

Génie civil, régolithe et construction martienne



Astronautes supervisant une construction additive à base de régolithe sur Mars.

Visualisation conceptuelle — le génie civil martien couple excavation, propriétés des matériaux, blindage, fondations, engins de chantier et vérification.

Passer de la structure transportée depuis la Terre à un site construit: sols, terrassement, fondations, blindage, routes, impression et **contrôle** géométrique.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Génie civil, régolithe et construction martienne: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « régolithe », et quel repère issu de « portance » permet de vérifier la décision?

Intuition. Une colonie doit préparer un sol, des fondations et des protections avec un matériau local dont les propriétés varient d'un site à l'autre.



Comprendre avant de calculer

Une colonie doit préparer un sol, des fondations et des protections avec un matériau local dont les propriétés varient d'un site à l'autre.



régolithe

Définition sans prérequis.



portance

Définition sans prérequis.

Repère concret. Une colonie doit préparer un sol, des fondations et des protections avec un matériau local dont les propriétés varient d'un site à l'autre.

- Comprendre avant de calculer — Une colonie doit préparer un sol, des fondations et des protections avec un matériau local dont les propriétés varient d'un site à l'autre.
- régolithe — Définition sans prérequis.
- portance — Définition sans prérequis.

Avant « Génie civil, régolithe et construction martienne », utilisez modules 00 à 46 selon le sujet. Dans « Génie civil, régolithe et construction martienne », une notation indispensable est redéfinie au moment où elle devient utile au raisonnement.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 48

Comprendre avant de calculer

Une colonie doit préparer un sol, des fondations et des protections avec un matériau local dont les propriétés varient d'un [site](#) à l'autre.

Progression du module — régolithe; portance; compactage; frittage.

régolithe

Définition sans prérequis. Le **régolithe** est la couche de matériaux meubles et fragmentés couvrant une surface planétaire. Sur Mars, granulométrie, minéralogie, glace et **perchlorates** varient selon le site.

Scène concrète. Un remblai destiné à protéger contre le rayonnement n'a pas les mêmes exigences qu'un matériau fritté porteur.

Contrôle mental. Ne supposez pas qu'un sol martien se comporte comme un sable terrestre standard: granulométrie, cohésion, glace, sels et densité doivent être mesurés avant de dimensionner.

Piège à éviter. Parler du « régolithe martien » comme d'un matériau unique cache une variabilité importante.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **régolithe** » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Exercice guidé — régolithe

Situation à reconnaître. Un remblai destiné à protéger contre le rayonnement n'a pas les mêmes exigences qu'un matériau fritté porteur.

Vérification demandée. Ne supposez pas qu'un sol martien se comporte comme un sable terrestre standard: granulométrie, cohésion, glace, sels et densité doivent être mesurés avant de dimensionner.

Erreur à écarter. Parler du « régolithe martien » comme d'un matériau unique cache une variabilité importante.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le régolithe est la couche de matériaux meubles et fragmentés couvrant une surface planétaire. Sur Mars, granulométrie, minéralogie, glace et perchlorates varient selon le site.

Test du cas

Ne supposez pas qu'un sol martien se comporte comme un sable terrestre standard: granulométrie, cohésion, glace, sels et densité doivent être mesurés avant de dimensionner.

Piège exclu

Parler du « régolithe martien » comme d'un matériau unique cache une variabilité importante.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « régolithe » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Termes du corrigé. [observation](#)

Quantification

régolithe: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

portance

Définition sans prérequis. La [portance](#) décrit la capacité d'un sol ou d'une fondation à supporter une charge sans rupture ou [déformation](#) excessive.

Scène concrète. Les pieds d'un habitat concentrent les charges; une surface plus grande peut réduire la [pression moyenne](#) sur le sol.

Contrôle mental. Une charge plus forte ou une surface d'appui plus petite augmente la pression au sol; la contrainte transmise doit rester sous la capacité portante avec [marge](#).

Piège à éviter. Une bonne résistance à la compression d'un échantillon ne suffit pas à garantir la stabilité d'une fondation entière.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « portance » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Exercice guidé — portance

Situation à reconnaître. Les pieds d'un habitat concentrent les charges; une surface plus grande peut réduire la pression moyenne sur le sol.

Vérification demandée. Une charge plus forte ou une surface d'appui plus petite augmente la pression au sol; la contrainte transmise doit rester sous la capacité portante avec marge.

Erreur à écarter. Une bonne résistance à la compression d'un échantillon ne suffit pas à garantir la stabilité d'une fondation entière.

Corrigé raisonné

Sens précis

La portance décrit la capacité d'un sol ou d'une fondation à supporter une charge sans rupture ou déformation excessive.

Test du cas

Une charge plus forte ou une surface d'appui plus petite augmente la pression au sol; la contrainte transmise doit rester sous la capacité portante avec marge.

Piège exclu

Une bonne résistance à la compression d'un échantillon ne suffit pas à garantir la stabilité d'une fondation entière.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « portance » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Quantification

portance: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

compactage

Définition sans prérequis. Le **compactage** augmente la densité d'un matériau granulaire en réduisant les vides par vibration, pression ou autre **énergie mécanique**.

Scène concrète. Une piste de rover peut nécessiter un traitement local pour limiter orniérage et poussière.

Contrôle mental. Un **compactage** utile doit augmenter densité et stabilité jusqu'à un optimum; davantage de passes ou d'énergie ne garantit pas une amélioration indéfinie.

Piège à éviter. Compacter davantage n'est pas toujours meilleur: énergie, structure des grains et glace éventuelle peuvent imposer un optimum.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **compactage** » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Exercice guidé — compactage

Situation à reconnaître. Une piste de rover peut nécessiter un traitement local pour limiter orniérage et poussière.

Vérification demandée. Un compactage utile doit augmenter densité et stabilité jusqu'à un optimum; davantage de passes ou d'énergie ne garantit pas une amélioration indéfinie.

Erreur à écarter. Compacter davantage n'est pas toujours meilleur: énergie, structure des grains et glace éventuelle peuvent imposer un optimum.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le compactage augmente la densité d'un matériau granulaire en réduisant les vides par vibration, pression ou autre énergie mécanique.

Test du cas

Un compactage utile doit augmenter densité et stabilité jusqu'à un optimum; davantage de passes ou d'énergie ne garantit pas une amélioration indéfinie.

Piège exclu

Compacter davantage n'est pas toujours meilleur: énergie, structure des grains et glace éventuelle peuvent imposer un optimum.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « compactage » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Termes du corrigé. [vérification](#)

Quantification

compactage: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

frittage

Définition sans prérequis. Le [frittage](#) lie des particules par chauffage ou autre apport d'énergie sans nécessairement fondre complètement toute la matière.

Scène concrète. Le régolithe peut être consolidé pour produire pavés, protections ou éléments selon composition et procédé.

Contrôle mental. Le matériau doit atteindre une combinaison suffisante de température et de durée pour créer des liaisons sans dégrader sa géométrie ou sa composition; contrôlez donc procédé et propriétés finales.

Piège à éviter. Un objet fritté doit être qualifié: porosité, fissures, résistance et cycles thermiques peuvent différer d'un matériau terrestre industriel.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [frittage](#) » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Exercice guidé — frittage

Situation à reconnaître. Le régolithe peut être consolidé pour produire pavés, protections ou éléments selon composition et procédé.

Vérification demandée. Le matériau doit atteindre une combinaison suffisante de température et de durée pour créer des liaisons sans dégrader sa géométrie ou sa composition; contrôlez donc procédé et propriétés finales.

Erreur à écarter. Un objet fritté doit être qualifié: porosité, fissures, résistance et cycles thermiques peuvent différer d'un matériau terrestre industriel.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le frittage lie des particules par chauffage ou autre apport d'énergie sans nécessairement fondre complètement toute la matière.

Test du cas

Le matériau doit atteindre une combinaison suffisante de température et de durée pour créer des liaisons sans dégrader sa géométrie ou sa composition; contrôlez donc procédé et propriétés finales.

Piège exclu

Un objet fritté doit être qualifié: porosité, fissures, résistance et cycles thermiques peuvent différer d'un matériau terrestre industriel.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « frittage » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel.

Quantification

frittage: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

Étude intégrée — Génie civil, régolithe et construction martienne

Situation à analyser. Une colonie doit préparer un sol, des fondations et des protections avec un matériau local dont les propriétés varient d'un site à l'autre.

- **régolithe:** Un remblai destiné à protéger contre le rayonnement n'a pas les mêmes exigences qu'un matériau fritté porteur. Contrôle attendu: Ne supposez pas qu'un sol martien se comporte comme un sable terrestre standard: granulométrie, cohésion, glace, sels et densité doivent être mesurés avant de dimensionner.
- **portance:** Les pieds d'un habitat concentrent les charges; une surface plus grande peut réduire la pression moyenne sur le sol. Contrôle attendu: Une charge plus forte ou une surface d'appui plus petite augmente la pression au sol; la contrainte transmise doit rester sous la capacité portante avec marge.
- **compactage:** Une piste de rover peut nécessiter un traitement local pour limiter orniérage et poussière. Contrôle attendu: Un compactage utile doit augmenter densité et stabilité jusqu'à un optimum; davantage de passes ou d'énergie ne garantit pas une amélioration indéfinie.
- **frittage:** Le régolithe peut être consolidé pour produire pavés, protections ou éléments selon composition et procédé. Contrôle attendu: Le matériau doit atteindre une combinaison suffisante de température et de durée pour créer des

liaisons sans dégrader sa géométrie ou sa composition; contrôlez donc procédé et propriétés finales.

Le diagnostic ne doit pas confondre « régolithe » et « portance ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Un remblai destiné à protéger contre le rayonnement n'a pas les mêmes exigences qu'un matériau fritté porteur. Le second doit être contrôlé autrement: Une charge plus forte ou une surface d'appui plus petite augmente la pression au sol; la contrainte transmise doit rester sous la capacité portante avec marge.

Une seconde vérification croise « compactage » et « frittage ». Gardez comme alerte « Compacter davantage n'est pas toujours meilleur: énergie, structure des grains et glace éventuelle peuvent imposer un optimum. »; pour « frittage », utilisez plutôt ce test: Le matériau doit atteindre une combinaison suffisante de température et de durée pour créer des liaisons sans dégrader sa géométrie ou sa composition; contrôlez donc procédé et propriétés finales.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Génie civil, régolithe et construction martienne », classez les indices selon « régolithe » (Ne supposez pas qu'un sol martien se comporte comme un sable terrestre standard: granulométrie, cohésion, glace, sels et densité doivent être mesurés avant de dimensionner.), « portance » (Une charge plus forte ou une surface d'appui plus petite augmente la pression au sol; la contrainte transmise doit rester sous la capacité portante avec marge.), « compactage » (Un compactage utile doit augmenter densité et stabilité jusqu'à un optimum; davantage de passes ou d'énergie ne garantit pas une amélioration indéfinie.), « frittage » (Le matériau doit atteindre une combinaison suffisante de température et de durée pour créer des liaisons sans dégrader sa géométrie ou sa composition; contrôlez donc procédé et propriétés finales.) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour régolithe, Dans ce module, une erreur sur « régolithe » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel. Le garde-fou principal est: Parler du « régolithe martien » comme d'un matériau unique cache une variabilité importante. Pour portance, Dans ce module, une erreur sur « portance » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel. Le garde-fou principal est: Une bonne résistance à la compression d'un échantillon ne suffit pas à garantir la stabilité d'une fondation entière. Pour compactage, Dans ce module, une erreur sur « compactage » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel. Le garde-fou principal est: Compacter davantage n'est pas toujours meilleur: énergie, structure des grains et glace éventuelle peuvent imposer un optimum. Pour frittage, Dans ce module, une erreur sur « frittage » peut provoquer tassement, rupture de fondation ou pièce frittée insuffisamment résistante pour un usage structurel. Le garde-fou principal est: Un objet fritté doit être qualifié: porosité, fissures, résistance et cycles thermiques peuvent différer d'un matériau terrestre industriel.

pression moyenne au sol = charge / surface de contact

Question de départ

Dans le contexte «Corrigé de synthèse», quelle réponse numérique fournit la division charge/surface de contact pour pression moyenne au sol?

Lecture à voix haute

Formulation à voix haute: «pression moyenne au sol égale charge divisé par surface de contact».

Symboles, prononciation et sens

pression moyenne au sol: pression mécanique de contact moyenne exercée sur le terrain; charge: force verticale transmise au sol; surface de contact: aire totale qui porte cette force.

Unités

charge en N et surface de contact en m^2 donnent une pression en Pa puisque $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Pour kPa, convertir le résultat. Une surface en km^2 doit être convertie avant un calcul usuel de contact.

Origine et statut des valeurs

La substitution numérique commence par un inventaire des sources des entrées; toute hypothèse d'exercice est nommée, et toute donnée manquante demeure manquante. La section rattache les nombres utilisés à: les dimensions, masse volumique, charges et propriétés du régolithe.

Pourquoi cette opération

La pression de contact mesure la force répartie par unité de surface.

Substitution et calcul

Mettre en correspondance chaque entrée numérique avec charge ou surface de contact; effectuer les changements d'unités avant de former $(\text{charge})/(\text{surface de contact})$, sans valeur implicite.

Saisie sur calculatrice

Utiliser les parenthèses quand charge ou surface de contact contient plusieurs termes; exécuter ensuite la division et conserver assez de chiffres pour contrôler pression moyenne au sol.

Estimation mentale

En première approximation, remplacer charge et surface de contact par des valeurs rondes de même ordre de grandeur. Leur quotient doit encadrer ou approcher pression moyenne au sol.

Contrôle indépendant

Contrôle inverse: pression moyenne $\times$ surface de contact doit redonner la charge verticale.

Interprétation physique ou opérationnelle

«Corrigé de synthèse» fixe le cadre de lecture de «pression moyenne au sol = charge / surface de contact». La valeur calculée reste liée au domaine du modèle, aux unités choisies et aux hypothèses qui ont permis la simplification.

Traduction en français courant

Le résultat pression moyenne au sol se comprend comme une quantité relative: valeur de charge pour une unité correspondante de surface de contact.

Variation / sensibilité

Augmenter charge sans toucher surface de contact élève pression moyenne au sol; augmenter uniquement surface de contact abaisse pression moyenne au sol. Une simulation simple à $\pm 10\%$ quantifie ces deux effets.

Limite / hypothèse

«pression moyenne au sol = charge / surface de contact» suppose une base surface de contact admissible et comparable au numérateur charge. Toute rupture de période, d'échantillon ou de frontière doit être signalée avant calcul.

Progression de maîtrise

1. régolithe: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. portance: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. compactage: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. frittage: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Génie civil, régolithe et construction martienne »: confrontez « régolithe » à « portance »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 48 — régolithe, portance, compactage, frittage. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Expliquer comment « Comprendre avant de calculer » se manifeste dans génie civil, régolithe et construction martienne.
- Refaire un calcul ou une estimation utile pour « régolithe » et contrôler ses unités.
- Identifier une hypothèse fragile ou un mode dégradé associé à « portance ».
- Transformer le résultat en décision vérifiable pour « compactage ».

1. Construire commence par connaître le sol

Avant une fondation, un merlon ou une route, il faut caractériser le terrain. Portance, pente, granulométrie, blocs, poussière et glace éventuelle changent la méthode de construction. Une zone excellente pour l'atterrissage n'est pas automatiquement un bon site pour une structure lourde. Les reconnaissances combinent images, essais de pénétration, observations de roues et prélèvements. Le génie civil martien doit accepter une [incertitude](#) initiale plus grande qu'un chantier terrestre, puis réduire cette incertitude avant de figer l'implantation.

[NASA TechPort](#) décrit des travaux de construction additive utilisant des matériaux indigènes et recyclés pour des habitats hors Terre. [NASA TechPort — construction](#)

2. Terrassement et déplacement de régolithe

Excaver un mètre cube n'est pas seulement vaincre le poids. Il faut générer l'effort de coupe, gérer l'adhérence du véhicule, éviter l'enlèvement, transporter le matériau et contrôler la poussière. La gravité plus faible réduit le poids disponible sur les roues ou chenilles, donc aussi la force transmissible avant patinage. Une pelle très puissante montée sur un châssis trop léger peut être incapable d'utiliser sa [puissance](#). Le dimensionnement doit relier force outil, réaction au sol et stratégie de passes successives.

3. Fondations et tassements

Une structure pressurisée exerce des charges permanentes et des efforts liés à la pression interne. Le support doit limiter tassement différentiel, glissement et rotation. Sur un sol hétérogène, deux appuis voisins peuvent s'enfoncer différemment et imposer des contraintes aux interfaces. Les fondations peuvent s'appuyer sur des plaques, des pieux, des plateformes compactées ou des systèmes réglables. Le choix dépend autant de la capacité de construction que de la géotechnique.

4. Blindage par régolithe: masse utile mais charge réelle

Recouvrir un habitat de régolithe peut augmenter la protection radiologique et thermique, mais cette masse devient une charge structurelle. Il faut connaître [densité](#), épaisseur, géométrie, surcharge locale et chemin de charge. Une couche déposée de façon irrégulière peut charger fortement une coque prévue pour une distribution uniforme. Le plan de blindage doit donc être défini avec la structure, pas ajouté après coup comme une simple opération de bulldozer.

5. Routes, pistes et zones d'atterrissage

Les véhicules de surface ont besoin de trajectoires entretenues. Une piste réduit patinage, abrasion et consommation, mais exige construction et [maintenance](#). Près d'une zone d'atterrissage, le souffle des moteurs peut projeter des particules à grande vitesse; la distance, les merlons et le traitement du sol deviennent des paramètres de sécurité. Le génie civil doit ainsi protéger les habitats, les panneaux, les radiateurs et les voies de circulation des effets indirects des opérations.

6. Construction additive et matériaux locaux

La [fabrication additive](#) peut réduire la masse de coffrages et produire des géométries adaptées, mais elle n'abolit pas les exigences structurelles. Un matériau imprimé doit être caractérisé en compression, traction, fissuration, cycles thermiques et variabilité. L'orientation des couches

peut créer une anisotropie, c'est-à-dire des propriétés différentes selon la direction. Une structure imprimée autonome doit aussi intégrer ouvertures, interfaces et tolérances avec des éléments pressurisés fabriqués autrement.

7. Métrologie du chantier

Un chantier autonome doit savoir si ce qu'il construit correspond réellement au modèle.

Balises, lidar, photogrammétrie et mesures dimensionnelles permettent de comparer le réel au plan. La métrologie détecte pente incorrecte, voilement, déformation ou position erronée d'une [interface](#) avant l'assemblage final. Sans cette boucle mesure-correction, l'automatisation risque de produire rapidement une grande quantité de géométrie incorrecte. La métrologie du chantier constitue ainsi la boucle de vérification géométrique du processus de construction.

8. Maintenance des ouvrages

Une route s'ornièrre, un merlon s'érode, une structure subit des cycles thermiques et une fondation peut évoluer. Le plan civil inclut inspection et réparation. Une fissure n'est pas jugée seulement par sa présence, mais par sa progression. Des repères permanents et des inspections répétées permettent de distinguer défaut stable et dégradation active.

Approfondissement: interfaces bâtiment-systèmes

Une paroi n'est jamais seulement une paroi. Elle reçoit passages de câbles, conduites, trappes, ancrages et équipements. Chaque pénétration peut devenir fuite, pont thermique ou point faible. Les interfaces sont donc normalisées et mesurées avant installation. Une construction locale très performante mais incapable de respecter les tolérances d'un sas ou d'un joint pressurisé ne peut pas être utilisée sans une couche d'adaptation.

Approfondissement: séquence robotique avant équipage

Une partie du chantier peut être réalisée avant l'arrivée humaine: reconnaissance, nivellement, préparation de routes, mise en place de merlons et éventuellement fabrication de structures non pressurisées. Mais la robotisation doit prévoir les échecs: outil coincé, panne de positionnement, tas de régolithe au mauvais endroit. Les opérations précurseurs sont choisies parce qu'elles restent récupérables ou vérifiables à distance, et parce qu'elles réduisent réellement le risque de la première mission habitée.

Approfondissement: géotechnique sous incertitude

Les premiers essais ne décriront jamais parfaitement tout le site. Le plan de construction doit donc intégrer l'incertitude: sondages répartis, marges de portance, zones interdites et capacité à déplacer une fondation avant assemblage définitif. Lorsqu'une glace proche de la surface est possible, creuser peut aussi modifier localement les propriétés du sol. La bonne démarche consiste à lier chaque décision irréversible à un niveau minimal de connaissance géotechnique.

9. Exemple calculé: masse de blindage

Un toit de 60 m^2 reçoit $0,8 \text{ m}$ de régolithe de densité moyenne $1\,500 \text{ kg/m}^3$. Le volume déposé vaut $60 \times 0,8 = 48 \text{ m}^3$ et la masse $48 \times 1\,500 = 72\,000 \text{ kg}$, soit 72 tonnes. Sur Mars, son poids est environ $72\,000 \times 3,71 \approx 267 \text{ kN}$. La structure doit être conçue pour cette charge distribuée et pour les irrégularités locales de dépôt.

Étude de cas calculée: masse de régolithe à préparer pour une berme

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE — Une berme rectangulaire mesure 18 m de long, $2,5 \text{ m}$ de haut et $0,40 \text{ m}$ d'épaisseur. La masse volumique apparente retenue pour le régolithe préparé est $1\,600 \text{ kg/m}^3$ et la marge de traitement 10% .

On note L la longueur, H la hauteur et e l'épaisseur, en mètres; V le volume, en m^3 ; ρ la masse volumique, en kg/m^3 ; M la masse, en kg ; m la marge, sans unité.

$V = L \times H \times e = 18 \times 2,5 \times 0,40 = 18 \text{ m}^3$. $M = V \times \rho = 18 \times 1\,600 = 28\,800 \text{ kg}$. Avec 10 % de marge: $M_{\text{plan}} = 28\,800 \times 1,10 = 31\,680 \text{ kg} = 31,68 \text{ t}$.

Une géométrie simple produit déjà des dizaines de tonnes à excaver, transporter et mettre en place. La densité et la forme sont des hypothèses de calcul, pas les caractéristiques d'un ouvrage réel.

10. Exercice

Dimensionner une plateforme de $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ nécessitant le retrait moyen de $0,25 \text{ m}$ de matériau. Calculer le volume excavé, la masse pour $1\,600 \text{ kg/m}^3$ et le nombre de voyages d'un engin transportant 400 kg par cycle. Discuter pourquoi le nombre brut de voyages ne suffit pas à définir le temps de chantier.

11. Solution raisonnée

Le volume est $20 \times 30 \times 0,25 = 150 \text{ m}^3$. La masse vaut $240\,000 \text{ kg}$. À 400 kg par voyage, il faudrait 600 voyages. Mais le cycle comprend excavation, déplacement, déchargement, recharge, maintenance et éventuelles pauses poussière/énergie. Le débit réel dépend donc du temps de cycle et de la [disponibilité](#) de la flotte.

12. Mini-projet de validation

Concevoir le génie civil d'un site comprenant deux habitats, un atelier, une piste de rover et une zone d'atterrissage: reconnaissance, terrassement, blindage, protection contre les projections, métrologie, séquence de construction et plan de maintenance.

Génie civil martien : construire, mesurer, accepter puis documenter

Un ouvrage n'est pas terminé lorsque la machine a fini de déplacer le régolithe. Il faut une géométrie mesurée, des critères d'acceptation, une traçabilité des matériaux, un relevé de l'état réel et un plan de maintenance. Cette discipline permet aux infrastructures suivantes de s'appuyer sur ce qui existe vraiment, pas sur ce qui était prévu.

Le sol martien est une donnée d'entrée, pas un matériau uniforme

Portance, granulométrie, teneur en blocs, glace éventuelle, pente et comportement au compactage varient selon le site. Avant production, une zone d'essai peut servir à régler excavation, couches, compactage et contrôle.

Les interfaces coûtent plus cher que les volumes

Fondations, seuils, conduites, traversées, câbles, accès rover, drainage de poussière et chemins de maintenance doivent être coordonnés. Une dalle parfaite qui interdit ensuite le remplacement d'une vanne est une mauvaise infrastructure.

Le relevé 'tel que construit' devient une ressource opérationnelle

Position, altitude, épaisseur, matériaux, conduites enterrées et écarts acceptés doivent être enregistrés. En cas de réparation plusieurs années plus tard, cette information réduit excavation inutile, risques d'endommagement et temps d'intervention.

► Exercice — accepter ou reprendre une plateforme

Pour relier cet atelier aux références déjà utilisées par le module, consulter [NASA TechPort — construction](#) et [NASA — 3D-Printed Habitat Challenge](#).

Sources primaires et passerelles

- [NASA — 3D-Printed Habitat Challenge](#)
- [NASA TechPort — 3D Printed Habitat](#)