

Robotique, autonomie et maintenance hors Terre

Concevoir des robots qui perçoivent, planifient, manipulent et se mettent en sécurité lorsque le terrain, la poussière ou la communication dégradent leurs hypothèses.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Robotique, autonomie et maintenance hors Terre: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « autonomie », et quel repère issu de « perception » permet de vérifier la décision?

Intuition. Un rover doit continuer une mission lorsque le délai de communication empêche un opérateur terrestre de corriger chaque mouvement et qu'une roue montre des signes de dégradation.

1

Comprendre avant de calculer

Un rover doit continuer une mission lorsque le délai de communication empêche un opérateur terrestre de corriger chaque mouvement et qu'une roue montre des signes de dégradation.

2

autonomie

Définition sans prérequis.

3

perception

Définition sans prérequis.

Repère concret. L'autonomie est la capacité d'un système à atteindre certains objectifs sans intervention humaine immédiate, dans des limites et règles définies.

- Comprendre avant de calculer — Un rover doit continuer une mission lorsque le délai de communication empêche un opérateur terrestre de corriger chaque mouvement et qu'une roue montre des signes de dégradation.
- autonomie — Définition sans prérequis.
- perception — Définition sans prérequis.

Préparation du module 31: modules 00 à 28 recommandés selon le sujet. Le module 31 revient sur les grandeurs qui conditionnent directement « Robotique, autonomie et maintenance hors Terre ».

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 31

Comprendre avant de calculer

Un rover doit continuer une mission lorsque le délai de communication empêche un opérateur terrestre de corriger chaque mouvement et qu'une roue montre des signes de dégradation.

Progression du module — autonomie; perception; actionneur; maintenance conditionnelle.

autonomie

Définition sans prérequis. L'[autonomie](#) est la capacité d'un [système](#) à atteindre certains objectifs sans intervention humaine immédiate, dans des limites et règles définies.

Scène concrète. Un rover peut détecter un obstacle, choisir un passage local et interrompre sa progression si la confiance devient insuffisante.

Contrôle mental. Présentez un cas non prévu: un système autonome doit détecter l'écart, choisir dans son domaine d'autorité et savoir demander de l'aide ou se mettre en sécurité hors domaine.

Piège à éviter. Autonomie ne signifie pas absence de supervision ni liberté illimitée: les objectifs, contraintes et critères d'abandon sont conçus.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [autonomie](#) » peut immobiliser un robot loin du [refuge](#), déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Exercice guidé — autonomie

Situation à reconnaître. Un rover peut détecter un obstacle, choisir un passage local et interrompre sa progression si la confiance devient insuffisante.

Vérification demandée. Présentez un cas non prévu: un système autonome doit détecter l'écart, choisir dans son domaine d'autorité et savoir demander de l'aide ou se mettre en sécurité hors domaine.

Erreur à écarter. Autonomie ne signifie pas absence de supervision ni liberté illimitée: les objectifs, contraintes et critères d'abandon sont conçus.

Corrigé raisonné

Sens précis

L'autonomie est la capacité d'un système à atteindre certains objectifs sans intervention humaine immédiate, dans des limites et règles définies.

Test du cas

Présentez un cas non prévu: un système autonome doit détecter l'écart, choisir dans son domaine d'autorité et savoir demander de l'aide ou se mettre en sécurité hors domaine.

Piège exclu

Autonomie ne signifie pas absence de supervision ni liberté illimitée: les objectifs, contraintes et critères d'abandon sont conçus.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « [autonomie](#) » peut immobiliser un robot loin du [refuge](#), déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Quantification

[autonomie](#): relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

[autonomie](#): confronter conclusion, [contrôle](#) et [piège](#) de la carte.

perception

Définition sans prérequis. La [perception](#) transforme des données de capteurs en informations utiles sur l'environnement ou l'état du robot.

Scène concrète. Caméras, lidar ou capteurs de roue peuvent aider à détecter terrain, obstacles, glissement ou position relative.

Contrôle mental. Comparez plusieurs capteurs ou une vérité terrain: une [perception](#) fiable doit exprimer son [incertitude](#) et reconnaître les situations où elle ne sait pas conclure.

Piège à éviter. Une image nette ne garantit pas une perception correcte: illumination, poussière, ambiguïtés et modèles entraînés hors domaine peuvent tromper le système.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [perception](#) » peut immobiliser un robot loin du [refuge](#), déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Exercice guidé — perception

Situation à reconnaître. Caméras, lidar ou capteurs de roue peuvent aider à détecter terrain, obstacles, glissement ou position relative.

Vérification demandée. Comparez plusieurs capteurs ou une vérité terrain: une perception fiable doit exprimer son incertitude et reconnaître les situations où elle ne sait pas conclure.

Erreur à écarter. Une image nette ne garantit pas une perception correcte: illumination, poussière, ambiguïtés et modèles entraînés hors domaine peuvent tromper le système.

Corrigé raisonné

Sens précis

La perception transforme des données de capteurs en informations utiles sur l'environnement ou l'état du robot.

Test du cas

Comparez plusieurs capteurs ou une vérité terrain: une perception fiable doit exprimer son incertitude et reconnaître les situations où elle ne sait pas conclure.

Piège exclu

Une image nette ne garantit pas une perception correcte: illumination, poussière, ambiguïtés et modèles entraînés hors domaine peuvent tromper le système.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « perception » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Termes du corrigé. [observation](#)

Quantification

perception: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

actionneur

Définition sans prérequis. Un [actionneur](#) transforme une commande en action physique, par exemple moteur de roue, articulation, vanne ou mécanisme.

Scène concrète. Une commande de vitesse n'a d'effet que si la chaîne électronique et mécanique peut produire le couple requis.

Contrôle mental. Une commande plus grande ne garantit pas un effet plus grand si l'[actionneur](#) sature; vérifiez limites, sens et retour de position ou d'effort.

Piège à éviter. Une commande logicielle valide peut devenir dangereuse si l'actionneur est bloqué, saturé ou partiellement défaillant.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [actionneur](#) » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Exercice guidé — actionneur

Situation à reconnaître. Une commande de vitesse n'a d'effet que si la chaîne électronique et mécanique peut produire le couple requis.

Vérification demandée. Une commande plus grande ne garantit pas un effet plus grand si l'actionneur sature; vérifiez limites, sens et retour de position ou d'effort.

Erreur à écarter. Une commande logicielle valide peut devenir dangereuse si l'actionneur est bloqué, saturé ou partiellement défaillant.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un actionneur transforme une commande en action physique, par exemple moteur de roue, articulation, vanne ou mécanisme.

Test du cas

Une commande plus grande ne garantit pas un effet plus grand si l'actionneur sature; vérifiez limites, sens et retour de position ou d'effort.

Piège exclu

Une commande logicielle valide peut devenir dangereuse si l'actionneur est bloqué, saturé ou partiellement défaillant.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « actionneur » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Quantification

actionneur: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

maintenance conditionnelle

Définition sans prérequis. La [maintenance conditionnelle](#) déclenche inspection ou intervention à partir d'indicateurs d'état plutôt qu'à une date fixe seulement.

Scène concrète. Une hausse de courant moteur, de vibration ou de [température](#) peut signaler une dégradation de roue avant la panne complète.

Contrôle mental. La maintenance doit être déclenchée par une tendance ou un indicateur relié au mode de [défaillance](#); un seuil sans lien physique avec l'usure ne constitue pas une politique conditionnelle robuste.

Piège à éviter. Une alarme unique ne doit pas conduire automatiquement au remplacement: tendance, contexte et faux positifs doivent être évalués.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [maintenance conditionnelle](#) » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Exercice guidé — maintenance conditionnelle

Situation à reconnaître. Une hausse de courant moteur, de vibration ou de température peut signaler une dégradation de roue avant la panne complète.

Vérification demandée. La maintenance doit être déclenchée par une tendance ou un indicateur relié au mode de défaillance; un seuil sans lien physique avec l'usure ne constitue pas une politique conditionnelle robuste.

Erreur à écarter. Une alarme unique ne doit pas conduire automatiquement au remplacement: tendance, contexte et faux positifs doivent être évalués.

Corrigé raisonné

Sens précis

La maintenance conditionnelle déclenche inspection ou intervention à partir d'indicateurs d'état plutôt qu'à une date fixe seulement.

Test du cas

La maintenance doit être déclenchée par une tendance ou un indicateur relié au mode de défaillance; un seuil sans lien physique avec l'usure ne constitue pas une politique conditionnelle robuste.

Piège exclu

Une alarme unique ne doit pas conduire automatiquement au remplacement: tendance, contexte et faux positifs doivent être évalués.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « maintenance conditionnelle » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne.

Termes du corrigé. [vérification](#)

Quantification

maintenance conditionnelle: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

maintenance conditionnelle: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Étude intégrée — Robotique, autonomie et maintenance hors Terre

Situation à analyser. Un rover doit continuer une mission lorsque le délai de communication empêche un opérateur terrestre de corriger chaque mouvement et qu'une roue montre des signes de dégradation.

- **autonomie:** Un rover peut détecter un obstacle, choisir un passage local et interrompre sa progression si la confiance devient insuffisante. Contrôle attendu: Présentez un cas non prévu: un système autonome doit détecter l'écart, choisir dans son domaine d'autorité et savoir demander de l'aide ou se mettre en sécurité hors domaine.
- **perception:** Caméras, lidar ou capteurs de roue peuvent aider à détecter terrain, obstacles, glissement ou position relative. Contrôle attendu: Comparez plusieurs capteurs ou une vérité terrain: une perception fiable doit exprimer son incertitude et reconnaître les situations où elle ne sait pas conclure.
- **actionneur:** Une commande de vitesse n'a d'effet que si la chaîne électronique et mécanique peut produire le couple requis. Contrôle attendu: Une commande plus grande ne garantit pas un effet plus grand si l'actionneur sature; vérifiez limites, sens et retour de position ou d'effort.
- **maintenance conditionnelle:** Une hausse de courant moteur, de vibration ou de température peut signaler une dégradation de roue avant la panne complète. Contrôle attendu: La maintenance doit être déclenchée par une tendance ou un indicateur relié au mode de défaillance; un seuil sans lien physique avec l'usure ne constitue pas une politique conditionnelle robuste.

Le diagnostic ne doit pas confondre « autonomie » et « perception ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Un rover peut détecter un obstacle, choisir un passage local et interrompre sa progression si la confiance devient insuffisante. Le second doit être contrôlé autrement: Comparez plusieurs capteurs ou une vérité terrain: une perception fiable doit exprimer son incertitude et reconnaître les situations où elle ne sait pas conclure.

Une seconde vérification croise « actionneur » et « maintenance conditionnelle ». Gardez comme alerte « Une commande logicielle valide peut devenir dangereuse si l'actionneur est bloqué, saturé ou partiellement défaillant. »; pour « maintenance conditionnelle », utilisez plutôt ce test: La maintenance doit être déclenchée par une tendance ou un indicateur relié au mode de défaillance; un seuil sans lien physique avec l'usure ne constitue pas une politique conditionnelle robuste.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Robotique, autonomie et maintenance hors Terre », classez les indices selon « autonomie » (Présentez un cas non prévu: un système autonome doit détecter l'écart, choisir dans son domaine d'autorité et savoir demander de l'aide ou se mettre en sécurité hors domaine.), « perception » (Comparez plusieurs capteurs ou une vérité terrain: une perception fiable doit exprimer son incertitude et reconnaître les situations où elle ne sait pas conclure.), « actionneur » (Une commande plus grande ne garantit pas un effet plus grand si l'actionneur sature; vérifiez limites, sens et retour de position ou d'effort.), « maintenance conditionnelle » (La maintenance doit être déclenchée par une tendance ou un indicateur relié au mode de défaillance; un seuil sans lien physique avec l'usure ne constitue pas une politique conditionnelle robuste.) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour autonomie, Dans ce module, une erreur sur « autonomie » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne. Le garde-fou principal est: Autonomie ne signifie pas absence de supervision ni liberté illimitée: les objectifs, contraintes et critères d'abandon sont conçus. Pour perception, Dans ce module, une erreur sur « perception » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne. Le garde-fou principal est: Une image nette ne garantit pas une perception correcte: illumination, poussière, ambiguïtés et modèles entraînés hors domaine peuvent tromper le système. Pour actionneur, Dans ce module, une erreur sur « actionneur » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne. Le garde-fou principal est: Une commande logicielle valide peut devenir dangereuse si l'actionneur est bloqué, saturé ou partiellement défaillant. Pour maintenance conditionnelle, Dans ce module, une erreur sur « maintenance conditionnelle » peut immobiliser un robot loin du refuge, déclencher une action dangereuse ou manquer le signal précoce d'une panne. Le garde-fou principal est: Une alarme unique ne doit pas conduire automatiquement au remplacement: tendance, contexte et faux positifs doivent être évalués.

Mini-leçons quantitatives canoniques

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

Autonomie énergétique robotique

$$t_{\text{end}} = E_{\text{useful}} / P_{\text{avg}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $t_{\text{end}} = E_{\text{useful}} / P_{\text{avg}}$ » dans « Autonomie énergétique robotique » ?

2 — Intuition sans symboles

Une batterie fournit une durée de mission seulement après avoir rapporté son énergie utilisable à la puissance réellement consommée.

3 — Grandeurs

t_{end} : autonomie énergétique [h]; E_{useful} : énergie utilisable [kWh]; P_{avg} : puissance moyenne [kW]

4 — Formule

$$t_{\text{end}} = E_{\text{useful}} / P_{\text{avg}}$$

5 — Lecture

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

6 — Symboles et sens

t_{end} : autonomie énergétique [h]; E_{useful} : énergie utilisable [kWh]; P_{avg} : puissance moyenne [kW]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

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

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

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

11 — Hypothèses

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

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $E_{\text{useful}} = 24$ kWh, $P_{\text{avg}} = 3$ kW: $t_{\text{end}} = 24 / 3 = 8$ h.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

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

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

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

17 — Interprétation

Conserver une réserve de retour et ne jamais planifier jusqu'à l'épuisement théorique.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

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

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $E_{\text{useful}} = 15$ kWh, $P_{\text{avg}} = 2.5$ kW: $t_{\text{end}} = 15 / 2.5$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $E_{\text{useful}} = 15$ kWh, $P_{\text{avg}} = 2.5$ kW: $t_{\text{end}} = 15 / 2.5 = 6$ h. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $E_{\text{useful}} = 40$ kWh, $P_{\text{avg}} = 5$ kW: $t_{\text{end}} = 40 / 5$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $E_{\text{useful}} = 40 \text{ kWh}$, $P_{\text{avg}} = 5 \text{ kW}$: $t_{\text{end}} = 40 / 5 = 8 \text{ h}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Conserver une réserve de retour et ne jamais planifier jusqu'à l'épuisement théorique.

Portée parcourable

$$d_{\text{range}} = v_{\text{rover}} \times t_{\text{end}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $d_{\text{range}} = v_{\text{rover}} \times t_{\text{end}}$ » dans « Portée parcourable » ?

2 — Intuition sans symboles

La portée découle de la vitesse soutenable pendant le temps réellement disponible.

3 — Grandeurs

d_{range} : distance parcourable [km]; v_{rover} : vitesse moyenne rover [km/h]; t_{end} : autonomie disponible [h]

4 — Formule

$$d_{\text{range}} = v_{\text{rover}} \times t_{\text{end}}$$

5 — Lecture

Lire « $d_{\text{range}} = v_{\text{rover}} \times t_{\text{end}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

d_{range} : distance parcourable [km]; v_{rover} : vitesse moyenne rover [km/h]; t_{end} : autonomie disponible [h]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

d_{range} [km]; v_{rover} [km/h]; t_{end} [h]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

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

11 — Hypothèses

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

12 — Contrôle indépendant

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

13 — Cas numérique

Avec $v_{\text{rover}} = 6 \text{ km/h}$, $t_{\text{end}} = 8 \text{ h}$: $d_{\text{range}} = 6 \times 8 = 48 \text{ km}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

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

15 — Vérification

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

16 — Estimation mentale

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

17 — Interprétation

Appliquer ensuite une marge de retour, de détour et de dégradation avant d'autoriser la sortie.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

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

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $v_{\text{rover}} = 4 \text{ km/h}$, $t_{\text{end}} = 6 \text{ h}$: $d_{\text{range}} = 4 \times 6$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $v_{\text{rover}} = 4 \text{ km/h}$, $t_{\text{end}} = 6 \text{ h}$: $d_{\text{range}} = 4 \times 6 = 24 \text{ km}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $v_{\text{rover}} = 10 \text{ km/h}$, $t_{\text{end}} = 3.5 \text{ h}$: $d_{\text{range}} = 10 \times 3.5$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $v_{\text{rover}} = 10 \text{ km/h}$, $t_{\text{end}} = 3.5 \text{ h}$: $d_{\text{range}} = 10 \times 3.5 = 35 \text{ km}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Appliquer ensuite une marge de retour, de détour et de dégradation avant d'autoriser la sortie.

Incertitude de localisation robotique

$$\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ » dans « Incertitude de localisation robotique » ?

2 — Intuition sans symboles

La localisation combine plusieurs axes d'incertitude indépendants pour obtenir une enveloppe de position.

3 — Grandeurs

σ_{pos} : incertitude combinée [m]; σ_x : incertitude axe x [m]; σ_y : incertitude axe y [m]

4 — Formule

$$\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

5 — Lecture

Lire « $\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

σ_{pos} : incertitude combinée [m]; σ_x : incertitude axe x [m]; σ_y : incertitude axe y [m]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

σ_{pos} [m]; σ_x [m]; σ_y [m]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La racine de la somme des carrés combine des contributions indépendantes sans supposer qu'elles s'ajoutent toutes dans le même sens.

11 — Hypothèses

Les contributions doivent être suffisamment indépendantes pour justifier cette combinaison.

12 — Contrôle indépendant

Le carré du résultat doit évaluer la somme des carrés des contributions.

13 — Cas numérique

Avec $\sigma_x = 2 \text{ m}$, $\sigma_y = 3 \text{ m}$: $\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{2^2 + 3^2} = 3.6056 \text{ m}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La racine de la somme des carrés combine des contributions indépendantes sans supposer qu'elles s'ajoutent toutes dans le même sens.

15 — Vérification

Le carré du résultat doit égaler la somme des carrés des contributions.

16 — Estimation mentale

Le résultat doit rester entre la contribution dominante et leur somme arithmétique.

17 — Interprétation

Réduire vitesse ou mission si l'enveloppe devient trop grande pour éviter les obstacles ou retrouver le chemin.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

La plus grande contribution pèse davantage parce qu'elle est élevée au carré.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $\sigma_x = 1$ m, $\sigma_y = 1$ m: $\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{1^2 + 1^2}$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $\sigma_x = 1$ m, $\sigma_y = 1$ m: $\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{1^2 + 1^2} = 1.4142$ m. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $\sigma_x = 0.3$ m, $\sigma_y = 0.4$ m: $\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{0.3^2 + 0.4^2}$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $\sigma_x = 0.3$ m, $\sigma_y = 0.4$ m: $\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{0.3^2 + 0.4^2} = 0.5$ m. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Réduire vitesse ou mission si l'enveloppe devient trop grande pour éviter les obstacles ou retrouver le chemin.

Marge de traction

$$F_{\text{margin}} = \mu \times N_{\text{load}} - F_{\text{resist}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $F_{\text{margin}} = \mu \times N_{\text{load}} - F_{\text{resist}}$ » dans « Marge de traction » ?

2 — Intuition sans symboles

La traction disponible doit dépasser les efforts résistants pour conserver une capacité de progression.

3 — Grandeurs

F_{margin} : marge de traction [N]; μ : coefficient de traction [sans dimension]; N_{load} : charge normale [N];

F_{resist} : effort résistant [N]

4 — Formule

$$F_{\text{margin}} = \mu \times N_{\text{load}} - F_{\text{resist}}$$

5 — Lecture

Lire « $F_{\text{margin}} = \mu \times N_{\text{load}} - F_{\text{resist}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

F_{margin} : marge de traction [N]; μ : coefficient de traction [sans dimension]; N_{load} : charge normale [N];

F_{resist} : effort résistant [N]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

F_{margin} [N]; μ [sans dimension]; N_{load} [N]; F_{resist} [N]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

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

11 — Hypothèses

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

12 — Contrôle indépendant

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

13 — Cas numérique

Avec $\mu = 0.6$ sans dimension, $N_{load} = 1200 \text{ N}$, $F_{resist} = 500 \text{ N}$: $F_{margin} = 0.6 \times 1200 - 500 = 220 \text{ N}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

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

15 — Vérification

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

16 — Estimation mentale

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

17 — Interprétation

Une marge faible interdit de compter sur la vitesse nominale et impose un trajet ou une charge plus conservateurs.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

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

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $\mu = 0.4$ sans dimension, $N_{load} = 900 \text{ N}$, $F_{resist} = 300 \text{ N}$: $F_{margin} = 0.4 \times 900 - 300$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $\mu = 0.4$ sans dimension, $N_{load} = 900 \text{ N}$, $F_{resist} = 300 \text{ N}$: $F_{margin} = 0.4 \times 900 - 300 = 60 \text{ N}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $\mu = 0.7$ sans dimension, $N_{load} = 1500 \text{ N}$, $F_{resist} = 800 \text{ N}$: $F_{margin} = 0.7 \times 1500 - 800$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $\mu = 0.7$ sans dimension, $N_{load} = 1500 \text{ N}$, $F_{resist} = 800 \text{ N}$: $F_{margin} = 0.7 \times 1500 - 800 = 250 \text{ N}$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Une marge faible interdit de compter sur la vitesse nominale et impose un trajet ou une charge plus conservateurs.

Taux d'utilisation robotique

$$U_{robot} = t_{active} / t_{window}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $U_{robot} = t_{active} / t_{window}$ » dans « Taux d'utilisation robotique » ?

2 — Intuition sans symboles

L'utilisation compare le temps productif au temps total alloué à la mission.

3 — Grandeurs

U_{robot} : utilisation [sans dimension]; t_{active} : temps actif [h]; t_{window} : fenêtre totale [h]

4 — Formule

$$U_{robot} = t_{active} / t_{window}$$

5 — Lecture

Lire « $U_{\text{robot}} = t_{\text{active}} / t_{\text{window}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

U_{robot} : utilisation [sans dimension]; t_{active} : temps actif [h]; t_{window} : fenêtre totale [h]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

U_{robot} [sans dimension]; t_{active} [h]; t_{window} [h]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

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

11 — Hypothèses

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

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $t_{\text{active}} = 6$ h, $t_{\text{window}} = 8$ h: $U_{\text{robot}} = 6 / 8 = 0.75$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

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

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

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

17 — Interprétation

Une utilisation très élevée laisse peu de marge pour diagnostic, recharge ou récupération.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

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

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $t_{\text{active}} = 10$ h, $t_{\text{window}} = 12$ h: $U_{\text{robot}} = 10 / 12$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $t_{\text{active}} = 10$ h, $t_{\text{window}} = 12$ h: $U_{\text{robot}} = 10 / 12 = 0.8333$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $t_{\text{active}} = 3$ h, $t_{\text{window}} = 10$ h: $U_{\text{robot}} = 3 / 10$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $t_{\text{active}} = 3$ h, $t_{\text{window}} = 10$ h: $U_{\text{robot}} = 3 / 10 = 0.3$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Une utilisation très élevée laisse peu de marge pour diagnostic, recharge ou récupération.

Disponibilité de flotte robotique

$A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$ » dans « Disponibilité de flotte robotique » ?

2 — Intuition sans symboles

La capacité réelle d'une flotte dépend du nombre d'unités effectivement prêtes, pas du nombre acheté.

3 — Grandeurs

A_{fleet} : fraction de robots prêts [sans dimension]; n_{ready} : robots prêts [robot]; n_{total} : robots totaux [robot]

4 — Formule

$A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$

5 — Lecture

Lire « $A_{\text{fleet}} = n_{\text{ready}} / n_{\text{total}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

A_{fleet} : fraction de robots prêts [sans dimension]; n_{ready} : robots prêts [robot]; n_{total} : robots totaux [robot]

7 — Prononciation

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

8 — Unités

A_{fleet} [sans dimension]; n_{ready} [robot]; n_{total} [robot]

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

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

11 — Hypothèses

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

12 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

13 — Cas numérique

Avec $n_{\text{ready}} = 8$ robot, $n_{\text{total}} = 10$ robot: $A_{\text{fleet}} = 8 / 10 = 0.8$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

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

15 — Vérification

Multiplier le résultat par le dénominateur doit reconstruire le numérateur.

16 — Estimation mentale

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

17 — Interprétation

Reporter une mission si le nombre de robots prêts ne couvre plus les fonctions critiques et la redondance prévue.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

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

19 — Sensibilité

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

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. Recalculez ce scénario: Avec $n_{\text{ready}} = 5$ robot, $n_{\text{total}} = 6$ robot: $A_{\text{fleet}} = 5 / 6$?

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

Avec $n_{\text{ready}} = 5$ robot, $n_{\text{total}} = 6$ robot: $A_{\text{fleet}} = 5 / 6 = 0.8333$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

Exercice autonome. Recalculez ce scénario: Avec $n_{\text{ready}} = 12$ robot, $n_{\text{total}} = 15$ robot: $A_{\text{fleet}} = 12 / 15$?

Correction autonome — ouvrir après essai

Avec $n_{\text{ready}} = 12$ robot, $n_{\text{total}} = 15$ robot: $A_{\text{fleet}} = 12 / 15 = 0.8$. La décision doit ensuite être confrontée aux marges et hypothèses du module.

21 — Décision mission

Reporter une mission si le nombre de robots prêts ne couvre plus les fonctions critiques et la redondance prévue.

Progression de maîtrise

1. autonomie: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. perception: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. actionneur: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. maintenance conditionnelle: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Robotique, autonomie et maintenance hors Terre »: confrontez « autonomie » à « perception »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 31 — autonomie, perception, actionneur, maintenance conditionnelle. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Distinguer les observations, les hypothèses et les inconnues lorsqu'on étudie « Comprendre avant de calculer ».
- Quantifier au moins une grandeur nécessaire à « autonomie » sans masquer les conversions.
- Expliquer ce qui invaliderait le raisonnement retenu pour « perception ».
- Relier « actionneur » aux contraintes concrètes du module 31.

1. Un robot est une chaîne perception–décision–action

Un robot planétaire combine capteurs, estimation, planification, commande, actionneurs et supervision. Une défaillance peut naître à n'importe quelle étape: caméra éblouie, localisation qui dérive, planificateur trop optimiste, articulation grippée ou ordre humain ambigu.

L'analyse doit donc suivre la chaîne complète. Dire « le bras fonctionne » ne suffit pas si la perception ne sait pas localiser la pièce à saisir ou si le logiciel n'a pas de **mode sûr** lorsque la pince ne confirme pas la prise.

2. Perception et localisation dans un terrain pauvre en repères

Mars impose poussière, ombres dures, relief, variations d'éclairage et absence de GNSS terrestre. Les robots peuvent combiner stéréo, lidar, inertiel, odométrie et cartes. La localisation simultanée et cartographie, souvent abrégée SLAM, consiste à construire ou corriger une carte tout en estimant sa propre pose.

Une carte n'est jamais la réalité complète. L'autonomie doit conserver un niveau de confiance et savoir ralentir, s'arrêter ou demander confirmation lorsque la scène ne ressemble plus aux données d'entraînement ou au modèle attendu.

3. Planification: choisir un chemin qui reste réparable

Le chemin le plus court n'est pas toujours le meilleur. Un trajet martien doit intégrer pente, dérapage, énergie, visibilité, **marge** de retour, exposition thermique et possibilité de secours. Une fonction de coût peut transformer ces contraintes en décision, mais ses pondérations doivent être explicites.

Un robot de logistique devrait aussi planifier en fonction de la maintenance: éviter un terrain qui use fortement les roues peut être rationnel même si le trajet est plus long.

4. Manipulation: saisir un objet est un problème de tolérances

Un bras robotique doit connaître la géométrie, la **force**, la compliance et les limites de contact. Une prise trop rigide casse un composant; trop faible, elle le laisse tomber. Sur Mars, gants, poussière et variations thermiques modifient aussi les interfaces destinées aux humains.

Les futurs équipements devraient être conçus pour la robotique: poignées normalisées, repères visuels, interfaces mécaniques tolérantes, connecteurs protégés et zones de prise accessibles.

5. Autonomie ajustable et partage humain–robot

L'autonomie peut être ajustable. Une tâche répétitive et bien connue peut être confiée au robot; une situation nouvelle peut repasser sous supervision humaine. Le système doit rendre visible ce qu'il croit, ce qu'il prévoit et pourquoi il s'arrête.

Le bon objectif n'est pas de supprimer l'humain mais de réserver son attention aux décisions où son jugement apporte le plus de valeur.

6. Multi-robots: coopération et causes communes

Plusieurs petits robots peuvent se répartir cartographie, transport et inspection. La coopération augmente la capacité mais ajoute communication, synchronisation et coordination. Trois robots exécutant le même logiciel peuvent aussi partager le même défaut.

La résilience d'un essaim doit donc distinguer **redondance** numérique et diversité réelle. Une mise à jour logicielle défectueuse ne doit pas immobiliser toute la flotte simultanément.

7. Maintenance robotique et diagnostic

Un robot utile à une base martienne doit signaler l'usure avant la panne: courant moteur, vibration, température, jeu mécanique, temps de mouvement et erreurs de position. Ces tendances alimentent une maintenance conditionnelle.

La machine doit aussi être conçue pour être réparée: modules remplaçables, accès aux fixations, outillage compatible, pièces imprimables lorsque possible et procédure de remise en service vérifiable.

8. Exemple calculé: autonomie énergétique d'une mission robotique

Un rover dispose de 8,0 kWh utilisables. La locomotion moyenne consomme 600 W pendant le déplacement et l'instrumentation 250 W en continu. Pour une sortie de 6 h dont 4 h de roulage, l'énergie vaut $0,600 \times 4 + 0,250 \times 6 = 2,4 + 1,5 = 3,9$ kWh.

Si une réserve de sécurité de 30 % de la capacité doit rester intacte, la mission ne peut consommer que $8,0 \times 0,70 = 5,6$ kWh. La marge après la sortie est $5,6 - 3,9 = 1,7$ kWh. Cette marge doit absorber froid, détour ou patinage.

9. De la vitesse du rover à l'autonomie décisionnelle

Un robot autonome n'est pas seulement un véhicule sans conducteur. Il doit transformer un objectif en séquence d'actions, observer si le monde réel correspond au modèle, détecter une divergence et choisir entre poursuivre, ralentir, contourner ou s'arrêter. Pour rendre cette idée concrète, distinguons la **vitesse de déplacement** de la **vitesse de décision**.

Hypothèse pédagogique. Un rover doit parcourir 120 m sur un terrain reconnu et sa vitesse moyenne sûre vaut 0,12 m/s. On note L la longueur du trajet en mètres, v la vitesse moyenne en mètres par seconde et t la durée en secondes. Comme $t = L / v$, on obtient $120 \text{ m} / 0,12 \text{ m/s} = 1\,000 \text{ s}$, soit 16 min 40 s. Le calcul donne le temps de mouvement, pas le temps de mission: arrêts, perception, replanification et contrôles de sécurité s'y ajoutent.

Si une architecture impose environ 25 min pour obtenir un aller-retour radio dans l'exemple du module 30, demander à la Terre de valider chaque obstacle serait plus lent que la traversée elle-même. L'autonomie devient alors une **exigence** de

sûreté et de productivité. Le rover doit au minimum savoir conserver une enveloppe de fonctionnement, enregistrer pourquoi il a interrompu une tâche et permettre à l'équipage local de reprendre la main sans perdre l'état de la mission.

Problème inversé. Si l'on veut que 300 m soient parcourus en 40 min de mouvement effectif, 40 min = 2 400 s. La vitesse moyenne nécessaire est $v = L / t = 300 / 2\,400 = 0,125\text{ m/s}$. Ce résultat ne prouve pas que le terrain autorise cette vitesse: il fixe une exigence que perception, adhérence, pente, énergie et risque doivent ensuite valider.

Exercice progressif

Une flotte de quatre robots doit déplacer 2 400 kg de **régolithe**. Chaque robot transporte 80 kg par trajet et réalise un trajet en 25 minutes, mais seulement 75 % du temps planifié est productif. Calculez le temps minimal théorique et identifiez au moins trois causes qui invalideraient l'hypothèse d'indépendance.

Correction raisonnée

Il faut $2\,400 / 80 = 30$ trajets. Répartis parfaitement entre quatre robots, cela représente 7,5 trajets par robot, soit 187,5 minutes de travail productif à 25 minutes par trajet. Avec seulement 75 % du temps planifié réellement productif, il faut prévoir $187,5 / 0,75 = 250$ minutes, environ 4 h 10. Ce résultat suppose pourtant une flotte indépendante. Il devient optimiste si les robots partagent un chargeur, une zone de chargement, un passage étroit, un opérateur, un réseau radio ou une même source de panne. Une file d'attente, un sol difficile ou l'immobilisation d'un robot peut alors dégrader le **débit** de toute la flotte.

Mini-projet

Concevoir un robot de maintenance extérieure capable d'inspecter panneaux, radiateurs et antennes: capteurs, locomotion, bras, autonomie, procédure de mise en sécurité, pièces remplaçables, journal de santé et partage de tâches avec un astronaute en EVA.

Sources primaires et passerelles

- NASA — Autonomous Systems & Robotics
- NASA JSC — Robotics
- NASA — Lunar Surface Technology: autonomy and robotics

Matrice de parité FR ↔ EN

Autonomie énergétique robotique	Robotic energy endurance
Portée parcourable	Travelable range
Incertitude de localisation robotique	Robotic localization uncertainty
Marge de traction	Traction margin
Taux d'utilisation robotique	Robot utilization
Disponibilité de flotte robotique	Robotic fleet availability

Repères lexicaux du module. **état dégradé**