

Vivre et travailler ailleurs: d'un site d'atterrissage à une société

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Vivre et travailler ailleurs: d'un site d'atterrissage à une société: comment « Choisir un site: science, ressources et opérations » agit-il sur « Construire localement: raisonner en tonnes », et quel repère issu de « Mobilité: la distance coûte plus que du carburant » permet de vérifier la décision?

Intuition. La NASA a utilisé le concept d'Exploration Zone: des régions d'intérêt situées approximativement dans un rayon de 100 km autour d'un site central afin de combiner science, ressources et opérations. Ce rayon est un cadre d'étude historique, pas une obligation universelle.

1

Choisir un site: science, ressources et opérations

La NASA a utilisé le concept d'Exploration Zone: des régions d'intérêt situées approximativement dans un rayon de 100 km autour d'un site central afin de combiner science, ressources et opérations.

2

Construire localement: raisonner en tonnes

Scénario pédagogique: 2 m de régolithe, densité supposée 1 500 kg/m³, sur 100 m².

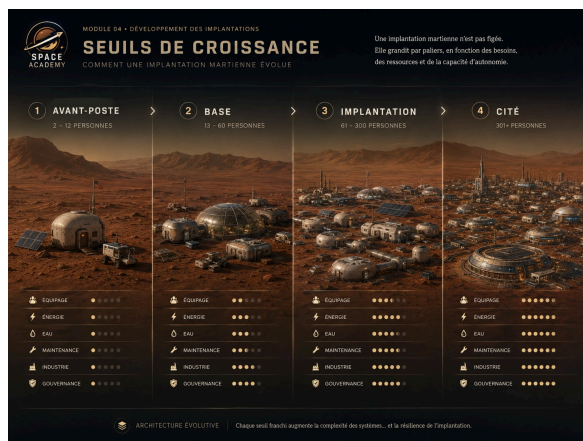
3

Mobilité: la distance coûte plus que du carburant

Une ressource à 30 km implique routes ou itinéraires, véhicules, énergie, navigation, pièces, secours et circulation dans les deux sens.

Repère concret. La NASA a utilisé le concept d'Exploration Zone: des régions d'intérêt situées approximativement dans un rayon de 100 km autour d'un site central afin de combiner science, ressources et opérations.

- Choisir un site: science, ressources et opérations — La NASA a utilisé le concept d'Exploration Zone: des régions d'intérêt situées approximativement dans un rayon de 100 km autour d'un site central afin de combiner science,...
- Construire localement: raisonner en tonnes — Scénario pédagogique: 2 m de régolithe, densité supposée 1 500 kg/m³, sur 100 m².
- Mobilité: la distance coûte plus que du carburant — Une ressource à 30 km implique routes ou itinéraires, véhicules, énergie, navigation, pièces, secours et circulation dans les deux sens.





MODULE 04 • DÉVELOPPEMENT DES IMPLANTATIONS

SEUILS DE CROISSANCE

COMMENT UNE IMPLANTATION MARTIENNE ÉVOLUE

Une implantation martienne n'est pas figée.
Elle grandit par paliers, en fonction des besoins,
des ressources et de la capacité d'autonomie.

1 AVANT-POSTE

2 – 12 PERSONNES



ÉQUIPAGE	● ● ● ● ●
ÉNERGIE	● ● ● ● ●
EAU	● ● ● ● ●
MAINTENANCE	● ● ● ● ●
INDUSTRIE	● ● ● ● ●
GOVERNANCE	● ● ● ● ●

2 BASE

13 – 60 PERSONNES



ÉQUIPAGE	● ● ● ● ●
ÉNERGIE	● ● ● ● ●
EAU	● ● ● ● ●
MAINTENANCE	● ● ● ● ●
INDUSTRIE	● ● ● ● ●
GOVERNANCE	● ● ● ● ●

3 IMPLANTATION

61 – 300 PERSONNES



ÉQUIPAGE	● ● ● ● ●
ÉNERGIE	● ● ● ● ●
EAU	● ● ● ● ●
MAINTENANCE	● ● ● ● ●
INDUSTRIE	● ● ● ● ●
GOVERNANCE	● ● ● ● ●

4 CITÉ

301+ PERSONNES



ÉQUIPAGE	● ● ● ● ●
ÉNERGIE	● ● ● ● ●
EAU	● ● ● ● ●
MAINTENANCE	● ● ● ● ●
INDUSTRIE	● ● ● ● ●
GOVERNANCE	● ● ● ● ●

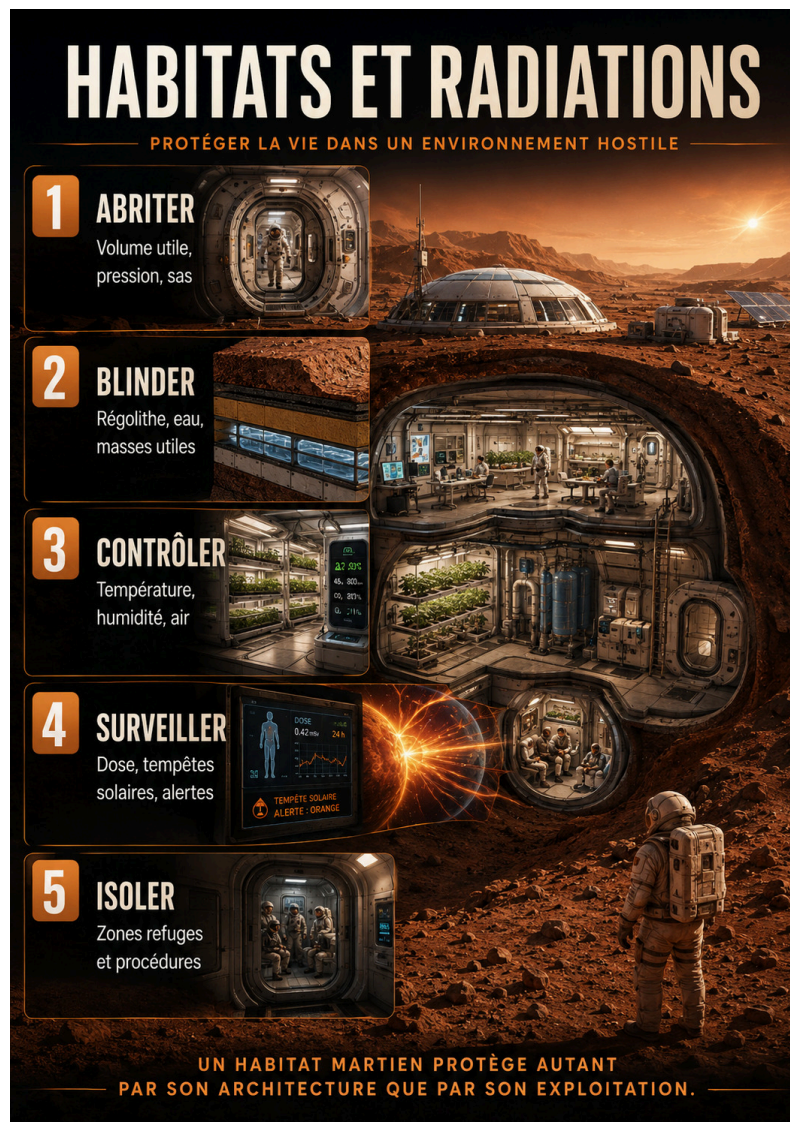


ARCHITECTURE ÉVOLUTIVE

Chaque seuil franchi augmente la complexité des systèmes... et la résilience de l'implantation.

Une implantation change d'architecture en grandissant — schéma pédagogique de synthèse du module.

Vivre ailleurs relie énergie, eau, transport, construction, industrie, santé et compétences. Chaque choix ferme certaines options et en ouvre d'autres.



Ce module assemble les outils précédents et compare les architectures à 4, 20, 100 et 1 000 habitants sans imposer une ville martienne unique.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 13

Comprendre avant de calculer

Passer de quelques jours de mission à des mois puis des années transforme le problème: logement, travail, sommeil, intimité, conflits, maintenance et gouvernance deviennent des systèmes vitaux.

Progression du module — habitabilité; rythme circadien; charge psychosociale; gouvernance locale.

habitabilité

Exemple concret. Volume, bruit, lumière, température, intimité et ergonomie influencent la performance de l'équipage.

Piège. Un habitat techniquement pressurisé n'est pas automatiquement habitable sur des mois.

Définition sans prérequis. décrit la capacité d'un environnement à permettre de vivre et travailler durablement avec sécurité, santé et performance acceptables.

Contrôle mental. Testez le scénario sur une journée complète: sommeil, hygiène, travail, repas, intimité et urgence doivent pouvoir coexister sans rendre une fonction vitale inaccessible.

Exercice guidé — habitabilité

Situation à reconnaître. L'habitabilité décrit la capacité d'un environnement à permettre de vivre et travailler durablement avec sécurité, santé et performance acceptables.

Vérification demandée. Testez le scénario sur une journée complète: sommeil, hygiène, travail, repas, intimité et urgence doivent pouvoir coexister sans rendre une fonction vitale inaccessible.

Erreur à écarter. Un habitat techniquement pressurisé n'est pas automatiquement habitable sur des mois.

Corrigé raisonné

Sens précis

L'habitabilité décrit la capacité d'un environnement à permettre de vivre et travailler durablement avec sécurité, santé et performance acceptables.

Test du cas

Testez le scénario sur une journée complète: sommeil, hygiène, travail, repas, intimité et urgence doivent pouvoir coexister sans rendre une fonction vitale inaccessible.

Piège exclu

Un habitat techniquement pressurisé n'est pas automatiquement habitable sur des mois.

Quantification

habitabilité: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

rythme circadien

Exemple concret. Un éclairage planifié et des horaires stables aident à soutenir le sommeil dans un environnement artificiel.

Piège. Accumuler du travail tardif peut dégrader progressivement la performance même si chaque journée semble supportable isolément.

Définition sans prérequis. Le est l'organisation biologique proche de 24 h qui influence sommeil, vigilance, hormones et température corporelle.

Contrôle mental. Un cycle imposé qui décale continuellement sommeil et lumière doit augmenter la dette de sommeil; vérifiez que le planning comporte de vraies périodes de récupération.

Exercice guidé — rythme circadien

Situation à reconnaître. Le rythme circadien est l'organisation biologique proche de 24 h qui influence sommeil, vigilance, hormones et température corporelle.

Vérification demandée. Un cycle imposé qui décale continuellement sommeil et lumière doit augmenter la dette de sommeil; vérifiez que le planning comporte de vraies périodes de récupération.

Erreur à écarter. Accumuler du travail tardif peut dégrader progressivement la performance même si chaque journée semble supportable isolément.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le rythme circadien est l'organisation biologique proche de 24 h qui influence sommeil, vigilance, hormones et température corporelle.

Test du cas

Un cycle imposé qui décale continuellement sommeil et lumière doit augmenter la dette de sommeil; vérifiez que le planning comporte de vraies périodes de récupération.

Piège exclu

Accumuler du travail tardif peut dégrader progressivement la performance même si chaque journée semble supportable isolément.

charge psychosociale

Exemple concret. Un désaccord mineur peut devenir chronique lorsque le groupe ne peut pas se séparer physiquement.

Piège. Traiter ces problèmes comme faiblesse individuelle empêche d'améliorer espace, procédures et organisation.

Définition sans prérequis. La regroupe contraintes relationnelles, isolement, manque d'intimité, conflits et pression de mission qui influencent santé et coopération.

Contrôle mental. Cherchez les signaux convergents plutôt qu'un seul indicateur: conflits, retrait, erreurs, sommeil et communication peuvent évoluer ensemble sans qu'un chiffre unique résume la situation.

Exercice guidé — charge psychosociale

Situation à reconnaître. La charge psychosociale regroupe contraintes relationnelles, isolement, manque d'intimité, conflits et pression de mission qui influencent santé et coopération.

Vérification demandée. Cherchez les signaux convergents plutôt qu'un seul indicateur: conflits, retrait, erreurs, sommeil et communication peuvent évoluer ensemble sans qu'un chiffre unique résume la situation.

Erreur à écarter. Traiter ces problèmes comme faiblesse individuelle empêche d'améliorer espace, procédures et organisation.

Corrigé raisonné

Sens précis

La charge psychosociale regroupe contraintes relationnelles, isolement, manque d'intimité, conflits et pression de mission qui influencent santé et coopération.

Test du cas

Cherchez les signaux convergents plutôt qu'un seul indicateur: conflits, retrait, erreurs, sommeil et communication peuvent évoluer ensemble sans qu'un chiffre unique résume la situation.

Piège exclu

Traiter ces problèmes comme faiblesse individuelle empêche d'améliorer espace, procédures et organisation.

Quantification

charge psychosociale: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

charge psychosociale: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

gouvernance locale

Exemple concret. Une équipe martienne doit pouvoir résoudre certaines urgences sans attendre une autorisation terrestre.

Piège. Une délégation mal définie peut produire soit paralysie, soit décisions contradictoires.

Définition sans prérequis. La définit règles, responsabilités, arbitrages et procédures de décision adaptées au délai de communication et à la vie quotidienne.

Contrôle mental. Posez une décision urgente sans contact Terre: l'équipage doit savoir qui a autorité, selon quelle règle et avec quel mécanisme de recours ou de révision.

Exercice guidé — gouvernance locale

Situation à reconnaître. La gouvernance locale définit règles, responsabilités, arbitrages et procédures de décision adaptées au délai de communication et à la vie quotidienne.

Vérification demandée. Posez une décision urgente sans contact Terre: l'équipage doit savoir qui a autorité, selon quelle règle et avec quel mécanisme de recours ou de révision.

Erreur à écarter. Une délégation mal définie peut produire soit paralysie, soit décisions contradictoires.

Corrigé raisonné

Sens précis

La gouvernance locale définit règles, responsabilités, arbitrages et procédures de décision adaptées au délai de communication et à la vie quotidienne.

Test du cas

Posez une décision urgente sans contact Terre: l'équipage doit savoir qui a autorité, selon quelle règle et avec quel mécanisme de recours ou de révision.

Piège exclu

Une délégation mal définie peut produire soit paralysie, soit décisions contradictoires.

Quantification

gouvernance locale: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

gouvernance locale: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Progression

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

Gate zéro prérequis

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

1. Choisir un site: science, ressources et opérations

La a utilisé le concept d'Exploration Zone: des régions d'intérêt situées approximativement dans un rayon de 100 km autour d'un site central afin de combiner science, ressources et opérations. Ce rayon est un cadre d'étude historique, pas une obligation universelle.

Un site combine altitude pour l'EDL, pente, rochers, glace ou minéraux, énergie, communications, risques géologiques et valeur scientifique. Une ressource excellente dans une zone difficile à atteindre peut être moins utile qu'une ressource un peu moins riche au sein d'une architecture robuste.

Étude de site — transformer un rayon en problème opérationnel

Le concept historique d'Exploration Zone de la NASA regroupait des régions d'intérêt dans un rayon approximatif de 100 km autour d'un site central. Un cercle de 100 km de rayon a une aire géométrique πr^2 d'environ 31 400 km², mais cette aire n'est évidemment pas entièrement utilisable: pentes, rochers, reliefs, zones dangereuses et objectifs scientifiques la fragmentent. Le calcul montre seulement l'échelle spatiale d'un problème de

Un aller-retour vers un point à 80 km du centre représente au minimum 160 km de trajet idéal, avant détour. Avec une moyenne opérationnelle supposée de 10 km/h, cela représente 16 h de conduite pure. Ajoutez échantillonnage, arrêts, recharge, météo et marge de secours: une « ressource à 80 km » devient une mission, pas une simple distance sur une carte. La sélection du site doit donc relier ressources et capacité réelle à les atteindre.

Aire de recherche et distance de mobilité

$$A = \pi r^2$$

1 — Question concrète	Dans «1. Choisir un site: science, ressources et opérations», quelles étapes faut-il suivre pour exploiter sans saut la chaîne « $A = \pi \times (100 \text{ km})^2 \approx 31\,400 \text{ km}^2$ »?
2 — Intuition sans symboles	Un rayon définit une zone circulaire de recherche, tandis que toute destination impose aussi une distance aller-retour à couvrir réellement.
3 — Grandeurs	A : aire accessible ; π : constante pi ; r : rayon de mobilité ou de recherche. L'aire varie comme le carré du rayon.
4 — Formule	$A = \pi r^2$
5 — Lecture	Version parlée: «A égale pi multiplié par (100 km) ² environ égal à 31 400 km ² ».
6 — Symboles et sens	A : aire accessible ; π : constante pi ; r : rayon de mobilité ou de recherche. L'aire varie comme le carré du rayon.

7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	A en km ² ici; π sans dimension; le rayon est en km et son carré en km ² . Si l'on convertit en SI, A peut être exprimée en m ² .
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. L'origine signalée dans cette section est: les mesures d'équipage, stocks et contraintes opérationnelles. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	L'aire d'un disque vaut $A=\pi r^2$. Ici $r=100$ km: on calcule d'abord $100^2=10\,000$ km ² , puis on multiplie par π , ce qui donne environ 31 416 km ² , arrondi ici à 31 400 km ² .
11 — Hypothèses	Les unités et frontières doivent rester compatibles d'un maillon à l'autre; la défaillance d'une sous-hypothèse invalide la conclusion globale.
12 — Contrôle d'unités	A en km ² ici; π sans dimension; le rayon est en km et son carré en km ² . Si l'on convertit en SI, A peut être exprimée en m ² . Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : pour $r = 100$ km, $A = \pi \times 100^2 \approx 31\,416$ km ² . Une destination à 80 km implique déjà 160 km d'aller-retour idéal.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	L'aire d'un disque vaut $A=\pi r^2$. Ici $r=100$ km: on calcule d'abord $100^2=10\,000$ km ² , puis on multiplie par π , ce qui donne environ 31 416 km ² , arrondi ici à 31 400 km ² .
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — diviser A par π pour retrouver r^2 ; prendre ensuite la racine carrée de A/π doit redonner environ 100 km. A/π ne redonne donc pas l'aire, mais le carré du rayon.
16 — Estimation mentale	Un ordre de grandeur est vérifié après chaque transformation, ce qui évite qu'une erreur précoce soit masquée par les calculs suivants.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «1. Choisir un site: science, ressources et opérations», la relation « $A = \pi \times (100 \text{ km})^2 \approx 31\,400 \text{ km}^2$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	A varie comme r^2 . Si le rayon augmente de 10 %, l'aire est multipliée par $1,10^2=1,21$, soit environ +21 %; une variation de rayon n'est donc pas transmise linéairement à l'aire.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez le rayon de recherche de 10 %, de 100 à 110 km. Recalculez l'aire accessible et comparez-la au cas initial. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $A = \pi \times 110^2 = \pi \times 12\,100 \approx 38\,013$ km². Le rayon augmente de 10 %, mais l'aire augmente selon le carré : $38\,013/31\,416 \approx 1,21$, soit environ +21 %. La logistique croît donc plus vite que la distance linéaire. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Aire de recherche et distance de mobilité» en changeant au moins deux données de $A = \pi r^2$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit

changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $A = \pi r^2$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Ne jamais confondre grande aire théorique et accessibilité opérationnelle réelle du terrain.

21 — Décision mission

Ne jamais confondre grande aire théorique et accessibilité opérationnelle réelle du terrain.

Intuition système

Choisir un site revient à résoudre plusieurs problèmes en même temps: sécurité d'atterrissage, accès à l'eau, énergie, science, terrain praticable, communications et capacité d'extension. Le concept NASA d'Exploration Zone place plusieurs régions d'intérêt dans un rayon d'environ 100 km, mais cette géométrie ne garantit pas leur accessibilité réelle.

Score multicritère de site

$$S_{\text{site}} = \sum w_i s_i$$

1 — Question concrète

Que signifie $\text{score_site} = f(\text{atterrissage, ressource, terrain, énergie, science, mobilité})$ lorsque la règle f n'est pas encore définie ?

2 — Intuition sans symboles

Chaque critère de site compte selon son importance, puis les contributions pondérées sont additionnées pour comparer des options sur une base commune.

3 — Grandeurs

S_{site} : score pondéré total ; w_i : poids du critère i ; s_i : note du critère i ; Σ : somme de toutes les contributions $w_i s_i$.

4 — Formule

$$S_{\text{site}} = \sum w_i s_i$$

5 — Lecture

Lecture : « score site égale f de atterrissage, ressource, terrain, énergie, science et mobilité ».

6 — Symboles et sens

S_{site} : score pondéré total ; w_i : poids du critère i ; s_i : note du critère i ; Σ : somme de toutes les contributions $w_i s_i$.

7 — Prononciation

Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

Les critères peuvent partir d'unités différentes. Avant toute combinaison numérique, la méthode f doit préciser comment ils sont normalisés, convertis en sous-scores, pondérés ou soumis à des seuils. Le score final utilise ensuite l'échelle définie par cette méthode.

9 — Convention

Chaque critère doit provenir d'une mesure, d'une carte, d'un modèle ou d'une hypothèse annoncée. La fonction f doit être documentée avant de produire un score numérique. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.

10 — Pourquoi cette opération	Une fonction f permet de représenter une dépendance multicritère sans imposer prématurément une forme mathématique. Selon la décision, f peut être une somme pondérée, une règle à seuils, un classement ou une autre méthode explicite.
11 — Hypothèses	Sans définition explicite de f , de l'échelle des critères et de leurs pondérations ou seuils, le score n'est ni reproductible ni comparable.
12 — Contrôle d'unités	Les critères peuvent partir d'unités différentes. Avant toute combinaison numérique, la méthode f doit préciser comment ils sont normalisés, convertis en sous-scores, pondérés ou soumis à des seuils. Le score final utilise ensuite l'échelle définie par cette méthode. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : avec les poids 0,30 ; 0,20 ; 0,15 ; 0,15 ; 0,10 ; 0,10 et les notes 8 ; 9 ; 7 ; 8 ; 6 ; 6,5, le score vaut $S_{\text{site}} = 7,70$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Une fonction f permet de représenter une dépendance multicritère sans imposer prématurément une forme mathématique. Selon la décision, f peut être une somme pondérée, une règle à seuils, un classement ou une autre méthode explicite.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle de méthode : recalculer deux sites avec exactement la même définition de f , puis modifier un seul critère. L'effet observé doit correspondre à la pondération, au seuil ou à la règle explicitement documentée.
16 — Estimation mentale	Avant calcul, vérifier que chaque critère reste dans son domaine admissible et que les sous-scores éventuels restent dans l'échelle annoncée. Sans définition de f , aucun ordre de grandeur numérique unique du score n'est déductible.
17 — Interprétation	Le score n'est pas une propriété physique du site : c'est le résultat d'une méthode de décision. Sa signification dépend donc de la définition de f et des critères retenus.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	La sensibilité n'est pas supposée monotone. Elle se déduit de la définition de f : une hausse d'un critère peut améliorer, dégrader ou ne pas changer le score selon la méthode.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez de 10 % la première note, de 8 à 8,8, sans changer les poids ni les autres notes. Recalculez S_{site}. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. La première contribution passe de $0,30 \times 8 = 2,40$ à $0,30 \times 8,8 = 2,64$, soit +0,24. Le score total passe donc de 7,70 à 7,94. Le poids de 0,30 limite l'effet de l'amélioration locale sur le score global. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Score multicritère de site» en changeant au moins deux données de $S_{\text{site}} = \sum w_i s_i$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $S_{\text{site}} = \sum w_i s_i$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision

suivante : Utiliser le score pour rendre les arbitrages visibles, puis conserver des critères éliminatoires séparés pour la sûreté.

21 — Décision mission

Utiliser le score pour rendre les arbitrages visibles, puis conserver des critères éliminatoires séparés pour la sûreté.

Les poids attribués aux critères changent la décision; un score n'est utile que si les hypothèses sont publiées.

Cas de site — multi-critères

Comparez deux sites: A possède une ressource d'eau plus proche mais un terrain plus difficile; B demande 20 km supplémentaires vers la ressource mais offre une zone d'atterrissage et des routes plus simples. Une matrice doit traduire chaque avantage en conséquences mesurables: masse de transport, temps EVA, énergie, fréquence de panne et accès de secours, plutôt qu'en adjectifs comme « meilleur » ou « prometteur ».

2. Pré-déployer avant l'équipage

Envoyer énergie, communications, stocks et éventuellement production locale avant les humains transforme du temps en information. Des équipements peuvent accumuler des heures de fonctionnement et révéler des pannes avant l'engagement du crew.

Un cargo pré-déployé peut lui-même échouer, atterrir loin ou vieillir. Une campagne robuste identifie donc ce qui doit être présent avant départ humain, ce qui doit être doublé et quelles combinaisons d'échecs annulent la mission.

Bilan quantifié

Pré-déployer réduit le risque humain seulement si les systèmes peuvent être testés à distance dans des états représentatifs. Une cargaison posée mais non raccordée, non calibrée ou impossible à réparer ne constitue pas une capacité disponible. Les campagnes cargo doivent donc inclure séquence d'activation, pièces de secours et critères d'acceptation.

Capacité réellement prête

$$\text{capacité_prête} = \text{livraison} \times \text{activation} \times \text{validation}$$

1 — Question concrète

Dans la relation «capacité_prête = livraison × activation × validation», quel résultat multiplicatif correspond à capacité_prête?

2 — Intuition sans symboles

Une capacité livrée n'est pas encore disponible : elle doit être activée puis validée avant d'être créditée pour la mission.

3 — Grandeurs

capacité_prête : capacité réellement utilisable ; livraison : capacité physiquement livrée ; activation : fraction mise en service ; validation : fraction activée ayant passé les critères d'acceptation.

4 — Formule

$$\text{capacité_prête} = \text{livraison} \times \text{activation} \times \text{validation}$$

5 — Lecture

Version parlée: «capacité indice prête égale livraison multiplié par activation multiplié par validation».

6 — Symboles et sens	capacité_prête : capacité réellement utilisable ; livraison : capacité physiquement livrée ; activation : fraction mise en service ; validation : fraction activée ayant passé les critères d'acceptation.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	capacité_prête et livraison dans la même unité de capacité ou de débit (par exemple kW, kg/h, L/h ou unités/h selon le système); activation et validation sans dimension. Le produit conserve donc l'unité de livraison.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	On part de la capacité livrée puis on applique deux fractions successives: la part activée et, parmi elle, la part validée. Les coefficients réduisent ou conservent la capacité; ils ne créent pas d'unité supplémentaire.
11 — Hypothèses	Le produit suppose que les coefficients et facteurs de livraison $\times$ activation $\times$ validation restent définis sur la même frontière. Une modification de périmètre impose de reconstruire le modèle.
12 — Contrôle d'unités	capacité_prête et livraison dans la même unité de capacité ou de débit (par exemple kW, kg/h, L/h ou unités/h selon le système); activation et validation sans dimension. Le produit conserve donc l'unité de livraison. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : 100 unités livrées, 90 % activées et 95 % validées donnent $\text{capacité_prête} = 100 \times 0,90 \times 0,95 = 85,5$ unités.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	On part de la capacité livrée puis on applique deux fractions successives: la part activée et, parmi elle, la part validée. Les coefficients réduisent ou conservent la capacité; ils ne créent pas d'unité supplémentaire.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: si activation et validation sont non nulles, $\text{capacité_prête}/(\text{activation} \times \text{validation})$ doit redonner la capacité livrée. Avec $\text{activation} = \text{validation} = 1$, capacité_prête doit éгалer livraison.
16 — Estimation mentale	Additionner les exposants en notation scientifique et multiplier grossièrement les mantisses de livraison $\times$ activation $\times$ validation; on obtient une estimation indépendante de capacité_prête.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Bilan quantifié», la relation «capacité_prête = livraison $\times$ activation $\times$ validation» n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Pour mesurer l'effet d'une entrée, la modifier de $\pm 10\%$ et laisser les autres facteurs de livraison $\times$ activation $\times$ validation fixes; capacité_prête doit suivre cette variation dans le même sens.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez de 10 % la capacité livrée, de 100 à 110 unités, sans changer activation ni validation. Recalculez la capacité prête. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. $\text{capacité_prête} = 110 \times 0,90 \times 0,95 = 94,05$ unités. Le produit des fractions reste 0,855 ; +10 % de livraison donne donc +10 % de capacité réellement prête, de 85,5 à 94,05 unités.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Capacité réellement prête» en changeant au moins deux données de $\text{capacité_prête} = \text{livraison} \times \text{activation} \times \text{validation}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\text{capacité_prête} = \text{livraison} \times \text{activation} \times \text{validation}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Interdire toute croissance d'équipage fondée sur une capacité non encore validée.

21 — Décision mission

Interdire toute croissance d'équipage fondée sur une capacité non encore validée.

Multiplier les vols ne multiplie pas automatiquement la si tous partagent un défaut de conception commun.

Cas cargo — disponibilité réelle

Une usine d'eau est pré-déployée en deux modules. Les deux atterrissent, mais un capteur de d'eau ne répond pas et aucun étalon de secours n'est disponible. La masse est sur Mars, pourtant la capacité « eau qualifiée » n'est pas démontrée. La recette à distance doit donc tester la fonction finale, pas seulement la présence électrique des équipements.

3. Énergie: l'infrastructure sous toutes les autres

Pomper, chauffer, comprimer, éclairer, recycler, fabriquer et communiquer demandent de la Le budget doit distinguer charge moyenne, pointe, stockage, et fonctions critiques. Une puissance installée n'est pas une puissance disponible pendant une panne.

La la NASA décrit encore en mars 2026 un Mars Architecture Trade Space relativement ouvert. Certaines décisions réduisent l'espace des options, mais les architectures de transport et de surface restent évolutives. Une étude martienne doit donc conserver le statut des technologies plutôt que traiter un concept comme une capacité acquise.



Choisir un site n'est que le début: une implantation permanente doit connecter transport, habitat, personnes, industrie et gouvernance.

L'énergie relie chaque fonction à une contrainte temporelle. Une usine peut consommer beaucoup mais accepter une interruption; un ECLSS peut consommer moins mais exiger une continuité presque immédiate. Il faut donc classer les charges par criticité et définir redémarrage et black-start.

Réserve d'énergie critique

$$E_{\text{réserve}} = P_{\text{critique}} \times t_{\text{sans_génération}}$$

1 — Question concrète	Dans «Mode dégradé», quelles étapes faut-il suivre pour exploiter sans saut la chaîne « $E = \int P \, dt$; réserve = charge_critique × temps_sans_génération»?
2 — Intuition sans symboles	Une charge critique doit disposer d'assez d'énergie stockée pour traverser toute la période où aucune génération fiable n'est garantie.
3 — Grandeurs	$E_{\text{réserve}}$: énergie minimale à réserver ; P_{critique} : puissance des fonctions prioritaires ; $t_{\text{sans_génération}}$: durée pendant laquelle elles doivent fonctionner sans production principale.
4 — Formule	$E_{\text{réserve}} = P_{\text{critique}} \times t_{\text{sans_génération}}$

5 — Lecture	Version parlée: «E égale intégrale de P dt; réserve égale charge indice critique multiplié par temps indice sans indice génération».
6 — Symboles et sens	E_réserve : énergie minimale à réserver ; P_critique : puissance des fonctions prioritaires ; t_sans_génération : durée pendant laquelle elles doivent fonctionner sans production principale.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	E et réserve en J, Wh ou kWh; P et charge_critique en W ou kW; t et temps_sans_génération en unités de temps cohérentes.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. L'origine signalée dans cette section est: les mesures d'équipage, stocks et contraintes opérationnelles. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	L'intégrale $\int P \, dt$ additionne l'énergie consommée instant après instant lorsque la puissance varie. La relation réserve = charge_critique $\times$ temps_sans_génération traite séparément le besoin de secours à puissance critique supposée constante.
11 — Hypothèses	Les unités et frontières doivent rester compatibles d'un maillon à l'autre; la défaillance d'une sous-hypothèse invalide la conclusion globale.
12 — Contrôle d'unités	E et réserve en J, Wh ou kWh; P et charge_critique en W ou kW; t et temps_sans_génération en unités de temps cohérentes. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : une charge critique P_critique = 5 kW à protéger pendant t_sans_génération = 12 h demande E_réserve = $5 \times 12 = 60$ kWh avant pertes et marge.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	L'intégrale $\int P \, dt$ additionne l'énergie consommée instant après instant lorsque la puissance varie. La relation réserve = charge_critique $\times$ temps_sans_génération traite séparément le besoin de secours à puissance critique supposée constante.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Verification croisée: recalculer au moins une étape par une forme équivalente ou une opération inverse et comparer les valeurs intermédiaires.
16 — Estimation mentale	Un ordre de grandeur est vérifié après chaque transformation, ce qui évite qu'une erreur précoce soit masquée par les calculs suivants.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Mode dégradé», la relation «E = $\int P \, dt$; réserve = charge_critique $\times$ temps_sans_génération» n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Une perturbation des données initiales est suivie tout au long des maillons afin d'identifier l'étape la plus sensible.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez de 10 % la durée sans génération, de 12 à 13,2 h, en conservant 5 kW. Recalculez la réserve minimale. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. $E_{\text{réserve}} = 5 \times 13,2 = 66 \text{ kWh}$. La durée intervient linéairement : +10 % de durée impose +10 % d'énergie minimale, soit +6 kWh par rapport aux 60 kWh initiaux, avant pertes et marge.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Réserve d'énergie critique» en changeant au moins deux données de $E_{\text{réserve}} = P_{\text{critique}} \times t_{\text{sans_génération}}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $E_{\text{réserve}} = P_{\text{critique}} \times t_{\text{sans_génération}}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Dimensionner la réserve sur la charge critique réelle et un scénario de génération perdue crédible.

21 — Décision mission

Dimensionner la réserve sur la charge critique réelle et un scénario de génération perdue crédible.

Le stockage doit aussi supporter la puissance de pointe et le courant de démarrage, pas seulement l'énergie totale.

Cas énergétique — black-start

Après une panne totale, des charges critiques totalisent 35 kW, mais le pic de démarrage des pompes et compresseurs atteint 60 kW pendant 20 s. Une batterie pouvant fournir 100 kWh mais seulement 45 kW de puissance ne peut pas relancer le système sans séquence de démarrage ou autre source. Énergie disponible et puissance de black-start sont deux contraintes différentes.

4. Eau, air et nourriture: passer du stock au flux

Au début, les stocks importés dominant. Avec la durée et la population, les deviennent structurants. Dix tonnes paraissent énormes, mais une perte nette de 400 kg/j les consomme en 25 jours.

Recycler réduit les importations mais ajoute filtres, capteurs, énergie et maintenance. Les cultures peuvent réduire certains apports alimentaires mais exigent eau, nutriments, lumière et contrôle sanitaire. L'autonomie est un réseau de flux couplés.

Lecture de sûreté

Eau, air et nourriture passent du stock au flux lorsque la population et la durée augmentent. Le bon indicateur devient alors le déficit quotidien après et production locale. Un stock massif reste utile pour les pannes, mais il ne peut cacher indéfiniment une boucle structurellement déficitaire.

Variation d'un stock

$$\Delta \text{stock} = \text{production} + \text{import} - \text{consommation} - \text{pertes}$$

1 — Question concrète	Que vaut variation_stock après le retrait défini par « $\text{variation_stock} = \text{production} + \text{import} - \text{consommation} - \text{pertes}$ » au passage «Lecture de sûreté»?
2 — Intuition sans symboles	Le stock final dépend de tous les flux qui entrent et sortent de la même frontière de système pendant la même période.
3 — Grandeurs	Δstock : variation nette sur la période ; production : quantité produite ; import : quantité reçue ; consommation : quantité utilisée ; pertes : quantité devenue indisponible. Tous les termes portent sur la même période.
4 — Formule	$\Delta\text{stock} = \text{production} + \text{import} - \text{consommation} - \text{pertes}$
5 — Lecture	Version parlée: «variation indice stock égale production plus import moins consommation moins pertes».
6 — Symboles et sens	Δstock : variation nette sur la période ; production : quantité produite ; import : quantité reçue ; consommation : quantité utilisée ; pertes : quantité devenue indisponible. Tous les termes portent sur la même période.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	variation_stock , production, import, consommation et pertes dans la même unité de quantité sur la même période: kg, L, doses, pièces, etc. Si une entrée est donnée comme débit (kg/j, L/j...), elle doit d'abord être intégrée ou multipliée par la durée du bilan.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Un bilan de stock additionne les entrées cumulées et soustrait les sorties cumulées sur une même frontière temporelle. Mélanger une quantité et un débit rendrait l'addition dimensionnellement impossible.
11 — Hypothèses	Les entrées doivent partager unité, date ou fenêtre temporelle et frontière de système. Un mélange de périmètres rendrait l'écart trompeur.
12 — Contrôle d'unités	variation_stock , production, import, consommation et pertes dans la même unité de quantité sur la même période: kg, L, doses, pièces, etc. Si une entrée est donnée comme débit (kg/j, L/j...), elle doit d'abord être intégrée ou multipliée par la durée du bilan. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : production 10 unités + import 2 – consommation 8 – pertes 2 = $\Delta\text{stock} = +2$ unités sur la période.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Un bilan de stock additionne les entrées cumulées et soustrait les sorties cumulées sur une même frontière temporelle. Mélanger une quantité et un débit rendrait l'addition dimensionnellement impossible.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle de fermeture: $\text{variation_stock} + \text{consommation} + \text{pertes} - \text{production} - \text{import}$ doit valoir zéro. Équivalent: $\text{stock_fin} = \text{stock_début} + \text{variation_stock}$.
16 — Estimation mentale	Avant le calcul fin, arrondir les deux entrées et estimer leur séparation; le résultat exact doit rester cohérent avec cette différence grossière.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Lecture de sûreté», la relation « $\text{variation_stock} = \text{production} + \text{import} - \text{consommation} - \text{pertes}$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.

19 — Sensibilité

Faire varier séparément les deux entrées de $\pm 10\%$ montre que leur influence sur `variation_stock` est opposée.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Augmentez la consommation de 10% , de 8 à 8,8 unités, sans changer les autres termes. Recalculez Δstock .

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. $\Delta\text{stock} = 10 + 2 - 8,8 - 2 = +1,2$ unité. Le stock augmente encore, mais la marge nette passe de +2 à +1,2 : 0,8 unité de marge a été consommée.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Variation d'un stock» en changeant au moins deux données de $\Delta\text{stock} = \text{production} + \text{import} - \text{consommation} - \text{pertes}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\Delta\text{stock} = \text{production} + \text{import} - \text{consommation} - \text{pertes}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Rendre visible toute dérive négative avant qu'elle ne devienne une rupture de stock.

21 — Décision mission

Rendre visible toute dérive négative avant qu'elle ne devienne une rupture de stock.

Une boucle stable en moyenne peut connaître des pics de demande; les tampons dimensionnent le décalage temporel, pas seulement le bilan annuel.

Cas flux — tampon

Une usine d'oxygène produit 45 kg/j en moyenne tandis que la demande moyenne est 40 kg/j. Pendant cinq jours de maintenance, la production tombe à zéro. Le surplus nominal de 5 kg/j ne suffit pas à décrire la sûreté: il faut au moins 200 kg pour couvrir la maintenance, plus marge, avant que le surplus quotidien puisse reconstituer le stock.

5. Construire localement: raisonner en tonnes

Scénario pédagogique: 2 m de densité supposée 1 500 kg/m³, sur 100 m². La masse à déplacer vaut $2 \times 1\,500 \times 100 = 300\,000$ kg, soit 300 t.

Masse de blindage

$$M = e \rho A$$

1 — Question concrète	Dans la relation « $M = \text{épaisseur} \times \text{densité} \times \text{surface}$ », quel résultat multiplicatif correspond à M ?
2 — Intuition sans symboles	L'épaisseur appliquée sur une surface donne un volume de matériau, puis la densité transforme ce volume en masse logistique.
3 — Grandeurs	M : masse de blindage ; e : épaisseur ; ρ : masse volumique du matériau ; A : aire couverte.
4 — Formule	$M = e \rho A$
5 — Lecture	Version parlée: « M égale épaisseur multiplié par densité multiplié par surface».
6 — Symboles et sens	M : masse de blindage ; e : épaisseur ; ρ : masse volumique du matériau ; A : aire couverte.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Pour la vie en mission, côté construire localement: masse de la couche $\rightarrow$ kg; épaisseur $\rightarrow$ m; masse volumique $\rightarrow$ kg/m ³ ; surface $\rightarrow$ m ² .
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	surface $\times$ épaisseur donne un volume; multiplier ce volume par la masse volumique donne une masse. Le produit est donc dimensionnellement m ² $\times$ m $\times$ kg/m ³ = kg.
11 — Hypothèses	Le produit suppose que les coefficients et facteurs de épaisseur $\times$ densité $\times$ surface restent définis sur la même frontière. Une modification de périmètre impose de reconstruire le modèle.
12 — Contrôle d'unités	Pour la vie en mission, côté construire localement: masse de la couche $\rightarrow$ kg; épaisseur $\rightarrow$ m; masse volumique $\rightarrow$ kg/m ³ ; surface $\rightarrow$ m ² . Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : $e = 2$ m, $\rho = 1\,500$ kg/m ³ et $A = 100$ m ² donnent $M = 2 \times 1\,500 \times 100 = 300\,000$ kg, soit 300 t.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	surface $\times$ épaisseur donne un volume; multiplier ce volume par la masse volumique donne une masse. Le produit est donc dimensionnellement m ² $\times$ m $\times$ kg/m ³ = kg.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: $M/(\text{surface} \times \text{épaisseur})$ doit redonner la masse volumique. On peut aussi vérifier que surface $\times$ épaisseur reconstruit bien un volume.
16 — Estimation mentale	Additionner les exposants en notation scientifique et multiplier grossièrement les mantisses de épaisseur $\times$ densité $\times$ surface; on obtient une estimation indépendante de M .
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «5. Construire localement: raisonner en tonnes», la relation « $M = \text{épaisseur} \times \text{densité} \times \text{surface}$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.

19 — Sensibilité	Pour mesurer l'effet d'une entrée, la modifier de $\pm 10\%$ et laisser les autres facteurs de épaisseur $\times$ densité $\times$ surface fixes; M doit suivre cette variation dans le même sens.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez l'épaisseur de 10%, de 2,0 à 2,2 m, en conservant densité et aire. Recalculez la masse. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $M = 2,2 \times 1\,500 \times 100 = 330\,000\text{ kg} = 330\text{ t}$. Une hausse de 10% d'épaisseur entraîne $+10\%$ de masse à aire et densité constantes : $+30\text{ t}$ à déplacer. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Masse de blindage» en changeant au moins deux données de $M = e \rho A$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $M = e \rho A$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Comparer masse déplacée, énergie, temps machine et bénéfice radiologique avant de retenir une architecture de blindage.
21 — Décision mission	Comparer masse déplacée, énergie, temps machine et bénéfice radiologique avant de retenir une architecture de blindage.

À 250 kg/h de moyen, il faut $1\,200\text{ h} = 50$ jours continus idéaux. Recharge, maintenance, déplacement, météo et contrôle qualité prolongent ce temps. "Utiliser le régolithe" devient ainsi une tâche industrielle mesurable.

Étude chantier — 300 tonnes de régolithe ne sont pas un dessin

Prenons une protection pédagogique de 2 m de matériau, une densité apparente supposée de $1\,500\text{ kg/m}^3$ et 100 m^2 de surface couverte. La masse déplacée vaut $2 \times 1\,500 \times 100 = 300\,000\text{ kg}$, soit 300 t . Une chaîne qui traite effectivement 250 kg/h a besoin de $1\,200\text{ h}$ de fonctionnement productif, soit 50 jours continus idéaux.

Le temps calendrier réel est plus long. À 70% de disponibilité, $1\,200\text{ h}$ productives demandent environ $1\,714\text{ h}$ calendaires, soit $71,4$ jours. Si l'engin consomme en moyenne 15 kW lorsqu'il travaille, l'énergie productive vaut $18\,000\text{ kWh}$ avant recharge et pertes. L'exercice montre pourquoi construction locale, puissance, maintenance et logistique sont une seule architecture. Le régolithe est local; le travail nécessaire pour le déplacer ne l'est pas gratuitement.

Temps productif et temps calendrier

$$t_{\text{productif}} = M / \text{débit} ; t_{\text{calendrier}} = t_{\text{productif}} / \text{disponibilité}$$

1 — Question concrète	La masse à déplacer est 300 t . Avec un débit productif connu, comment calculer le temps productif nécessaire?
2 — Intuition sans symboles	Le temps de travail utile vient de la masse à traiter et du débit réel ; l'indisponibilité allonge ensuite le calendrier total.
3 — Grandeurs	$t_{\text{productif}}$: heures de fonctionnement réellement productif ; M : masse totale à traiter ; débit : masse traitée par heure productive ; $t_{\text{calendrier}}$: temps écoulé réel ;

	disponibilité : fraction de ce temps pendant laquelle l'équipement peut produire.
4 — Formule	$t_{\text{productif}} = M / \text{débit}$; $t_{\text{calendrier}} = t_{\text{productif}} / \text{disponibilité}$
5 — Lecture	Lecture: «M vaut trois cents tonnes; le temps productif vaut M divisé par le débit productif».
6 — Symboles et sens	$t_{\text{productif}}$: heures de fonctionnement réellement productif ; M : masse totale à traiter ; débit : masse traitée par heure productive ; $t_{\text{calendrier}}$: temps écoulé réel ; disponibilité : fraction de ce temps pendant laquelle l'équipement peut produire.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	M en kg ou t; débit_productif en kg/h ou t/h; $t_{\text{productif}}$ dans l'unité de temps correspondante. Dans l'exemple, $300\,000 \text{ kg} \div 250 \text{ kg/h} = 1\,200 \text{ h}$.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. L'origine signalée dans cette section est: les mesures d'équipage, stocks et contraintes opérationnelles. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	La donnée M=300 t fixe la quantité de travail. Le temps productif n'est pas une seconde donnée sans lien: il se calcule par quantité ÷ débit, soit $t_{\text{productif}} = M / \text{débit}_{\text{productif}}$.
11 — Hypothèses	Les unités et frontières doivent rester compatibles d'un maillon à l'autre; la défaillance d'une sous-hypothèse invalide la conclusion globale.
12 — Contrôle d'unités	M en kg ou t; débit_productif en kg/h ou t/h; $t_{\text{productif}}$ dans l'unité de temps correspondante. Dans l'exemple, $300\,000 \text{ kg} \div 250 \text{ kg/h} = 1\,200 \text{ h}$. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : M = 300 000 kg et débit = 250 kg/h donnent $t_{\text{productif}} = 1\,200 \text{ h}$. Avec une disponibilité de 0,70, $t_{\text{calendrier}} = 1\,200 / 0,70 \approx 1\,714 \text{ h}$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	La donnée M=300 t fixe la quantité de travail. Le temps productif n'est pas une seconde donnée sans lien: il se calcule par quantité ÷ débit, soit $t_{\text{productif}} = M / \text{débit}_{\text{productif}}$.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: $t_{\text{productif}} \times \text{débit}_{\text{productif}}$ doit redonner M. Avec $1\,200 \text{ h} \times 250 \text{ kg/h} = 300\,000 \text{ kg} = 300 \text{ t}$.
16 — Estimation mentale	Un ordre de grandeur est vérifié après chaque transformation, ce qui évite qu'une erreur précoce soit masquée par les calculs suivants.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «5. Construire localement: raisonner en tonnes», la relation «M = 300 t; $t_{\text{productif}}$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Une perturbation des données initiales est suivie tout au long des maillons afin d'identifier l'étape la plus sensible.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez le débit de 10 %, de 250 à 275 kg/h, avec M = 300 000 kg et disponibilité = 0,70. Recalculez les deux temps. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. $t_{\text{productif}} = 300\,000/275 = 1\,090,9$ h. $t_{\text{calendrier}} = 1\,090,9/0,70 = 1\,558,4$ h. Le gain calendrier est $1\,714,3 - 1\,558,4 \approx 155,9$ h, soit environ 6,5 jours.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Temps productif et temps calendrier» en changeant au moins deux données de $t_{\text{productif}} = M / \text{débit}$; $t_{\text{calendrier}} = t_{\text{productif}} / \text{disponibilité}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $t_{\text{productif}} = M / \text{débit}$; $t_{\text{calendrier}} = t_{\text{productif}} / \text{disponibilité}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Planifier avec le temps calendrier et non le seul temps de fonctionnement nominal.

21 — Décision mission

Planifier avec le temps calendrier et non le seul temps de fonctionnement nominal.

Intuition système

La construction locale doit être exprimée en tonnes, heures machine et qualité vérifiée. Une épaisseur de protection, une surface ou un volume deviennent vite des centaines de tonnes, ce qui transforme un problème de matériau en problème de terrassement, transport, énergie et maintenance.

Masse géométrique de matériau

$$M = A \, e \, \rho$$

1 — Question concrète	Dans la relation « $M = A \, e \, \rho$ », quel résultat multiplicatif correspond à M?
2 — Intuition sans symboles	Une surface, une épaisseur et une densité suffisent à transformer une géométrie de couche en masse de matériau.
3 — Grandeurs	M : masse de matériau ; A : aire couverte ; e : épaisseur moyenne ; ρ : masse volumique.
4 — Formule	$M = A \, e \, \rho$
5 — Lecture	Version parlée: «M égale A e rho».
6 — Symboles et sens	M : masse de matériau ; A : aire couverte ; e : épaisseur moyenne ; ρ : masse volumique.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	M en kg; A en m ² ; e en m; ρ en kg/m ³ . Le produit m ² ×m×kg/m ³ se simplifie en kg.

9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	$A \times e$ donne le volume de la couche; multiplier ce volume par ρ donne sa masse.
11 — Hypothèses	Le produit suppose que les coefficients et facteurs de A et ρ restent définis sur la même frontière. Une modification de périmètre impose de reconstruire le modèle.
12 — Contrôle d'unités	M en kg; A en m^2 ; e en m; ρ en kg/m^3 . Le produit $m^2 \times m \times kg/m^3$ se simplifie en kg. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : $A = 120 \text{ m}^2$, $e = 0,50 \text{ m}$ et $\rho = 2\,000 \text{ kg/m}^3$ donnent $M = 120 \times 0,50 \times 2\,000 = 120\,000 \text{ kg}$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	$A \times e$ donne le volume de la couche; multiplier ce volume par ρ donne sa masse.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: $M/(A \times e)$ doit redonner ρ ; $A \times e$ doit avoir l'unité d'un volume.
16 — Estimation mentale	Additionner les exposants en notation scientifique et multiplier grossièrement les mantisses de A et ρ ; on obtient une estimation indépendante de M .
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Intuition système», la relation « $M = A \times e \times \rho$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Pour mesurer l'effet d'une entrée, la modifier de $\pm 10\%$ et laisser les autres facteurs de A et ρ fixes; M doit suivre cette variation dans le même sens.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez l'aire de 10%, de 120 à 132 m^2, sans changer épaisseur ni densité. Recalculez M. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $M = 132 \times 0,50 \times 2\,000 = 132\,000 \text{ kg}$. L'aire intervient linéairement : $+10\%$ d'aire produit $+10\%$ de masse, soit $+12\,000 \text{ kg}$. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Masse géométrique de matériau» en changeant au moins deux données de $M = A \times e \times \rho$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $M = A \times e \times \rho$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Vérifier l'ordre de grandeur de la masse avant de transformer un dessin de protection en plan logistique.

21 — Décision mission

Vérifier l'ordre de grandeur de la masse avant de transformer un dessin de protection en plan logistique.

Le matériau brut n'est pas toujours utilisable directement; humidité, granulométrie, porosité et procédé peuvent changer la masse réellement qualifiée.

Cas construction — cadence

Un blindage demande 1 600 t de matériau. Deux engins déplacent chacun 12 t/h mais ne sont disponibles que 60 % de 20 h/j. Capacité quotidienne $= 2 \times 12 \times 20 \times 0,60 = 288$ t/j, soit environ 5,6 jours idéaux. Ajoutez préparation du sol, distances, pannes, contrôle d'épaisseur et sécurité avant de transformer ce minimum en planning.

6. Mobilité: la distance coûte plus que du carburant

Une ressource à 30 km implique routes ou itinéraires, véhicules, énergie, navigation, pièces, secours et circulation dans les deux sens. Le rayon catalogue d'un rover ne suffit pas.

La bonne question est: quelle distance peut être parcourue, puis une fonction perdue, tout en conservant un retour ou une attente sûre? La logistique s'évalue en mission complète avec marge de panne.

AUTONOMIE INDUSTRIELLE SUR MARS

LES 5 MARCHES VERS LA CAPACITÉ LOCALE



PRINCIPE CENTRAL

Une colonie durable ne se contente pas d'utiliser des machines : elle apprend à les comprendre, les réparer et en reconstruire une partie.



SANS BASE INDUSTRIELLE LOCALE, L'AUTONOMIE RESTE LIMITÉE.

DELTA - SIERRA - MARS

L'autonomie industrielle se construit par degrés: stocker, réparer, fabriquer, contrôler la qualité puis transmettre les savoir-faire.

Bilan quantifié

La mobilité doit être dimensionnée avec un mode de retour dégradé. Le rayon nominal d'un rover n'est pas le rayon sûr si une batterie, une roue, un capteur ou une liaison est perdue. L'architecture peut utiliser véhicules jumelés, caches, robots de secours ou limites de distance selon le scénario.

Rayon sûr de mobilité

$$r_{\text{sûr}} \leq (v_{\text{dégradée}} \times t_{\text{dégradé}}) / 2 - \text{marge_distance}$$

1 — Question concrète

Le rayon de mission reste-t-il inférieur à la distance qu'un véhicule peut parcourir en mode dégradé pour un aller-retour, après retrait de la marge de sécurité?

2 — Intuition sans symboles

Une mission extérieure doit pouvoir revenir en mode dégradé, donc l'autonomie totale est partagée entre aller et retour avant de retirer une marge.

3 — Grandeurs

$r_{\text{sûr}}$: rayon opérationnel maximal ; $v_{\text{dégradée}}$: vitesse soutenable en panne ; $t_{\text{dégradé}}$: durée disponible dans ce mode ; 2 : partage aller-retour ; marge_distance : distance réservée à la sûreté.

4 — Formule	$r_{\text{sûr}} \leq (v_{\text{dégradée}} \times t_{\text{dégradé}})/2 - \text{marge_distance}$
5 — Lecture	Version parlée: «rayon indice sûr inférieur ou égal à autonomie indice dégradée divisé par 2 avec marge».
6 — Symboles et sens	$r_{\text{sûr}}$: rayon opérationnel maximal ; $v_{\text{dégradée}}$: vitesse soutenable en panne ; $t_{\text{dégradé}}$: durée disponible dans ce mode ; 2 : partage aller-retour ; marge_distance : distance réservée à la sûreté.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	rayon_sûr et marge_distance en m ou km; $v_{\text{dégradée}}$ en m/s ou km/h; autonomie_dégradée en s ou h de façon cohérente. Le produit vitesse $\times$ temps est une distance; la division par 2 réserve l'aller et le retour.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. L'origine signalée dans cette section est: les mesures d'équipage, stocks et contraintes opérationnelles. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Le symbole $\leq$ impose une frontière de sécurité: le rayon autorisé ne peut pas dépasser la moitié de la distance parcourable en mode dégradé, diminuée de la marge de distance réservée.
11 — Hypothèses	Le modèle suppose une vitesse moyenne représentative et une autonomie exprimée en durée. Terrain, arrêts, pente, énergie de chauffage, détours et secours peuvent imposer une marge plus grande.
12 — Contrôle d'unités	rayon_sûr et marge_distance en m ou km; $v_{\text{dégradée}}$ en m/s ou km/h; autonomie_dégradée en s ou h de façon cohérente. Le produit vitesse $\times$ temps est une distance; la division par 2 réserve l'aller et le retour. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : $v_{\text{dégradée}} = 5 \text{ km/h}$, $t_{\text{dégradé}} = 6 \text{ h}$ et $\text{marge_distance} = 5 \text{ km}$ donnent $r_{\text{sûr}} \leq (5 \times 6)/2 - 5 = 10 \text{ km}$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Le symbole $\leq$ impose une frontière de sécurité: le rayon autorisé ne peut pas dépasser la moitié de la distance parcourable en mode dégradé, diminuée de la marge de distance réservée.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle de fermeture: $2 \times (\text{rayon_sûr} + \text{marge_distance}) / v_{\text{dégradée}}$ doit rester inférieur ou égal à autonomie_dégradée. Ce contrôle reconstruit le temps de mission à partir du rayon autorisé.
16 — Estimation mentale	Avant le calcul fin, déterminer quel membre devrait dominer. Si les valeurs sont proches, la précision des entrées devient déterminante.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Bilan quantifié», la relation «rayon_sûr $\leq$ autonomie_dégradée / 2 avec marge» n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	À marge fixe, +10 % de vitesse ou de durée augmente de 10 % la distance aller-retour disponible; le rayon utile varie ensuite après soustraction de la marge_distance.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Augmentez la vitesse dégradée de 10 %, de 5 à 5,5 km/h, en conservant 6 h et 5 km de marge. Recalculez le rayon sûr.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. $r_{\text{sûr}} \leq (5,5 \times 6) / 2 - 5 = 33 / 2 - 5 = 16,5 - 5 = 11,5$ km. Le gain de 0,5 km/h augmente ici le rayon de 1,5 km, après conservation de la même marge distance.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Rayon sûr de mobilité» en changeant au moins deux données de $r_{\text{sûr}} \leq (v_{\text{dégradée}} \times t_{\text{dégradé}}) / 2 - \text{marge_distance}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $r_{\text{sûr}} \leq (v_{\text{dégradée}} \times t_{\text{dégradé}}) / 2 - \text{marge_distance}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Définir le rayon opérationnel sur le mode dégradé et non sur l'autonomie nominale du véhicule.

21 — Décision mission

Définir le rayon opérationnel sur le mode dégradé et non sur l'autonomie nominale du véhicule.

Le facteur 1/2 n'est qu'une intuition aller-retour; terrain, détour et secours peuvent imposer une marge bien plus grande.

Cas mobilité — secours

Un rover a 200 km d'autonomie énergétique nominale, mais seulement 120 km avec une batterie dégradée et chauffage élevé. Une cible à 50 km exige 100 km aller-retour avant détour. Avec 20 % de détour, le trajet devient 120 km: toute la marge disparaît. La limite d'excursion doit être calculée sur l'autonomie dégradée, pas sur le chiffre publicitaire nominal.

7. ISRU: démontrer le procédé puis concevoir l'usine

a démontré la production d'oxygène depuis le CO₂ martien, avec jusqu'à 12 g/h et 122 g au total selon NASA. Une demande hypothétique de 1 t/j nécessite 41,7 kg/h en moyenne, soit plus de 3 400 fois ce débit maximal démontré.

Ce rapport n'est pas un plan à 3 400 copies. Une usine change compresseurs, cellules, thermique, alimentation, stockage, contrôle, maintenance et disponibilité. Le statut correct est: principe démontré sur Mars à petite échelle, industrialisation à concevoir et qualifier.

Étude — du débit démontré au service garanti

MOXIE a démontré sur Mars jusqu'à 12 g/h d'oxygène et 122 g au total. Imaginons une future nominale de 20 kg/h, valeur purement pédagogique. À 90 % de disponibilité sur une année terrestre de 8 760 h, la production serait $20 \times 8 760 \times 0,90 = 157 680$ kg, soit 157,7 t/an. À 70 %, elle tombe à 122,6 t/an. Vingt points de disponibilité valent donc environ 35,0 t/an de production dans ce scénario.

Cette sensibilité explique pourquoi le dimensionnement industriel inclut maintenance, rechanges, durée de vie des cellules, compresseurs, stockage et puissance. Le chiffre nominal ne suffit pas. Une architecture robuste distingue débit instantané, disponibilité, capacité de stockage et demande cumulée. MOXIE fournit une preuve de principe martienne; la disponibilité d'une usine future est encore une variable de conception.

Production annuelle ISRU

$$M_{an} = \text{débit} \times 8\,760\text{ h} \times \text{disponibilité}$$

1 — Question concrète	Dans «7. ISRU: démontrer le procédé puis concevoir l'usine», quelles étapes faut-il suivre pour exploiter sans saut la chaîne «20 kg/h × 8 760 h × 0,90 = 157,7 t/an; à 0,70 = 122,6 t/an»?
2 — Intuition sans symboles	La production annuelle réelle part du débit nominal puis ne crédite que la fraction de l'année réellement productive.
3 — Grandeurs	M_an : production annuelle ; débit : production par heure ; 8 760 h : durée d'une année terrestre non bissextile ; disponibilité : fraction de l'année réellement productive.
4 — Formule	M_an = débit × 8 760 h × disponibilité
5 — Lecture	Version parlée: «20 kg divisé par h multiplié par 8 760 h multiplié par 0,90 égale 157,7 t divisé par an; à 0,70 égale 122,6 t divisé par an».
6 — Symboles et sens	M_an : production annuelle ; débit : production par heure ; 8 760 h : durée d'une année terrestre non bissextile ; disponibilité : fraction de l'année réellement productive.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Pour la vie en mission, côté démontrer procédé: production annuelle corrigée de disponibilité → kg/an ou t/an; durée → s, min ou h.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Une chaîne de calcul n'est valide que si la sortie d'une étape est compatible avec l'entrée de la suivante. On conserve unités, définition et hypothèses entre les deux.
11 — Hypothèses	Les unités et frontières doivent rester compatibles d'un maillon à l'autre; la défaillance d'une sous-hypothèse invalide la conclusion globale.
12 — Contrôle d'unités	Pour la vie en mission, côté démontrer procédé: production annuelle corrigée de disponibilité → kg/an ou t/an; durée → s, min ou h. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : débit = 20 kg/h et disponibilité = 0,90 donnent M_an = 20 × 8 760 × 0,90 = 157 680 kg/an.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Une chaîne de calcul n'est valide que si la sortie d'une étape est compatible avec l'entrée de la suivante. On conserve unités, définition et hypothèses entre les deux.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Verification croisée: recalculer au moins une étape par une forme équivalente ou une opération inverse et comparer les valeurs intermédiaires.
16 — Estimation mentale	Un ordre de grandeur est vérifié après chaque transformation, ce qui évite qu'une erreur précoce soit masquée par les calculs suivants.

17 — Interprétation	Dans ce calcul de «7. ISRU: démontrer le procédé puis concevoir l'usine», la relation « $20 \text{ kg/h} \times 8\,760 \text{ h} \times 0,90 = 157,7 \text{ t/an}$; à $0,70 = 122,6 \text{ t/an}$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Une perturbation des données initiales est suivie tout au long des maillons afin d'identifier l'étape la plus sensible.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez le débit de 10 %, de 20 à 22 kg/h, en conservant une disponibilité de 0,90. Recalculez la production annuelle. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $M_{\text{an}} = 22 \times 8\,760 \times 0,90 = 173\,448 \text{ kg/an}$. Le gain est $173\,448 - 157\,680 = 15\,768 \text{ kg/an}$, exactement +10 % car seul le débit a changé. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Production annuelle ISRU» en changeant au moins deux données de $M_{\text{an}} = \text{débit} \times 8\,760 \text{ h} \times \text{disponibilité}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $M_{\text{an}} = \text{débit} \times 8\,760 \text{ h} \times \text{disponibilité}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Dimensionner réserves et redondance sur la production annuelle dégradée crédible, pas sur la plaque signalétique.
21 — Décision mission	Dimensionner réserves et redondance sur la production annuelle dégradée crédible, pas sur la plaque signalétique.

Mode dégradé

ISRU signifie remplacer une importation par une chaîne locale complète. Extraire une ressource ne suffit pas: il faut capter, purifier, transformer, stocker, mesurer et maintenir. MOXIE démontre une étape de production d'O₂ à partir du CO₂ martien; MARS-C est en 2026 un projet technologique actif, pas une usine opérationnelle.

Production annuelle générique

$$\text{production_annuelle} = \text{débit} \times \text{disponibilité} \times 8\,760 \text{ h}$$

1 — Question concrète

Dans la relation « $\text{production_annuelle} = \text{débit} \times \text{disponibilité} \times 8\,760 \text{ h}$ », quel résultat multiplicatif correspond à $\text{production_annuelle}$?

2 — Intuition sans symboles	Le même budget de disponibilité s'applique à toute machine dont la cadence nominale n'est pas disponible en permanence.
3 — Grandeurs	production_annuelle : production effective par an ; débit : cadence nominale ; disponibilité : fraction productive ; 8 760 h : durée conventionnelle de l'année utilisée dans ce calcul.
4 — Formule	$\text{production_annuelle} = \text{débit} \times \text{disponibilité} \times 8\,760\text{ h}$
5 — Lecture	Version parlée: «production indice annuelle égale débit multiplié par disponibilité multiplié par 8 760 h».
6 — Symboles et sens	production_annuelle : production effective par an ; débit : cadence nominale ; disponibilité : fraction productive ; 8 760 h : durée conventionnelle de l'année utilisée dans ce calcul.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	si débit est en kg/h, production_annuelle est en kg/an après multiplication par 8 760 h/an; disponibilité est sans dimension. Même logique pour L/h, pièces/h, etc.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. L'origine signalée dans cette section est: les mesures d'équipage, stocks et contraintes opérationnelles. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Le débit indique une quantité par heure. Multiplier par 8 760 h/an convertit ce débit en production théorique annuelle; la disponibilité applique ensuite la fraction du temps réellement productif.
11 — Hypothèses	Le produit suppose que les coefficients et facteurs de $\text{débit} \times \text{disponibilité} \times 8\,760\text{ h}$ restent définis sur la même frontière. Une modification de périmètre impose de reconstruire le modèle.
12 — Contrôle d'unités	si débit est en kg/h, production_annuelle est en kg/an après multiplication par 8 760 h/an; disponibilité est sans dimension. Même logique pour L/h, pièces/h, etc. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : débit = 5 kg/h et disponibilité = 0,80 donnent $\text{production_annuelle} = 5 \times 0,80 \times 8\,760 = 35\,040\text{ kg/an}$.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Le débit indique une quantité par heure. Multiplier par 8 760 h/an convertit ce débit en production théorique annuelle; la disponibilité applique ensuite la fraction du temps réellement productif.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: $\text{production_annuelle}/(\text{disponibilité} \times 8\,760\text{ h/an})$ doit redonner le débit nominal. À disponibilité 1, la production annuelle doit être exactement le débit multiplié par la durée annuelle.
16 — Estimation mentale	Additionner les exposants en notation scientifique et multiplier grossièrement les mantisses de $\text{débit} \times \text{disponibilité} \times 8\,760\text{ h}$; on obtient une estimation indépendante de production_annuelle.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Mode dégradé», la relation « $\text{production_annuelle} = \text{débit} \times \text{disponibilité} \times 8\,760\text{ h}$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.

pas

19 — Sensibilité

Pour mesurer l'effet d'une entrée, la modifier de $\pm 10\%$ et laisser les autres facteurs de débit $\times$ disponibilité $\times 8\,760$ h fixes; production_annuelle doit suivre cette variation dans le même sens.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Augmentez la disponibilité de 10% relativement, de $0,80$ à $0,88$, avec le même débit. Recalculez la production.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Correction détaillée. production_annuelle = $5 \times 0,88 \times 8\,760 = 38\,544$ kg/an. Le gain est $3\,504$ kg/an, soit $+10\%$ par rapport aux $35\,040$ kg/an initiaux.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Production annuelle générique» en changeant au moins deux données de production_annuelle = débit $\times$ disponibilité $\times 8\,760$ h. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans production_annuelle = débit $\times$ disponibilité $\times 8\,760$ h, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Comparer besoin annuel et production annuelle avec une marge explicite avant d'autoriser une dépendance locale.

21 — Décision mission

Comparer besoin annuel et production annuelle avec une marge explicite avant d'autoriser une dépendance locale.

Un changement d'échelle doit être démontré sur puissance, durée de vie, maintenance et pas seulement sur débit nominal.

Cas ISRU — disponibilité

Une usine nominale de $2\text{ kg O}_2/\text{h}$ fonctionnant 70% de l'année produit $2 \times 8\,760 \times 0,70 = 12\,264$ kg/an. Passer à 90% donnerait $15\,768$ kg/an, soit $3\,504$ t de différence. La maintenance et la réparabilité peuvent donc valoir plusieurs tonnes annuelles sans augmenter d'un gramme le débit nominal.

8. Atelier, métrologie et

Une pièce fabriquée n'est pas automatiquement qualifiée pour un service critique. Matière, dimensions, tolérances, état de surface, traitements et défauts doivent être mesurés. Le travail NIST 2026 sur la in situ en métallique relie précisément mesure, qualification et certification.

martien doit donc associer machines, instruments, étalons, données matière et critères d'acceptation. Une bride simple peut être locale alors qu'un roulement, un capteur ou une électronique reste importé.

Étude atelier — capacité machine et qualification

Supposons qu'un atelier possède une machine critique disponible 20 h par jour après maintenance, changements d'outils et contrôles. Trois familles de pièces demandent respectivement 6 h, 8 h et 10 h machine par lot. Une journée ne peut pas produire les trois lots: la demande totale vaut 24 h. Le problème n'est donc pas « posséder une imprimante », mais ordonnancer une ressource rare.

Si une réparation vitale de 7 h arrive, elle doit prendre la priorité ou attendre. Une seconde machine ne double la capacité que si elle dispose aussi des opérateurs, matière, métrologie, énergie et outillage nécessaires. Le workshop NIST 2026 sur la métrologie in situ de fabrication additive métallique rappelle justement que mesurer, qualifier et certifier font partie de la chaîne. Une pièce sortie de machine n'est pas automatiquement une pièce acceptable pour un système vital.

Charge quotidienne de l'atelier

demande = 6 + 8 + 10

1 — Question concrète	Quelle somme demande faut-il obtenir en appliquant «demande = 6+8+10» au contexte «8. Atelier, métrologie et pièces de rechange»?
2 — Intuition sans symboles	Les travaux qui sollicitent la même ressource machine s'additionnent avant d'être comparés à la capacité quotidienne disponible.
3 — Grandeurs	demande : total quotidien d'heures-machine requises ; 6 h, 8 h et 10 h : besoins des trois familles de tâches dans l'exemple. Les trois termes doivent être sur la même journée et la même machine.
4 — Formule	demande = 6 + 8 + 10
5 — Lecture	Version parlée: «demande égale 6+8+10».
6 — Symboles et sens	demande : total quotidien d'heures-machine requises ; 6 h, 8 h et 10 h : besoins des trois familles de tâches dans l'exemple. Les trois termes doivent être sur la même journée et la même machine.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Pour la vie en mission, côté atelier métrologie: demande machine totale → h machine/j.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	La relation assemble des contributions additives: chacune apporte une part du bilan et leur réunion construit demande.
11 — Hypothèses	La validité de la somme impose des contributions compatibles et non redondantes; préciser aussi si certains termes sont conditionnels ou déjà inclus ailleurs.
12 — Contrôle d'unités	Pour la vie en mission, côté atelier métrologie: demande machine totale → h machine/j. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : trois familles demandent 6 h, 8 h et 10 h machine par jour, soit demande = 24 h/j. Face à une capacité utile de 20 h/j, le déficit est 4 h/j.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	La relation assemble des contributions additives: chacune apporte une part du bilan et leur réunion construit demande.

15 — Contrôle algébrique	Contrôle indépendant — Vérification par recomposition: séparer les contributions en deux sous-totaux indépendants, puis vérifier que leur addition redonne demande.
16 — Estimation mentale	Estimer la somme à partir du terme dominant et de quelques ordres de grandeur; un demande inférieur à un terme positif inclus serait incohérent.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «8. Atelier, métrologie et pièces de rechange», la relation «demande = 6+8+10» n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Une perturbation d'une contribution se retrouve dans le total avec le même signe; les coefficients éventuels modifient seulement son amplitude.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez de 10 % la deuxième demande, de 8 à 8,8 h/j, sans changer les autres besoins ni la capacité de 20 h/j. Recalculez la charge et le déficit. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. demande = 6 + 8,8 + 10 = 24,8 h/j. Déficit = 24,8 – 20 = 4,8 h/j. La hausse de 0,8 h sur une famille se transmet intégralement au backlog quotidien : 4,0 → 4,8 h/j. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Charge quotidienne de l'atelier» en changeant au moins deux données de demande = 6 + 8 + 10. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans demande = 6 + 8 + 10, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Prioriser ou ajouter de la capacité dès que la demande durable dépasse le temps machine disponible.
21 — Décision mission	Prioriser ou ajouter de la capacité dès que la demande durable dépasse le temps machine disponible.

Lecture de sûreté

Un atelier n'est pas une imprimante isolée: il exige matière, préparation, machine, outils, métrologie, qualification, données de définition, opérateurs et gestion de Le workshop NIST 2026 sur la métrologie in situ montre que mesure, qualification et certification restent des enjeux centraux de la fabrication additive métallique.

Capacité qualifiée réellement livrable

$$\text{capacité_qualifiée} = \text{cadence} \times \text{disponibilité} \times \text{rendement} \times \text{taux_acceptation}$$

1 — Question concrète	Dans la relation «capacité_qualifiée = cadence × disponibilité × rendement × taux_acceptation», quel résultat multiplicatif correspond à capacité_qualifiée?
2 — Intuition sans symboles	La capacité utile est la cadence nominale réduite par les pertes de disponibilité, de rendement et de conformité du produit.
3 — Grandeurs	capacité_qualifiée : débit de produits acceptés ; cadence : débit nominal ; disponibilité : fraction de temps productif ; rendement : fraction réellement produite ; taux_acceptation : fraction conforme et acceptée.
4 — Formule	$\text{capacité_qualifiée} = \text{cadence} \times \text{disponibilité} \times \text{rendement} \times \text{taux_acceptation}$
5 — Lecture	Version parlée: «capacité indice qualifiée égale cadence multiplié par disponibilité multiplié par rendement multiplié par taux indice acceptation».
6 — Symboles et sens	capacité_qualifiée : débit de produits acceptés ; cadence : débit nominal ; disponibilité : fraction de temps productif ; rendement : fraction réellement produite ; taux_acceptation : fraction conforme et acceptée.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	capacité_qualifiée et cadence dans la même unité de débit de production (par exemple pièces/h ou kg/h); disponibilité, rendement et taux_acceptation sans dimension.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Chaque coefficient sans dimension réduit successivement la cadence nominale pour tenir compte du temps disponible, du rendement puis de la fraction conforme.
11 — Hypothèses	Le produit suppose que les coefficients et facteurs de cadence × disponibilité × rendement × taux_acceptation restent définis sur la même frontière. Une modification de périmètre impose de reconstruire le modèle.
12 — Contrôle d'unités	capacité_qualifiée et cadence dans la même unité de débit de production (par exemple pièces/h ou kg/h); disponibilité, rendement et taux_acceptation sans dimension. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : cadence = 100 kg/h, disponibilité = 0,90, rendement = 0,80 et taux_acceptation = 0,95 donnent capacité_qualifiée = 68,4 kg/h.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Chaque coefficient sans dimension réduit successivement la cadence nominale pour tenir compte du temps disponible, du rendement puis de la fraction conforme.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: capacité_qualifiée/cadence doit redonner disponibilité × rendement × taux_acceptation. Si les trois coefficients valent 1, la capacité qualifiée doit égaler la cadence.
16 — Estimation mentale	Additionner les exposants en notation scientifique et multiplier grossièrement les mantisses de cadence × disponibilité × rendement × taux_acceptation; on obtient une estimation indépendante de capacité_qualifiée.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Lecture de sûreté», la relation «capacité_qualifiée = cadence × disponibilité × rendement × taux_acceptation» n'a de portée qu'avec une définition

	explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Pour mesurer l'effet d'une entrée, la modifier de $\pm 10\%$ et laisser les autres facteurs de cadence $\times$ disponibilité $\times$ rendement $\times$ taux_acceptation fixes; capacité_qualifiée doit suivre cette variation dans le même sens.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez la cadence nominale de 10%, de 100 à 110 kg/h, sans modifier les trois fractions. Recalculez la capacité qualifiée. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $\text{capacité_qualifiée} = 110 \times 0,90 \times 0,80 \times 0,95 = 75,24$ kg/h. Le gain est $6,84$ kg/h, soit $+10\%$, car les facteurs de disponibilité, rendement et acceptation restent constants. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Capacité qualifiée réellement livrable» en changeant au moins deux données de $\text{capacité_qualifiée} = \text{cadence} \times \text{disponibilité} \times \text{rendement} \times \text{taux_acceptation}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\text{capacité_qualifiée} = \text{cadence} \times \text{disponibilité} \times \text{rendement} \times \text{taux_acceptation}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Promettre la production sur la capacité qualifiée et non sur la cadence nominale.
21 — Décision mission	Promettre la production sur la capacité qualifiée et non sur la cadence nominale.

Une pièce produite n'est pas encore une pièce libérée pour service tant que les caractéristiques critiques ne sont pas vérifiées.

Cas atelier — qualification

Une imprimante produit 10 pièces/h mais 15% sont rejetées après contrôle et 10% du temps est consommé par changement de série. Sur 16 h de présence, sortie acceptée $\approx 10 \times 16 \times 0,90 \times 0,85 = 122$ pièces. Le nombre brut « 160 pièces » surestime la capacité utile parce qu'il ignore support et acceptation.

9. Population et profondeur de compétences

Quatre personnes forment une équipe de mission; vingt permettent davantage de spécialités; cent commencent à soutenir des services permanents; mille peuvent créer des filières de formation, mais nécessitent des infrastructures beaucoup plus complexes.

Le nombre brut ne suffit pas. Il faut suivre compétences critiques, temps humain disponible, capacité à former un remplaçant et charge de maintenance. Une société durable doit reproduire le savoir autant que les pièces.

Intuition système

La croissance démographique exige une profondeur de compétences, pas seulement davantage de personnes. Une fonction critique doit disposer de remplaçants, d'apprentissage pratique, de documentation et d'un temps de formation compatible avec le renouvellement de l'équipe.

Couverture d'une compétence critique

$$\text{couverture_compétence} = \text{personnes_qualifiées} \times \text{disponibilité_individuelle}$$

1 — Question concrète	Dans la relation «couverture_compétence = personnes_qualifiées × disponibilité_individuelle», quel résultat multiplicatif correspond à couverture_compétence?
2 — Intuition sans symboles	Compter les personnes formées ne suffit pas : la couverture réelle dépend aussi de leur disponibilité simultanée.
3 — Grandeurs	couverture_compétence : nombre équivalent de personnes qualifiées réellement disponibles ; personnes_qualifiées : effectif formé ; disponibilité_individuelle : fraction moyenne de temps mobilisable pour cette fonction.
4 — Formule	$\text{couverture_compétence} = \text{personnes_qualifiées} \times \text{disponibilité_individuelle}$
5 — Lecture	Version parlée: «couverture indice compétence égale personnes indice qualifiées multiplié par disponibilité indice individuelle».
6 — Symboles et sens	couverture_compétence : nombre équivalent de personnes qualifiées réellement disponibles ; personnes_qualifiées : effectif formé ; disponibilité_individuelle : fraction moyenne de temps mobilisable pour cette fonction.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	personnes_qualifiées est un compte de personnes; disponibilité_individuelle est sans dimension entre 0 et 1; couverture_compétence s'interprète en personnes équivalentes disponibles.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Multiplier l'effectif qualifié par sa fraction de disponibilité transforme un effectif nominal en effectif équivalent mobilisable.
11 — Hypothèses	Le produit suppose que les coefficients et facteurs de personnes_qualifiées × disponibilité_individuelle restent définis sur la même frontière. Une modification de périmètre impose de reconstruire le modèle.

12 — Contrôle d'unités	personnes_qualifiées est un compte de personnes; disponibilité_individuelle est sans dimension entre 0 et 1; couverture_compétence s'interprète en personnes équivalentes disponibles. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : 3 personnes qualifiées avec une disponibilité individuelle de 0,80 donnent $\text{couverture_compétence} = 3 \times 0,80 = 2,4$ personnes équivalentes disponibles.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Multiplier l'effectif qualifié par sa fraction de disponibilité transforme un effectif nominal en effectif équivalent mobilisable.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: si disponibilité_individuelle est non nulle, $\text{couverture_compétence}/\text{disponibilité_individuelle}$ doit redonner personnes_qualifiées. À disponibilité 1, les deux effectifs doivent coïncider.
16 — Estimation mentale	Additionner les exposants en notation scientifique et multiplier grossièrement les mantisses de personnes_qualifiées $\times$ disponibilité_individuelle; on obtient une estimation indépendante de couverture_compétence.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Intuition système», la relation « $\text{couverture_compétence} = \text{personnes_qualifiées} \times \text{disponibilité_individuelle}$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Pour mesurer l'effet d'une entrée, la modifier de $\pm 10\%$ et laisser les autres facteurs de personnes_qualifiées $\times$ disponibilité_individuelle fixes; couverture_compétence doit suivre cette variation dans le même sens.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez la disponibilité individuelle de 10 % relativement, de 0,80 à 0,88, avec toujours 3 personnes qualifiées. Recalculez la couverture. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $\text{couverture_compétence} = 3 \times 0,88 = 2,64$ personnes équivalentes. Le gain est 0,24 équivalent, soit +10 % par rapport aux 2,4 initiaux. Cela ne crée pas une quatrième personne physique. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Couverture d'une compétence critique» en changeant au moins deux données de $\text{couverture_compétence} = \text{personnes_qualifiées} \times \text{disponibilité_individuelle}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\text{couverture_compétence} = \text{personnes_qualifiées} \times \text{disponibilité_individuelle}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Exiger une relève qualifiée indépendante pour chaque fonction dont l'absence pourrait arrêter la mission.

21 — Décision mission

Exiger une relève qualifiée indépendante pour chaque fonction dont l'absence pourrait arrêter la mission.

Une compétence théorique non pratiquée depuis longtemps peut ne pas fournir la même capacité qu'un opérateur actif; les exercices périodiques font partie de la maintenance humaine.

Cas compétences — rotation d'équipe

Une fonction critique possède trois spécialistes. L'un part en EVA longue, le second est malade et le troisième doit superviser une autre urgence. Le nominal « trois personnes qualifiées » devient zéro disponibilité pratique. La planification doit donc combiner matrice de compétences, horaires, indisponibilités simultanées et formation croisée.

10. Gouvernance opérationnelle et sûreté

Les systèmes vitaux ont besoin d'autorités claires: qui peut arrêter une usine, déclarer une eau non conforme, consommer une réserve ou isoler une zone? Ces règles sont d'abord des mécanismes de sûreté, pas une constitution politique complète.

Les questions institutionnelles plus larges viennent ensuite: allocation des ressources, investissement, propriété, urgence, transparence et conflits. Il faut distinguer ce qui est imposé par la physique de ce qui relève d'un choix collectif.

Bilan quantifié

La opérationnelle doit transformer des principes en autorisations concrètes: arrêter une ligne, isoler un habitat, utiliser une réserve, modifier une configuration, accepter une pièce ou reporter une EVA. Les règles doivent être traçables tout en laissant une voie rapide en urgence.

Décision sûre et traçable

décision sûre $\Leftrightarrow$ autorité ET information ET seuil ET trace

1 — Question concrète	Quelles quatre conditions doivent être réunies pour satisfaire la checklist de décision sûre ?
2 — Intuition sans symboles	Une décision critique n'est sûre que si la bonne personne dispose des bonnes informations, d'un seuil explicite et d'une trace vérifiable.
3 — Grandeurs	autorité, information, seuil et trace sont quatre conditions booléennes obligatoires ; $\Leftrightarrow$ signifie que la décision n'est sûre que si les quatre conditions sont vraies simultanément.
4 — Formule	décision sûre $\Leftrightarrow$ autorité ET information ET seuil ET trace
5 — Lecture	À lire : « décision sûre si autorité ET information ET seuil ET trace sont réunis ».
6 — Symboles et sens	autorité, information, seuil et trace sont quatre conditions booléennes obligatoires ; $\Leftrightarrow$ signifie que la décision n'est sûre que si les quatre conditions sont vraies simultanément.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités	La checklist n'a pas d'unité. Les données contenues dans information ou seuil peuvent avoir leurs propres unités physiques, mais on ne les additionne ni entre elles ni avec une autorité ou une trace.
9 — Convention	Les éléments proviennent de l'organisation de mission, des procédures, des mesures et des seuils approuvés. La checklist elle-même ne crée aucun nombre. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Le mot ET impose la présence conjointe des quatre conditions. Une décision ne satisfait pas ce modèle lorsqu'une condition manque, même si les trois autres sont présentes.
11 — Hypothèses	Cette checklist ne garantit pas à elle seule qu'une décision soit correcte ; elle garantit seulement que quatre conditions de gouvernance et de traçabilité sont explicitement présentes.
12 — Contrôle d'unités	La checklist n'a pas d'unité. Les données contenues dans information ou seuil peuvent avoir leurs propres unités physiques, mais on ne les additionne ni entre elles ni avec une autorité ou une trace. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : sur 4 conditions obligatoires, autorité = oui, information = oui, seuil = non, trace = oui. Même si 3 conditions sur 4 sont présentes, la décision sûre reste FAUSSE car la logique utilise ET entre les quatre conditions.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Le mot ET impose la présence conjointe des quatre conditions. Une décision ne satisfait pas ce modèle lorsqu'une condition manque, même si les trois autres sont présentes.
15 — Contrôle algébrique	Tester quatre scénarios en retirant successivement autorité, information, seuil puis trace. Le modèle doit refuser chacun de ces quatre scénarios incomplets.
16 — Estimation mentale	Le contrôle mental consiste à vérifier quatre réponses explicites. Une seule réponse « non » suffit à classer la décision comme incomplètement sécurisée selon cette checklist.
17 — Interprétation	La checklist sert à rendre une décision opérationnelle explicite, autorisée et auditable en situation nominale ou de crise.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Il n'existe pas de variation $+\Delta$ de cette checklist. Les grandeurs physiques utilisées dans information ou seuil possèdent leurs propres sensibilités, traitées dans leurs modèles respectifs.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Le seuil manquant est ensuite formalisé et validé : les quatre conditions deviennent oui. La décision satisfait-elle maintenant la règle ? Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. Avec autorité = oui, information = oui, seuil = oui et trace = oui, les 4 conditions obligatoires sont vraies. L'expression logique avec ET devient donc vraie. Le comptage 4/4 sert ici à illustrer la complétude ; il ne transforme pas la règle en score compensatoire.

Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Décision sûre et traçable» en changeant au moins deux données de décision sûre → autorité ET information ET seuil ET trace. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer.

Correction autonome — critères spécifiques

Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans décision sûre → autorité ET information ET seuil ET trace, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Refuser les décisions critiques fondées sur une autorité implicite ou un seuil non écrit.

21 — Décision mission

Refuser les décisions critiques fondées sur une autorité implicite ou un seuil non écrit.

Une procédure qui nécessite une communication terrestre immédiate n'est pas robuste à la réalité du délai et des coupures martiennes.

Cas gouvernance — arrêt d'usine

Une ligne ISRU dépasse un seuil de température mais l'arrêt sacrifierait une production d'oxygène nécessaire. La règle doit préciser qui arbitre, quel seuil impose l'arrêt automatique, quelle réserve permet de survivre à l'arrêt et comment une dérogation est tracée. Sans ces éléments, « priorité à la sécurité » reste une intention non exécutable.

11. Économie physique: masse, énergie et temps machine

Avant même la monnaie, une implantation possède une économie physique. Une pièce consomme matériau, kWh, heures machine, temps humain et risque. Économiser un kilogramme importé peut être moins important que mobiliser vingt heures la machine la plus rare.

Des indicateurs simples — kg importés, kWh, disponibilité, jours de stock, heures de maintenance, temps de réparation — permettent de comparer des architectures sans prétendre prévoir toute une économie future.

Mode dégradé

L'économie physique rend visibles les goulets avant de parler monnaie: énergie disponible, masse importée, heures machine, temps équipage, surfaces pressurisées et stocks. Une monnaie ou un prix peut aider à allouer ces raretés, mais ne crée pas de kilowattheures supplémentaires.

Capacité limitée par le goulot d'étranglement

capacité = min(ressource, énergie, machine, opérateur, métrologie)

1 — Question concrète

Au passage «Mode dégradé», quelle branche de capacité = min(ressource, énergie, machine, opérateur, métrologie) devient contraignante et fixe capacité?

2 — Intuition sans

Une chaîne ne livre pas plus que son maillon le plus contraignant une fois toutes les

symboles	capacités converties sur la même base.
3 — Grandeurs	capacité : débit soutenable du système ; ressource, énergie, machine, opérateur et métrologie : capacités équivalentes des maillons ; min retient la plus petite valeur, donc le goulot.
4 — Formule	$\text{capacité} = \min(\text{ressource, énergie, machine, opérateur, métrologie})$
5 — Lecture	Version parlée: «capacité égale min(ressource, énergie, machine, opérateur, métrologie)».
6 — Symboles et sens	capacité : débit soutenable du système ; ressource, énergie, machine, opérateur et métrologie : capacités équivalentes des maillons ; min retient la plus petite valeur, donc le goulot.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	capacité et les cinq capacités candidates doivent être exprimées dans la même unité de débit utile, par exemple kg/h, pièces/h ou analyses/h. On ne peut pas prendre directement le minimum de kg, kW, heures-personnes et précision métrologique sans les convertir en capacités équivalentes.
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. L'origine signalée dans cette section est: les mesures d'équipage, stocks et contraintes opérationnelles. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Une chaîne est limitée par son goulot d'étranglement. Après conversion de chaque contrainte en capacité de production comparable, min retient la plus faible: c'est elle qui borne le débit de l'ensemble.
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 d'unités	capacité et les cinq capacités candidates doivent être exprimées dans la même unité de débit utile, par exemple kg/h, pièces/h ou analyses/h. On ne peut pas prendre directement le minimum de kg, kW, heures-personnes et précision métrologique sans les convertir en capacités équivalentes. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : des capacités équivalentes de 80, 70, 90, 85 et 75 unités/h donnent $\text{capacité} = \min(\dots) = 70$ unités/h ; le goulot est l'énergie.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Une chaîne est limitée par son goulot d'étranglement. Après conversion de chaque contrainte en capacité de production comparable, min retient la plus faible: c'est elle qui borne le débit de l'ensemble.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle de branche active: la capacité retenue doit être égale à au moins une capacité candidate et inférieure ou égale à toutes les autres. Changer la contrainte active doit changer le minimum.
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	Dans ce calcul de «Mode dégradé», la relation «capacité = min(ressource, énergie, machine, opérateur, métrologie)» n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Sensibilité 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. Augmentez de 10 % la capacité énergie, de 70 à 77 unités/h, en conservant les autres valeurs. Recalculez la capacité système et identifiez le nouveau goulot. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. Les capacités deviennent 80, 77, 90, 85 et 75 unités/h. Le minimum vaut désormais 75 unités/h : la métrologie devient le nouveau goulot. Améliorer l'énergie de 10 % ne donne donc que +5 unités/h au système, de 70 à 75. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Capacité limitée par le goulot d'étranglement» en changeant au moins deux données de capacité = $\min(\text{ressource}, \text{énergie}, \text{machine}, \text{opérateur}, \text{métrologie})$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\text{capacité} = \min(\text{ressource}, \text{énergie}, \text{machine}, \text{opérateur}, \text{métrologie})$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Financer l'amélioration du goulot réel avant d'augmenter une capacité déjà excédentaire.
21 — Décision mission	Financer l'amélioration du goulot réel avant d'augmenter une capacité déjà excédentaire.

Le minimum de chaîne domine: améliorer un poste non limitant peut ne produire aucun gain de sortie.

Cas économie physique — goulet

L'atelier possède matière pour 500 pièces et énergie pour 700, mais métrologie seulement pour contrôler 80 pièces/j. La cadence de production à 150 pièces/j n'augmente pas la sortie qualifiée au-delà de 80 tant que le contrôle reste le goulet. L'investissement utile est donc peut-être un banc de mesure plutôt qu'une deuxième machine de fabrication.

12. Scénarios de panne comme outil de conception

Un scénario utile ne dit pas « tout tombe en panne ». Il combine des événements plausibles: un cargo perdu, une pompe indisponible, poussière après EVA, un instrument de métrologie hors service et un délai de communication. Le but est d'exposer les dépendances.

Un bon scénario produit une action: augmenter un stock, isoler une interface, simplifier une réparation, former un second spécialiste ou ajouter un capteur indépendant. L'analyse de panne devient alors une méthode de conception.

Lecture de sûreté

Les scénarios de panne doivent être choisis pour révéler les couplages: perte de puissance + eau, mobilité + radiation, atelier + stock de rechange, capteur + logiciel commun. On examine détection, isolement, mode dégradé, temps de réparation et retour à un état qualifié.

Marge de survie en mode dégradé

$$\text{marge_survie} = \text{autonomie_mode_dégradé} - \text{temps_récupération}$$

1 — Question concrète	Que vaut marge_survie après le retrait défini par «marge_survie = autonomie_mode_dégradé – temps_récupération» au passage «Lecture de sûreté»?
2 — Intuition sans symboles	L'autonomie brute n'est pas une marge : il faut d'abord réserver tout le temps nécessaire au rétablissement ou à l'atteinte d'un état sûr.
3 — Grandeurs	marge_survie : temps réellement restant après récupération ; autonomie_mode_dégradé : durée soutenable en mode dégradé ; temps_récupération : durée nécessaire pour rétablir la fonction ou atteindre un état sûr.
4 — Formule	$\text{marge_survie} = \text{autonomie_mode_dégradé} - \text{temps_récupération}$
5 — Lecture	Version parlée: «marge indice survie égale autonomie indice mode indice dégradé moins temps indice récupération».
6 — Symboles et sens	marge_survie : temps réellement restant après récupération ; autonomie_mode_dégradé : durée soutenable en mode dégradé ; temps_récupération : durée nécessaire pour rétablir la fonction ou atteindre un état sûr.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	les trois termes sont des durées dans la même unité (s, min ou h selon le scénario).
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	La marge de survie est la différence entre le temps pendant lequel le système peut tenir et le temps nécessaire pour récupérer. Une marge positive signifie qu'une réserve temporelle subsiste.
11 — Hypothèses	Les entrées doivent partager unité, date ou fenêtre temporelle et frontière de système. Un mélange de périmètres rendrait l'écart trompeur.
12 — Contrôle d'unités	les trois termes sont des durées dans la même unité (s, min ou h selon le scénario). Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : autonomie_mode_dégradé = 36 h et temps_récupération = 12 h donnent marge_survie = 24 h.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	La marge de survie est la différence entre le temps pendant lequel le système peut tenir et le temps nécessaire pour récupérer. Une marge positive signifie qu'une réserve temporelle subsiste.

15 — Contrôle algébrique	Contrôle inverse: $\text{marge_survie} + \text{temps_récupération}$ doit redonner $\text{autonomie_mode_dégradé}$.
16 — Estimation mentale	Avant le calcul fin, arrondir les deux entrées et estimer leur séparation; le résultat exact doit rester cohérent avec cette différence grossière.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «Lecture de sûreté», la relation « $\text{marge_survie} = \text{autonomie_mode_dégradé} - \text{temps_récupération}$ » n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Faire varier séparément les deux entrées de $\pm 10\%$ montre que leur influence sur marge_survie est opposée.
20 — Exercices guidé et autonome	----- Exercice guidé. Augmentez le temps de récupération de 10 %, de 12 à 13,2 h, sans changer l'autonomie dégradée. Recalculez la marge. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. $\text{marge_survie} = 36 - 13,2 = 22,8$ h. La hausse de 1,2 h du temps de récupération retire exactement 1,2 h à la marge : $24 \rightarrow 22,8$ h. Une marge positive n'est pas automatiquement suffisante si l'option de repli exige plus de 22,8 h. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Marge de survie en mode dégradé» en changeant au moins deux données de $\text{marge_survie} = \text{autonomie_mode_dégradé} - \text{temps_récupération}$. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans $\text{marge_survie} = \text{autonomie_mode_dégradé} - \text{temps_récupération}$, produire une valeur avec son unité ou un résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Déclencher l'escalade lorsque la marge tombe sous le temps nécessaire à une option de repli crédible.
21 — Décision mission	Déclencher l'escalade lorsque la marge tombe sous le temps nécessaire à une option de repli crédible.

Une marge positive dans le scénario nominal n'est pas suffisante si sur le temps de réparation est du même ordre que la marge.

Cas panne combinée — énergie + eau

Une panne de générateur le délestage industriel; simultanément, le processeur d'eau doit chauffer un circuit pour redémarrer. Si le mode secours ne réserve pas cette puissance de redémarrage, l'eau reste indisponible alors même que l'énergie nominale revient. Les scénarios combinés doivent donc suivre la séquence temporelle des fonctions, pas

seulement une liste de composants en panne.

13. Quatre échelles, quatre architectures

Échelle	Caractère	Question
4	mission intégrée	Une panne simple reste-t-elle survivable?
20	avant-poste spécialisé	Quelles compétences/pièces doivent être doublées?
100	base permanente	Quels services deviennent infrastructures?
1 000	société industrielle	Quelles chaînes locales remplacent des importations?

La progression n'est pas automatique. Cent personnes peuvent rester dépendantes d'un composant unique importé. L'échelle sert à révéler les ruptures d'architecture, pas à fournir une date de colonisation.

14. Projet final: base de 100 personnes

Construisez une matrice de dix fonctions: puissance, eau, atmosphère, nourriture, habitat, santé, mobilité, communications, atelier, rechanges. Pour chacune: capacité nominale, capacité après panne simple, stock d'urgence, temps de réparation et dépendances communes.

Le projet est réussi lorsque vous pouvez expliquer pourquoi chaque fonction est prête, tolérable en mode dégradé ou bloquante, et quelles données manquent encore. Une architecture crédible est un réseau de fonctions aux limites explicites, pas une collection de technologies impressionnantes.

Projet final — architecture physique d'une base de 100 personnes

Commencez par dix fonctions: énergie, eau, atmosphère, nourriture, habitat, santé, mobilité, communications, atelier et rechanges. Pour chacune, inscrivez une capacité nominale et surtout une capacité après panne simple. Une base de 100 personnes qui possède 500 kW de génération mais seulement 120 kWh de stockage n'a pas la même résilience qu'une base de même puissance avec plusieurs jours de réserve. Les grandeurs ne sont pas interchangeables: puissance, énergie, débit, masse de stock et temps de réparation répondent à des questions distinctes.

Pour l'eau, reprenez un scénario de perte nette de 40 kg/j après récupération. Trente jours d'appoint valent 1 200 kg. Une réserve stratégique de 90 jours vaut 3,6 t. Si la perte double pendant une dégradation, cette réserve de 90 jours nominaux devient 45 jours. Le stock n'a pas changé; l'autonomie a changé parce que le flux a changé. La base doit donc surveiller les tendances de perte, pas seulement le niveau des réservoirs.

Pour la construction, un chantier de 300 t de régolithe à 250 kg/h représente 1 200 h productives. Si deux engins identiques sont véritablement indépendants, la capacité nominale peut approcher 500 kg/h. Mais un seul atelier de maintenance, un seul chargeur électrique ou une même pièce d'usure peut limiter le gain. Écrivez pour chaque capacité la dépendance qui pourrait la rendre commune. Cette colonne révèle souvent davantage que le nombre de machines.

Pour l'industrie, supposez une machine-outil critique disponible 18 h/j et une demande planifiée de 15 h/j. L'utilisation nominale vaut 83 %. Une réparation imprévue de 8 h ne peut pas être absorbée le même jour sans retard. Une capacité moyenne suffisante peut donc manquer de marge temporelle. Ajoutez un indicateur de backlog: heures de travail en attente. Quand le backlog augmente plusieurs jours, l'atelier est structurellement sous-capacitaire même si aucune machine n'est totalement en panne.

Pour les compétences, ne comptez pas seulement les personnes. Listez les fonctions où un seul spécialiste peut autoriser ou réaliser une opération: chirurgie, contrôle qualité, haute tension, logiciel critique, chimie, maintenance d'un compresseur. Une société de 100 habitants peut être démographiquement grande et techniquement fragile. Le plan doit prévoir compagnonnage, documentation, simulateurs, exercices et temps de formation. La reproduction des compétences est une infrastructure aussi réelle qu'un stock de pièces.

Terminez par trois scénarios combinés: perte d'un cargo annuel, panne de 72 h d'un train ECLSS et indisponibilité simultanée d'une machine de métrologie. Pour chaque scénario, décrivez les fonctions maintenues, celles qui passent en mode dégradé, les stocks consommés, le temps de récupération et la décision qui devient irréversible. L'objectif n'est pas de prédire la première ville martienne mais de démontrer qu'une architecture peut être discutée avec des bilans, des dépendances, des modes dégradés et des preuves.

Fonction	Mesure utile	Question de résilience
Énergie	kW + kWh + disponibilité	combien de temps après perte de production?
Eau	kg/l de perte + tonnes de réserve	quelle autonomie au flux dégradé?
Atelier	h machine/l + backlog	quelle réparation retarde les autres?
Compétences	personnes qualifiées par fonction	quelle tâche possède un point humain unique?

Tableau de bord intégré de soutenabilité

autonomie = stock/perte ; utilisation = demande/capacité ; disponibilité ≠ capacité nominale

1 — Question concrète	Au point «14. Projet final: base de 100 personnes», comment faut-il appliquer la règle de qualification ou de dépendance autonomie = stock / perte; utilisation atelier = demande/capacité; disponibilité ≠ capacité nominale?
2 — Intuition sans symboles	La soutenabilité combine au moins une réserve, une charge de travail et la disponibilité réelle des moyens ; un seul indicateur ne suffit pas.
3 — Grandeurs	autonomie : stock divisé par perte nette ; utilisation : demande divisée par capacité ; disponibilité : fraction de temps où le moyen est réellement utilisable ; capacité nominale : performance théorique, distincte de la disponibilité réelle.
4 — Formule	autonomie = stock/perte ; utilisation = demande/capacité ; disponibilité ≠ capacité nominale
5 — Lecture	Version parlée: «autonomie égale stock divisé par perte; utilisation atelier égale demande divisé par capacité; disponibilité ≠ capacité nominale».
6 — Symboles et sens	autonomie : stock divisé par perte nette ; utilisation : demande divisée par capacité ; disponibilité : fraction de temps où le moyen est réellement utilisable ; capacité nominale : performance théorique, distincte de la disponibilité réelle.
7 — Prononciation	Lire explicitement les indices, exposants, lettres grecques et opérations ; une autre personne doit pouvoir reconstruire la relation sans voir la page.
8 — Unités	Pour la vie en mission, côté projet final: cette relation logique n'a pas de dimension d'ensemble; chaque grandeur demeure exprimée dans son unité
9 — Convention	Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée. L'origine signalée dans cette section est: les mesures d'équipage, stocks et contraintes opérationnelles. Conserver la même frontière de système et la même base de temps du début à la fin.
10 — Pourquoi cette opération	Le symbole ≠ signale qu'une égalité simplificatrice est interdite dans le cas décrit. Le contrôle consiste à identifier la cause qui rompt l'indépendance supposée, puis à vérifier les deux côtés par un contre-exemple.

11 — Hypothèses	Limites: cette écriture résume une règle de qualification ou de dépendance; elle n'autorise pas à convertir automatiquement les conditions en nombres ni à supposer leur indépendance.
12 — Contrôle d'unités	Pour la vie en mission, côté projet final: cette relation logique n'a pas de dimension d'ensemble; chaque grandeur demeure exprimée dans son unité. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
13 — Cas numérique	Exemple pédagogique : stock = 900 unités et perte = 300/j donnent autonomie = 3 jours. Une demande de 24 face à une capacité de 20 donne utilisation = 1,20, donc 120 %. Une disponibilité nominale élevée ne compense pas une utilisation durablement supérieure à 1.
14 — Pourquoi le calcul fonctionne	Le symbole $\neq$ signale qu'une égalité simplificatrice est interdite dans le cas décrit. Le contrôle consiste à identifier la cause qui rompt l'indépendance supposée, puis à vérifier les deux côtés par un contre-exemple.
15 — Contrôle algébrique	Contrôle par table de cas: construire au moins un cas satisfaisant toutes les conditions et un cas qui en viole une; la sortie doit changer conformément à la règle.
16 — Estimation mentale	Tester un cas manifestement conforme et un cas manifestement non conforme; la règle doit les classer dans le bon sens avant d'être appliquée au cas limite.
17 — Interprétation	Dans ce calcul de «14. Projet final: base de 100 personnes», la relation «autonomie = stock / perte; utilisation atelier = demande/capacité; disponibilité $\neq$ capacité nominale» n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.
18 — Ce que le résultat ne prouve pas	Ce résultat ne démontre ni la fiabilité du matériel, ni la qualité des données d'entrée, ni la sûreté globale du système en dehors des hypothèses déclarées.
19 — Sensibilité	Sensibilité logique: modifier une condition à la fois permet d'identifier celle qui fait basculer l'acceptation ou invalide la simplification.
20 — Exercices guidé et autonome	Exercice guidé. Augmentez de 10 % la perte, de 300 à 330/j, et de 10 % la capacité, de 20 à 22, en gardant stock = 900 et demande = 24. Recalculez autonomie et utilisation. Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé Correction détaillée. autonomie = $900/330 = 2,73$ jours environ. utilisation = $24/22 = 1,091$, soit 109,1 %. La capacité améliorée réduit la surcharge de 120 % à 109,1 %, mais elle reste >100 %, tandis que l'autonomie se dégrade à 2,73 jours. Le tableau de bord reste donc défavorable. Exercice autonome. Construisez un second scénario chiffré pour «Tableau de bord intégré de soutenabilité» en changeant au moins deux données de autonomie = stock/perte ; utilisation = demande/capacité ; disponibilité $\neq$ capacité nominale. Calculez le résultat, vérifiez unités et ordre de grandeur, puis dites si la décision mission doit changer. Correction autonome — critères spécifiques Correction autonome. La réponse doit montrer la substitution des valeurs dans autonomie = stock/perte ; utilisation = demande/capacité ; disponibilité $\neq$ capacité nominale, produire une valeur avec son unité ou un

résultat logique explicite, comparer ce résultat au scénario de référence et justifier la décision suivante : Bloquer l'expansion si l'un des indicateurs intégrés montre une dette non compensée, même si les autres sont favorables.

21 — Décision mission

Bloquer l'expansion si l'un des indicateurs intégrés montre une dette non compensée, même si les autres sont favorables.

Série d'exercices corrigés — contrôle autonome

1. 100 km de rayon: aire géométrique approximative?

$\pi \times 100^2 \approx 31\,400 \text{ km}^2$. Ce chiffre ne signifie pas 31 400 km² praticables; il donne seulement une enveloppe géométrique du problème.

2. 300 t à 250 kg/h: heures productives?

$300\,000/250 = 1\,200 \text{ h}$. À 50 % de disponibilité, le calendrier idéal double à 2 400 h, avant autres contraintes.

3. Machine disponible 18 h/j, demande 15 h/j: utilisation?

$15/18 \approx 83 \%$. Une utilisation élevée laisse peu de marge aux réparations urgentes et peut créer un backlog même sans panne longue.

4. Pourquoi produire localement une pièce peut coûter plus cher que l'importer en masse?

Parce qu'elle peut consommer machine rare, énergie, opérateur, métrologie, matière qualifiée et temps. La bonne comparaison porte sur le système de ressources, pas seulement sur les kilogrammes transportés.

5. Quel indicateur révèle un point humain unique?

Le nombre de personnes indépendamment qualifiées pour une fonction critique. Une compétence détenue par une seule personne est une dépendance même si la population totale est élevée.

Atelier d'entraînement approfondi

Dans ces exercices d'implantation, évitez de traiter une base martienne comme une simple somme d'équipements. Commencez par la fonction recherchée, puis remontez ses dépendances en énergie, eau, mobilité, atelier, compétences et pièces. Le corrigé cherche le goulet d'étranglement et montre comment une solution qui semble optimale à quatre personnes peut devenir mauvaise à cent ou mille habitants.

1. Exploration Zone

Une cible à 80 km en ligne droite avec 25 % de détour: distance réelle aller?

Correction: 100 km. Le rayon géographique ne suffit pas; il faut le chemin praticable.

Le détour transforme 80 km géométriques en 100 km opérationnels. Cette différence devient énergie, temps d'équipage, usure et marge de retour; une Exploration Zone n'est donc pas un simple cercle dessiné sur une carte.

Données du cas

1. Exploration Zone — Une cible à 80 km en ligne droite avec 25 % de détour: distance réelle aller?

Raisonnement

Correction: 100 km. Le rayon géographique ne suffit pas; il faut le chemin praticable. Le détour transforme 80 km géométriques en 100 km opérationnels. Cette différence devient énergie, temps d'équipage, usure et marge de retour; une Exploration Zone n'est donc pas un simple cercle dessiné sur une carte.

Résultat

100 km.

Contrôle

Cette différence devient énergie, temps d'équipage, usure et marge de retour

Interprétation

une Exploration Zone n'est donc pas un simple cercle dessiné sur une carte.

2. Énergie

150 kW moyens pendant 24 h.

Correction: 3,6 MWh/j.

Données du cas

Puissance moyenne constante de 150 kW pendant 24 h.

Relation

Énergie = puissance × durée, $E = P \times t$.

Raisonnement

150 kW × 24 h = 3 600 kWh. Diviser par 1 000 convertit les kilowattheures en mégawattheures: 3 600 kWh = 3,6 MWh.

Résultat

La consommation quotidienne est de 3,6 MWh/j.

Contrôle

À 150 kW, 10 h représentent 1,5 MWh; un peu plus du double de durée doit donner un peu plus du double d'énergie, soit 3,6 MWh pour 24 h.

Interprétation

La puissance moyenne devient un budget énergétique journalier; ce budget doit ensuite être confronté à la production, au stockage et aux marges de la base.

Repères numériques conservés. 150kw · 24h.

3. Blindage local

150 m² couverts par 1,5 m de matériau à 1 500 kg/m³.

Correction: Volume=225 m³; masse=337 500 kg=337,5 t.

Les 337,5 tonnes viennent d'un volume de 225 m³ multiplié par la densité supposée. Avant de promettre ce blindage, il faut convertir la masse en heures d'excavation, transport, compactage et disponibilité d'engins.

Données du cas

3. Blindage local — 150 m² couverts par 1,5 m de matériau à 1 500 kg/m³.

Relation

Correction: Volume=225 m³

Raisonnement

Correction: Volume=225 m³; masse=337 500 kg=337,5 t. Les 337,5 tonnes viennent d'un volume de 225 m³ multiplié par la densité supposée. Avant de promettre ce blindage, il faut convertir la masse en heures d'excavation, transport, compactage et disponibilité d'engins.

Résultat

Volume=225 m³

Interprétation

Avant de promettre ce blindage, il faut convertir la masse en heures d'excavation, transport, compactage et disponibilité d'engins.

Repères numériques conservés. 150m² · 1,5m.

4. Disponibilité atelier

Machine 90 % disponible, 2 h/j de support, cadence 4 pièces/h.

Correction: $24 \times 0,9 = 21,6$ h; moins 2 = 19,6 h; 78,4 pièces/j avant rendement/rebut.

La disponibilité réduit d'abord les 24 h théoriques à 21,6 h; retirer 2 h de support laisse 19,6 h productives. Multiplier ensuite par la cadence montre pourquoi personnel, maintenance et disponibilité comptent autant que la vitesse nominale de la machine.

Données du cas

4. Disponibilité atelier — Machine 90 % disponible, 2 h/j de support, cadence 4 pièces/h.

Relation

Correction: $24 \times 0,9 = 21,6$ h

Raisonnement

Correction: $24 \times 0,9 = 21,6$ h; moins 2 = 19,6 h; 78,4 pièces/j avant rendement/rebut. La disponibilité réduit d'abord les 24 h théoriques à 21,6 h; retirer 2 h de support laisse 19,6 h productives. Multiplier ensuite par la cadence montre pourquoi personnel, maintenance et disponibilité comptent autant que la vitesse nominale de la machine.

Résultat

$24 \times 0,9 = 21,6$ h

Interprétation

Multiplier ensuite par la cadence montre pourquoi personnel, maintenance et disponibilité comptent autant que la vitesse nominale de la machine.

5. Campagne cargo

4 vols indépendants à 96 % chacun: tous réussissent?

Correction: $0,96^4 \approx 84,9$ %.

Le produit $0,96^4$ suppose quatre vols indépendants. Le résultat de 84,9 % montre qu'une fiabilité élevée par vol peut devenir beaucoup moins confortable lorsqu'une campagne exige le succès de tous les éléments.

Données du cas

5. Campagne cargo — 4 vols indépendants à 96 % chacun: tous réussissent?

Relation

Correction: $0,96^4 \approx 84,9$ %.

Raisonnement

Correction: $0,96^4 \approx 84,9$ %. Le produit $0,96^4$ suppose quatre vols indépendants. Le résultat de 84,9 % montre qu'une fiabilité élevée par vol peut devenir beaucoup moins confortable lorsqu'une campagne exige le succès de tous les éléments.

Résultat

$0,96^4 \approx 84,9$ %.

Interprétation

Le résultat de 84,9 % montre qu'une fiabilité élevée par vol peut devenir beaucoup moins confortable lorsqu'une campagne exige le succès de tous les éléments.

Repères numériques conservés. 96%.

6. Eau

100 personnes, 0,4 kg/j d'appoint chacune.

Correction: 40 kg/j, 14,6 t/an.

Données du cas

6. Eau — 100 personnes, 0,4 kg/j d'appoint chacune.

Relation

Correction: 40 kg/j, 14,6 t/an.

Raisonnement

Correction: 40 kg/j, 14,6 t/an.

Résultat

40 kg/j, 14,6 t/an.

Repères numériques conservés. 0,4kg.

7. Mobilité

60 km carte, 30 % détour, 12 km/h.

Correction: 78 km; 6,5 h de roulage idéal aller.

Données du cas

7. Mobilité — 60 km carte, 30 % détour, 12 km/h.

Relation

60 km carte, 30 % détour, 12 km/h.

Raisonnement

Correction: 78 km; 6,5 h de roulage idéal aller.

Résultat

78 km

Interprétation

6,5 h de roulage idéal aller.

Repères numériques conservés. 60km · 30%.

8. Capstone croissance

Une base passe de 20 à 100 personnes. L'eau d'appoint suit linéairement 0,4 kg/pers/j, mais l'atelier de maintenance possède deux machines de 60 pièces/j chacune à 80 % de disponibilité. Comparez les deux changements.

Correction: L'eau passe de 8 à 40 kg/j, facteur 5. La capacité atelier nominale corrigée vaut $2 \times 60 \times 0,8 = 96$ pièces/j; elle ne se multiplie pas automatiquement avec la population. Si la demande de pièces passe elle aussi $\times 5$, il faut ajouter machines, équipes, heures ou productivité. Le capstone montre pourquoi certains flux scalent avec N tandis que les infrastructures évoluent par paliers.

L'eau suit ici la population de façon linéaire, mais l'atelier ne suit pas automatiquement: il possède des machines discrètes, des postes humains et une disponibilité. Le passage de 20 à 100 habitants peut donc exiger un saut d'architecture plutôt qu'un simple facteur cinq.

Problèmes avancés supplémentaires

1. Matériau local

$500 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m} \times 1\,600 \text{ kg/m}^3$.

Correction raisonnée: $1\,600\,000 \text{ kg} = 1\,600 \text{ t}$.

Données du cas

1. Matériau local — $500 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m} \times 1\,600 \text{ kg/m}^3$.

Relation

$500 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m} \times 1\,600 \text{ kg/m}^3$.

Raisonnement

Correction raisonnée: $1\,600\,000\text{ kg}=1\,600\text{ t}$.

Résultat

$1\,600\,000\text{ kg}=1\,600\text{ t}$.

Repères numériques conservés. $500\text{m}^2 \cdot 2\text{m}$.

2. Atelier

2 machines, 6 pièces/h, 18 h/j, disponibilité 85 %, rendement 90 %.

Correction raisonnée: $2 \times 6 \times 18 \times 0,85 \times 0,90 \approx 165$ pièces/j.

Les 165 pièces/j combinent nombre de machines, cadence, temps, disponibilité et rendement. Chacun de ces facteurs possède sa propre cause de perte; le produit final est utile précisément parce qu'il expose où une amélioration ou une panne agit.

Données du cas

2. Atelier — 2 machines, 6 pièces/h, 18 h/j, disponibilité 85 %, rendement 90 %.

Relation

Les 165 pièces/j combinent nombre de machines, cadence, temps, disponibilité et rendement.

Raisonnement

Correction raisonnée: $2 \times 6 \times 18 \times 0,85 \times 0,90 \approx 165$ pièces/j. Les 165 pièces/j combinent nombre de machines, cadence, temps, disponibilité et rendement. Chacun de ces facteurs possède sa propre cause de perte; le produit final est utile précisément parce qu'il expose où une amélioration ou une panne agit.

Résultat

$2 \times 6 \times 18 \times 0,85 \times 0,90 \approx 165$ pièces/j.

Interprétation

le produit final est utile précisément parce qu'il expose où une amélioration ou une panne agit.

Repères numériques conservés. 18h.

3. Campagne

5 cargaisons indépendantes à 97 %. Toutes réussissent?

Correction raisonnée: $0,97^5 \approx 85,9\%$.

Cinq cargaisons à 97 % chacune donnent seulement 85,9 % de chance que toutes réussissent sous indépendance. Une stratégie robuste peut donc dimensionner stocks et séquences pour survivre à une livraison manquante au lieu de supposer une campagne parfaite.

Données du cas

3. Campagne — 5 cargaisons indépendantes à 97 %. Toutes réussissent?

Raisonnement

Correction raisonnée: $0,97^5 \approx 85,9\%$. Cinq cargaisons à 97 % chacune donnent seulement 85,9 % de chance que toutes réussissent sous indépendance. Une stratégie robuste peut donc dimensionner stocks et séquences pour survivre à une livraison manquante au lieu de supposer une campagne parfaite.

Résultat

$0,97^5 \approx 85,9\%$.

Interprétation

Une stratégie robuste peut donc dimensionner stocks et séquences pour survivre à une livraison manquante au lieu de supposer une campagne parfaite.

4. Mini-projet croissance

100 personnes consomment 40 kg/j d'appoint d'eau et l'usine en produit 50 kg/j. Quel surplus annuel idéal?

Correction raisonnée: $10\text{ kg/j} \times 365 = 3,65\text{ t/an}$. Ce surplus n'est une réserve que si stockage, qualité et disponibilité de l'usine restent suffisants.

Le surplus annuel de 3,65 t n'existe réellement que si l'usine maintient son débit et si l'eau produite reste qualifiée et stockable. La marge de production doit être séparée d'une réserve déjà disponible en cas de panne.

Données du cas

4. Mini-projet croissance — 100 personnes consomment 40 kg/j d'appoint d'eau et l'usine en produit 50 kg/j.
Quel surplus annuel idéal?

Relation

100 personnes consomment 40 kg/j d'appoint d'eau et l'usine en produit 50 kg/j.

Raisonnement

Correction raisonnée: $10\text{ kg/j} \times 365 = 3,65\text{ t/an}$. Ce surplus n'est une réserve que si stockage, qualité et disponibilité de l'usine restent suffisants. Le surplus annuel de 3,65 t n'existe réellement que si l'usine maintient son débit et si l'eau produite reste qualifiée et stockable. La marge de production doit être séparée d'une réserve déjà disponible en cas de panne.

Résultat

$10\text{ kg/j} \times 365 = 3,65\text{ t/an}$.

Contrôle

Ce surplus n'est une réserve que si stockage, qualité et disponibilité de l'usine restent suffisants.

Interprétation

La marge de production doit être séparée d'une réserve déjà disponible en cas de panne.

Sources et références

Ces références encadrent le choix de site, l'état encore ouvert de l'architecture Mars, la démonstration MOXIE et la qualification industrielle. Les valeurs d'usine, de disponibilité et de chantier restent des scénarios Delta-Sierra clairement identifiés.

- [NASA — Mars Architecture Trade Space](#) — 2026 status of the still-open Mars architecture trade space.
- [NASA NTRS — Human Mars Landing Site and Surface Operations](#) — Exploration Zone concept and roughly 100 km regions-of-interest framework.
- [NASA/JPL — MOXIE completes Mars mission](#) — 122 g total O₂, up to 12 g/h, at least 98% purity.
- [NIST — In-Situ Metrology for Metal Additive Manufacturing](#) — 2026 measurement-science roadmap for qualification-ready metal AM.
- [NASA TechPort — MARS-C](#) — Source primaire ou institutionnelle utilisée pour les définitions, le statut technologique ou les données du module.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Aire de recherche et distance de mobilité	Search area and mobility distance	PASS
02	Score multicritère de site	Multi-criteria site score	PASS
03	Capacité réellement prête	Actually ready capacity	PASS
04	Réserve d'énergie critique	Critical energy reserve	PASS
05	Variation d'un stock	Inventory change	PASS

#	Français	English	Statut
06	Masse de blindage	Shielding mass	PASS
07	Temps productif et temps calendrier	Productive time and calendar time	PASS
08	Masse géométrique de matériau	Geometric material mass	PASS
09	Rayon sûr de mobilité	Safe mobility radius	PASS
10	Production annuelle ISRU	Annual ISRU production	PASS
11	Production annuelle générique	Generic annual production	PASS
12	Charge quotidienne de l'atelier	Daily workshop workload	PASS
13	Capacité qualifiée réellement livrable	Qualified deliverable capacity	PASS
14	Couverture d'une compétence critique	Critical-skill coverage	PASS
15	Décision sûre et traçable	Safe and traceable decision	PASS
16	Capacité limitée par le goulot d'étranglement	Bottleneck-limited capacity	PASS
17	Marge de survie en mode dégradé	Degraded-mode survival margin	PASS
18	Tableau de bord intégré de soutenabilité	Integrated sustainability dashboard	PASS