

ECLSS avancé: boucles fermées, qualité et modes dégradés

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — ECLSS avancé: boucles fermées, qualité et modes dégradés: comment « De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance » agit-il sur « Bilan dynamique de masse », et quel repère issu de « Boucle oxygène et électrolyse » permet de vérifier la décision?

Intuition. L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars. Une base martienne doit augmenter diagnostic, pièces de rechange, nettoyage, reconditionnement et capacité à fabriquer certains consommables.

1

De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance

L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars.

2

Bilan dynamique de masse

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

3

Boucle oxygène et électrolyse

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Repère concret. L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars.

- De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance — L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars.
- Bilan dynamique de masse — Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.
- Boucle oxygène et électrolyse — Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

CARTE DE MAÎTRISE · MODULE 27

Quatre repères à maîtriser — ECLSS avancé: boucles fermées, qualité et modes dégradés

De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance

Définition

L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars. Une base martienne doit augmenter diagnostic, pièces de rechange, nettoyage, reconditionnement et capacité à fabriquer certains consommables.

Intuition ou cas concret

L'objectif d'une boucle fermée n'est donc pas seulement de réduire la masse importée.

Repère quantitatif

L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars.

Limite ou critère de vigilance

Le bon indicateur n'est donc pas uniquement le rendement nominal, mais le temps pendant lequel l'équipage peut conserver eau, oxygène et contrôle du CO₂ après une panne donnée.

Exercice guidé — De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance

Cas « De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance » — L'objectif d'une boucle fermée n'est donc pas seulement de réduire la masse importée. Repère: L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars. Réserve: Le bon indicateur n'est donc pas uniquement le rendement nominal, mais le temps pendant lequel l'équipage peut conserver eau, oxygène et contrôle du CO₂ après une panne...

Corrigé raisonné — De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance

Point de départ

L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars. Une base martienne doit augmenter diagnostic, pièces de rechange, nettoyage, reconditionnement et capacité à fabriquer certains consommables.

Indice du cas

L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars.

Réserve à appliquer

Le bon indicateur n'est donc pas uniquement le rendement nominal, mais le temps pendant lequel l'équipage peut conserver eau, oxygène et contrôle du CO₂ après une panne donnée.

Conclusion

La maintenabilité impose de pouvoir isoler une pompe, un lit filtrant ou un réacteur sans perdre instantanément toute la fonction.

Repères numériques conservés. 100% · 98% · 2%.

Bilan dynamique de masse

Définition

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Repère quantitatif

Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Limite ou critère de vigilance

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Exercice guidé — Bilan dynamique de masse

Cas « Bilan dynamique de masse » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Corrigé raisonné — Bilan dynamique de masse

Point de départ

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Indice du cas

Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve à appliquer

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Conclusion

Cas dégradé: une contamination impose l'isolement d'un réservoir.

Boucle oxygène et électrolyse

Définition

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Repère quantitatif

Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Limite ou critère de vigilance

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Exercice guidé — Boucle oxygène et électrolyse

Cas « Boucle oxygène et électrolyse » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les...

Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Corrigé raisonné — Boucle oxygène et électrolyse

Point de départ

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Indice du cas

Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve à appliquer

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Conclusion

Cas dégradé: une contamination impose l'isolement d'un réservoir.

Élimination du CO2

Définition

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Intuition ou cas concret

Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Repère quantitatif

Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Limite ou critère de vigilance

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Exercice guidé — Élimination du CO2

Cas « Élimination du CO2 » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j. Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Corrigé raisonné — Élimination du CO2

Point de départ

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Indice du cas

Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve à appliquer

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Conclusion

Cas dégradé: une contamination impose l'isolement d'un réservoir.

Ce module s'appuie sur modules 00 à 22 recommandés selon le sujet, mais il reste lisible isolément: les symboles déterminants pour eclss avancé: boucles fermées, qualité et modes dégradés sont explicités au premier calcul.

Avant ce module: 12 — Survie & ECLSS: fermer les boucles sans cacher les pannes et 18 — Thermodynamique, fluides & contrôle thermique.

Objectifs de maîtrise

- Savoir reconnaître un cas réel de « Fermer une boucle ne signifie pas atteindre 100 % » à partir d'indices observables.
- Présenter les données et unités nécessaires à l'analyse de « Eau: plusieurs flux, plusieurs qualités ».
- Tester la sensibilité du résultat à une hypothèse de « Air: oxygène, CO₂ et contaminants traces ».
- Formuler le critère qui autorise, retarde ou interdit la décision liée à « Modes dégradés et réserves ».

1. Fermer une boucle ne signifie pas atteindre 100 %

Un système de support-vie récupère une fraction de l'eau, de l'oxygène ou des nutriments, mais les pertes s'accumulent. Si une boucle récupère 98 % d'une ressource à chaque cycle, les 2 % restants doivent être compensés par des stocks ou une production locale.

Le rendement doit donc être relié au débit quotidien et à la durée de mission.

2. Eau: plusieurs flux, plusieurs qualités

Urine, humidité condensée, eaux d'hygiène et procédés industriels ne présentent pas les mêmes contaminants. Les mélanger trop tôt peut augmenter la difficulté de traitement. Une architecture suit les flux séparément puis décide où ils peuvent être réunis.

La qualité doit être mesurée après traitement. Un débit élevé n'est pas une réussite si le produit n'est pas conforme.

3. Air: oxygène, CO₂ et contaminants traces

Le contrôle atmosphérique combine production ou stockage d'oxygène, élimination du CO₂, circulation de l'air, filtration et surveillance de composés traces. Une concentration globale acceptable peut masquer une poche locale dangereuse si la ventilation est mauvaise.

Les capteurs doivent donc être placés selon les flux d'air et les volumes occupés, pas uniquement dans une baie technique.

4. Modes dégradés et réserves

Un ECLSS robuste définit ce qui se passe lorsqu'un processeur d'eau, un lit de sorbant ou un électrolyseur devient indisponible. Les réserves donnent du temps; elles ne remplacent pas une stratégie de réparation.

Le temps de survie après panne est un nombre aussi important que le rendement nominal.

5. De l'ISS à Mars: autonomie et maintenance

L'ISS bénéficie d'une logistique terrestre fréquente par rapport à Mars. Une base martienne doit augmenter diagnostic, pièces de rechange, nettoyage, reconditionnement et capacité à fabriquer certains consommables.

L'objectif d'une boucle fermée n'est donc pas seulement de réduire la masse importée. Il est de rendre la dépendance résiduelle suffisamment lente et prévisible pour que la colonie puisse survivre entre deux fenêtres de transport.

6. Fermer une boucle n'élimine pas les pertes

Un taux de récupération de 98 % paraît presque parfait, mais 2 % de perte répété chaque jour devient une masse importante sur une mission longue. Les boucles d'eau, d'oxygène et de déchets doivent donc être décrites par des bilans de matière. Il faut aussi compter les opérations de maintenance, les rinçages, les échantillons et les volumes temporairement immobilisés dans les équipements. La fermeture annoncée doit correspondre à une frontière de système clairement définie.

7. Qualité d'eau: récupération et potabilité sont deux fonctions différentes

Récupérer de l'eau ne signifie pas qu'elle est immédiatement potable. Filtration, adsorption, oxydation catalytique, contrôle de conductivité et désinfection répondent à des contaminants différents. Des capteurs peuvent détecter certaines dérives, mais des analyses périodiques restent nécessaires pour confirmer microbiologie et chimie. Une boucle robuste prévoit aussi le sort de l'eau hors spécification: retraitement, stockage isolé ou usage non potable selon le diagnostic.

8. Mode dégradé: survivre pendant que la boucle est ouverte

La maintenabilité impose de pouvoir isoler une pompe, un lit filtrant ou un réacteur sans perdre instantanément toute la fonction. Réservoirs tampons, dérivations, consommables et procédures manuelles créent du temps pour diagnostiquer. Le bon indicateur n'est donc pas uniquement le rendement nominal, mais le temps pendant lequel l'équipage peut conserver eau, oxygène et contrôle du CO₂ après une panne donnée.

Cas boucle fermée: un bon rendement ne supprime pas le stock

Une récupération d'eau de 98 % paraît presque totale, mais la colonie perd sans cesse la fraction restante et doit survivre aux arrêts de maintenance. Le stock tampon couvre à la fois les pertes normales et une durée crédible de panne du traitement. Une boucle fermée est donc une boucle à faibles pertes, pas une machine qui crée de la matière. Les réserves d'eau, d'oxygène et de consommables donnent du temps aux opérateurs pour diagnostiquer avant qu'une panne ne devienne une urgence vitale.

9. Exemple calculé pas à pas

Supposons qu'une boucle traite 24 L d'eau par jour et récupère 98 % du flux. L'appoint théorique est $24 \times (1 - 0,98) = 0,48$ L/j. Sur 500 jours, cela représente 240 L d'appoint, avant même les pertes de maintenance ou de stockage. À 95 % de récupération, l'appoint serait 1,20 L/j, soit 600 L sur 500 jours. Trois points de rendement changent donc la logistique de 360 L dans cet exemple.

10. Exercice progressif

Pour six personnes, établir un bilan journalier avec eau potable, préparation alimentaire, hygiène et production métabolique. Choisir un taux de récupération et calculer l'appoint sur 900 jours. Introduire ensuite une panne de 72 h du processeur principal et dimensionner le tampon nécessaire.

11. Solution raisonnée

Pour 12 personnes à 3,5 L/j, le besoin est 42 L/j. Avec 98 % de récupération, la perte théorique est 0,84 L/j. Un stock de 250 L couvrirait près de 298 jours de cette seule perte théorique, mais seulement environ 5,95 jours si la récupération tombe complètement en panne et que les 42 L/j proviennent du stock. Les deux calculs décrivent deux modes de panne différents.

12. Mini-projet de validation

Produire l'architecture d'une boucle eau complète: sources, collecte, traitement, capteurs, désinfection, stockage, rejet, mode dégradé, maintenance, consommables et protocole de décision en cas d'eau hors spécification.

Calculateurs associés

Mettre en pratique ce module avec:

- Calculateur d'appoint d'eau

Approfondissement du module 27: comprendre, calculer, vérifier et décider

Objectif du module — fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

contrôle dimensionnel · ordre de grandeur

1. Bilan dynamique de masse

Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

Mini-leçons quantitatives canoniques — protocole V7.4

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

1. Bilan dynamique de masse

$$dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$ » dans « 1. Bilan dynamique de masse » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 1. Bilan dynamique de masse », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

dM/dt : vitesse de variation du stock de matière; Entrées: somme des débits massiques entrant dans la frontière; Sorties: somme des débits massiques en sortant; Production: débit massique créé à l'intérieur par les procédés considérés; Consommation: débit massique consommé à l'intérieur.

4 — Formule

$$dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$$

5 — Lecture

Lecture recommandée: « dM divisé par dt égale Entrées - Sorties plus Production - Consommation ».

6 — Symboles et sens

dM/dt : vitesse de variation du stock de matière; Entrées: somme des débits massiques entrant dans la frontière; Sorties: somme des débits massiques en sortant; Production: débit massique créé à l'intérieur par les procédés considérés; Consommation: débit massique consommé à l'intérieur.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Tous les termes sont des débits de masse de la même espèce ou d'un bilan explicitement compatible, par exemple kg/h. Si une consommation est connue comme quantité cumulée, elle doit d'abord être divisée par la durée du bilan pour devenir un débit avant d'entrer dans cette équation.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

Le bilan additionne les contributions qui augmentent le stock et soustrait celles qui le diminuent: $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$.

11 — Hypothèses

La frontière du système, l'espèce suivie et la base de temps doivent rester identiques pour tous les flux. Mélanger kg/h et kg/j exige une conversion préalable.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle de fermeture: $dM/dt + \text{Sorties} + \text{Consommation} - \text{Production}$ doit redonner Entrées. Vérifier séparément que chaque terme a bien l'unité kg/temps.

13 — Cas numérique

Entrées = 95 kg/jour Sorties = 100 kg/jour Production = 8 kg/jour Consommation = 2 kg/jour $dM/dt = 95 - 100 + 8 - 2 = +1$ kg/jour

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le bilan additionne les contributions qui augmentent le stock et soustrait celles qui le diminuent: $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$.

15 — Vérification

Contrôle de fermeture: $dM/dt + \text{Sorties} + \text{Consommation} - \text{Production}$ doit redonner Entrées. Vérifier séparément que chaque terme a bien l'unité kg/temps.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental compare les tailles des deux termes et prévoit si dM/dt doit être positif, nul ou négatif avant d'afficher les décimales.

17 — Interprétation

Le sens pratique de « $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$ » dépend de «1. Bilan dynamique de masse»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

Une petite hausse du premier terme augmente la marge; une hausse identique du terme retiré la diminue de la même quantité.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : Entrées = 50; Sorties = 54; Production = 7; Consommation = 1 kg/jour. Appliquez « $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : Entrées = 50; Sorties = 54; Production = 7; Consommation = 1 kg/jour. Relation appliquée : $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$. Calcul et résultat : 2 kg/jour. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 1. Bilan dynamique de masse ».

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

Correction autonome — ouvrir après essai

Entrées = 95 kg/jour Sorties = 100 kg/jour Production = 8 kg/jour Consommation = 2 kg/jour $dM/dt = 95 - 100 + 8 - 2 = +1$ kg/jour Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$ » dépend de « 1. Bilan dynamique de masse »: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

2. Boucle oxygène et électrolyse

$$m_{O_2} = \eta_{elec} \times (32 / 36) \times m_{H_2O}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{O_2} = \eta_{elec} \times (32 / 36) \times m_{H_2O}$ » dans « 2. Boucle oxygène et électrolyse » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 2. Boucle oxygène et électrolyse », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

m_{O_2} : masse d'oxygène effectivement produite; η_{elec} : rendement massique global par rapport au maximum stœchiométrique; 32/36: fraction massique maximale d' O_2 issue de l'électrolyse de l'eau selon $2 H_2O \rightarrow 2 H_2 + O_2$; m_{H_2O} : masse d'eau effectivement traitée.

4 — Formule

$$m_{O_2} = \eta_{elec} \times (32 / 36) \times m_{H_2O}$$

5 — Lecture

Lecture recommandée: « m indice O2 égale éta indice elec multiplié par (32 divisé par 36) multiplié par m indice H2O ».

6 — Symboles et sens

m_{O_2} : masse d'oxygène effectivement produite; η_{elec} : rendement massique global par rapport au maximum stœchiométrique; 32/36: fraction massique maximale d' O_2 issue de l'électrolyse de l'eau selon $2 H_2O \rightarrow 2 H_2 + O_2$; m_{H_2O} : masse d'eau effectivement traitée.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

m_{O_2} et m_{H_2O} sont ramenés à une base d'unité de masse commune; η_{elec} et 32/36 sans dimension.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La stœchiométrie idéale donne 32 unités de masse d'O₂ pour 36 unités de masse d'eau consommée. Le rendement η_{elec} réduit ce maximum pour représenter les pertes du procédé.

11 — Hypothèses

η_{elec} doit être défini comme un rendement massique sur la même frontière. Les rendements électrique, faradique et de récupération ne doivent pas être confondus sans modèle explicite.

12 — Contrôle indépendant

À $\eta_{\text{elec}}=1$, $m_{\text{O}_2}/m_{\text{H}_2\text{O}}$ doit valoir $32/36 \approx 0,889$. Pour $\eta_{\text{elec}} < 1$, le rapport doit être plus faible.

13 — Cas numérique

$$\eta_{\text{elec}} = 0.85 \quad m_{\text{H}_2\text{O}} = 10.0 \text{ kg} \quad m_{\text{O}_2} = 0.85 \times (32/36) \times 10.0 \approx 7.56 \text{ kg}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La stœchiométrie idéale donne 32 unités de masse d'O₂ pour 36 unités de masse d'eau consommée. Le rendement η_{elec} réduit ce maximum pour représenter les pertes du procédé.

15 — Vérification

À $\eta_{\text{elec}}=1$, $m_{\text{O}_2}/m_{\text{H}_2\text{O}}$ doit valoir $32/36 \approx 0,889$. Pour $\eta_{\text{elec}} < 1$, le rapport doit être plus faible.

16 — Estimation mentale

Si tous les facteurs de $\eta_{\text{elec}} \times (32 / 36) \times m_{\text{H}_2\text{O}}$ sont positifs, leur taille indique immédiatement si m_{O_2} doit croître ou décroître par rapport à chacun pris isolément.

17 — Interprétation

Le sens pratique de « $m_{\text{O}_2} = \eta_{\text{elec}} \times (32 / 36) \times m_{\text{H}_2\text{O}}$ » dépend de « 2. Boucle oxygène et électrolyse » : avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

Une perturbation d'un facteur se propage proportionnellement à m_{O_2} . Si plusieurs facteurs varient, leurs multiplicateurs relatifs se composent.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\eta = 0.90$ avec 18 kg eau traitée. Appliquez « $m_{\text{O}_2} = \eta_{\text{elec}} \times (32 / 36) \times m_{\text{H}_2\text{O}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\eta = 0.90$ avec 18 kg eau traitée. Relation appliquée : $m_{\text{O}_2} = \eta_{\text{elec}} \times (32 / 36) \times m_{\text{H}_2\text{O}}$. Calcul et résultat : $\text{O}_2 = 18 \times 32/36 = 16.0 \text{ kg}$; collecté = 14.4 kg. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 2. Boucle oxygène et électrolyse ».

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

Correction autonome — ouvrir après essai

$\eta_{\text{elec}} = 0.85 \quad m_{\text{H}_2\text{O}} = 10.0 \text{ kg} \quad m_{\text{O}_2} = 0.85 \times (32/36) \times 10.0 \approx 7.56 \text{ kg}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $m_{O_2} = \eta_{elec} \times (32 / 36) \times m_{H_2O}$ » dépend de «2. Boucle oxygène et électrolyse»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

3. Élimination du CO2

$$m_{CO_2,net} = m_{CO_2,produit} - m_{CO_2,retiré}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{CO_2,net} = m_{CO_2,produit} - m_{CO_2,retiré}$ » dans «3. Élimination du CO2»? ?

2 — Intuition sans symboles

Dans «3. Élimination du CO2», l'écart entre deux états comparables donne directement la marge, la perte ou la différence utile à la décision.

3 — Grandeurs

$m_{CO_2,net}$: variation nette de masse de CO2; $m_{CO_2,produit}$: masse de CO2 ajoutée sur la période;
 $m_{CO_2,retiré}$: masse de CO2 retirée sur la même période.

4 — Formule

$$m_{CO_2,net} = m_{CO_2,produit} - m_{CO_2,retiré}$$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «m indice CO2,net égale m indice CO2,produit - m indice CO2,retiré».

6 — Symboles et sens

$m_{CO_2,net}$: variation nette de masse de CO2; $m_{CO_2,produit}$: masse de CO2 ajoutée sur la période;
 $m_{CO_2,retiré}$: masse de CO2 retirée sur la même période.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Exprimer Les trois termes avec une unité commune de masse, par exemple kg par période de bilan.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

Le bilan net est la production moins le retrait.

11 — Hypothèses

La différence reste fiable seulement si les grandeurs comparées sont homogènes et si leur incertitude ne rend pas le signe indéterminé.

12 — Contrôle indépendant

$m_{CO_2,net} + m_{CO_2,retiré}$ doit redonner $m_{CO_2,produit}$.

13 — Cas numérique

$$m_{CO_2,produit} = 4.2 \text{ kg/jour} \quad m_{CO_2,retiré} = 4.0 \text{ kg/jour} \quad m_{CO_2,net} = 4.2 - 4.0 = +0.2 \text{ kg/jour}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le bilan net est la production moins le retrait.

15 — Vérification

$m_{CO_2,net} + m_{CO_2,retiré}$ doit redonner $m_{CO_2,produit}$.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental compare les tailles des deux termes et prévoit si $m_{CO_2,net}$ doit être positif, nul ou négatif avant d'afficher les décimales.

17 — Interprétation

Le sens pratique de « $m_{\text{CO}_2,\text{net}} = m_{\text{CO}_2,\text{produit}} - m_{\text{CO}_2,\text{retiré}}$ » dépend de «3. Élimination du CO₂»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 3. Élimination du CO₂ »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Une petite hausse du premier terme augmente la marge; une hausse identique du terme retiré la diminue de la même quantité.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : Production = 3.6; retrait = 3.9 kg/jour. Appliquez « $m_{\text{CO}_2,\text{net}} = m_{\text{CO}_2,\text{produit}} - m_{\text{CO}_2,\text{retiré}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : Production = 3.6; retrait = 3.9 kg/jour. Relation appliquée : $m_{\text{CO}_2,\text{net}} = m_{\text{CO}_2,\text{produit}} - m_{\text{CO}_2,\text{retiré}}$. Calcul et résultat : bilan net = -0.3 kg/jour. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 3. Élimination du CO₂ ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 3. Élimination du CO₂ », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$m_{\text{CO}_2,\text{produit}} = 4.2$ kg/jour $m_{\text{CO}_2,\text{retiré}} = 4.0$ kg/jour $m_{\text{CO}_2,\text{net}} = 4.2 - 4.0 = +0.2$ kg/jour Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $m_{\text{CO}_2,\text{net}} = m_{\text{CO}_2,\text{produit}} - m_{\text{CO}_2,\text{retiré}}$ » dépend de «3. Élimination du CO₂»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

4. Boucle eau et taux de récupération

$$R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ » dans « 4. Boucle eau et taux de récupération » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 4. Boucle eau et taux de récupération », rapporter une quantité à sa référence permet de comparer des situations de taille, durée ou capacité différentes.

3 — Grandeurs

R: taux de récupération massique, sans dimension; $m_{\text{récupérée}}$: masse effectivement récupérée; $m_{\text{entrée}}$: masse entrant dans le procédé.

4 — Formule

$$R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «R égale m indice récupérée divisé par m indice entrée».

6 — Symboles et sens

R: taux de récupération massique, sans dimension; $m_{\text{récupérée}}$: masse effectivement récupérée; $m_{\text{entrée}}$: masse entrant dans le procédé.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Pour $m_{\text{récupérée}}$ et $m_{\text{entrée}}$, choisir une unité de masse identique; R est sans dimension, entre 0 et 1 pour un taux de récupération physique.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La fraction de « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ » demande combien représente $m_{\text{récupérée}}$ par rapport à $m_{\text{entrée}}$. On évalue chaque côté de la barre, puis la division donne R.

11 — Hypothèses

La formule suppose un dénominateur $m_{\text{entrée}}$ valide et une frontière commune aux deux entrées. Un ratio entre périmètres incompatibles n'a pas l'interprétation annoncée.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Après avoir obtenu R, reconstruire le numérateur avec R multiplié par $m_{\text{entrée}}$; le résultat attendu est $m_{\text{récupérée}}$.

13 — Cas numérique

$m_{\text{entrée}} = 80 \text{ kg/jour}$ $m_{\text{récupérée}} = 76 \text{ kg/jour}$ $R = 76/80 = 0.95 = 95\%$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La fraction de « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ » demande combien représente $m_{\text{récupérée}}$ par rapport à $m_{\text{entrée}}$. On évalue chaque côté de la barre, puis la division donne R.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Après avoir obtenu R, reconstruire le numérateur avec R multiplié par $m_{\text{entrée}}$; le résultat attendu est $m_{\text{récupérée}}$.

16 — Estimation mentale

Repère mental: si $m_{\text{récupérée}}$ est nettement inférieur à $m_{\text{entrée}}$, un quotient positif R devrait être inférieur à 1; l'inverse vaut si $m_{\text{récupérée}}$ domine.

17 — Interprétation

Le sens pratique de « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ » dépend de «4. Boucle eau et taux de récupération»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 4. Boucle eau et taux de récupération »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Pour tester la robustesse, faire varier $m_{\text{récupérée}}$ puis $m_{\text{entrée}}$ séparément. R doit croître avec le premier et décroître lorsque le second augmente.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : Entrée = 100 kg/jour; recovered = 92 kg/jour. Appliquez « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : Entrée = 100 kg/jour; recovered = 92 kg/jour. Relation appliquée : $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$. Calcul et résultat : $R=92\%$. Unrecovered mass is 8 kg/jour before other return pathways. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 4. Boucle eau et taux de récupération ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 4. Boucle eau et taux de récupération », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

$m_{\text{entrée}} = 80 \text{ kg/jour}$ $m_{\text{récupérée}} = 76 \text{ kg/jour}$ $R = 76/80 = 0.95 = 95\%$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ » dépend de «4. Boucle eau et taux de récupération»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

5. Humidité et condensats

$$m_{\text{cond}} = m_{\text{vapeur,entrée}} - m_{\text{vapeur,sortie}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_{\text{cond}} = m_{\text{vapeur,entrée}} - m_{\text{vapeur,sortie}}$ » dans « 5. Humidité et condensats » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 5. Humidité et condensats », l'écart entre deux états comparables donne directement la marge, la perte ou la différence utile à la décision.

3 — Grandeurs

m_{cond} : masse de vapeur condensée; $m_{\text{vapeur,entrée}}$: masse de vapeur entrant dans le condenseur; $m_{\text{vapeur,sortie}}$: masse restant sous forme de vapeur à la sortie.

4 — Formule

$$m_{\text{cond}} = m_{\text{vapeur,entrée}} - m_{\text{vapeur,sortie}}$$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «m indice cond égale m indice vapeur,entrée - m indice vapeur,sortie».

6 — Symboles et sens

m_{cond} : masse de vapeur condensée; $m_{\text{vapeur,entrée}}$: masse de vapeur entrant dans le condenseur; $m_{\text{vapeur,sortie}}$: masse restant sous forme de vapeur à la sortie.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Une même unité de masse sur la même période doit servir à Les trois termes.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La masse condensée est ce qui a disparu de la phase vapeur entre entrée et sortie, dans ce bilan simplifié.

11 — Hypothèses

La différence reste fiable seulement si les grandeurs comparées sont homogènes et si leur incertitude ne rend pas le signe indéterminé.

12 — Contrôle indépendant

$m_{\text{cond}} + m_{\text{vapeur, sortie}}$ doit redonner $m_{\text{vapeur, entrée}}$.

13 — Cas numérique

$m_{\text{vapeur, entrée}} = 6.0 \text{ kg}$ $m_{\text{vapeur, sortie}} = 1.5 \text{ kg}$ $m_{\text{cond}} = 6.0 - 1.5 = 4.5 \text{ kg}$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La masse condensée est ce qui a disparu de la phase vapeur entre entrée et sortie, dans ce bilan simplifié.

15 — Vérification

$m_{\text{cond}} + m_{\text{vapeur, sortie}}$ doit redonner $m_{\text{vapeur, entrée}}$.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental compare les tailles des deux termes et prévoit si m_{cond} doit être positif, nul ou négatif avant d'afficher les décimales.

17 — Interprétation

Le sens pratique de « $m_{\text{cond}} = m_{\text{vapeur, entrée}} - m_{\text{vapeur, sortie}}$ » dépend de «5. Humidité et condensats»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

Une petite hausse du premier terme augmente la marge; une hausse identique du terme retiré la diminue de la même quantité.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : vapor = 8.2 kg; outlet = 2.7 kg. Appliquez « $m_{\text{cond}} = m_{\text{vapeur, entrée}} - m_{\text{vapeur, sortie}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : vapor = 8.2 kg; outlet = 2.7 kg. Relation appliquée : $m_{\text{cond}} = m_{\text{vapeur, entrée}} - m_{\text{vapeur, sortie}}$. Calcul et résultat : $m_{\text{cond}} = 5.5 \text{ kg}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 5. Humidité et condensats ».

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

Correction autonome — ouvrir après essai

$m_{\text{vapeur, entrée}} = 6.0 \text{ kg}$ $m_{\text{vapeur, sortie}} = 1.5 \text{ kg}$ $m_{\text{cond}} = 6.0 - 1.5 = 4.5 \text{ kg}$ Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $m_{\text{cond}} = m_{\text{vapeur, entrée}} - m_{\text{vapeur, sortie}}$ » dépend de «5. Humidité et condensats»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

6. Contaminants et filtration

$$C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ » dans « 6. Contaminants et filtration » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 6. Contaminants et filtration », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

C_{sortie} : concentration «C sortie» de l'espèce ou du constituant considéré; $C_{\text{entrée}}$: concentration «C entrée» de l'espèce ou du constituant considéré; η_{filtre} : rendement ou efficacité sans dimension défini pour ce procédé

4 — Formule

$$C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «C indice sortie égale C indice entrée multiplié par (1 - éta indice filtre)».

6 — Symboles et sens

C_{sortie} : concentration «C sortie» de l'espèce ou du constituant considéré; $C_{\text{entrée}}$: concentration «C entrée» de l'espèce ou du constituant considéré; η_{filtre} : rendement ou efficacité sans dimension défini pour ce procédé

7 — Prononciation

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

8 — Unités

C_{sortie} → unité de concentration définie dans la section; $C_{\text{entrée}}$ → unité de concentration définie dans la section; η_{filtre} → sans dimension [0;1].

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

Le modèle « $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ » attribue un rôle multiplicatif aux termes de $C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$. Leur combinaison produit C_{sortie} , et les unités se combinent de la même manière que les valeurs.

11 — Hypothèses

Limite principale: « $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ » suppose une composition multiplicative stable. Des facteurs corrélés ou variables avec l'état du système exigent un modèle plus complet.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Une preuve indépendante isole un terme de $C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$. Recalculer ce terme à partir de C_{sortie} et des autres facteurs permet de contrôler la multiplication.

13 — Cas numérique

$$C_{\text{entrée}} = 100 \text{ ppm} \quad \eta_{\text{filtre}} = 0.97 \quad C_{\text{sortie}} = 100 \times (1 - 0.97) = 3 \text{ ppm}$$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le modèle « $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ » attribue un rôle multiplicatif aux termes de $C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$. Leur combinaison produit C_{sortie} , et les unités se combinent de la même manière que les valeurs.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Une preuve indépendante isole un terme de $C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$. Recalculer ce terme à partir de C_{sortie} et des autres facteurs permet de contrôler la multiplication.

16 — Estimation mentale

Si tous les facteurs de $C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ sont positifs, leur taille indique immédiatement si C_{sortie} doit croître ou décroître par rapport à chacun pris isolément.

17 — Interprétation

Le sens pratique de « $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ » dépend de «6. Contaminants et filtration»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

Une perturbation d'un facteur se propage proportionnellement à C_{sortie} . Si plusieurs facteurs varient, leurs multiplicateurs relatifs se composent.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $C_{\text{entrée}} = 250$ ppm; $\eta = 0.96$. Appliquez « $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $C_{\text{entrée}} = 250$ ppm; $\eta = 0.96$. Relation appliquée : $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$. Calcul et résultat : $C_{\text{sortie}} = 250 \times 0.04 = 10$ ppm. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 6. Contaminants et filtration ».

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

Correction autonome — ouvrir après essai

$C_{\text{entrée}} = 100$ ppm $\eta_{\text{filtre}} = 0.97$ $C_{\text{sortie}} = 100 \times (1 - 0.97) = 3$ ppm Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $C_{\text{sortie}} = C_{\text{entrée}} \times (1 - \eta_{\text{filtre}})$ » dépend de «6. Contaminants et filtration»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

7. Capteurs, actionneurs et contrôle

$e = \text{Consigne} - \text{Mesure}$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $e = \text{Consigne} - \text{Mesure}$ » dans « 7. Capteurs, actionneurs et contrôle » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 7. Capteurs, actionneurs et contrôle », l'écart entre deux états comparables donne directement la marge, la perte ou la différence utile à la décision.

3 — Grandeurs

e : erreur de régulation; Consigne: valeur désirée; Mesure: valeur effectivement mesurée de la même grandeur.

4 — Formule

$e = \text{Consigne} - \text{Mesure}$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «e égale Consigne - Mesure».

6 — Symboles et sens

e: erreur de régulation; Consigne: valeur désirée; Mesure: valeur effectivement mesurée de la même grandeur.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

e, Consigne et Mesure dans la même unité physique.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La soustraction forme un écart signé utilisable par le régulateur.

11 — Hypothèses

La différence reste fiable seulement si les grandeurs comparées sont homogènes et si leur incertitude ne rend pas le signe indéterminé.

12 — Contrôle indépendant

e + Mesure doit redonner Consigne.

13 — Cas numérique

Consigne = 21.0 °C Mesure = 22.4 °C e = 21.0–22.4 = –1.4 °C

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La soustraction forme un écart signé utilisable par le régulateur.

15 — Vérification

e + Mesure doit redonner Consigne.

16 — Estimation mentale

Un contrôle mental compare les tailles des deux termes et prévoit si e doit être positif, nul ou négatif avant d’afficher les décimales.

17 — Interprétation

Le sens pratique de «e = Consigne - Mesure» dépend de «7. Capteurs, actionneurs et contrôle»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

Une petite hausse du premier terme augmente la marge; une hausse identique du terme retiré la diminue de la même quantité.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l’exercice : Consigne = 45 % RH; measurement = 41 % RH; autres valeurs: 45%, 41%. Appliquez « e = Consigne - Mesure », montrez la substitution, les conversions et l’unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : Consigne = 45 % RH; measurement = 41 % RH; autres valeurs: 45%, 41%.
Relation appliquée : $e = \text{Consigne} - \text{Mesure}$. Calcul et résultat : $e = +4$ pourcentage points. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 7. Capteurs, actionneurs et contrôle ».

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

Correction autonome — ouvrir après essai

Consigne = 21.0 °C Mesure = 22.4 °C $e = 21.0 - 22.4 = -1.4$ °C Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $e = \text{Consigne} - \text{Mesure}$ » dépend de « 7. Capteurs, actionneurs et contrôle »: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

8. Stocks tampons et autonomie

$\text{Autonomie} = \text{Stock_utile} / \text{Débit_net}$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Autonomie} = \text{Stock_utile} / \text{Débit_net}$ » dans « 8. Stocks tampons et autonomie » ?

2 — Intuition sans symboles

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

3 — Grandeurs

Autonomie: durée de couverture du stock utile lorsque le débit net de perte est maintenu; Stock_utile: quantité disponible dans le stock «Stock utile»; Débit_net: débit «Débit net» exprimant une quantité par unité de temps

4 — Formule

$\text{Autonomie} = \text{Stock_utile} / \text{Débit_net}$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «Autonomie égale Stock indice utile divisé par Débit indice net».

6 — Symboles et sens

Autonomie: durée de couverture du stock utile lorsque le débit net de perte est maintenu; Stock_utile: quantité disponible dans le stock «Stock utile»; Débit_net: débit «Débit net» exprimant une quantité par unité de temps

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Autonomie → unité de temps cohérente avec le flux; Stock utile → kg/L/doses/pièces; périmètre de comptage commun; Débit net → kg/h, m³/s, L/h ou kg/s peuvent servir au débit; l'unité doit rester cohérente avec le type de flux.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La fraction de «Autonomie = Stock_utile / Débit_net» demande combien représente Stock_utile par rapport à Débit_net. On évalue chaque côté de la barre, puis la division donne Autonomie.

11 — Hypothèses

La formule suppose un dénominateur Débit_net valide et une frontière commune aux deux entrées. Un ratio entre périmètres incompatibles n'a pas l'interprétation annoncée.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle indépendant — Après avoir obtenu Autonomie, reconstruire le numérateur avec Autonomie multiplié par Débit_net; le résultat attendu est Stock_utile.

13 — Cas numérique

Stock_utile = 120 kg Débit_net = 8 kg/jour Autonomie = $120/8 = 15$ jours

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La fraction de «Autonomie = Stock_utile / Débit_net» demande combien représente Stock_utile par rapport à Débit_net. On évalue chaque côté de la barre, puis la division donne Autonomie.

15 — Vérification

Contrôle indépendant — Après avoir obtenu Autonomie, reconstruire le numérateur avec Autonomie multiplié par Débit_net; le résultat attendu est Stock_utile.

16 — Estimation mentale

Repère mental: si Stock_utile est nettement inférieur à Débit_net, un quotient positif Autonomie devrait être inférieur à 1; l'inverse vaut si Stock_utile domine.

17 — Interprétation

Le sens pratique de «Autonomie = Stock_utile / Débit_net» dépend de «8. Stocks tampons et autonomie»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

Pour tester la robustesse, faire varier Stock_utile puis Débit_net séparément. Autonomie doit croître avec le premier et décroître lorsque le second augmente.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : stock = 210 kg; demand = 14 kg/jour. Appliquez « Autonomie = Stock_utile / Débit_net », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : stock = 210 kg; demand = 14 kg/jour. Relation appliquée : Autonomie = Stock_utile / Débit_net. Calcul et résultat : $t=210/14=15$ jours. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 8. Stocks tampons et autonomie ».

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

Correction autonome — ouvrir après essai

Stock_utile = 120 kg Débit_net = 8 kg/jour Autonomie = $120/8 = 15$ jours Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de «Autonomie = Stock_utile / Débit_net» dépend de «8. Stocks tampons et autonomie»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

9. Maintenance et consommables

$$\text{Stock_rechange} = \lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Stock_rechange} = \lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$ » dans « 9. Maintenance et consommables » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 9. Maintenance et consommables », plusieurs facteurs agissent ensemble; leur combinaison transforme des grandeurs partielles en une quantité opérationnelle.

3 — Grandeurs

Stock_rechange: nombre attendu de pièces de rechange à prévoir dans ce modèle moyen; λ_{panne} : fréquence moyenne de pannes par unité de temps; t_{mission} : durée couverte; c_{unitaire} : nombre moyen de pièces consommées par panne.

4 — Formule

$$\text{Stock_rechange} = \lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «Stock indice rechange égale lambda indice panne multiplié par t indice mission multiplié par c indice unitaire».

6 — Symboles et sens

Stock_rechange: nombre attendu de pièces de rechange à prévoir dans ce modèle moyen; λ_{panne} : fréquence moyenne de pannes par unité de temps; t_{mission} : durée couverte; c_{unitaire} : nombre moyen de pièces consommées par panne.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

λ_{panne} en pannes/h ou pannes/j; t_{mission} dans la même base de temps; c_{unitaire} en pièces/panne; Stock_rechange en pièces. Exemple dimensionnel: $(\text{pannes/j}) \times j \times (\text{pièces/panne}) = \text{pièces}$.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

$\lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}}$ donne le nombre moyen de pannes attendu sur la durée; multiplier par le besoin de pièces par panne donne le nombre moyen de rechanges correspondant.

11 — Hypothèses

Cette relation donne une valeur moyenne, pas un niveau de stock garantissant un risque donné. Pour une exigence de disponibilité, il faut traiter la distribution des pannes, les dépendances et un quantile de sûreté.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle dimensionnel: les unités panne et temps s'annulent pour laisser des pièces. Contrôle inverse: $\text{Stock_rechange} / (t_{\text{mission}} c_{\text{unitaire}})$ doit redonner λ_{panne} .

13 — Cas numérique

$\lambda_{\text{panne}} = 0.03$ pannes/jour $t_{\text{mission}} = 180$ jours $c_{\text{unitaire}} = 1$ pièce/panne $\text{Stock_rechange} = 0.03 \times 180 \times 1 = 5.4$ pièces

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

$\lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}}$ donne le nombre moyen de pannes attendu sur la durée; multiplier par le besoin de pièces par panne donne le nombre moyen de rechanges correspondant.

15 — Vérification

Contrôle dimensionnel: les unités panne et temps s'annulent pour laisser des pièces. Contrôle inverse: $\text{Stock_rechange} / (t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}})$ doit redonner λ_{panne} .

16 — Estimation mentale

Si tous les facteurs de $\lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$ sont positifs, leur taille indique immédiatement si Stock_rechange doit croître ou décroître par rapport à chacun pris isolément.

17 — Interprétation

Le sens pratique de « $\text{Stock_rechange} = \lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$ » dépend de «9. Maintenance et consommables»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

Une perturbation d'un facteur se propage proportionnellement à Stock_rechange . Si plusieurs facteurs varient, leurs multiplicateurs relatifs se composent.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $\lambda_{\text{panne}} = 0.015$ /jour; $t_{\text{mission}} = 300$ jours; $c_{\text{unitaire}} = 2$ pièces/failure. Appliquez « $\text{Stock_rechange} = \lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $\lambda_{\text{panne}} = 0.015$ /jour; $t_{\text{mission}} = 300$ jours; $c_{\text{unitaire}} = 2$ pièces/failure.
Relation appliquée : $\text{Stock_rechange} = \lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$. Calcul et résultat :
 $\text{Stock_rechange} = 0.015 \times 300 \times 2 = 9$ pièces. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 9. Maintenance et consommables ».

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

Correction autonome — ouvrir après essai

$\lambda_{\text{panne}} = 0.03$ pannes/jour $t_{\text{mission}} = 180$ jours $c_{\text{unitaire}} = 1$ pièce/panne $\text{Stock_rechange} = 0.03 \times 180 \times 1 = 5.4$ pièces Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de « $\text{Stock_rechange} = \lambda_{\text{panne}} \times t_{\text{mission}} \times c_{\text{unitaire}}$ » dépend de «9. Maintenance et consommables»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

10. Boucles croisées et cascades de panne

$\text{Marge_système} = \min(\text{Marge}_i)$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\text{Marge_système} = \min(\text{Marge}_i)$ » dans « 10. Boucles croisées et cascades de panne » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 10. Boucles croisées et cascades de panne », la branche la plus contraignante fixe la marge réellement disponible; améliorer une branche non limitante ne suffit pas.

3 — Grandeurs

Marge_système : marge globale retenue pour le système; Marge_i : marge du sous-système i après conversion sur une base comparable; $\min$: fonction qui retient la plus petite des marges candidates.

4 — Formule

$\text{Marge_système} = \min(\text{Marge}_i)$

5 — Lecture

Lecture recommandée: «Marge indice système égale $\min(\text{Marge indice } i)$ ».

6 — Symboles et sens

Marge_système : marge globale retenue pour le système; Marge_i : marge du sous-système i après conversion sur une base comparable; $\min$: fonction qui retient la plus petite des marges candidates.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Marge_système et toutes les Marge_i doivent utiliser la même unité ou la même normalisation avant comparaison. Si les marges physiques ont des unités différentes, les comparer directement est interdit; elles doivent d'abord être converties en fraction de marge ou autre score commun.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

Le système est contraint par sa marge la plus faible: une seule fonction proche de sa limite peut fixer la réserve globale. $\min$ sélectionne donc le goulot le plus critique après harmonisation des marges.

11 — Hypothèses

Limites: tous les candidats comparés doivent être exprimés dans une unité et une définition compatibles. Au voisinage du croisement de deux branches, une petite incertitude peut changer la contrainte active.

12 — Contrôle indépendant

Contrôle de branche active: Marge_système doit être égale à l'une des Marge_i et inférieure ou égale à toutes les autres.

13 — Cas numérique

eau = 22% marge oxygène = 15% marge retrait CO₂ = 9% marge puissance = 18% $\text{Marge_système} = \min(22,15,9,18) = 9\%$

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

Le système est contraint par sa marge la plus faible: une seule fonction proche de sa limite peut fixer la réserve globale. $\min$ sélectionne donc le goulot le plus critique après harmonisation des marges.

15 — Vérification

Contrôle de branche active: Marge_système doit être égale à l'une des Marge_i et inférieure ou égale à toutes les autres.

16 — Estimation mentale

Avant le calcul exact, repérer la branche manifestement la plus petite ou la plus grande; si $\min/\max$ sélectionne l'opposé, vérifier unités et saisies.

17 — Interprétation

Le sens pratique de «Marge_système = min(Marge_i)» dépend de «10. Boucles croisées et cascades de panne»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 10. Boucles croisées et cascades de panne »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Sensibilité par branche: tant qu'un candidat reste la branche active, varier un candidat inactif ne change pas le résultat; le comportement change lorsqu'une autre branche devient minimale ou maximale.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : 14%, 11%, 16%, 13%. Appliquez « Marge_système = min(Marge_i) », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : 14%, 11%, 16%, 13%. Relation appliquée : Marge_système = min(Marge_i).
Calcul et résultat : Marge_système=11%. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 10. Boucles croisées et cascades de panne ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 10. Boucles croisées et cascades de panne », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

eau = 22% marge oxygène = 15% marge retrait CO₂ = 9% marge puissance = 18% Marge_système = min(22,15,9,18) = 9% Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Le sens pratique de «Marge_système = min(Marge_i)» dépend de «10. Boucles croisées et cascades de panne»: avant toute décision, identifier la grandeur obtenue, son unité, le système auquel elle se rapporte et les hypothèses conservées.

11. Besoin journalier d'appoint vérifié d'une boucle d'eau

```
m_appoint = max(0, m_demande - m_récupérée_vérifiée)
```

1 — Question concrète

Que permet de calculer « m_appoint = max(0, m_demande - m_récupérée_vérifiée) » dans « 11. Besoin journalier d'appoint vérifié d'une boucle d'eau » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans « 11. Besoin journalier d'appoint vérifié d'une boucle d'eau », on empêche une demande physique de devenir négative tout en conservant l'écart réel lorsque le besoin dépasse la récupération.

3 — Grandeurs

m_appoint : masse d'eau neuve à fournir; m_demande : besoin total du jour; m_récupérée_vérifiée : masse effectivement récupérée et libérée après contrôle qualité; max : fonction empêchant un appoint négatif.

4 — Formule

$m_{\text{appoint}} = \max(0, m_{\text{demande}} - m_{\text{récupérée_vérifiée}})$

5 — Lecture

Lire « $m_{\text{appoint}} = \max(0, m_{\text{demande}} - m_{\text{récupérée_vérifiée}})$ » en nommant chaque opération, indice, fonction et symbole.

6 — Symboles et sens

m_{appoint} : masse d'eau neuve à fournir; m_{demande} : besoin total du jour; $m_{\text{récupérée_vérifiée}}$: masse effectivement récupérée et libérée après contrôle qualité; $\max$: fonction empêchant un appoint négatif.

7 — Prononciation

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

8 — Unités

Toutes les masses doivent utiliser la même unité et la même période, par exemple kg/jour.

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

L'appoint doit être calculé sur l'eau réellement qualifiée, pas sur la récupération brute annoncée par le procédé.

11 — Hypothèses

La frontière inclut le contrôle qualité et les volumes mis en quarantaine; les stocks déjà disponibles sont traités séparément.

12 — Contrôle indépendant

$m_{\text{récupérée_vérifiée}} + m_{\text{appoint}}$ doit au moins couvrir m_{demande} lorsque la récupération ne suffit pas.

13 — Cas numérique

Avec $m_{\text{demande}} = 80$ kg/j et $m_{\text{récupérée_vérifiée}} = 76$ kg/j : $m_{\text{appoint}} = \max(0, 80 - 76) = 4$ kg/j.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

L'appoint doit être calculé sur l'eau réellement qualifiée, pas sur la récupération brute annoncée par le procédé.

15 — Vérification

$m_{\text{récupérée_vérifiée}} + m_{\text{appoint}}$ doit au moins couvrir m_{demande} lorsque la récupération ne suffit pas.

16 — Estimation mentale

Si la récupération vérifiée approche la demande, l'appoint doit devenir petit; s'il dépasse la demande, l'appoint est nul dans ce modèle.

17 — Interprétation

Dimensionner l'appoint et le stockage sur la récupération vérifiée afin qu'une dérive qualité ne soit pas masquée par un bon rendement brut.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne démontre ni que les données d'entrée sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario « 11. Besoin journalier d'appoint vérifié d'une boucle d'eau »; les mesures, hypothèses et limites doivent rester traçables.

19 — Sensibilité

Si la récupération vérifiée tombe de 76 à 66 kg/j pour une demande de 80 kg/j, l'appoint passe de 4 à 14 kg/j.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Données de l'exercice : $m_{\text{demande}} = 95 \text{ kg/j}$; $m_{\text{récupérée_vérifiée}} = 82 \text{ kg/j}$. Appliquez « $m_{\text{appoint}} = \max(0, m_{\text{demande}} - m_{\text{récupérée_vérifiée}})$ », montrez la substitution, les conversions et l'unité finale.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Données utilisées : $m_{\text{demande}} = 95 \text{ kg/j}$; $m_{\text{récupérée_vérifiée}} = 82 \text{ kg/j}$. Relation appliquée : $m_{\text{appoint}} = \max(0, m_{\text{demande}} - m_{\text{récupérée_vérifiée}})$. Calcul et résultat : Avec $m_{\text{demande}} = 95 \text{ kg/j}$ et $m_{\text{récupérée_vérifiée}} = 82 \text{ kg/j}$: $m_{\text{appoint}} = \max(0, 95 - 82) = 13 \text{ kg/j}$. Contrôler l'unité avec l'étape 8, puis relier le résultat à la décision décrite pour « 11. Besoin journalier d'appoint vérifié d'une boucle d'eau ».

Exercice autonome. Sans relire l'étape 13, reprenez le cas numérique de référence de « 11. Besoin journalier d'appoint vérifié d'une boucle d'eau », refaites les conversions et vérifiez le résultat par une méthode indépendante.

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $m_{\text{demande}} = 80 \text{ kg/j}$ et $m_{\text{récupérée_vérifiée}} = 76 \text{ kg/j}$: $m_{\text{appoint}} = \max(0, 80 - 76) = 4 \text{ kg/j}$. Le contrôle indépendant doit retrouver le même ordre de grandeur et la même unité.

21 — Décision mission

Dimensionner l'appoint et le stockage sur la récupération vérifiée afin qu'une dérive qualité ne soit pas masquée par un bon rendement brut.

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle eau s'arrête.

2. Boucle oxygène et électrolyse

Dans ce module, boucle oxygène et électrolyse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

On injecte maintenant l'événement suivant: un capteur CO2 dérive lentement.

3. Élimination du CO2

Dans ce module, élimination du co2 sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

— « Élimination du CO2 ».

On injecte maintenant l'événement suivant: une contamination impose l'isolement d'un réservoir.

4. Boucle eau et taux de récupération

Dans ce module, boucle eau et taux de récupération sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

5. Humidité et condensats

Dans ce module, humidité et condensats sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

On injecte maintenant l'événement suivant: une fuite lente augmente l'appoint de gaz.

6. Contaminants et filtration

Dans ce module, contaminants et filtration sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

On injecte maintenant l'événement suivant: la puissance disponible impose un fonctionnement intermittent.

7. Capteurs, actionneurs et contrôle

Dans ce module, capteurs, actionneurs et contrôle sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

On injecte maintenant l'événement suivant: une pompe de boucle eau s'arrête.

8. Stocks tampons et autonomie

Dans ce module, stocks tampons et autonomie sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

— « Stocks tampons et autonomie ».

On injecte maintenant l'événement suivant: un capteur CO2 dérive lentement.

9. Maintenance et consommables

Dans ce module, maintenance et consommables sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

On injecte maintenant l'événement suivant: une contamination impose l'isolement d'un réservoir.

10. Boucles croisées et cascades de panne

Dans ce module, boucles croisées et cascades de panne sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les modes dégradés.

On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Exercices progressifs avec corrigés 1:1

Exercice 1: Bilan dynamique de masse

Analysez bilan dynamique de masse. Relation à tester: « $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$ ». Cas dégradé: un capteur CO2 dérive lentement. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 1: Bilan dynamique de masse

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO2 — Cas « Élimination du CO2 » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 1: Bilan dynamique de masse

Résultat

Corrigé — Exercice 1: Bilan dynamique de masse

Exercice 2: Boucle oxygène et électrolyse

Analysez boucle oxygène et électrolyse. Relation à tester: « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ ». Cas dégradé: une contamination impose l'isolement d'un réservoir. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 2: Boucle oxygène et électrolyse

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO₂ — Cas « Élimination du CO₂ » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 2: Boucle oxygène et électrolyse

Résultat

Corrigé — Exercice 2: Boucle oxygène et électrolyse

Exercice 3: Élimination du CO₂

Relation à tester: « $M_{\text{appoint}} = M_{\text{demande}} \times (1 - R)$ ». Cas dégradé: un filtre atteint sa perte de charge limite.

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

Corrigé — Exercice 3: Élimination du CO₂

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO₂ — Cas « Élimination du CO₂ » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 3: Élimination du CO₂

Résultat

Corrigé — Exercice 3: Élimination du CO₂

Exercice 4: Boucle eau et taux de récupération

Analysez boucle eau et taux de récupération. Relation à tester: « $\text{Autonomie} = \text{Stock}_{\text{utile}} / \text{Débit}_{\text{net}}$ ». Cas

dégradé: une fuite lente augmente l'appoint de gaz. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 4: Boucle eau et taux de récupération

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO₂ — Cas « Élimination du CO₂ » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 4: Boucle eau et taux de récupération

Résultat

Corrigé — Exercice 4: Boucle eau et taux de récupération

Exercice 5: Humidité et condensats

Relation à tester: « $dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$ ». Cas dégradé: la puissance

disponible impose un fonctionnement intermittent. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 5: Humidité et condensats

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO₂ — Cas « Élimination du CO₂ » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 5: Humidité et condensats

Résultat

Corrigé — Exercice 5: Humidité et condensats

Exercice 6: Contaminants et filtration

Relation à tester: « $R = m_{\text{récupérée}} / m_{\text{entrée}}$ ». Cas dégradé: une pompe de boucle eau s'arrête. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 6: Contaminants et filtration

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO₂ — Cas « Élimination du CO₂ » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 6: Contaminants et filtration

Résultat

Corrigé — Exercice 6: Contaminants et filtration

Exercice 7: Capteurs, actionneurs et contrôle

Analysez capteurs, actionneurs et contrôle. Relation à tester: « $M_{\text{appoint}} = M_{\text{demande}} \times (1 - R)$ ». Cas dégradé: un capteur CO₂ dérive lentement. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 7: Capteurs, actionneurs et contrôle

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO₂ — Cas « Élimination du CO₂ » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 7: Capteurs, actionneurs et contrôle

Résultat

Corrigé — Exercice 7: Capteurs, actionneurs et contrôle

Contrôle

Corrigé — Exercice 7: Capteurs, actionneurs et contrôle

Exercice 8: Stocks tampons et autonomie

Analysez stocks tampons et autonomie. Relation à tester: « $\text{Autonomie} = \text{Stock}_{\text{utile}} / \text{Débit}_{\text{net}}$ ». Cas dégradé: une contamination impose l'isolement d'un réservoir. Livrable: données, unités, résultat, marge, décision.

Corrigé — Exercice 8: Stocks tampons et autonomie

Données du cas

Exercice guidé — Élimination du CO₂ — Cas « Élimination du CO₂ » — Dans ce module, bilan dynamique de masse sert directement à fermer et piloter des boucles d'air et d'eau en suivant les masses, la qualité, l'énergie, les stocks tampons et les... Repère: Pour « Bilan dynamique de masse », si 12 kg/j entrent, 2 kg/j sortent, 8 kg/j sont consommés et 1 kg/j est produit localement, l'inventaire augmente de 3 kg/j.

Réserve: On injecte maintenant l'événement suivant: un filtre atteint sa perte de charge limite.

Raisonnement

Corrigé — Exercice 8: Stocks tampons et autonomie

Résultat

Corrigé — Exercice 8: Stocks tampons et autonomie

Mini-projet intégrateur et dossier de référence

Fermer un modèle de 30 jours pour six personnes: inventaires initiaux, consommations, récupération, appoint, énergie et alarmes. Injecter une panne de pompe et un capteur biaisé, puis montrer comment les stocks et les mesures indépendantes permettent de gagner du temps.

« Exercice 8: Stocks tampons et autonomie » — hypothèses, budget, marges.

« Exercice 8: Stocks tampons et autonomie » — interfaces et causes communes.

« Exercice 8: Stocks tampons et autonomie » — calculs, limites, critères.

Repères du passage: sous-système · redondance

Vérification de maîtrise du module 27

- « Exercice 8: Stocks tampons et autonomie » — unités et ordre de grandeur.
- « Exercice 8: Stocks tampons et autonomie » — cas dégradé.
- « Exercice 8: Stocks tampons et autonomie » — marge décisionnelle.
- « Exercice 8: Stocks tampons et autonomie » — mesure de contrôle.
- Termes de contrôle: Vérification

contrôle dimensionnel · ordre de grandeur

Repères du passage: état · observation

Repères du passage: inventaire · substitution

Repères du passage: validation

Repères du passage: marge

Repères du passage: robustesse

Repères du passage: débit

Repères du passage: contamination

Repères du passage: Autonomie

Repères du passage: puissance

Termes. contrôle dimensionnel · ordre de grandeur

Sources primaires et passerelles

- NASA — 98% water recovery milestone
- NASA ECLSS overview

Repères lexicaux du module. masses

- NASA — ECLSS
- NASA-STD-3001 Volume 2

Matrice de parité FR ↔ EN

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

#	Mini-leçon FR	Correspondance EN	Formule canonique
1	1. Bilan dynamique de masse	Dynamic mass balance — account for every pathway	$dM/dt = \text{Entrées} - \text{Sorties} + \text{Production} - \text{Consommation}$
2	2. Boucle oxygène et électrolyse	Electrolysis oxygen yield — connect processed water to theoretical oxygen mass	$m_{O_2} = \eta_{elec} \times (32 / 36) \times m_{H_2O}$
3	3. Élimination du CO2	Net carbon-dioxide accumulation	$m_{CO_2,net} = m_{CO_2,produit} - m_{CO_2,retiré}$
4	4. Boucle eau et taux de récupération	Water recovery fraction — quantify recovered product from incoming wastewater	$R = m_{récupérée} / m_{entrée}$
5	5. Humidité et condensats	Condensate collection — water removed from an air stream	$m_{cond} = m_{vapeur,entrée} - m_{vapeur,sortie}$
6	6. Contaminants et filtration	Filter removal efficiency — calculate downstream concentration	$C_{sortie} = C_{entrée} \times (1 - \eta_{filtre})$
7	7. Capteurs, actionneurs et contrôle	Control error — preserve the sign between setpoint and measurement	$e = \text{Consigne} - \text{Mesure}$
8	8. Stocks tampons et autonomie	Stock autonomy — convert usable inventory into time at net demand	$\text{Autonomie} = \text{Stock}_{utile} / \text{Débit}_{net}$
9	9. Maintenance et consommables	Expected spare demand — link failure rate, exposure time and units consumed per failure	$\text{Stock}_{rechange} = \lambda_{panne} \times t_{mission} \times c_{unitaire}$
10	10. Boucles croisées et cascades de panne	Minimum subsystem margin — the weakest protected margin controls the immediate gate	$\text{Marge}_{système} = \min(\text{Marge}_i)$
11	11. Besoin journalier d'appoint vérifié d'une boucle d'eau	Daily verified make-up requirement for a closed water loop	$m_{appoint} = \max(0, m_{demande} - m_{récupérée_vérifiée})$