$

1 — Question concrète	Dans «8. Incendie, dépressurisation et refuge», comment évaluer eau à partir des facteurs de «eau = $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ »?
2 — Intuition sans symboles	Un refuge doit couvrir simultanément le besoin humain et l'énergie critique pendant toute la durée protégée, avec une marge explicite.
3 — Grandeurs	M_{eau} : masse d'eau de secours ; N : équipage ; q : besoin d'eau par personne et par jour ; t : durée ; k : coefficient de marge ; E_{stock} : énergie à stocker ; P : puissance critique ; η : rendement global du stockage, entre 0 et 1.
4 — Formule	$M_{\text{eau}} = N q t k ; E_{\text{stock}} = P t / \eta$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «eau égale 6 multiplié par 4 multiplié par 3 multiplié par 1,25».

6 — Symboles et sens	M_eau : masse d'eau de secours ; N : équipage ; q : besoin d'eau par personne et par jour ; t : durée ; k : coefficient de marge ; E_stock : énergie à stocker ; P : puissance critique ; η : rendement global du stockage, entre 0 et 1.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	quantité d'eau de secours → L ou kg selon le bilan.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	«eau = $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ » n'additionne pas ses entrées: les termes de $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ se multiplient. Cette structure signifie que modifier un facteur change directement l'échelle de eau.
11 — Hypothèses	Avant d'extrapoler eau, vérifier que chaque facteur de $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ conserve sa définition et que les coefficients implicites restent valables dans le régime considéré.
12 — Contrôle d'unités	quantité d'eau de secours → L ou kg selon le bilan. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : N = 6, q = 4 kg/personne/j, t = 3 j et k = 1,25 donnent M_eau = $6 \times 4 \times 3 \times 1,25 = 90$ kg. Pour P = 1,5 kW pendant 72 h avec $\eta = 0,85$, E_stock = $1,5 \times 72 / 0,85 = 127,1$ kWh.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	«eau = $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ » n'additionne pas ses entrées: les termes de $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ se multiplient. Cette structure signifie que modifier un facteur change directement l'échelle de eau.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Pour tester eau sans répéter exactement le calcul, isoler un facteur de «eau = $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ » et le retrouver par division du résultat par le produit des autres facteurs.
16 — Estimation mentale	Le produit attendu peut être borné avec des facteurs ronds proches de ceux de $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$. Si eau sort largement de cette borne, reprendre la saisie.
17 — Interprétation	Pour «8. Incendie, dépressurisation et refuge», le résultat de «eau = $6 \times 4 \times 3 \times 1,25$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Pour un produit simple, la variation relative de eau suit celle du facteur que l'on change isolément. Les perturbations simultanées se multiplient entre elles.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez la durée de refuge de 10 %, de 3 à 3,3 jours, sans changer les autres hypothèses. Recalculez l'eau et l'énergie stockées nécessaires. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. Pour l'eau : M_eau = $6 \times 4 \times 3,3 \times 1,25 = 99$ kg. Pour l'énergie, 3,3 jours = 79,2 h ; E_stock = $1,5 \times 79,2 / 0,85 = 139,8$ kWh environ. Les deux besoins augmentent de 10 % car la durée intervient linéairement dans les deux relations.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Refuge autonome pendant trois jours» en changeant au moins deux données de $M_{\text{eau}} = N q t k$; $E_{\text{stock}} = P t / \eta$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $M_{\text{eau}} = N q t k$; $E_{\text{stock}} = P t / \eta$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Valider le refuge seulement si eau, énergie, air, communications et accès restent indépendants de la panne principale.

21 — Décision mission

Valider le refuge seulement si eau, énergie, air, communications et accès restent indépendants de la panne principale.

Lecture de sûreté

Incendie et dépressurisation exigent des réponses opposées sur certains points: un feu peut demander confinement, coupure de ventilation ou extinction, tandis qu'une fuite impose isolement de volume et gestion d'une perte de pression. Le refuge doit rester habitable pendant la réparation sans dépendre du même défaut qui a déclenché l'urgence.

Autonomie d'un refuge

$$t_{\text{refuge}} = \text{stocks} / \text{consommation_mode_secours}$$

1 — Question concrète	La relation «autonomie_refuge = stocks / consommation_mode_secours» compare stocks à consommation_mode_secours: quel est le ratio autonomie_refuge?
2 — Intuition sans symboles	La durée utile d'un refuge est déterminée par la ressource critique qui s'épuise la première en mode secours.
3 — Grandeurs	t_{refuge} : autonomie ; stocks : quantité vérifiée disponible ; consommation_mode_secours : débit de consommation en fonctionnement dégradé.
4 — Formule	$t_{\text{refuge}} = \text{stocks} / \text{consommation_mode_secours}$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «autonomie indice refuge égale stocks divisé par consommation indice mode indice secours».
6 — Symboles et sens	t_{refuge} : autonomie ; stocks : quantité vérifiée disponible ; consommation_mode_secours : débit de consommation en fonctionnement dégradé.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	stocks en kg, L, doses, Wh ou autre unité de quantité; consommation_mode_secours dans la même unité par unité de temps; autonomie_refuge en h, j ou autre durée cohérente.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici

	est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	L'autonomie est une quantité disponible divisée par un débit de consommation. Exemple d'unités: $\text{kg} \div (\text{kg/j}) = \text{j}$.
11 — Hypothèses	Le quotient n'est interprétable que si consommation_mode_secours $\neq$ 0 et si stocks et consommation_mode_secours portent sur la même définition de système. Mélanger deux frontières fausse autonomie_refuge.
12 — Contrôle d'unités	stocks en kg, L, doses, Wh ou autre unité de quantité; consommation_mode_secours dans la même unité par unité de temps; autonomie_refuge en h, j ou autre durée cohérente. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : un stock vérifié de 90 kg consommé à 30 kg/j donne $t_{\text{refuge}} = 90/30 = 3$ jours.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	L'autonomie est une quantité disponible divisée par un débit de consommation. Exemple d'unités: $\text{kg} \div (\text{kg/j}) = \text{j}$.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: autonomie_refuge $\times$ consommation_mode_secours doit redonner stocks.
16 — Estimation mentale	Contrôle mental : convertir le stock et le débit de secours dans des unités compatibles, puis demander combien d'unités de temps le stock peut alimenter ce débit. Un stock correspondant à environ 24 consommations horaires donne près de 24 h d'autonomie de refuge.
17 — Interprétation	Pour «Lecture de sûreté», le résultat de «autonomie_refuge = stocks / consommation_mode_secours» prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Le numérateur agit linéairement: doubler stocks double autonomie_refuge. Le dénominateur agit en sens inverse: doubler consommation_mode_secours réduit autonomie_refuge de moitié.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez le stock de 10 %, de 90 à 99 kg, en conservant 30 kg/j de consommation de secours. Recalculez l'autonomie. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $t_{\text{refuge}} = 99/30 = 3,3$ jours. Le débit étant inchangé, +10 % de stock donne +10 % d'autonomie : $3,0 \rightarrow 3,3$ jours. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Autonomie d'un refuge» en changeant au moins deux données de $t_{\text{refuge}} = \text{stocks} / \text{consommation_mode_secours}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $t_{\text{refuge}} = \text{stocks} / \text{consommation_mode_secours}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de

référence et justifier la décision suivante : Retenir comme autonomie du refuge le minimum des autonomies eau, énergie, oxygène et consommables critiques.

21 — Décision mission

Retenir comme autonomie du refuge le minimum des autonomies eau, énergie, oxygène et consommables critiques.

Le concept NASA de refuge 30 jours est une architecture étudiée, pas une durée universelle; la mission doit démontrer son propre temps de récupération.

Cas d'urgence — refuge

Pour huit personnes pendant 30 jours, une charge vitale moyenne de 3 kW représente 2 160 kWh si aucune production n'est disponible. Avec 80 % d'énergie utilisable et 90 % de rendement de conversion, le stockage nominal nécessaire devient $2\,160 / (0,8 \times 0,9) \approx 3\,000$ kWh. L'exercice sépare consommation utile, profondeur de décharge et pertes.

9. Poussière martienne: un risque de contamination mesurable

En juillet 2026, la NASA a établi une exigence préliminaire de $0,1 \text{ mg/m}^3$ en moyenne sur 24 h pour les particules martiennes $<10 \text{ }\mu\text{m}$ dans des scénarios d'exposition jusqu'à 30 jours. L'agence souligne les incertitudes dues à l'absence d'échantillons authentiques de aéroporée retournés pour toxicologie complète.

À cette concentration, 100 m^3 d'air contiennent 10 mg suspendus en moyenne. La masse est minime mais l'exposition respiratoire concerne précisément des particules fines. Sas, gestion des scaphandres, nettoyage, filtration et capteurs forment donc une défense en profondeur.

Scénario — poussière, sas et contamination croisée

La NASA a publié en juillet 2026 une exigence préliminaire visant les particules martiennes de moins de $10 \text{ }\mu\text{m}$: moyenne pondérée sur 24 h inférieure à $0,1 \text{ mg/m}^3$ pour certains scénarios jusqu'à 30 jours. Dans un habitat de 150 m^3 , cette concentration moyenne correspond à 15 mg de masse aérienne à cet instant moyen. Une faible masse totale peut donc suffire à dépasser un critère respiratoire quand elle est dispersée en particules fines.

L'architecture de contamination cherche à empêcher la poussière d'atteindre l'air habitable: zones sales et propres, dépoussiérage des scaphandres, surfaces nettoyables, filtration, mesure et procédures après EVA. Comme aucune poussière martienne aéroporée authentique n'a encore été rapportée sur Terre, la NASA souligne de la limite initiale. Le bon réflexe est donc de concevoir pour mesurer et réviser, pas de traiter $0,1 \text{ mg/m}^3$ comme une vérité biologique définitive.

Charge totale de poussière

$$m = C \times V$$

1 — Question concrète

Quelle information la relation « $0,1 \text{ mg/m}^3 \times 150 \text{ m}^3 = 15 \text{ mg}$ » permet-elle de calculer pour $0,1 \text{ mg/m}^3 \times 150 \text{ m}^3$ dans «9. Poussière martienne: un risque de contamination mesurable»?

2 — Intuition sans symboles

Une concentration multipliée par le volume d'air concerné donne la masse totale présente dans ce volume.

3 — Grandeurs	m : masse totale de contaminant en suspension ; C : concentration massique ; V : volume d'air considéré.
4 — Formule	$m = C \times V$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «0,1 mg divisé par m^3 multiplié par 150 m^3 égale 15 mg».
6 — Symboles et sens	m : masse totale de contaminant en suspension ; C : concentration massique ; V : volume d'air considéré.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	suivre les unités écrites dans «0,1 mg/ m^3 × 150 m^3 = 15 mg» et vérifier leur simplification jusqu'au résultat.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Les symboles expriment un lien mathématique précis entre grandeurs. Le calcul respecte ce lien et conserve la signification de chaque terme.
11 — Hypothèses	La formule doit rester utilisée sur le périmètre pour lequel elle a été définie. Les unités compatibles ne suffisent pas si les hypothèses physiques changent.
12 — Contrôle d'unités	suivre les unités écrites dans «0,1 mg/ m^3 × 150 m^3 = 15 mg» et vérifier leur simplification jusqu'au résultat. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : C = 0,10 mg/ m^3 dans V = 150 m^3 donne m = 0,10 × 150 = 15 mg de matière en suspension.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Les symboles expriment un lien mathématique précis entre grandeurs. Le calcul respecte ce lien et conserve la signification de chaque terme.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Verification croisée: injecter le résultat 0,1 mg/ m^3 × 150 m^3 dans une forme équivalente de la relation et contrôler une donnée connue.
16 — Estimation mentale	Le contrôle mental repose sur l'échelle des entrées et sur le sens physique de la relation; une réponse contraire à ces deux repères est suspecte.
17 — Interprétation	Pour «9. Poussière martienne: un risque de contamination mesurable», le résultat de «0,1 mg/ m^3 × 150 m^3 = 15 mg» prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Faire bouger une seule variable permet d'observer la réponse de 0,1 mg/ m^3 × 150 m^3 ; répéter ce test sur les entrées importantes donne la sensibilité du modèle.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. La concentration augmente de 10 %, de 0,10 à 0,11 mg/m^3, pour le même volume de 150 m^3. Recalculez la charge totale. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. $m = 0,11 \times 150 = 16,5$ mg. Une hausse de 10 % de la concentration augmente de 10 % la charge totale à volume constant : $15 \rightarrow 16,5$ mg.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Charge totale de poussière» en changeant au moins deux données de $m = C \times V$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

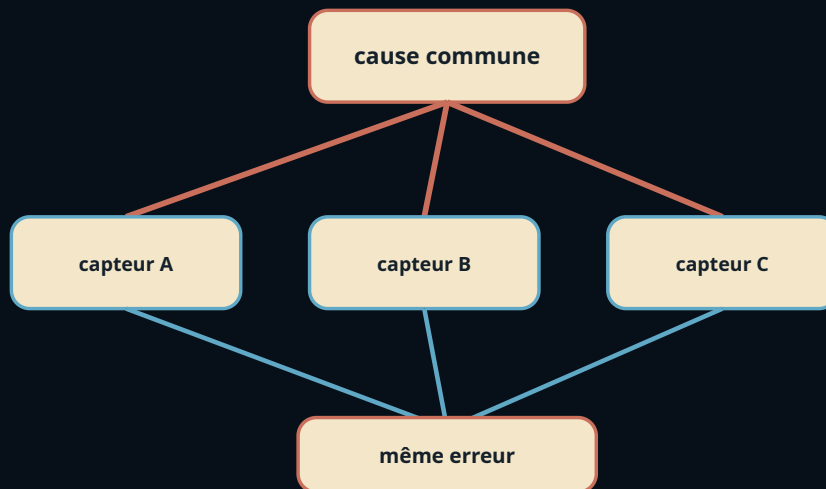
Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $m = C \times V$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Utiliser cette masse pour décider confinement, filtration, nettoyage et prélèvements, sans la confondre avec une dose inhalée.

21 — Décision mission

Utiliser cette masse pour décider confinement, filtration, nettoyage et prélèvements, sans la confondre avec une dose inhalée.

Space Academy · 12

Arbre de cause commune / common-cause fault tree



Trois capteurs identiques ne valent pas trois causes indépendantes

Redondance et cause commune: identifier ce qui peut faire tomber simultanément deux voies supposées indépendantes.

Intuition système

La poussière martienne doit être traitée comme un flux de contamination: entrée par EVA, dépôt, remise en suspension, filtration et élimination. La nouvelle exigence NASA 2026 fournit une limite moyenne de 24 h pour les particules $<10 \mu\text{m}$, mais la conception doit également regarder les pics locaux et l'incertitude toxicologique.

Exposition moyenne pondérée

$$C_TWA = (\sum C_i \Delta t_i) / (\sum \Delta t_i)$$

1 — Question concrète	La relation « $C_TWA = (\sum C_i \Delta t_i) / (\sum \Delta t_i)$ » compare $(\sum C_i \Delta t_i)$ à $(\sum \Delta t_i)$: quel est le ratio C_TWA ?
2 — Intuition sans symboles	Chaque niveau d'exposition pèse d'autant plus qu'il dure longtemps ; la moyenne doit donc intégrer le temps passé à chaque niveau.
3 — Grandeurs	C_TWA : concentration moyenne pondérée ; C_i : concentration pendant l'intervalle i ; Δt_i : durée de cet intervalle ; $\sum$: somme sur tous les intervalles.
4 — Formule	$C_TWA = (\sum C_i \Delta t_i) / (\sum \Delta t_i)$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «C indice TWA égale (somme de C indice i delta t indice i) divisé par (somme de delta t indice i)».
6 — Symboles et sens	C_TWA : concentration moyenne pondérée ; C_i : concentration pendant l'intervalle i ; Δt_i : durée de cet intervalle ; $\sum$: somme sur tous les intervalles.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Exprimer toutes les C_i et C_TWA en adoptant pour les deux une unité commune de concentration, par exemple mg/m^3 ; Exprimer tous les Δt_i en adoptant pour les deux une unité commune de temps. Le numérateur a l'unité concentration×temps et la division par le temps total redonne une concentration.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Chaque concentration est pondérée par la durée pendant laquelle elle s'applique. On additionne les expositions $C_i \Delta t_i$ puis on divise par la durée totale $\sum \Delta t_i$.
11 — Hypothèses	Le quotient n'est interprétable que si $(\sum \Delta t_i) \neq 0$ et si $(\sum C_i \Delta t_i)$ et $(\sum \Delta t_i)$ portent sur la même définition de système. Mélanger deux frontières fausse C_TWA .
12 — Contrôle d'unités	Exprimer toutes les C_i et C_TWA en adoptant pour les deux une unité commune de concentration, par exemple mg/m^3 ; Exprimer tous les Δt_i en adoptant pour les deux une unité commune de temps. Le numérateur a l'unité concentration×temps et la division par le temps total redonne une concentration. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : 4 h à 0,10 mg/m^3 puis 4 h à 0,20 mg/m^3 donnent $C_TWA = (0,10 \times 4 + 0,20 \times 4) / 8 = 0,15 \text{ mg}/\text{m}^3$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Chaque concentration est pondérée par la durée pendant laquelle elle s'applique. On additionne les expositions $C_i \Delta t_i$ puis on divise par la durée totale $\sum \Delta t_i$.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle de cas simple: si toutes les C_i sont égales à C , alors C_TWA doit être exactement C , quelles que soient les durées positives. Vérifier aussi $C_TWA \times \sum \Delta t_i = \sum (C_i \Delta t_i)$.
16 — Estimation mentale	Contrôle mental : C_TWA est une moyenne pondérée, donc elle doit rester entre la plus petite et la plus grande concentration C_i . Les concentrations associées aux durées

	Δt_i les plus longues doivent tirer davantage la moyenne vers elles ; sortir de l'intervalle $[\min(C_i), \max(C_i)]$ signale une erreur.
17 — Interprétation	Pour «Intuition système», le résultat de « $C_{TWA} = (\sum C_i \Delta t_i) / (\sum \Delta t_i)$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Le numérateur agit linéairement: doubler $(\sum C_i \Delta t_i)$ double C_{TWA} . Le dénominateur agit en sens inverse: doubler $(\sum \Delta t_i)$ réduit C_{TWA} de moitié.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez de 10 % la concentration du second intervalle, de 0,20 à 0,22 mg/m³, sans changer les durées. Recalculez la moyenne pondérée. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. Numérateur = $0,10 \times 4 + 0,22 \times 4 = 0,40 + 0,88 = 1,28$ mg·h/m³. Durée totale = 8 h. Donc $C_{TWA} = 1,28/8 = 0,16$ mg/m³. La hausse de 10 % sur seulement la moitié du temps augmente la TWA de 0,01 mg/m³. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Exposition moyenne pondérée» en changeant au moins deux données de $C_{TWA} = (\sum C_i \Delta t_i) / (\sum \Delta t_i)$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $C_{TWA} = (\sum C_i \Delta t_i) / (\sum \Delta t_i)$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Comparer la moyenne et les pics séparément : une moyenne acceptable ne rend pas un pic extrême acceptable.
21 — Décision mission	Comparer la moyenne et les pics séparément : une moyenne acceptable ne rend pas un pic extrême acceptable.

Une concentration moyenne acceptable peut cacher un pic important près d'un sas; échantillonnage et localisation des capteurs comptent.

Cas d'exposition — poussière

Une moyenne pondérée sur 24 h peut combiner 0,20 mg/m³ pendant 2 h près du sas et 0,05 mg/m³ pendant 22 h dans le reste de la journée. La moyenne vaut 0,0625 mg/m³. Elle reste sous 0,1 mg/m³ dans cet exemple, mais le pic à 0,20 peut encore être important pour l'exploitation et la stratégie de prélèvement.

10. EVA et temps de retour

Le rayonnement de fond et les événements solaires imposent blindage et gestion du temps d'exposition. L'EVA ajoute vide, poussière, fatigue, thermique et dépendance au Ces risques doivent être reliés au planning et aux capacités de retour.

Une architecture peut réserver une zone mieux protégée et définir des règles d'entrée en fonction des alertes. Une EVA doit conserver une marge de consommables et un chemin de retour compatible avec une panne crédible. La survie est aussi une gestion du temps disponible.

Bilan quantifié

Radiation et EVA deviennent une question de temps vers le blindage. Une sortie lointaine ajoute un délai de retour, une dépendance à la et une possibilité de panne simultanée. La procédure doit relier prévision, alarme, distance, vitesse dégradée, dose déjà accumulée et capacité du refuge.

Temps de retour en mode dégradé

$$t_{\text{retour}} = d / v_{\text{dégradée}}$$

1 — Question concrète	La relation « $t_{\text{retour}} = d / v_{\text{dégradée}}$ » compare d à $v_{\text{dégradée}}$: quel est le ratio t_{retour} ?
2 — Intuition sans symboles	La distance à parcourir divisée par la vitesse réellement soutenable en panne donne le temps minimal de retour.
3 — Grandeurs	t_{retour} : durée de retour ; d : distance à parcourir ; $v_{\text{dégradée}}$: vitesse moyenne soutenable en mode dégradé.
4 — Formule	$t_{\text{retour}} = d / v_{\text{dégradée}}$
5 — Lecture	À dire à voix haute: « t indice retour égale d divisé par v indice dégradée».
6 — Symboles et sens	t_{retour} : durée de retour ; d : distance à parcourir ; $v_{\text{dégradée}}$: vitesse moyenne soutenable en mode dégradé.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	d en m ou km; $v_{\text{dégradée}}$ en m/s ou km/h sur une base cohérente; t_{retour} en s ou h. Par exemple $\text{km} \div (\text{km/h}) = \text{h}$.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	À vitesse moyenne constante, temps = distance/vitesse. Le quotient répond directement au temps nécessaire pour couvrir la distance d .
11 — Hypothèses	Le quotient n'est interprétable que si $v_{\text{dégradée}} \neq 0$ et si d et $v_{\text{dégradée}}$ portent sur la même définition de système. Mélanger deux frontières fausse t_{retour} .
12 — Contrôle d'unités	d en m ou km; $v_{\text{dégradée}}$ en m/s ou km/h sur une base cohérente; t_{retour} en s ou h. Par exemple $\text{km} \div (\text{km/h}) = \text{h}$. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : à $d = 18 \text{ km}$ du refuge et $v_{\text{dégradée}} = 6 \text{ km/h}$, $t_{\text{retour}} = 18/6 = 3 \text{ h}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne	À vitesse moyenne constante, temps = distance/vitesse. Le quotient répond directement au temps nécessaire pour couvrir la distance d.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: $v_{\text{dégradée}} \times t_{\text{retour}}$ doit redonner d.
16 — Estimation mentale	Contrôle mental : distance divisée par vitesse donne un temps. Par exemple, parcourir 30 km à environ 10 km/h demande de l'ordre de 3 h ; à distance fixe, diviser la vitesse par deux double le temps de retour.
17 — Interprétation	Pour «Bilan quantifié», le résultat de « $t_{\text{retour}} = d / v_{\text{dégradée}}$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Le numérateur agit linéairement: doubler d double t_{retour} . Le dénominateur agit en sens inverse: doubler $v_{\text{dégradée}}$ réduit t_{retour} de moitié.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. La distance augmente de 10 %, de 18 à 19,8 km, tandis que la vitesse dégradée reste 6 km/h. Recalculez le temps de retour. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $t_{\text{retour}} = 19,8/6 = 3,3$ h, soit 3 h 18 min. À vitesse inchangée, +10 % de distance entraîne +10 % de temps de retour : 3,0 → 3,3 h. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Temps de retour en mode dégradé» en changeant au moins deux données de $t_{\text{retour}} = d / v_{\text{dégradée}}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $t_{\text{retour}} = d / v_{\text{dégradée}}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Limiter les sorties pour que le retour dégradé conserve une marge sur oxygène, énergie, thermique et fatigue.
21 — Décision mission	Limiter les sorties pour que le retour dégradé conserve une marge sur oxygène, énergie, thermique et fatigue.

Le calcul de temps ne convertit pas directement un événement radiatif en dose; il sert à déterminer la fenêtre de réponse opérationnelle.

Cas de retour — EVA

Une équipe travaille à 24 km du refuge. À 12 km/h nominal, le retour prend 2 h. Si une panne réduit la vitesse à 6 km/h, il faut 4 h. Une limite d'excursion fondée sur la vitesse nominale peut donc doubler le temps d'exposition au moment précis où l'on dépend d'un mode dégradé. La distance doit être liée au pire mode crédible.

11. Médecine et facteurs humains

Le délai de communication Terre-Mars interdit une téléassistance instantanée. Le crew doit reconnaître, stabiliser et traiter localement un ensemble de problèmes. L'hôpital dépend lui-même de l'eau, la puissance, la stérilisation, la pharmacie, le froid et les déchets.

sommeil, conflits et charge de maintenance influencent le risque. Une architecture théoriquement redondante peut devenir fragile si chaque panne consomme trop d'heures d'un spécialiste rare. Le temps humain est une ressource d'ECLSS au sens large.

Mode dégradé

La médecine de mission doit classer ce qui peut être diagnostiqué localement, ce qui peut attendre une expertise terrestre et ce qui exige une action immédiate. Le stock médical est donc un portefeuille de capacités: médicaments, consommables, stérilisation, imagerie, sang ou substituts, procédures et compétence humaine.

Autonomie clinique locale

$$\text{temps_clinique_disponible} < \text{délai_communication} \Rightarrow \text{autonomie_locale}$$

1 — Question concrète	Au point «Mode dégradé», comment faut-il appliquer la règle de qualification ou de dépendance $\text{temps_clinique_disponible} < \text{délai_communication} \Rightarrow \text{autonomie_locale}$?
2 — Intuition sans symboles	Si la fenêtre d'action médicale se ferme avant qu'une aide distante puisse arriver, la compétence et les moyens doivent déjà être présents localement.
3 — Grandeurs	$\text{temps_clinique_disponible}$: fenêtre maximale avant action ; $\text{délai_communication}$: délai avant soutien distant exploitable ; autonomie_locale : capacité de décider et agir localement quand la fenêtre est plus courte que le délai.
4 — Formule	$\text{temps_clinique_disponible} < \text{délai_communication} \Rightarrow \text{autonomie_locale}$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «temps indice clinique disponible < délai de communication $\Rightarrow$ autonomie locale».
6 — Symboles et sens	$\text{temps_clinique_disponible}$: fenêtre maximale avant action ; $\text{délai_communication}$: délai avant soutien distant exploitable ; autonomie_locale : capacité de décider et agir localement quand la fenêtre est plus courte que le délai.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Pour $\text{temps_clinique_disponible}$ et $\text{délai_communication}$, choisir une unité de durée identique, par exemple minutes ou heures. autonomie_locale est une conclusion logique, pas une grandeur à additionner aux durées.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. Conserver la même frontière de

	système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	On compare deux durées. Si le délai de communication est supérieur au temps clinique disponible, une réponse distante arrive trop tard; la conséquence opérationnelle est donc l'autonomie locale.
11 — Hypothèses	Limites: cette écriture résume une règle de qualification ou de dépendance; elle n'autorise pas à convertir automatiquement les conditions en nombres ni à supposer leur indépendance.
12 — Contrôle d'unités	Pour temps_clinique disponible et délai de communication, choisir une unité de durée identique, par exemple minutes ou heures. autonomie locale est une conclusion logique, pas une grandeur à additionner aux durées. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : une action clinique doit être décidée sous 20 min alors qu'un soutien distant exploitable ne peut répondre qu'en 30 min. Comme $20 < 30$, l'équipage doit disposer de l'autonomie locale nécessaire.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	On compare deux durées. Si le délai de communication est supérieur au temps clinique disponible, une réponse distante arrive trop tard; la conséquence opérationnelle est donc l'autonomie locale.
15 — Contrôle algébrique	Test de seuil: avec délai $<$ temps clinique, une aide distante peut encore arriver à temps; avec délai $>$ temps clinique, elle ne peut pas être la condition de la décision immédiate. Les deux durées doivent être comparées dans la même unité.
16 — Estimation mentale	Tester un cas manifestement conforme et un cas manifestement non conforme; la règle doit les classer dans le bon sens avant d'être appliquée au cas limite.
17 — Interprétation	Pour «Mode dégradé», le résultat de «temps_clinique disponible $<$ délai de communication $\Rightarrow$ autonomie locale» prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Sensibilité logique: modifier une condition à la fois permet d'identifier celle qui fait basculer l'acceptation ou invalide la simplification.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. La fenêtre clinique augmente de 10 %, de 20 à 22 min, mais le délai de soutien reste 30 min. La règle change-t-elle ? Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $22 \text{ min} < 30 \text{ min}$: la condition reste vraie. L'augmentation de la fenêtre ne suffit pas à rendre le soutien distant compatible avec l'urgence ; l'autonomie clinique locale reste requise. Si le soutien devenait exploitable en 18 min, la comparaison serait différente. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Autonomie clinique locale» en changeant au moins deux données de temps_clinique_disponible $<$ délai_communication $\Rightarrow$ autonomie_locale. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\text{temps_clinique_disponible} < \text{délai_communication} \Rightarrow \text{autonomie_locale}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Identifier à l'avance les actes qui doivent être autonomes et entraîner au moins une relève qualifiée.

21 — Décision mission

Identifier à l'avance les actes qui doivent être autonomes et entraîner au moins une relève qualifiée.

Le délai de communication varie avec la géométrie; l'architecture doit être robuste à la plage de délais et aux coupures, pas à une valeur unique.

Cas clinique — autonomie

Une procédure de décision médicale exige quatre échanges avec un spécialiste terrestre. Avec 18 min aller, un échange question-réponse minimal prend 36 min; quatre séquences pourraient dépasser 2 h 20 avant même les temps humains. Toute urgence dont la fenêtre thérapeutique est plus courte doit être gérée localement avec procédures, compétence et matériel disponibles.

12. Redondance et causes communes

Deux unités identiques branchées sur la même alimentation ou le même logiciel ne sont pas deux barrières indépendantes. Une — énergie, contamination, erreur de procédure — peut les perdre ensemble.

Le mode dégradé est une configuration volontairement moins confortable mais stable: certaines zones isolées, expériences reportées, consommation réduite. Définir ces états avant l'urgence permet de dimensionner réserves et procédures.

Lecture de sûreté

La redondance utile sépare les causes. Deux équipements sur la même alimentation, dans le même local poussiéreux et avec le même logiciel peuvent échouer ensemble. Diversité, isolation, surveillance indépendante et capacité de réparation comptent parfois davantage que le simple nombre d'unités.

Risque de cause commune

$\text{risque_système} \neq \text{produit des risques individuels si causes communes}$

1 — Question concrète

Au point «Lecture de sûreté», comment faut-il appliquer la règle de qualification ou de dépendance $\text{risque_système} \neq \text{produit des risques individuels si causes communes}$?

2 — Intuition sans symboles

Deux barrières ne sont pas réellement indépendantes si la même panne, le même opérateur ou le même environnement peut les neutraliser ensemble.

3 — Grandeurs

risque_système : risque de perte simultanée de la fonction ; risques individuels : défaillances propres à chaque composant ; cause commune : événement unique pouvant neutraliser plusieurs composants à la fois.

4 — Formule	risque_système $\neq$ produit des risques individuels si causes communes
5 — Lecture	À dire à voix haute: «risque indice système $\neq$ produit des risques individuels si causes communes».
6 — Symboles et sens	risque_système : risque de perte simultanée de la fonction ; risques individuels : défaillances propres à chaque composant ; cause commune : événement unique pouvant neutraliser plusieurs composants à la fois.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	la relation elle-même n'a pas de dimension physique unique; les unités restent celles des grandeurs citées
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Le symbole $\neq$ signale qu'une égalité simplificatrice est interdite dans le cas décrit. Le contrôle consiste à identifier la cause qui rompt l'indépendance supposée, puis à vérifier les deux côtés par un contre-exemple.
11 — Hypothèses	Limites: cette écriture résume une règle de qualification ou de dépendance; elle n'autorise pas à convertir automatiquement les conditions en nombres ni à supposer leur indépendance.
12 — Contrôle d'unités	la relation elle-même n'a pas de dimension physique unique; les unités restent celles des grandeurs citées Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : deux pompes ont chacune 1 % de risque individuel de panne sur la période, mais elles partagent un bus électrique ayant 5 % de risque de perte. Le produit naïf $1\% \times 1\% = 0,01\%$ ne représente donc pas le risque système, car la cause commune du bus impose déjà une contribution d'au moins 5 %.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Le symbole $\neq$ signale qu'une égalité simplificatrice est interdite dans le cas décrit. Le contrôle consiste à identifier la cause qui rompt l'indépendance supposée, puis à vérifier les deux côtés par un contre-exemple.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle par table de cas: construire au moins un cas satisfaisant toutes les conditions et un cas qui en viole une; la sortie doit changer conformément à la règle.
16 — Estimation mentale	Tester un cas manifestation conforme et un cas manifestation non conforme; la règle doit les classer dans le bon sens avant d'être appliquée au cas limite.
17 — Interprétation	Pour «Lecture de sûreté», le résultat de «risque_système $\neq$ produit des risques individuels si causes communes» prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Sensibilité logique: modifier une condition à la fois permet d'identifier celle qui fait basculer l'acceptation ou invalide la simplification.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Supposez que le risque individuel des pompes reste 1 %, mais que le risque du bus commun soit réduit de 5 % à 2 %. Comparez encore au produit naïf des risques individuels.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. Le produit naïf reste 0,01 %. Pourtant la seule cause commune du bus apporte encore 2 % de risque de perte simultanée, soit 200 fois 0,01 %. Le système n'est donc toujours pas décrit par le produit des deux risques individuels ; il faut modéliser explicitement la cause commune.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Risque de cause commune» en changeant au moins deux données de `risque_système` ≠ produit des risques individuels si causes communes. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans `risque_système` ≠ produit des risques individuels si causes communes, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Chercher explicitement les alimentations, capteurs, logiciels, opérateurs et locaux communs avant de créditer une redondance.

21 — Décision mission

Chercher explicitement les alimentations, capteurs, logiciels, opérateurs et locaux communs avant de créditer une redondance.

Les calculs probabilistes indépendants doivent être présentés comme des modèles conditionnels, jamais comme une preuve que les causes communes ont disparu.

Cas de cause commune

Deux pompes de secours sont installées dans le même compartiment et partagent un contrôleur. Une contamination liquide du compartiment ou une erreur logicielle peut neutraliser les deux. Ajouter une troisième pompe identique au même endroit augmente le nombre de composants sans créer une vraie diversité. Le bon exercice consiste à chercher quelle séparation physique ou fonctionnelle casse la cause commune.

13. Échelle: 4, 20, 100, 1 000 habitants

À quatre personnes, un équipement et un stock peuvent suffire. À vingt, pièces et charge de maintenance structurent l'organisation. À cent, hôpital, atelier, qualité de l'eau et redondance multi-zone deviennent des infrastructures. À mille, 2 % de perte d'un gros flux représente des centaines de kilogrammes chaque jour.

La grande population apporte davantage de compétences mais aussi réseaux, interfaces et risques de contamination commune. Une ville n'est pas une mission multipliée par 250.

14. Exercice intégrateur: 72 h sans récupération d'eau

Scénario: 100 personnes, demande vitale réduite à 4 kg/personne/j, récupération nulle, réserve séparée de 1 500 kg. La demande vaut 400 kg/j. En trois jours, 1 200 kg sont consommés; il reste 300 kg, soit 18 h au même régime.

Le chiffre ouvre les vraies questions: peut-on réduire encore le débit, la réserve est-elle de qualité vérifiée, la réparation finira-t-elle avant 72 h, le stock est-il isolé de la panne et quels usages non vitaux sont automatiquement coupés?

Changement d'échelle — quand une boucle devient une infrastructure

À quatre personnes, un unique appareil peut parfois être surveillé directement par tout l'équipage. À vingt, le système devient un service avec maintenance planifiée et pièces dédiées. À cent, l'arrêt d'une boucle peut affecter une population qui ne participe pas à son exploitation; il faut compartimenter, distribuer, isoler et documenter. À mille, plusieurs trains parallèles, stocks stratégiques, ateliers et équipes spécialisées deviennent plausibles, mais de nouvelles causes communes apparaissent: même logiciel, même alimentation, même filtre ou même erreur de

Le changement d'échelle ne se résume donc pas à multiplier la puissance par le nombre d'habitants. Prenez une pompe dont le pédagogique est de 8 h. Une seule pompe impose huit heures de fonction indisponible lors d'une panne. Deux trains réellement isolables peuvent maintenir un service partiel, mais seulement si la panne n'est pas due à une contamination de l'eau commune ou à un défaut électrique partagé. La redondance utile exige l'indépendance des causes de panne autant que la duplication des machines.

- 4: équipe intégrée, stocks simples mais peu de profondeur humaine.
- 20: spécialisation et premières redondances dédiées.
- 100: services distribués, et maintenance institutionnalisée.
- 1 000: trains multiples, industrie de support et maîtrise des causes communes.

Projet de fin de module — sept jours en mode dégradé contrôlé

Une base de 20 personnes perd une unité de traitement d'eau et doit fonctionner sept jours sur stocks et capacité réduite. Le scénario pédagogique suppose 5 kg/personne/jour de besoin direct non différable et 3 kg/personne/jour d'usages reportables. Le besoin vital minimal vaut $20 \times 5 \times 7 = 700$ kg. Les usages reportables ajouteraient 420 kg. Cette séparation crée immédiatement une politique de mode dégradé: 700 kg sont une fonction vitale; les 420 kg peuvent être réduits ou différés selon la situation.

Le stock disponible est de 1 050 kg, dont 150 kg sont réservés à la médecine et aux événements imprévus. Il reste donc 900 kg pour l'exploitation courante. Le besoin vital de 700 kg laisse 200 kg, insuffisants pour maintenir les 420 kg d'usages reportables. Le système doit rationner environ 220 kg sur sept jours, soit 31,4 kg/j. Cette phrase ne dit pas qui boit moins: on réduit d'abord les usages non vitaux définis par le scénario. Une règle de sûreté découle du bilan avant de devenir une règle organisationnelle.

En parallèle, le train principal de retrait du CO₂ est indisponible 10 h et un train de secours assure 70 % de la capacité nominale. Sans modèle métabolique détaillé, on ne calcule pas ici une concentration réelle; on définit plutôt les informations nécessaires: production de CO₂ par personne, volume habitable, ventilation, capacité d'adsorption, seuils et dynamique du capteur. Savoir quand ne pas calculer avec des données absentes est une compétence de sûreté. Inventer un taux métabolique pour remplir une équation serait moins rigoureux que déclarer l'information manquante.

Une EVA imprévue ramène ensuite une charge de poussière. La base doit pouvoir isoler le sas, nettoyer le scaphandre, surveiller l'air et remplacer un filtre sans arrêter la totalité du système. Le scénario cherche une cause commune: si le même circuit électrique alimente filtration principale et filtration du sas, une seule panne peut annuler la séparation fonctionnelle. La redondance dessinée sur un schéma n'est utile que si alimentation, capteurs, logiciel et consommables ne recréent pas un point unique de défaillance.

Le bilan final comporte donc cinq colonnes: fonction, capacité normale, capacité dégradée, ressource tampon, critère de retour au nominal. Pour l'eau, le critère peut être réparation et qualification de la boucle. Pour l'air, retour du train principal et confirmation capteurs. Pour la poussière, nettoyage, mesure et remplacement consommable. Le projet est réussi quand l'équipe peut expliquer pourquoi la base reste dans une enveloppe sûre pendant sept jours, quelles activités sont suspendues et quel événement supplémentaire ferait basculer le scénario dans l'évacuation ou le refuge.

Fonction	Nominal	Dégradé	Tampon / décision
Eau	8 kg/p/j dans ce scénario	5 kg/p/j vital	900 kg courants +150 kg réservés
CO ₂	train principal	70 % secours	surveiller tendance, limiter activité si nécessaire
Poussière	sas + filtration	isolement local	filtre, nettoyage, contrôle air
Puissance	réseau complet	charges critiques	des fonctions reportables

Réserve vitale protégée

$$M_{\text{vitale}} = N q_{\text{vital}} t_{\text{protégé}}$$

1 — Question concrète	Dans «14. Exercice intégrateur: 72 h sans récupération d'eau», comment évaluer besoin vital à partir des facteurs de «besoin vital = 20×5×7»?
2 — Intuition sans symboles	La réserve vitale se dimensionne sur le besoin minimal, le nombre de personnes et la durée que l'on veut protéger indépendamment du fonctionnement nominal.
3 — Grandeurs	M_vitale : masse de réserve protégée ; N : effectif ; q_vital : besoin vital par personne et par unité de temps ; t_protégé : durée à couvrir.
4 — Formule	$M_{\text{vitale}} = N q_{\text{vital}} t_{\text{protégé}}$
5 — Lecture	À dire à voix haute: «besoin vital égale 20 multiplié par 5 multiplié par 7».
6 — Symboles et sens	M_vitale : masse de réserve protégée ; N : effectif ; q_vital : besoin vital par personne et par unité de temps ; t_protégé : durée à couvrir.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	besoin vital → kg/L/doses/pièces; même base de comptage.
9 — Convention	Aucun chiffre n'est créé par la formule: les valeurs viennent du cas, d'une source citée ou d'une hypothèse pédagogique clairement signalée. La provenance locale donnée ici est: les capteurs ECLSS, inventaires et débits de consommation. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	«besoin vital = 20×5×7» n'additionne pas ses entrées: les termes de 20×5×7 se multiplient. Cette structure signifie que modifier un facteur change directement l'échelle de besoin vital.
11 — Hypothèses	Avant d'extrapoler besoin vital, vérifier que chaque facteur de 20×5×7 conserve sa définition et que les coefficients implicites restent valables dans le régime considéré.
12 — Contrôle d'unités	besoin vital → kg/L/doses/pièces; même base de comptage. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : N = 5 personnes, q_vital = 20 kg/personne/j et t_protégé = 7 j donnent $M_{\text{vitale}} = 5 \times 20 \times 7 = 700$ kg.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	«besoin vital = 20×5×7» n'additionne pas ses entrées: les termes de 20×5×7 se multiplient. Cette structure signifie que modifier un facteur change directement l'échelle de besoin vital.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Pour tester besoin vital sans répéter exactement le calcul, isoler un facteur de «besoin vital = 20×5×7» et le retrouver par division du résultat par

	le produit des autres facteurs.
16 — Estimation mentale	Le produit attendu peut être borné avec des facteurs ronds proches de ceux de $20 \times 5 \times 7$. Si besoin vital sort largement de cette borne, reprendre la saisie.
17 — Interprétation	Pour «14. Exercice intégrateur: 72 h sans récupération d'eau», le résultat de «besoin vital = $20 \times 5 \times 7$ » prend son sens seulement après trois vérifications: quelle grandeur est chiffrée, sur quel périmètre, et avec quelles hypothèses.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Pour un produit simple, la variation relative de besoin vital suit celle du facteur que l'on change isolément. Les perturbations simultanées se multiplient entre elles.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez la durée protégée de 10 %, de 7 à 7,7 jours, sans changer l'équipage ni le besoin vital. Recalculez la réserve. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $M_{vitale} = 5 \times 20 \times 7,7 = 770$ kg. L'augmentation de 10 % de la durée protégée augmente la réserve de 70 kg, soit exactement 10 % par rapport aux 700 kg initiaux. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Réserve vitale protégée» en changeant au moins deux données de $M_{vitale} = N \ q_{vital} \ t_{protégé}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $M_{vitale} = N \ q_{vital} \ t_{protégé}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Rendre cette réserve non consommable par les usages ordinaires sans autorisation explicite de crise.
21 — Décision mission	Rendre cette réserve non consommable par les usages ordinaires sans autorisation explicite de crise.

Série d'exercices corrigés — contrôle autonome

1. 20 personnes, 10 kg/j/personne de flux brut, 98 % récupéré: appoint?

Flux brut 200 kg/j; perte 2 % = 4 kg/j. Sur 365 jours, 1 460 kg. C'est l'appoint associé à cette hypothèse de flux et à ce seul

2. Pourquoi deux filtres identiques ne suffisent-ils pas toujours à la redondance?

S'ils partagent alimentation, logiciel, lot de consommables ou contamination commune, une seule cause peut neutraliser les deux. La redondance physique doit être accompagnée d'indépendance fonctionnelle.

3. Une réserve de 300 kg consommée à 25 kg/j dure combien?

12 jours si le débit reste constant et si toute la réserve est mobilisable. Une réserve médicale ou un seuil minimal réduirait le stock disponible.

4. Que faut-il vérifier après réparation d'une boucle d'eau?

Pas seulement que la pompe tourne: débit, pression, étanchéité, capteurs, qualité de l'eau et retour stable au nominal. Une fonction vitale est qualifiée par sa sortie utile.

5. Pourquoi la poussière relie-t-elle santé et maintenance?

Elle peut affecter l'exposition humaine, les joints, filtres, surfaces, capteurs et procédures EVA. La barrière de contamination doit donc être traitée comme architecture multi-système.

Atelier d'entraînement approfondi

Pour chaque scénario de survie, commencez par identifier la fonction vitale et son autonomie temporelle: combien de temps avant que pression, CO₂, eau, température ou soins sortent de la plage acceptable? Établissez ensuite le bilan de ressources et la voie de secours. Les corrigés privilégient la décision opérationnelle: détecter, isoler, fonctionner en mode dégradé, réparer puis requalifier.

1. Eau 98 %

20 personnes, 20 kg/pers/j, récupération 98 %. Appoint?

Correction: $20 \times 20 \times 0,02 = 8$ kg/j; 2 920 kg/an.

Données du cas

1. Eau 98 % — 20 personnes, 20 kg/pers/j, récupération 98 %. Appoint?

Relation

Correction: $20 \times 20 \times 0,02 = 8$ kg/j

Raisonnement

Correction: $20 \times 20 \times 0,02 = 8$ kg/j; 2 920 kg/an.

Résultat

$20 \times 20 \times 0,02 = 8$ kg/j

Repères numériques conservés. 98%.

2. Dérive CO₂ équivalente

Production 4,0 kg/j, retrait 3,95 kg/j pendant 60 j.

Correction: Accumulation = $0,05 \times 60 = 3$ kg.

Une différence quotidienne de seulement 0,05 kg paraît minuscule, mais l'intégration sur soixante jours crée 3 kg de CO₂ non retiré. Un habitat suit donc les écarts cumulés, pas seulement le débit instantané.

Données du cas

2. Dérive CO₂ équivalente — Production 4,0 kg/j, retrait 3,95 kg/j pendant 60 j.

Relation

Correction: Accumulation = $0,05 \times 60 = 3$ kg.

Raisonnement

Correction: Accumulation = $0,05 \times 60 = 3$ kg. Une différence quotidienne de seulement 0,05 kg paraît minuscule, mais l'intégration sur soixante jours crée 3 kg de CO₂ non retiré. Un habitat suit donc les écarts cumulés, pas seulement le débit instantané.

Résultat

Accumulation = $0,05 \times 60 = 3$ kg.

Contrôle

Un habitat suit donc les écarts cumulés, pas seulement le débit instantané.

Interprétation

Une différence quotidienne de seulement 0,05 kg paraît minuscule, mais l'intégration sur soixante jours crée 3 kg de CO₂ non retiré.

Repères numériques conservés. 4,0kg.

3. Pression partielle

70 kPa à 30 % O₂.

Correction: 21 kPa.

Données du cas

Pression totale de 70 kPa; fraction d'oxygène de 30 %.

Relation

Pression partielle d'oxygène pO_2 = fraction molaire O₂ × pression totale.

Raisonnement

30 % = 0,30. Donc $pO_2 = 0,30 \times 70 \text{ kPa} = 21 \text{ kPa}$.

Résultat

La pression partielle d'oxygène vaut 21 kPa.

Contrôle

La pression partielle doit être inférieure à la pression totale; 21 kPa représente exactement 30 % de 70 kPa.

Interprétation

Pour l'équipage, la fraction en pourcentage ne suffit pas: c'est la pression partielle d'O₂ qui décrit directement la contribution de l'oxygène au mélange gazeux.

Repères numériques conservés. 70kpa · 30%.

4. Poussière

0,1 mg/m³ dans 120 m³ parfaitement mélangés.

Correction: 12 mg en suspension à la moyenne considérée.

Les 12 mg décrivent une masse présente dans 120 m³ à la concentration moyenne choisie. Ils ne donnent ni la distribution près du sas, ni la fraction inhalée, ni la durée d'exposition d'un membre d'équipage.

Données du cas

4. Poussière — 0,1 mg/m³ dans 120 m³ parfaitement mélangés.

Relation

0,1 mg/m³ dans 120 m³ parfaitement mélangés.

Raisonnement

Correction: 12 mg en suspension à la moyenne considérée. Les 12 mg décrivent une masse présente dans 120 m³ à la concentration moyenne choisie. Ils ne donnent ni la distribution près du sas, ni la fraction inhalée, ni la durée d'exposition d'un membre d'équipage.

Résultat

12 mg en suspension à la moyenne considérée.

Interprétation

Ils ne donnent ni la distribution près du sas, ni la fraction inhalée, ni la durée d'exposition d'un membre d'équipage.

Repères numériques conservés. 0,1mg/m³.

5. Refuge

20 personnes, 30 j, appoint eau 2 kg/pers/j.

Correction: 1 200 kg d'appoint dans ce scénario dégradé.

Les 1 200 kg proviennent d'un besoin dégradé de 2 kg par personne et par jour pendant trente jours. Une vraie réserve de refuge doit ajouter pertes, soins, incendie, remise en route et incertitude sur la durée d'isolement.

Données du cas

5. Refuge — 20 personnes, 30 j, appoint eau 2 kg/pers/j.

Relation

20 personnes, 30 j, appoint eau 2 kg/pers/j.

Raisonnement

Correction: 1 200 kg d'appoint dans ce scénario dégradé. Les 1 200 kg proviennent d'un besoin dégradé de 2 kg par personne et par jour pendant trente jours. Une vraie réserve de refuge doit ajouter pertes, soins, incendie, remise en route et incertitude sur la durée d'isolement.

Résultat

1 200 kg d'appoint dans ce scénario dégradé.

Interprétation

Une vraie réserve de refuge doit ajouter pertes, soins, incendie, remise en route et incertitude sur la durée d'isolement.

Repères numériques conservés. 30j.

6. Vote capteurs

$p=0,01$ indépendant, vote 2/3.

Correction: $3p^2(1-p)+p^3=0,000298=0,0298 \%$.

Le vote 2-sur-3 réduit fortement une erreur indépendante à 1 %, mais la formule suppose précisément cette indépendance. Une alimentation, un logiciel ou un étalonnage commun peut faire échouer les trois capteurs ensemble et invalider le gain théorique.

Données du cas

6. Vote capteurs — $p=0,01$ indépendant, vote 2/3.

Relation

Correction: $3p^2(1-p)+p^3=0,000298=0,0298 \%$.

Raisonnement

Correction: $3p^2(1-p)+p^3=0,000298=0,0298 \%$. Le vote 2-sur-3 réduit fortement une erreur indépendante à 1 %, mais la formule suppose précisément cette indépendance. Une alimentation, un logiciel ou un étalonnage commun peut faire échouer les trois capteurs ensemble et invalider le gain théorique.

Résultat

$3p^2(1-p)+p^3=0,000298=0,0298 \%$.

Interprétation

Une alimentation, un logiciel ou un étalonnage commun peut faire échouer les trois capteurs ensemble et invalider le gain théorique.

7. Délai

22 min aller: boucle question-réponse minimale.

Correction: 44 min, sans décision ni transmission supplémentaire.

Quarante-quatre minutes est uniquement le temps lumière aller-retour pour 22 min dans chaque sens. Une décision médicale ou technique ajoute observation, analyse humaine, rédaction du message et éventuelle nouvelle question.

Données du cas

7. Délai — 22 min aller: boucle question-réponse minimale.

Raisonnement

Correction: 44 min, sans décision ni transmission supplémentaire. Quarante-quatre minutes est uniquement le temps lumière aller-retour pour 22 min dans chaque sens. Une décision médicale ou technique ajoute observation, analyse humaine, rédaction du message et éventuelle nouvelle question.

Résultat

44 min, sans décision ni transmission supplémentaire.

Interprétation

Une décision médicale ou technique ajoute observation, analyse humaine, rédaction du message et éventuelle nouvelle question.

8. Capstone panne combinée

Une base de 20 personnes perd son unité principale de traitement d'eau pendant 72 h. Mode secours récupère 90 % d'un flux de 15 kg/pers/j. Quel stock d'appoint minimum idéal, et pourquoi ce chiffre est-il insuffisant pour une procédure?

Correction: Déficit = $20 \times 15 \times 0,10 = 30$ kg/j. Sur 3 j: 90 kg. Mais une procédure doit ajouter marge, eau non potable, incendie, soins, démarrage, incertitude de réparation et possibilité que la panne affecte aussi énergie ou capteurs. Le nombre 90 kg est une base de calcul, pas un stock de sûreté final.

Le déficit de 90 kg sur trois jours est la première ligne du budget de secours, pas la réserve finale. Le scénario doit aussi protéger l'eau non potable nécessaire à certaines fonctions et conserver une marge de redémarrage.

Problèmes avancés supplémentaires

1. Tampon eau

Déficit 25 kg/j, réparation estimée 5 j, marge 2 j.

Correction raisonnée: Stock minimal de scénario = $25 \times 7 = 175$ kg.

Données du cas

1. Tampon eau — Déficit 25 kg/j, réparation estimée 5 j, marge 2 j.

Relation

Déficit 25 kg/j, réparation estimée 5 j, marge 2 j.

Raisonnement

Correction raisonnée: Stock minimal de scénario = $25 \times 7 = 175$ kg.

Résultat

Stock minimal de scénario = $25 \times 7 = 175$ kg.

2. Atmosphère

60 kPa, O₂ 32 %. pO₂?

Correction raisonnée: 19,2 kPa.

Données du cas

Pression totale de 60 kPa; fraction d'oxygène de 32 %.

Relation

$pO_2 = \text{fraction } O_2 \times \text{pression totale.}$

Raisonnement

32 % = 0,32. Donc $pO_2 = 0,32 \times 60 \text{ kPa} = 19,2 \text{ kPa.}$

Résultat

La pression partielle d'oxygène vaut 19,2 kPa.

Contrôle

19,2 kPa est inférieur à 60 kPa et $19,2/60 = 0,32$; le calcul restitue bien la fraction de 32 %.

Interprétation

Deux atmosphères ayant des pressions totales différentes peuvent fournir une pression partielle d'O₂ comparable si leur fraction d'oxygène est ajustée.

Repères numériques conservés. 60kpa · 32%.

3. Poussière TWA

0,2 mg/m³ pendant 2 h puis 0,05 pendant 22 h. Moyenne 24 h?

Correction raisonnée: $(0,2 \times 2 + 0,05 \times 22)/24 = 0,0625$ mg/m³.

La moyenne pondérée sur 24 h est inférieure au pic de deux heures parce que les 22 autres heures pèsent davantage. Une moyenne conforme ne décrit cependant pas à elle seule les risques d'un pic local ou la distribution des tailles de particules.

Données du cas

3. Poussière TWA — 0,2 mg/m³ pendant 2 h puis 0,05 pendant 22 h. Moyenne 24 h?

Relation

0,2 mg/m³ pendant 2 h puis 0,05 pendant 22 h.

Raisonnement

Correction raisonnée: $(0,2 \times 2 + 0,05 \times 22)/24 = 0,0625$ mg/m³. La moyenne pondérée sur 24 h est inférieure au pic de deux heures parce que les 22 autres heures pèsent davantage. Une moyenne conforme ne décrit cependant pas à elle seule les risques d'un pic local ou la distribution des tailles de particules.

Résultat

$(0,2 \times 2 + 0,05 \times 22)/24 = 0,0625$ mg/m³.

Contrôle

La moyenne pondérée sur 24 h est inférieure au pic de deux heures parce que les 22 autres heures pèsent davantage.

Interprétation

Une moyenne conforme ne décrit cependant pas à elle seule les risques d'un pic local ou la distribution des tailles de particules.

Repères numériques conservés. 0,2mg/m³ · 2h.

4. Mini-projet refuge

8 personnes, 30 j, 3 kW de charge vitale moyenne. Énergie totale sans production?

Correction raisonnée: 8 personnes n'interviennent pas directement dans ce calcul si 3 kW est déjà la charge totale: $3 \times 24 \times 30 = 2\,160$ kWh. Il faut ensuite rendement, réserve et puissance de pointe.

Les 2 160 kWh supposent que 3 kW est déjà la charge totale du refuge. Le nombre de personnes influe sur d'autres consommables mais pas sur cette multiplication; vérifier la frontière du chiffre évite de compter deux fois la population.

Sources et références

Les références documentent l'ECLSS réel, le jalon de récupération de l'eau et la limite préliminaire de poussière. Les budgets de refuge sont des exercices de dimensionnement et non des prescriptions opérationnelles NASA.

Calculateurs associés

Mettre en pratique ce module avec:

- [Calculateur de gaz d'un habitat martien](#)
- [Calculateur de demande d'oxygène](#)

- [NASA — Environmental Control and Life Support System](#) — Operational ISS life-support architecture.
- [NASA — ISS 98% water recovery milestone](#) — Demonstrated total water recovery milestone and prior 93–94% level.
- [NASA — Deep Space Habitation Systems](#) — Long-duration habitation and life-support context.
- [NASA — Martian dust exposure limits](#) — 2026 preliminary exposure requirement for Martian particles under 10 μm .
- [NASA NTRS — Safe Haven Configurations](#) — Source primaire ou institutionnelle utilisée pour les définitions, le statut technologique ou les données du module.
- [NASA NTRS — Space Crop Considerations](#) — Source primaire ou institutionnelle utilisée pour les définitions, le statut technologique ou les données du module.
- [NASA-STD-3001 Volume 2](#) — Source primaire ou institutionnelle utilisée pour les définitions, le statut technologique ou les données du module.

Autonomie d'eau vérifiée en récupération dégradée

$$t = V_{\text{vérifiée}} / (N q_{\text{essentiel}} - q_{\text{récupération}})$$

1 — Question concrète	Pendant combien de jours le stock d'eau vérifiée peut-il compenser un déficit de récupération en mode dégradé ?
2 — Intuition sans symboles	Quand la récupération ne couvre plus le besoin essentiel, le stock vérifié comble chaque jour le déficit restant jusqu'à épuisement.
3 — Grandeurs	t : autonomie ; $V_{\text{vérifiée}}$: stock d'eau qualifié ; N : effectif ; $q_{\text{essentiel}}$: besoin essentiel par personne et par jour ; $q_{\text{récupération}}$: débit journalier récupéré et vérifié. Le dénominateur est le déficit net quotidien.
4 — Formule	$t = V_{\text{vérifiée}} / (N q_{\text{essentiel}} - q_{\text{récupération}})$
5 — Lecture	Lire : « t égale volume vérifié divisé par le besoin essentiel total moins la récupération vérifiée ».
6 — Symboles et sens	t : autonomie ; $V_{\text{vérifiée}}$: stock d'eau qualifié ; N : effectif ; $q_{\text{essentiel}}$: besoin essentiel par personne et par jour ; $q_{\text{récupération}}$: débit journalier récupéré et vérifié. Le dénominateur est le déficit net quotidien.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Litres ou kilogrammes pour le stock ; litres ou kilogrammes par jour pour les flux ; jours pour l'autonomie.
9 — Convention	Les valeurs doivent venir du stock réellement qualifié, de l'effectif et des débits mesurés dans le mode dégradé considéré. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.

10 — Pourquoi cette opération	Quand la récupération ne couvre plus le besoin essentiel, le stock vérifié comble chaque jour le déficit restant jusqu'à épuisement.
11 — Hypothèses	Le modèle suppose des débits moyens constants et un déficit strictement positif ; les autres ressources peuvent devenir limitantes avant l'eau.
12 — Contrôle d'unités	Litres ou kilogrammes pour le stock ; litres ou kilogrammes par jour pour les flux ; jours pour l'autonomie. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : $V_{\text{vérifiée}} = 120 \text{ L}$, $Nq_{\text{essentiel}} = 72 \text{ L/j}$ et $q_{\text{récupération}} = 64 \text{ L/j}$ donnent un déficit de 8 L/j et $t = 120/8 = 15 \text{ jours}$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Quand la récupération ne couvre plus le besoin essentiel, le stock vérifié comble chaque jour le déficit restant jusqu'à épuisement.
15 — Contrôle algébrique	Multiplier l'autonomie trouvée par le déficit journalier doit redonner le stock vérifié consommable.
16 — Estimation mentale	Un déficit proche de dix litres par jour face à un stock d'environ cent vingt litres doit donner un ordre de grandeur d'une dizaine de jours.
17 — Interprétation	Les quinze jours sont un temps de déplétion simplifié ; ils ne garantissent ni qualité, ni distribution, ni énergie, ni réparabilité.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Si la récupération remonte, le déficit diminue et l'autonomie augmente fortement ; si le déficit devient nul ou négatif, ce modèle de déplétion ne s'applique plus.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. La récupération vérifiée baisse de 10 %, de 64 à 57,6 L/j, alors que le besoin essentiel reste 72 L/j. Recalculez l'autonomie. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. Le nouveau déficit est $72 - 57,6 = 14,4 \text{ L/j}$. Donc $t = 120/14,4 = 8,33 \text{ jours environ}$. Une baisse de 10 % du flux récupéré réduit ici l'autonomie de 15 à 8,33 jours, car elle agit sur un petit déficit au dénominateur. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Autonomie d'eau vérifiée en récupération dégradée» en changeant au moins deux données de $t = V_{\text{vérifiée}} / (Nq_{\text{essentiel}} - q_{\text{récupération}})$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $t = V_{\text{vérifiée}} / (Nq_{\text{essentiel}} - q_{\text{récupération}})$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Fixer réparation, rationnement et seuil de repli avant la consommation de la réserve vitale protégée.
21 — Décision mission	Fixer réparation, rationnement et seuil de repli avant la consommation de la réserve vitale protégée.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Autonomie d'un stock critique	Critical-stock endurance	PASS
02	Chaîne fonctionnelle de sûreté	Functional safety chain	PASS
03	Pression partielle dans un mélange	Partial pressure in a gas mixture	PASS
04	Bilan dynamique d'un inventaire	Dynamic inventory balance	PASS
05	Stœchiométrie de Sabatier	Sabatier stoichiometry	PASS
06	Couplage électrolyse–Sabatier	Electrolysis-Sabatier coupling	PASS
07	Besoin d'appoint avec récupération	Make-up demand with recovery	PASS
08	Effet du rendement de récupération	Recovery-efficiency leverage	PASS
09	Acceptation de l'eau produite	Produced-water acceptance	PASS
10	Masse d'un aliment humide	Wet-food mass from dry matter	PASS
11	Refuge autonome pendant trois jours	Three-day refuge water and energy	PASS
12	Autonomie d'un refuge	Refuge endurance	PASS
13	Charge totale de poussière	Total dust loading	PASS
14	Exposition moyenne pondérée	Time-weighted average exposure	PASS
15	Temps de retour en mode dégradé	Degraded-mode return time	PASS
16	Autonomie clinique locale	Local clinical autonomy	PASS
17	Risque de cause commune	Common-cause risk	PASS
18	Réserve vitale protégée	Protected vital-water reserve	PASS
19	Autonomie d'eau vérifiée en récupération dégradée	Verified-water endurance during a recovery shortfall	PASS