

Déchets, recyclage et boucles matière



Équipage travaillant autour de boucles biologiques et de recyclage dans un habitat martien.

Visualisation conceptuelle — un déchet ne devient ressource que si collecte, séparation, traitement, contrôle qualité et réemploi sûr ferment réellement la boucle.

Transformer les déchets d'une implantation martienne en flux caractérisés, triés et valorisés, sans confondre recyclage théorique et boucle réellement exploitable.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Déchets, recyclage et boucles matière: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « recyclage », et quel repère issu de « boucle matière » permet de vérifier la décision?

Intuition. Chaque kilogramme de matière importée est précieux. Une boucle de déchets doit distinguer ce qui peut être réutilisé, recyclé, traité ou stocké sans créer de nouvelle contamination.



Comprendre avant de calculer

Chaque kilogramme de matière importée est précieux.



recyclage

Définition sans prérequis.



boucle matière

Définition sans prérequis.

Repère concret. Le taux de récupération ne peut dépasser 100 % et n'élimine pas les pertes; vérifiez masse entrante, produit récupéré, résidus et énergie consommée.

- Comprendre avant de calculer — Chaque kilogramme de matière importée est précieux.
- recyclage — Définition sans prérequis.
- boucle matière — Définition sans prérequis.

Parcours conseillé pour « Déchets, recyclage et boucles matière »: modules 00 à 46 selon le sujet. Dans « Déchets, recyclage et boucles matière », l'objectif est de comprendre pourquoi une notion antérieure intervient dans la décision étudiée, pas d'en réciter la notation.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 47

Comprendre avant de calculer

Chaque kilogramme de matière importée est précieux. Une boucle de déchets doit distinguer ce qui peut être réutilisé, recyclé, traité ou stocké sans créer de nouvelle contamination.

Progression du module — déchet; recyclage; boucle matière; tri à la source.

déchet

Définition sans prérequis. Un **déchet** est une matière ou un objet dont l'usage initial est terminé, mais qui peut encore contenir des ressources récupérables

ou présenter des risques.

Scène concrète. Un emballage polymère peut devenir matière première, combustible de procédé ou rebut selon la technologie locale.

Contrôle mental. Un **déchet** doit être caractérisé par matière, danger, volume et destination; mélanger des flux incompatibles peut rendre impossible un recyclage qui était possible séparément.

Piège à éviter. Appeler quelque chose « déchet » ne signifie pas qu'il n'a plus de valeur; l'analyse doit suivre matière, contamination et énergie de récupération.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **déchet** » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Exercice guidé — déchet

Situation à reconnaître. Un emballage polymère peut devenir matière première, combustible de procédé ou rebut selon la technologie locale.

Vérification demandée. Un déchet doit être caractérisé par matière, danger, volume et destination; mélanger des flux incompatibles peut rendre impossible un recyclage qui était possible séparément.

Erreur à écarter. Appeler quelque chose « déchet » ne signifie pas qu'il n'a plus de valeur; l'analyse doit suivre matière, contamination et énergie de récupération.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un déchet est une matière ou un objet dont l'usage initial est terminé, mais qui peut encore contenir des ressources récupérables ou présenter des risques.

Test du cas

Un déchet doit être caractérisé par matière, danger, volume et destination; mélanger des flux incompatibles peut rendre impossible un recyclage qui était possible séparément.

Piège exclu

Appeler quelque chose « déchet » ne signifie pas qu'il n'a plus de valeur; l'analyse doit suivre matière, contamination et énergie de récupération.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « déchet » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Quantification

déchet: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

recyclage

Définition sans prérequis. Le **recyclage** transforme une matière usagée afin de la réintroduire dans un usage, souvent avec des pertes de qualité, de masse ou d'énergie.

Scène concrète. Un métal propre est généralement plus simple à recycler qu'un composite multi-matériaux contaminé.

Contrôle mental. Le **taux de récupération** ne peut dépasser 100 % et n'élimine pas les pertes; vérifiez masse entrante, **produit** récupéré, résidus et énergie consommée.

Piège à éviter. Un taux de recyclage annoncé sans expliquer les pertes, les rejets et la qualité du produit recyclé est incomplet.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [recyclage](#) » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Exercice guidé — recyclage

Situation à reconnaître. Un métal propre est généralement plus simple à recycler qu'un composite multi-matériaux contaminé.

Vérification demandée. Le taux de récupération ne peut dépasser 100 % et n'élimine pas les pertes; vérifiez masse entrante, produit récupéré, résidus et énergie consommée.

Erreur à écarter. Un taux de recyclage annoncé sans expliquer les pertes, les rejets et la qualité du produit recyclé est incomplet.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le recyclage transforme une matière usagée afin de la réintroduire dans un usage, souvent avec des pertes de qualité, de masse ou d'énergie.

Test du cas

Le taux de récupération ne peut dépasser 100 % et n'élimine pas les pertes; vérifiez masse entrante, produit récupéré, résidus et énergie consommée.

Piège exclu

Un taux de recyclage annoncé sans expliquer les pertes, les rejets et la qualité du produit recyclé est incomplet.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « [recyclage](#) » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Termes du corrigé. [observation](#)

boucle matière

Définition sans prérequis. Une **boucle matière** suit une substance depuis son entrée jusqu'aux usages, transformations, pertes, récupération et stockage.

Scène concrète. L'eau peut passer boisson → **eaux grises** → traitement → eau technique → nouveau traitement.

Contrôle mental. Sur une longue durée, toute perte nette doit être compensée par un stock ou une production locale; une boucle déclarée fermée avec fuite permanente finit nécessairement par se vider.

Piège à éviter. Une boucle dite fermée possède toujours des limites pratiques: fuites, purges, résidus et accumulation de contaminants.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **boucle matière** » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Exercice guidé — boucle matière

Situation à reconnaître. L'eau peut passer boisson → **eaux grises** → traitement → eau technique → nouveau traitement.

Vérification demandée. Sur une longue durée, toute perte nette doit être compensée par un stock ou une production locale; une boucle déclarée fermée avec fuite permanente finit nécessairement par se vider.

Erreur à écarter. Une boucle dite fermée possède toujours des limites pratiques: fuites, purges, résidus et accumulation de contaminants.

Corrigé raisonné

Sens précis	Une boucle matière suit une substance depuis son entrée jusqu'aux usages, transformations, pertes, récupération et stockage.
Test du cas	Sur une longue durée, toute perte nette doit être compensée par un stock ou une production locale; une boucle déclarée fermée avec fuite permanente finit nécessairement par se vider.
Piège exclu	Une boucle dite fermée possède toujours des limites pratiques: fuites, purges, résidus et accumulation de contaminants.
Conséquence opérationnelle	Dans ce module, une erreur sur « boucle matière » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Quantification

boucle matière: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

boucle matière: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

tri à la source

Définition sans prérequis. Le tri à la source sépare les flux avant qu'ils ne se mélangent, ce qui peut réduire l'énergie et la complexité nécessaires au recyclage.

Scène concrète. Séparer métal, polymère propre et déchet biologique évite de contaminer des matières facilement réutilisables.

Contrôle mental. Le tri doit avoir lieu avant que les flux ne se contaminent mutuellement; si la séparation intervient trop tard, le taux de récupération réel baisse même si le procédé aval est performant.

Piège à éviter. Un tri trop complexe peut échouer opérationnellement si l'équipage ne peut pas l'appliquer de manière fiable.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « tri à la source » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Exercice guidé — tri à la source

Situation à reconnaître. Séparer métal, polymère propre et déchet biologique évite de contaminer des matières facilement réutilisables.

Vérification demandée. Le tri doit avoir lieu avant que les flux ne se contaminent mutuellement; si la séparation intervient trop tard, le taux de récupération réel baisse même si le procédé aval est performant.

Erreur à écarter. Un tri trop complexe peut échouer opérationnellement si l'équipage ne peut pas l'appliquer de manière fiable.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le tri à la source sépare les flux avant qu'ils ne se mélangent, ce qui peut réduire l'énergie et la complexité nécessaires au recyclage.

Test du cas

Le tri doit avoir lieu avant que les flux ne se contaminent mutuellement; si la séparation intervient trop tard, le taux de récupération réel baisse même si le procédé aval est performant.

Piège exclu

Un tri trop complexe peut échouer opérationnellement si l'équipage ne peut pas l'appliquer de manière fiable.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « tri à la source » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé.

Termes du corrigé. [vérification](#)

Quantification

tri à la source: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

tri à la source: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Étude intégrée — Déchets, recyclage et boucles matière

Situation à analyser. Chaque kilogramme de matière importée est précieux. Une boucle de déchets doit distinguer ce qui peut être réutilisé, recyclé, traité ou stocké sans créer de nouvelle contamination.

- **déchet:** Un emballage polymère peut devenir matière première, combustible de procédé ou rebut selon la technologie locale. Contrôle attendu: Un déchet doit être caractérisé par matière, danger, volume et destination; mélanger des flux incompatibles peut rendre impossible un recyclage qui était possible séparément.
- **recyclage:** Un métal propre est généralement plus simple à recycler qu'un composite multi-matériaux contaminé. Contrôle attendu: Le taux de récupération ne peut dépasser 100 % et n'élimine pas les pertes; vérifiez masse entrante, produit récupéré, résidus et énergie consommée.
- **boucle matière:** L'eau peut passer boisson → eaux grises → traitement → eau technique → nouveau traitement. Contrôle attendu: Sur une longue durée, toute perte nette doit être compensée par un stock ou une production locale; une boucle déclarée fermée avec fuite permanente finit nécessairement par se vider.
- **tri à la source:** Séparer métal, polymère propre et déchet biologique évite de contaminer des matières facilement réutilisables. Contrôle attendu: Le tri doit avoir lieu avant que les flux ne se contaminent mutuellement; si la séparation intervient trop tard, le taux de récupération réel baisse même si le procédé aval est performant.

Le diagnostic ne doit pas confondre « déchet » et « recyclage ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Un emballage polymère peut devenir matière première, combustible de procédé ou rebut selon la technologie locale. Le second

doit être contrôlé autrement: Le taux de récupération ne peut dépasser 100 % et n'élimine pas les pertes; vérifiez masse entrante, produit récupéré, résidus et énergie consommée.

Une seconde vérification croise « boucle matière » et « tri à la source ». Gardez comme alerte « Une boucle dite fermée possède toujours des limites pratiques: fuites, purges, résidus et accumulation de contaminants. »; pour « tri à la source », utilisez plutôt ce test: Le tri doit avoir lieu avant que les flux ne se contaminent mutuellement; si la séparation intervient trop tard, le taux de récupération réel baisse même si le procédé aval est performant.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Déchets, recyclage et boucles matière », classez les indices selon « déchet » (Un déchet doit être caractérisé par matière, danger, volume et destination; mélanger des flux incompatibles peut rendre impossible un recyclage qui était possible séparément.), « recyclage » (Le taux de récupération ne peut dépasser 100 % et n'élimine pas les pertes; vérifiez masse entrante, produit récupéré, résidus et énergie consommée.), « boucle matière » (Sur une longue durée, toute perte nette doit être compensée par un stock ou une production locale; une boucle déclarée fermée avec fuite permanente finit nécessairement par se vider.), « tri à la source » (Le tri doit avoir lieu avant que les flux ne se contaminent mutuellement; si la séparation intervient trop tard, le taux de récupération réel baisse même si le procédé aval est performant.) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour déchet, Dans ce module, une erreur sur « déchet » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé. Le garde-fou principal est: Appeler quelque chose « déchet » ne signifie pas qu'il n'a plus de valeur; l'analyse doit suivre matière, contamination et énergie de récupération. Pour recyclage, Dans ce module,

une erreur sur « recyclage » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé. Le garde-fou principal est: Un taux de recyclage annoncé sans expliquer les pertes, les rejets et la qualité du produit recyclé est incomplet. Pour boucle matière, Dans ce module, une erreur sur « boucle matière » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé. Le garde-fou principal est: Une boucle dite fermée possède toujours des limites pratiques: fuites, purges, résidus et accumulation de contaminants. Pour tri à la source, Dans ce module, une erreur sur « tri à la source » peut saturer le stockage, contaminer un flux recyclable ou créer une dépendance à un consommable importé. Le garde-fou principal est: Un tri trop complexe peut échouer opérationnellement si l'équipage ne peut pas l'appliquer de manière fiable.

taux de récupération = masse utile récupérée / masse du flux entrant

Question de départ

Quel est le résultat de la normalisation de masse utile récupérée par masse du flux entrant, noté taux de récupération, dans «Corrigé de synthèse»?

Lecture à voix haute

Version parlée: «taux de récupération égale masse utile récupérée divisé par masse du flux entrant».

Symboles, prononciation et sens

taux de récupération: fraction massique du flux entrant récupérée sous forme utile; masse utile récupérée: masse de matière effectivement réutilisable; masse du flux entrant: masse totale entrant dans le procédé.

Unités

Les deux masses dans la même unité; taux de récupération sans dimension entre 0 et 1.

Origine et statut des valeurs

Avant substitution, classer chaque nombre selon sa provenance. Si une donnée nécessaire manque, la démonstration reste symbolique au lieu d'inventer une entrée.

Pourquoi cette opération

Le quotient rapporte la sortie utile à la masse traitée.

Substitution et calcul

Construire le numérateur avec masse utile récupérée et le dénominateur avec masse du flux entrant; n'utiliser que les nombres tracés dans «Corrigé de synthèse», puis calculer le ratio.

Saisie sur calculatrice

Évaluer les sous-expressions de masse utile récupérée et masse du flux entrant, noter leurs résultats, puis diviser le premier par le second; conserver la précision jusqu'au résultat final.

Estimation mentale

Sans calculatrice, déterminer si masse utile récupérée représente environ une moitié, un multiple ou plusieurs ordres de grandeur de masse du flux entrant; taux de récupération doit refléter ce rapport.

Contrôle indépendant

$\text{taux} \times \text{masse du flux entrant}$ doit redonner la masse utile récupérée.

Interprétation physique ou opérationnelle

Dans ce calcul de «Corrigé de synthèse», la relation «taux de récupération = masse utile récupérée / masse du flux entrant» n'a de portée qu'avec une définition explicite du système étudié, des unités employées et des hypothèses retenues.

Traduction en français courant

Formulé sans notation, taux de récupération est le rapport de la quantité masse utile récupérée à la quantité de référence masse du flux entrant.

Variation / sensibilité

Changer masse utile récupérée de $\pm 10\%$ doit modifier taux de récupération d'environ $\pm 10\%$ si masse du flux entrant reste fixe; tester ensuite masse du flux entrant seul pour observer l'effet réciproque.

Limite / hypothèse

Un dénominateur nul rend «taux de récupération = masse utile récupérée / masse du flux entrant» indéfini; un dénominateur provenant d'un autre périmètre rendrait taux de récupération numériquement possible mais conceptuellement faux.

Progression de maîtrise

1. déchet: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. recyclage: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. boucle matière: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. tri à la source: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Déchets, recyclage et boucles matière »: confrontez « déchet » à « recyclage »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 47 — déchet, recyclage, boucle matière, tri à la source. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Lire « déchet » comme un problème concret de « Déchets, recyclage et boucles matière » et non comme une définition à réciter.
- Contrôler un résultat chiffré lié à « déchet » par une seconde méthode simple.
- Dire quelle donnée supplémentaire manque avant de trancher sur « recyclage ».
- Choisir une réponse opérationnelle cohérente avec « boucle matière » et ses marges.

1. Un déchet n'est pas une catégorie, mais un flux à caractériser

Une colonie ne peut pas gérer « les déchets » comme un bloc unique. Emballages polymères, textiles usés, filtres, résidus alimentaires, métaux, verre, boues biologiques, consommables médicaux et pièces contaminées n'ont ni les mêmes risques ni les mêmes voies de valorisation. La première étape est donc un [inventaire](#) massif par famille, assorti d'une [fréquence](#) de production et d'un niveau de danger. Cette comptabilité paraît administrative, mais elle décide du volume des stockages, de la puissance de traitement, des protections et des [pièces de rechange](#) nécessaires. Un [système](#) de recyclage dimensionné sur une masse [moyenne](#) peut être saturé par une campagne de maintenance qui produit soudain plusieurs dizaines de kilogrammes d'isolants et de pièces composites.

La NASA documente le Refabricator comme une démonstration de recyclage de polymères vers une matière de [fabrication additive](#). [NASA — Refabricator](#)

2. Hiérarchie: éviter, réemployer, réparer, recycler, éliminer

Le meilleur déchet est celui que l'architecture n'a pas créé. Une conception martienne privilégie donc les emballages servant ensuite de bacs, panneaux, calages ou matière première. Le réemploi conserve davantage de valeur que la destruction suivie d'un recyclage coûteux. Une pièce métallique réusinable est souvent plus utile qu'un métal refondu avec pertes et forte consommation énergétique. Le recyclage vient après la réduction, le réemploi et la réparation. Enfin, certains flux devront être isolés ou stockés durablement lorsque la décontamination coûterait davantage de ressources qu'elle n'en restitue. L'objectif n'est pas le slogan « zéro déchet », mais la minimisation du coût total en masse importée, énergie, temps équipement, risques et pertes de matière.

3. Tri à la source et contamination croisée

Un recyclage performant commence au point où le déchet est produit. Mélanger métal propre, polymère, nourriture humide et produit chimique transforme quatre flux gérables en un mélange complexe. L'habitat prévoit des contenants identifiés, des procédures et une formation afin de protéger la qualité matière. Les déchets biologiques ou médicaux peuvent nécessiter un

confinement temporaire et une étape de désinfection. Les poussières martiennes introduites par les EVA ajoutent un problème: un textile ou un joint apparemment recyclable peut transporter des particules abrasives ou réactives. La qualité du tri devient donc une fonction d'ingénierie au même titre que la capacité nominale d'un compacteur ou d'un broyeur.

4. Polymères: récupérer une matière, pas seulement un volume

Les polymères sont attractifs car ils peuvent être broyés, extrudés et éventuellement réutilisés en fabrication additive. Mais chaque cycle peut modifier viscosité, [humidité](#), propriétés mécaniques et contamination. La boucle doit distinguer les familles de polymères, limiter les mélanges incompatibles et imposer un contrôle qualité du filament ou du granulé produit. Une pièce non critique, comme un support de rangement, peut accepter une matière recyclée aux performances variables; une pièce pressurisée ou structurelle ne le peut pas sans qualification. Le système de production locale doit donc connaître l'historique matière au lieu de considérer qu'un kilogramme de plastique recyclé vaut automatiquement un kilogramme de matière vierge.

5. Métaux, verre et matériaux complexes

Les métaux conservent une valeur élevée mais leur récupération peut exiger tri d'alliage, découpe, nettoyage, fusion ou usinage. Le verre peut être réemployé comme granulat, protection ou matière de fusion selon la qualité. Les composites sont plus difficiles: une pièce associant fibres, résine, inserts métalliques et adhésifs ne se sépare pas facilement. Ces flux influencent donc la conception initiale. Favoriser des assemblages démontables, identifier les alliages et limiter les matériaux indissociables peut réduire la dette de recyclage plusieurs années plus tard. C'est une application directe de la conception pour démontage et [maintenance](#).

6. Déchets organiques, carbone et nutriments

Les résidus alimentaires et biomasses végétales contiennent carbone, azote, phosphore, eau et micronutriments. Leur valorisation peut passer par séchage, traitement biologique, oxydation contrôlée ou incorporation à des procédés agricoles. Mais une boucle biologique mal surveillée

peut aussi concentrer pathogènes ou contaminants chimiques. Le simple fait qu'une matière soit « organique » ne la rend pas automatiquement saine pour une culture. Les chaînes nourriture-déchets-culture doivent donc être couplées au contrôle microbiologique, à la qualité de l'eau et à la traçabilité des intrants.

7. Stocker quand traiter immédiatement est une mauvaise décision

Une implantation petite ne dispose pas nécessairement d'une machine optimale pour chaque déchet. Il peut être rationnel de compacter et stocker un flux propre pendant des mois avant une campagne de traitement. Cette stratégie évite de faire fonctionner souvent un équipement énergivore à faible charge et réduit les opérations équipement. Le stockage doit cependant contrôler incendie, dégazage, odeurs, stabilité chimique et volume. Le calendrier de recyclage devient alors une décision de planification comparable à une campagne de maintenance ou de production [ISRU](#).

8. Mesurer la fermeture réelle de la boucle

Le taux de recyclage doit être défini avec précision. Une boucle qui récupère 90 % de la masse mais consomme un consommable importé rare à chaque cycle n'est pas indépendante. Il faut donc suivre masse récupérée, pertes irréversibles, énergie, eau, consommables, temps équipement et qualité du produit. L'indicateur utile est la réduction effective des importations et du risque opérationnel, pas le seul pourcentage de matière entrant dans une machine.

Approfondissement: économie de masse importée

La valeur d'une boucle se mesure finalement par ce qu'elle évite d'importer. Il faut donc comparer masse des machines de recyclage, pièces et consommables nécessaires avec la masse de matière économisée sur plusieurs années. Un équipement de 800 kg qui économise 50 kg par an n'est pas automatiquement intéressant; un petit broyeur qui transforme chaque semaine des emballages en matière utile peut l'être beaucoup plus. Le calcul doit inclure durée de vie, maintenance, [disponibilité](#) et diversité des usages du produit recyclé.

Approfondissement: incendie, dégazage et stockage

Le stockage de déchets modifie le risque incendie et la qualité de l'atmosphère. Polymères, batteries hors service et textiles peuvent créer des charges combustibles; certaines matières dégazent ou réagissent après contamination. Les volumes de stockage doivent donc être ventilés ou isolables selon le flux, surveillés et compatibles avec la stratégie incendie de l'habitat. Un compactage qui réduit très bien le volume mais rend ensuite impossible l'inspection d'une batterie endommagée peut déplacer le risque au lieu du réduire.

Approfondissement: bilan matière avec qualité dégradée

Une boucle matière doit distinguer masse récupérée et masse réellement réutilisable. Si un kilogramme de polymère récupéré ne satisfait plus les tolérances d'une pièce mécanique, il peut encore servir à des usages moins exigeants. Le système gagne à définir plusieurs classes qualité plutôt qu'une frontière binaire recyclable/non recyclable. Cette cascade d'usage prolonge la valeur de la matière tout en évitant de qualifier abusivement des pièces critiques. Elle impose une traçabilité de lot, des essais simples et des règles indiquant quelles familles de pièces acceptent quelle classe de matière.

9. Exemple calculé: masse évitée par une boucle polymère

Une implantation consomme 18 kg de polymères par semaine. Si 70 % sont récupérables et si le procédé de recyclage restitue 85 % de cette masse sous forme utilisable, la production recyclée vaut $18 \times 0,70 \times 0,85 = 10,71$ kg par semaine. Sur 52 semaines, cela représente environ 557 kg de matière secondaire. Mais $18 - 10,71 = 7,29$ kg restent à fournir, stocker ou éliminer chaque semaine: le recyclage réduit fortement la dépendance sans la supprimer.

Étude de cas calculée: dimensionner le volume annuel d'un résidu non recyclé

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE — Après tri et recyclage, il reste 7,29 kg de polymères par semaine. On retient une masse volumique apparente compactée de 150 kg/m^3 et une marge de stockage de 30 %.

On note m_s la masse hebdomadaire, en kg/semaine; m_a la masse annuelle, en kg/an; ρ la masse volumique apparente, en kg/m³; V le volume, en m³; m la marge, sans unité.

$m_a = 7,29 \times 52 = 379,08$ kg/an. $V = m_a \div \rho = 379,08 \div 150 = 2,5272$ m³/an. Avec 30 % de marge: $V_{\text{plan}} = 2,5272 \times 1,30 = 3,28536$ m³, soit environ 3,29 m³/an.

La masse ne suffit pas à dimensionner une zone de déchets. La compaction et la marge transforment le flux massique en besoin volumique; la masse volumique choisie est une hypothèse pédagogique.

10. Exercice

Pour une base produisant chaque semaine 25 kg de polymères, 12 kg de métal, 30 kg de déchets organiques et 8 kg de flux non recyclables, proposer une politique de tri, stockage et traitement. Calculer les masses annuelles, dimensionner trois zones de stockage et identifier les deux flux dont une saturation deviendrait la plus critique.

11. Solution raisonnée

La première étape est de convertir chaque débit hebdomadaire en débit annuel, puis de distinguer les flux stables des campagnes ponctuelles. Les organiques imposent un traitement rapide ou un confinement sanitaire; les métaux peuvent attendre une campagne; les polymères exigent un tri fin par famille. Le flux non recyclable doit disposer d'un stockage de long terme. Une bonne solution explicite aussi les consommables de traitement, l'énergie et la stratégie si une machine reste indisponible plusieurs semaines.

12. Mini-projet de validation

Établir le plan matière d'un habitat de 24 personnes pendant deux ans: inventaire des déchets, points de tri, équipements, bilans massiques, stockage tampon, qualité matière, procédures de contamination, stratégie de panne et indicateurs de fermeture de boucle.

Boucles matière : le déchet est d'abord un flux à caractériser

Une colonie ne devient pas circulaire parce qu'elle possède une machine de recyclage. Elle doit connaître ce qui entre dans chaque flux, ce qui peut être réutilisé sans risque, ce qui exige un traitement, ce qui s'accumule dans la boucle et ce qui doit être purgé. Les bilans matière rendent visibles les pertes et les contaminants cachés.

Séparer les flux avant de vouloir les valoriser

Mélanger emballages, biomasse, solvants, métaux, textiles, déchets médicaux et résidus biologiques détruit souvent la valeur de récupération. Le tri est une opération d'ingénierie qui réduit l'énergie de traitement et évite de contaminer des flux propres.

Une boucle fermée n'est jamais parfaitement fermée

Impuretés, sels, composés organiques, particules et produits de dégradation peuvent s'accumuler. Une purge contrôlée, un appoint de matière vierge et une mesure régulière de qualité sont parfois nécessaires pour maintenir le procédé stable.

La meilleure boucle est celle qui évite un import critique

La priorité n'est pas de recycler tout avec le même effort. On classe les flux selon masse importée, criticité, difficulté de traitement, énergie, risques et qualité du produit récupéré. Cela oriente l'investissement vers les boucles qui achètent réellement de l'autonomie.

► Exercice — décider quoi recycler en premier

Pour relier cet atelier aux références déjà utilisées par le module, consulter [NASA — Refabricator](#) et [NASA — Environmental Control and Life Support Systems](#).

Sources primaires et passerelles

- [NASA — Environmental Control and Life Support Systems](#)
- [NASA — 3D-Printed Habitat Challenge](#)