

Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs

Passer du sachet de nourriture à une production biologique contrôlée: lumière, eau, nutriments, microbiologie, rendement, sécurité alimentaire et couplage avec ECLSS.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « transpiration végétale », et quel repère issu de « surface cultivée » permet de vérifier la décision?

Intuition. La serre doit fournir nourriture fraîche et oxygène partiel sans devenir une source incontrôlée de microbes, de consommation d'eau ou de panne systémique.

1

Comprendre avant de calculer

La serre doit fournir nourriture fraîche et oxygène partiel sans devenir une source incontrôlée de microbes, de consommation d'eau ou de panne systémique.

2

transpiration végétale

Définition sans prérequis.

3

surface cultivée

Définition sans prérequis.

Repère concret. Une estimation en kg/m² doit préciser période, culture, fraction comestible et conditions de croissance.

- Comprendre avant de calculer — La serre doit fournir nourriture fraîche et oxygène partiel sans devenir une source incontrôlée de microbes, de consommation d'eau ou de panne systémique.
- transpiration végétale — Définition sans prérequis.
- surface cultivée — Définition sans prérequis.

Avant « Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs », utilisez modules 00 à 34 recommandés selon le sujet. Dans « Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs », une notation indispensable est redéfinie au moment où elle devient utile au raisonnement.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 36

Comprendre avant de calculer

La serre doit fournir nourriture fraîche et oxygène partiel sans devenir une source incontrôlée de microbes, de consommation d'eau ou de panne systémique.

Progression du module — photosynthèse; transpiration végétale; solution nutritive; surface cultivée.

photosynthèse

Définition sans prérequis. La photosynthèse utilise l'énergie lumineuse pour convertir du CO₂ et de l'eau en matière organique, avec libération d'oxygène selon les réactions biologiques globales.

Scène concrète. Une culture transforme une partie de l'énergie lumineuse en biomasse comestible, mais une grande partie devient chaleur ou biomasse non consommée.

Contrôle mental. Sans lumière utilisable, CO₂, eau et nutriments adéquats, la production ne peut pas rester nominale; un modèle qui ignore un facteur limitant surestime la biomasse.

Piège à éviter. Une serre n'est pas un dispositif d'efficacité parfaite: respiration, pertes, cycles lumineux et parties non comestibles doivent être comptés.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [photosynthèse](#) » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Exercice guidé — photosynthèse

Situation à reconnaître. Une culture transforme une partie de l'énergie lumineuse en biomasse comestible, mais une grande partie devient chaleur ou biomasse non consommée.

Vérification demandée. Sans lumière utilisable, CO₂, eau et nutriments adéquats, la production ne peut pas rester nominale; un modèle qui ignore un facteur limitant surestime la biomasse.

Erreur à écarter. Une serre n'est pas un dispositif d'efficacité parfaite: respiration, pertes, cycles lumineux et parties non comestibles doivent être comptés.

Corrigé raisonné

Sens précis

La photosynthèse utilise l'énergie lumineuse pour convertir du CO₂ et de l'eau en matière organique, avec libération d'oxygène selon les réactions biologiques globales.

Test du cas

Sans lumière utilisable, CO₂, eau et nutriments adéquats, la production ne peut pas rester nominale; un modèle qui ignore un facteur limitant surestime la biomasse.

Piège exclu

Une serre n'est pas un dispositif d'efficacité parfaite: respiration, pertes, cycles lumineux et parties non comestibles doivent être comptés.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « [photosynthèse](#) » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Termes du corrigé. [observation](#)

Quantification

photosynthèse: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

transpiration végétale

Définition sans prérequis. La transpiration est la perte d'eau sous forme de vapeur par les plantes, principalement via les stomates. Dans une serre fermée, cette eau peut être condensée et recyclée.

Scène concrète. Des cultures actives peuvent transférer beaucoup d'eau vers l'air, créant une charge importante pour la déshumidification.

Contrôle mental. Une surface foliaire ou un déficit de vapeur plus élevé tend à augmenter la perte d'eau; vérifiez que le bilan hydrique de l'habitat récupère ou compense ce flux.

Piège à éviter. Ce flux n'est pas forcément une perte si la boucle de récupération est efficace; il devient un problème si condensation et qualité d'eau ne suivent pas.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [transpiration végétale](#) » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Exercice guidé — transpiration végétale

Situation à reconnaître. Des cultures actives peuvent transférer beaucoup d'eau vers l'air, créant une charge importante pour la déshumidification.

Vérification demandée. Une surface foliaire ou un déficit de vapeur plus élevé tend à augmenter la perte d'eau; vérifiez que le bilan hydrique de l'habitat récupère ou compense ce flux.

Erreur à écarter. Ce flux n'est pas forcément une perte si la boucle de récupération est efficace; il devient un problème si condensation et qualité d'eau ne suivent pas.

Corrigé raisonné

Sens précis

La transpiration est la perte d'eau sous forme de vapeur par les plantes, principalement via les stomates. Dans une serre fermée, cette eau peut être condensée et recyclée.

Test du cas

Une surface foliaire ou un déficit de vapeur plus élevé tend à augmenter la perte d'eau; vérifiez que le bilan hydrique de l'habitat récupère ou compense ce flux.

Piège exclu

Ce flux n'est pas forcément une perte si la boucle de récupération est efficace; il devient un problème si condensation et qualité d'eau ne suivent pas.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « transpiration végétale » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Quantification

transpiration végétale: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

transpiration végétale: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

solution nutritive

Définition sans prérequis. Une [solution nutritive](#) apporte aux racines les éléments minéraux nécessaires dans des concentrations, un pH et une conductivité contrôlés.

Scène concrète. En [hydroponie](#), une dérive de pH peut rendre certains nutriments moins disponibles même si leur quantité totale est suffisante.

Contrôle mental. Contrôlez concentration, pH et conductivité dans la plage de culture: ajouter davantage de nutriments n'améliore pas indéfiniment la croissance et peut devenir toxique.

Piège à éviter. Ajouter davantage d'engrais n'est pas toujours correct: excès ionique et déséquilibres peuvent endommager les plantes.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [solution nutritive](#) » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Exercice guidé — solution nutritive

Situation à reconnaître. En hydroponie, une dérive de pH peut rendre certains nutriments moins disponibles même si leur quantité totale est suffisante.

Vérification demandée. Contrôlez concentration, pH et conductivité dans la plage de culture: ajouter davantage de nutriments n'améliore pas indéfiniment la croissance et peut devenir toxique.

Erreur à écarter. Ajouter davantage d'engrais n'est pas toujours correct: excès ionique et déséquilibres peuvent endommager les plantes.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une solution nutritive apporte aux racines les éléments minéraux nécessaires dans des concentrations, un pH et une conductivité contrôlés.

Test du cas

Contrôlez concentration, pH et conductivité dans la plage de culture: ajouter davantage de nutriments n'améliore pas indéfiniment la croissance et peut devenir toxique.

Piège exclu

Ajouter davantage d'engrais n'est pas toujours correct: excès ionique et déséquilibres peuvent endommager les plantes.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « solution nutritive » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Termes du corrigé. [vérification](#)

Quantification

solution nutritive: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

solution nutritive: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

surface cultivée

Définition sans prérequis. La [surface cultivée](#) est une grandeur de conception reliant production, lumière, espace, eau et travail humain. Elle doit être définie avec rendement par culture et cycle.

Scène concrète. Doubler la surface sans doubler lumière, pompage et capacité de traitement ne double pas nécessairement la récolte.

Contrôle mental. À rendement surfacique constant, doubler la surface doit doubler la production; si le besoin alimentaire double sans augmentation de rendement, la surface nécessaire doit aussi augmenter.

Piège à éviter. Une estimation en kg/m² doit préciser [période](#), culture, fraction comestible et conditions de croissance.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [surface cultivée](#) » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Exercice guidé — surface cultivée

Situation à reconnaître. Doubler la surface sans doubler lumière, pompage et capacité de traitement ne double pas nécessairement la récolte.

Vérification demandée. À rendement surfacique constant, doubler la surface doit doubler la production; si le besoin alimentaire double sans augmentation de rendement, la surface nécessaire doit aussi augmenter.

Erreur à écarter. Une estimation en kg/m² doit préciser période, culture, fraction comestible et conditions de croissance.

Corrigé raisonné

Sens précis

La surface cultivée est une grandeur de conception reliant production, lumière, espace, eau et travail humain. Elle doit être définie avec rendement par culture et cycle.

Test du cas

À rendement surfacique constant, doubler la surface doit doubler la production; si le besoin alimentaire double sans augmentation de rendement, la surface nécessaire doit aussi augmenter.

Piège exclu

Une estimation en kg/m² doit préciser période, culture, fraction comestible et conditions de croissance.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « surface cultivée » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Étude intégrée — Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs

Situation à analyser. La serre doit fournir nourriture fraîche et oxygène partiel sans devenir une source incontrôlée de microbes, de consommation d'eau ou de panne systémique.

- **photosynthèse:** Une culture transforme une partie de l'énergie lumineuse en biomasse comestible, mais une grande partie devient chaleur ou biomasse non consommée. Contrôle attendu: Sans lumière utilisable, CO₂, eau et nutriments adéquats, la production ne peut pas rester nominale; un modèle qui ignore un facteur limitant surestime la biomasse.
- **transpiration végétale:** Des cultures actives peuvent transférer beaucoup d'eau vers l'air, créant une charge importante pour la déshumidification. Contrôle attendu: Une surface foliaire ou un déficit de vapeur plus élevé tend à augmenter la perte d'eau; vérifiez que le bilan hydrique de l'habitat récupère ou compense ce flux.
- **solution nutritive:** En hydroponie, une dérive de pH peut rendre certains nutriments moins disponibles même si leur quantité totale est suffisante. Contrôle attendu: Contrôlez concentration, pH et conductivité dans la plage de culture: ajouter davantage de nutriments n'améliore pas indéfiniment la croissance et peut devenir toxique.
- **surface cultivée:** Doubler la surface sans doubler lumière, pompage et capacité de traitement ne double pas nécessairement la récolte. Contrôle attendu: À rendement surfacique constant, doubler la surface doit doubler la production; si le besoin alimentaire double sans augmentation de rendement, la surface nécessaire doit aussi augmenter.

Le diagnostic ne doit pas confondre « photosynthèse » et « transpiration végétale ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Une culture transforme une partie de l'énergie lumineuse en biomasse comestible, mais une grande partie devient chaleur ou biomasse non consommée. Le second doit être contrôlé autrement: Une surface foliaire ou un déficit de vapeur plus élevé tend à augmenter la perte d'eau; vérifiez que le bilan hydrique de l'habitat récupère ou compense ce flux.

Une seconde vérification croise « solution nutritive » et « surface cultivée ». Gardez comme alerte « Ajouter davantage d'engrais n'est pas toujours correct: excès ionique et déséquilibres peuvent endommager les plantes. »; pour « surface cultivée », utilisez plutôt ce test: À rendement surfacique constant, doubler la surface doit doubler la production; si le besoin alimentaire double sans augmentation de rendement, la surface nécessaire doit aussi augmenter.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs », classez les indices selon « photosynthèse » (Sans lumière utilisable, CO₂, eau et nutriments adéquats, la production ne peut pas rester nominale; un modèle qui ignore un facteur limitant surestime la biomasse.), « transpiration végétale » (Une surface foliaire ou un déficit de vapeur plus élevé tend à augmenter la perte d'eau; vérifiez que le bilan hydrique de l'habitat récupère ou compense ce flux.), « solution nutritive » (Contrôlez concentration, pH et conductivité dans la plage de culture: ajouter davantage de nutriments n'améliore pas indéfiniment la croissance et peut devenir toxique.), « surface cultivée » (À rendement surfacique constant, doubler la surface doit doubler la production; si le besoin alimentaire double sans augmentation de rendement, la surface nécessaire doit aussi augmenter.) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour photosynthèse, Dans ce module, une erreur sur « photosynthèse » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger. Le garde-fou principal est: Une serre n'est pas un dispositif d'efficacité parfaite: respiration, pertes, cycles lumineux et parties non comestibles doivent être comptés. Pour transpiration végétale, Dans ce module, une erreur sur « transpiration végétale » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger. Le garde-fou principal est: Ce flux n'est pas forcément une perte si la boucle de récupération est efficace; il devient un problème si condensation et qualité d'eau ne suivent pas. Pour solution nutritive, Dans ce module, une erreur sur « solution nutritive » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger. Le garde-fou principal est: Ajouter davantage d'engrais n'est pas toujours correct: excès ionique et déséquilibres peuvent endommager les plantes. Pour surface cultivée, Dans ce module, une erreur sur « surface cultivée » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger. Le garde-fou principal est: Une estimation en kg/m² doit préciser période, culture, fraction comestible et conditions de croissance.

Données du cas

Exercice de synthèse — Dans la situation de « Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs », classez les indices selon « photosynthèse » (Sans lumière utilisable, CO₂, eau et nutriments adéquats, la production ne peut pas rester nominale; un modèle qui ignore un facteur limitant surestime la biomasse.), « transpiration végétale »

(Une surface foliaire ou un déficit de vapeur plus élevé tend à augmenter la perte d'eau; vérifiez que le bilan hydrique de l'habitat récupère ou compense ce flux.), « solution nutritive » (Contr

Relation

Le garde-fou principal est: Une estimation en kg/m² doit préciser période, culture, fraction comestible et conditions de croissance.

Raisonnement

Corrigé de synthèse Pour photosynthèse, Dans ce module, une erreur sur « photosynthèse » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger. Le garde-fou principal est: Une serre n'est pas un dispositif d'efficacité parfaite: respiration, pertes, cycles lumineux et parties non comestibles doivent être comptés. Pour transpiration végétale, Dans ce module, une erreur sur « transpiration végétale » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger. Le garde-fou principal est: Ce flux n'est pas forcément une perte si la boucle de récupération est efficace; il devient un problème si condensation et qualité d'eau ne suivent pas. Pour solution nutritive, Dans ce module, une erreur sur « solution nutritive » peut provoquer déficit alimentaire, d

Résultat

Corrigé de synthèse Pour photosynthèse, Dans ce module, une erreur sur « photosynthèse » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Interprétation

Pour surface cultivée, Dans ce module, une erreur sur « surface cultivée » peut provoquer déficit alimentaire, dérive du bilan d'eau ou déséquilibre nutritif dans une boucle biologique lente à corriger.

Mini-leçons quantitatives canoniques

Ce bloc constitue la référence quantitative du module; les valeurs d'exercice sont pédagogiques et doivent être remplacées par les données de mission avant toute décision réelle.

Surface de culture nécessaire

$$A_{\text{crop}} = M_{\text{food}} / \text{yield_area}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $A_{\text{crop}} = M_{\text{food}} / \text{yield_area}$ » dans « Surface de culture nécessaire » ?

2 — Intuition sans symboles

La surface requise dépend du besoin alimentaire et du rendement réellement soutenable par unité de surface.

3 — Grandeurs

A_{crop} : surface de culture [m²]; M_{food} : besoin alimentaire produit [kg/d]; yield_area : rendement surfacique [kg/(m²·d)]

4 — Formule

$$A_{\text{crop}} = M_{\text{food}} / \text{yield_area}$$

5 — Lecture

Lire « $A_{\text{crop}} = M_{\text{food}} / \text{yield_area}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

A_{crop} : surface de culture [m²]; M_{food} : besoin alimentaire produit [kg/d]; yield_area : rendement surfacique [kg/(m²·d)]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

A_{crop} [m²]; M_{food} [kg/d]; yield_area [kg/(m²·d)]

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

11 — Hypothèses

Numérateur et dénominateur doivent décrire le même scénario et le dénominateur doit rester positif.

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $M_{\text{food}} = 30 \text{ kg/d}$, $\text{yield_area} = 0.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$: $A_{\text{crop}} = 30 / 0.5 = 60 \text{ m}^2$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

Comparer les ordres de grandeur du numérateur et du dénominateur permet d'anticiper le résultat.

17 — Interprétation

Ajouter marge biologique et capacité de réserve avant de figer la surface d'une serre opérationnelle.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente avec le numérateur et diminue quand le dénominateur augmente.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{food}} = 20 \text{ kg/d}$, $\text{yield_area} = 0.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$: $A_{\text{crop}} = 20 / 0.4$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{food}} = 20 \text{ kg/d}$, $\text{yield_area} = 0.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$: $A_{\text{crop}} = 20 / 0.4 = 50 \text{ m}^2$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{food}} = 45 \text{ kg/d}$, $\text{yield_area} = 0.75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$: $A_{\text{crop}} = 45 / 0.75$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{food}} = 45 \text{ kg/d}$, $\text{yield_area} = 0.75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$: $A_{\text{crop}} = 45 / 0.75 = 60 \text{ m}^2$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Ajouter marge biologique et capacité de réserve avant de figer la surface d'une serre opérationnelle.

Énergie quotidienne d'éclairage

$$E_{\text{light}} = P_{\text{density}} \times A_{\text{crop}} \times t_{\text{light}} / 1000$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E_{\text{light}} = P_{\text{density}} \times A_{\text{crop}} \times t_{\text{light}} / 1000$ » dans « Énergie quotidienne d'éclairage » ?

2 — Intuition sans symboles

L'éclairage transforme une densité de puissance, une surface et une photopériode en charge énergétique quotidienne.

3 — Grandeurs

E_{light} : énergie quotidienne [kWh]; P_{density} : puissance lumineuse surfacique [W/m^2]; A_{crop} : surface éclairée [m^2]; t_{light} : photopériode [h]

4 — Formule

$$E_{\text{light}} = P_{\text{density}} \times A_{\text{crop}} \times t_{\text{light}} / 1000$$

5 — Lecture

Lire « $E_{\text{light}} = P_{\text{density}} \times A_{\text{crop}} \times t_{\text{light}} / 1000$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

E_light: énergie quotidienne [kWh]; P_density: puissance lumineuse surfacique [W/m²]; A_crop: surface éclairée [m²]; t_light: photopériode [h]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

E_light [kWh]; P_density [W/m²]; A_crop [m²]; t_light [h]

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent appartenir au même scénario et leurs unités doivent se combiner correctement.

12 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

13 — Cas numérique

Avec P_density = 250 W/m², A_crop = 60 m², t_light = 16 h: E_light = $250 \times 60 \times 16 / 1000 = 240$ kWh.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

15 — Vérification

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément chaque facteur donne rapidement l'ordre de grandeur du produit.

17 — Interprétation

Vérifier que cette énergie reste compatible avec le budget électrique et le rejet thermique de la serre.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit si les autres restent constants.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec P_density = 180 W/m², A_crop = 50 m², t_light = 14 h: E_light = $180 \times 50 \times 14 / 1000$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec P_density = 180 W/m², A_crop = 50 m², t_light = 14 h: E_light = $180 \times 50 \times 14 / 1000 = 126$ kWh. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec P_density = 300 W/m², A_crop = 40 m², t_light = 18 h: E_light = $300 \times 40 \times 18 / 1000$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec P_density = 300 W/m², A_crop = 40 m², t_light = 18 h: E_light = $300 \times 40 \times 18 / 1000 = 216$ kWh. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Vérifier que cette énergie reste compatible avec le budget électrique et le rejet thermique de la serre.

Appoint d'eau de culture

$$q_{\text{makeup}} = q_{\text{crop}} \times (1 - \text{eta}_{\text{recovery}})$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $q_{\text{makeup}} = q_{\text{crop}} \times (1 - \text{eta_recovery})$ » dans « Appoint d'eau de culture » ?

2 — Intuition sans symboles

L'appoint correspond à la part de l'eau de culture qui n'est pas récupérée par la boucle.

3 — Grandeurs

q_{makeup} : appoint quotidien [L/d]; q_{crop} : circulation d'eau culture [L/d]; eta_recovery : fraction récupérée [sans dimension]

4 — Formule

$$q_{\text{makeup}} = q_{\text{crop}} \times (1 - \text{eta_recovery})$$

5 — Lecture

Lire « $q_{\text{makeup}} = q_{\text{crop}} \times (1 - \text{eta_recovery})$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

q_{makeup} : appoint quotidien [L/d]; q_{crop} : circulation d'eau culture [L/d]; eta_recovery : fraction récupérée [sans dimension]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

q_{makeup} [L/d]; q_{crop} [L/d]; eta_recovery [sans dimension]

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La soustraction isole une marge ou un écart entre deux états comparables.

11 — Hypothèses

Les termes doivent partager le même repère et la même unité.

12 — Contrôle indépendant

Réadditionner la marge au terme retranché doit reconstruire l'état initial.

13 — Cas numérique

Avec $q_{\text{crop}} = 100$ L/d, $\text{eta_recovery} = 0.95$ sans dimension: $q_{\text{makeup}} = 100 \times (1 - 0.95) = 5$ L/day.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La soustraction isole une marge ou un écart entre deux états comparables.

15 — Vérification

Réadditionner la marge au terme retranché doit reconstruire l'état initial.

16 — Estimation mentale

Comparer les deux termes permet de prévoir le signe avant calcul.

17 — Interprétation

Dimensionner les réserves sur l'appoint réel et surveiller toute baisse du taux de récupération.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le résultat se déplace directement quand l'un des deux termes varie.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $q_{\text{crop}} = 80$ L/d, $\text{eta_recovery} = 0.9$ sans dimension: $q_{\text{makeup}} = 80 \times (1 - 0.9)$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $q_{\text{crop}} = 80$ L/d, $\text{eta_recovery} = 0.9$ sans dimension: $q_{\text{makeup}} = 80 \times (1 - 0.9) = 8$ L/day. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $q_{\text{crop}} = 150$ L/d, $\text{eta_recovery} = 0.98$ sans dimension: $q_{\text{makeup}} = 150 \times (1 - 0.98)$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $q_{\text{crop}} = 150 \text{ L/d}$, $\eta_{\text{recovery}} = 0.98$ sans dimension: $q_{\text{makeup}} = 150 \times (1 - 0.98) = 3 \text{ L/day}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Dimensionner les réserves sur l'appoint réel et surveiller toute baisse du taux de récupération.

Production alimentaire

$$M_{\text{output}} = \text{yield_area} \times A_{\text{crop}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $M_{\text{output}} = \text{yield_area} \times A_{\text{crop}}$ » dans « Production alimentaire » ?

2 — Intuition sans symboles

Le rendement surfacique appliqué à la surface donne la production quotidienne attendue.

3 — Grandeurs

M_{output} : production quotidienne [kg/d]; yield_area : rendement surfacique [kg/(m²·d)]; A_{crop} : surface cultivée [m²]

4 — Formule

$$M_{\text{output}} = \text{yield_area} \times A_{\text{crop}}$$

5 — Lecture

Lire « $M_{\text{output}} = \text{yield_area} \times A_{\text{crop}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

M_{output} : production quotidienne [kg/d]; yield_area : rendement surfacique [kg/(m²·d)]; A_{crop} : surface cultivée [m²]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

M_{output} [kg/d]; yield_area [kg/(m²·d)]; A_{crop} [m²]

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent appartenir au même scénario et leurs unités doivent se combiner correctement.

12 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

13 — Cas numérique

Avec $\text{yield_area} = 0.5 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{d)}$, $A_{\text{crop}} = 60 \text{ m}^2$: $M_{\text{output}} = 0.5 \times 60 = 30 \text{ kg/day}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux, une fraction ou une grandeur spécifique en quantité totale.

15 — Vérification

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver le produit des autres.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément chaque facteur donne rapidement l'ordre de grandeur du produit.

17 — Interprétation

Comparer la production à la demande et non à la seule performance botanique du meilleur lot.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit si les autres restent constants.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $\text{yield_area} = 0.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $A_{\text{crop}} = 50 \text{ m}^2$: $M_{\text{output}} = 0.4 \times 50$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $\text{yield_area} = 0.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $A_{\text{crop}} = 50 \text{ m}^2$: $M_{\text{output}} = 0.4 \times 50 = 20 \text{ kg/day}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $\text{yield_area} = 0.75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $A_{\text{crop}} = 40 \text{ m}^2$: $M_{\text{output}} = 0.75 \times 40$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $\text{yield_area} = 0.75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $A_{\text{crop}} = 40 \text{ m}^2$: $M_{\text{output}} = 0.75 \times 40 = 30 \text{ kg/day}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Comparer la production à la demande et non à la seule performance botanique du meilleur lot.

Puissance moyenne du système de culture

$$P_{\text{avg}} = E_{\text{day}} / t_{\text{day}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $P_{\text{avg}} = E_{\text{day}} / t_{\text{day}}$ » dans « Puissance moyenne du système de culture » ?

2 — Intuition sans symboles

Une énergie quotidienne peut être convertie en puissance moyenne pour comparer la serre aux autres charges de la colonie.

3 — Grandeurs

P_{avg} : puissance moyenne [kW]; E_{day} : énergie quotidienne [kWh]; t_{day} : durée de référence quotidienne [h]

4 — Formule

$$P_{\text{avg}} = E_{\text{day}} / t_{\text{day}}$$

5 — Lecture

Lire « $P_{\text{avg}} = E_{\text{day}} / t_{\text{day}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

P_{avg} : puissance moyenne [kW]; E_{day} : énergie quotidienne [kWh]; t_{day} : durée de référence quotidienne [h]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

P_{avg} [kW]; E_{day} [kWh]; t_{day} [h]

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

11 — Hypothèses

Numérateur et dénominateur doivent décrire le même scénario et le dénominateur doit rester positif.

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $E_{\text{day}} = 240 \text{ kWh}$, $t_{\text{day}} = 24 \text{ h}$: $P_{\text{avg}} = 240 / 24 = 10 \text{ kW}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division rapporte une quantité à une capacité, une durée ou une référence cohérente.

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

Comparer les ordres de grandeur du numérateur et du dénominateur permet d'anticiper le résultat.

17 — Interprétation

Ne pas confondre puissance moyenne et puissance de pointe pour le dimensionnement électrique.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente avec le numérateur et diminue quand le dénominateur augmente.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $E_{\text{day}} = 360 \text{ kWh}$, $t_{\text{day}} = 24 \text{ h}$: $P_{\text{avg}} = 360 / 24$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $E_{\text{day}} = 360 \text{ kWh}$, $t_{\text{day}} = 24 \text{ h}$: $P_{\text{avg}} = 360 / 24 = 15 \text{ kW}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $E_{\text{day}} = 120 \text{ kWh}$, $t_{\text{day}} = 24 \text{ h}$: $P_{\text{avg}} = 120 / 24$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $E_{\text{day}} = 120 \text{ kWh}$, $t_{\text{day}} = 24 \text{ h}$: $P_{\text{avg}} = 120 / 24 = 5 \text{ kW}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Ne pas confondre puissance moyenne et puissance de pointe pour le dimensionnement électrique.

Marge alimentaire

$$M_{\text{food_margin}} = M_{\text{output}} - M_{\text{demand}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $M_{\text{food_margin}} = M_{\text{output}} - M_{\text{demand}}$ » dans « Marge alimentaire » ?

2 — Intuition sans symboles

La marge montre la quantité quotidienne restante après satisfaction de la demande.

3 — Grandeurs

$M_{\text{food_margin}}$: marge de production [kg/d]; M_{output} : production disponible [kg/d]; M_{demand} : demande équipage [kg/d]

4 — Formule

$$M_{\text{food_margin}} = M_{\text{output}} - M_{\text{demand}}$$

5 — Lecture

Lire « $M_{\text{food_margin}} = M_{\text{output}} - M_{\text{demand}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

$M_{\text{food_margin}}$: marge de production [kg/d]; M_{output} : production disponible [kg/d]; M_{demand} : demande équipage [kg/d]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

$M_{\text{food_margin}}$ [kg/d]; M_{output} [kg/d]; M_{demand} [kg/d]

9 — Convention

Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.

10 — Pourquoi cette opération

La soustraction isole une marge ou un écart entre deux états comparables.

11 — Hypothèses

Les termes doivent partager le même repère et la même unité.

12 — Contrôle indépendant

Réadditionner la marge au terme retranché doit reconstruire l'état initial.

13 — Cas numérique

Avec $M_{\text{output}} = 35 \text{ kg/d}$, $M_{\text{demand}} = 30 \text{ kg/d}$: $M_{\text{food_margin}} = 35 - 30 = 5 \text{ kg/day}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La soustraction isole une marge ou un écart entre deux états comparables.

15 — Vérification

Réadditionner la marge au terme retranché doit reconstruire l'état initial.

16 — Estimation mentale

Comparer les deux termes permet de prévoir le signe avant calcul.

17 — Interprétation

Une marge durablement négative exige rationnement, importation ou augmentation de capacité avant d'épuiser les stocks.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont exactes ni que le modèle reste valide hors du scénario annoncé; ces deux points exigent des preuves séparées.

19 — Sensibilité

Le résultat se déplace directement quand l'un des deux termes varie.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{output}} = 18 \text{ kg/d}$, $M_{\text{demand}} = 20 \text{ kg/d}$: $M_{\text{food_margin}} = 18 - 20$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{output}} = 18 \text{ kg/d}$, $M_{\text{demand}} = 20 \text{ kg/d}$: $M_{\text{food_margin}} = 18 - 20 = -2 \text{ kg/day}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $M_{\text{output}} = 50 \text{ kg/d}$, $M_{\text{demand}} = 42 \text{ kg/d}$: $M_{\text{food_margin}} = 50 - 42$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $M_{\text{output}} = 50 \text{ kg/d}$, $M_{\text{demand}} = 42 \text{ kg/d}$: $M_{\text{food_margin}} = 50 - 42 = 8 \text{ kg/day}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Une marge durablement négative exige rationnement, importation ou augmentation de capacité avant d'épuiser les stocks.

Progression de maîtrise

1. photosynthèse: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. transpiration végétale: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. solution nutritive: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. surface cultivée: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs »: confrontez « photosynthèse » à « transpiration végétale »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 36 — photosynthèse, transpiration végétale, solution nutritive, surface cultivée. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Expliquer comment « Comprendre avant de calculer » se manifeste dans agriculture martienne, cultures et biosystèmes régénératifs.
- Refaire un calcul ou une estimation utile pour « photosynthèse » et contrôler ses unités.
- Identifier une hypothèse fragile ou un mode dégradé associé à « transpiration végétale ».
- Transformer le résultat en décision vérifiable pour « surface cultivée ».

1. Les plantes sont à la fois nourriture et équipement de support-vie

Une culture consomme eau, lumière, nutriments, volume et temps d'équipage, mais elle **produit** biomasse comestible, oxygène et vapeur d'eau tout en **absorbant** du CO₂. Il faut donc la traiter comme un **sous-système** biologique avec des flux mesurables, pas comme un simple potager.

2. Choisir une culture par fonction, pas par habitude terrestre

Une plante utile sur Mars doit combiner rendement comestible, temps de cycle, **densité** nutritive, résistance aux maladies, fraction de biomasse non comestible et facilité de récolte. Une salade apporte du frais rapidement; une céréale ou une pomme de terre peut contribuer davantage aux calories mais demande une autre infrastructure.

3. Lumière, photopériode et énergie électrique

Les LED permettent de choisir spectre et photopériode. L'agriculture devient alors un problème énergétique: une serre de 50 m² recevant en **moyenne** 200 W/m² de puissance lumineuse demande 10 kW optiques, auxquels s'ajoutent pertes de conversion, pompes et **contrôle thermique**. Le calendrier des cultures doit donc être relié au budget de puissance de la base.

4. Eau et nutriments en boucle contrôlée

Hydroponie et substrats contrôlés permettent de mesurer précisément eau, pH, conductivité et éléments nutritifs. Une **boucle fermée** économise la ressource mais accumule aussi sels, composés organiques et agents pathogènes. Fermer une boucle signifie donc surveiller la qualité, pas simplement réutiliser l'eau.

5. Microbiologie, maladies et sécurité alimentaire

Une serre fermée peut amplifier rapidement un pathogène végétal. Les graines, substrats, surfaces, eau et mains de l'équipage font partie du système microbiologique. Les plantes destinées à être mangées crues imposent une surveillance particulière parce qu'une **contamination** alimentaire affecte directement la capacité opérationnelle de l'équipage.

6. Déchets, compostage et circularité

Les résidus végétaux contiennent encore carbone, azote, phosphore et eau. Une base mature cherchera à récupérer ces éléments par compostage, digestion ou autres procédés compatibles avec la biosécurité. Le défi est d'éviter qu'une boucle de **recyclage** transmette simultanément toxines ou organismes indésirables.

7. Fermer les cycles nutritifs sans créer un système biologiquement fragile

Un biosystème régénératif cherche à recycler eau, nutriments et une partie des déchets, mais le mot « fermé » ne signifie pas qu'aucune correction n'est nécessaire. Les plantes retirent certains ions plus vite que d'autres, les sels peuvent

s'accumuler, le pH dérive et les micro-organismes transforment les composés azotés. Une exploitation martienne doit donc mesurer conductivité, pH, oxygène dissous, concentrations nutritives et état sanitaire des racines. Les déchets organiques peuvent redevenir une ressource après traitement, mais une boucle mal contrôlée peut aussi propager pathogènes ou contaminants. L'objectif d'ingénierie n'est pas la fermeture absolue: c'est une boucle suffisamment récupérable, mesurable et découplable pour qu'une anomalie biologique n'entraîne pas la perte de toute la production alimentaire.

8. Lumière, chaleur et puissance: une culture est aussi une charge électrique

Dans un habitat pressurisé, produire des plantes sous éclairage artificiel transforme l'agriculture en problème énergétique. La puissance des luminaires devient chaleur à évacuer presque intégralement; la photopériode influence à la fois croissance et profil de charge; une réduction de puissance imposée par le système électrique peut affecter le calendrier de récolte plusieurs semaines plus tard. Il faut donc raisonner en photons utiles, rendement électrique, surface cultivée, température foliaire et capacité du contrôle thermique. Les serres utilisant la lumière solaire réduisent une partie de cette charge mais introduisent d'autres contraintes: poussière, transmission optique, isolation, cycles jour-nuit et protection contre les événements radiatifs. Agriculture et énergie doivent être dimensionnées ensemble.

9. De l'expérience botanique à une chaîne alimentaire exploitable

Une culture scientifique peut réussir avec quelques plantes; une fonction alimentaire doit livrer une quantité prévisible, récoltable, stockable et compatible avec la santé de l'équipage. Il faut donc ajouter semences, germination, transplantation, pollinisation, récolte, transformation, conservation, nettoyage et gestion des lots. La diversité des cultures protège contre une défaillance unique mais augmente la complexité. Une base doit également conserver un stock alimentaire tampon: même une excellente serre peut subir maladie, panne d'éclairage ou retard de croissance. La bonne architecture combine production locale, réserves, capacités de diagnostic et procédures permettant d'isoler un compartiment agricole sans contaminer les autres.

10. Exemple calculé: surface de culture et fraction de besoins

Une étude NASA cite des ordres de grandeur d'environ 20–25 m² de cultures pour contribuer aux besoins en oxygène d'une personne et autour de 50 m² pour produire l'équivalent calorique complet dans certains scénarios. Pour six personnes, 50 m²/personne donnerait 300 m². Si une première serre ne possède que 90 m², elle représente environ $90/300 = 30\%$ de cette surface théorique de référence; elle doit donc être pensée comme complément plutôt que comme autonomie alimentaire totale.

Approfondissement: convertir une ration en surface, lumière et puissance

Une serre martienne ne se dimensionne pas seulement en mètres carrés. Il faut relier production alimentaire, lumière reçue par les plantes, rendement électrique et chaleur à rejeter. Les expériences spatiales de culture permettent d'étudier physiologie et systèmes contrôlés, mais elles ne démontrent pas à elles seules l'autonomie alimentaire d'une colonie. Le passage du végétal expérimental à la chaîne alimentaire exige un bilan de matière et d'énergie. [NASA Science — Space Crops](#)

Exemple calculé. Imaginons une zone de culture de 120 m² recevant en moyenne 220 W/m² de lumière artificielle pendant 16 heures par jour. La puissance lumineuse instantanée vaut $120 \times 220 = 26\,400$ W, soit 26,4 kW. L'énergie lumineuse quotidienne vaut $26,4 \times 16 = 422,4$ kWh par jour. Si l'ensemble alimentation électrique + luminaires convertit 45 % de l'électricité en photons utiles, l'électricité nécessaire est $422,4 \div 0,45 \approx 938,7$ kWh/jour. Cette valeur n'est pas une prescription agronomique: elle montre pourquoi le choix des cultures et de l'éclairage devient un problème énergétique majeur.

Une partie importante de cette énergie finit également sous forme de chaleur dans la serre et doit être déplacée ou rejetée. Cela relie agriculture, réseau électrique et contrôle thermique. Une culture peut être excellente biologiquement mais

mauvaise pour la mission si sa consommation de puissance, d'eau, de nutriments ou de travail dépasse les marges disponibles. Le bon indicateur n'est donc jamais le rendement agricole isolé. [NASA — Advanced Plant Habitat](#)

11. Exercice progressif

Une chambre de culture de 24 m² produit en moyenne 0,35 kg de biomasse comestible par m² et par cycle de 30 jours. Calculez la production mensuelle puis discutez pourquoi le nombre brut de kilogrammes ne suffit pas à établir la valeur nutritionnelle.

Correction raisonnée

La production est $24 \times 0,35 = 8,4$ kg de biomasse comestible par cycle de 30 jours, soit environ 8,4 kg par mois dans ce modèle simplifié. Ce total ne dit toutefois rien sur les calories, protéines, lipides, acides aminés essentiels, micronutriments, teneur en eau ou part réellement consommable. Huit kilogrammes d'une culture très aqueuse ne remplacent pas huit kilogrammes d'un aliment énergétique. Il faut aussi intégrer les pertes, la variabilité des rendements, le temps entre récoltes, la durée de conservation et les besoins du menu complet. Le bon indicateur combine donc masse, énergie alimentaire, qualité nutritionnelle et régularité de production.

Mini-projet

Concevoir une serre de première génération pour six personnes: cultures, calendrier, éclairage, eau, nutriments, contrôle microbien, [redondance](#), déchets, stock de graines et stratégie de repli vers les aliments stockés.

Sources primaires et passerelles

- [NASA Science — Space Crops](#)
- [NASA Science — Advanced Plant Habitat](#)
- [NASA NTRS — Bioregenerative Life Support for Humans in Space](#)

Matrice de parité FR ↔ EN

Surface de culture nécessaire	Required crop area
Énergie quotidienne d'éclairage	Daily lighting energy
Appoint d'eau de culture	Crop-water make-up
Production alimentaire	Food output
Puissance moyenne du système de culture	Average crop-system power
Marge alimentaire	Food-production margin

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