

Énergie, avionique & logiciel de vol

Un véhicule spatial ne possède pas une prise électrique idéale. Sa production varie, les batteries vieillissent, les convertisseurs dissipent de la chaleur et certaines charges ne peuvent pas fonctionner simultanément. L'avionique doit mesurer cet état, exécuter le logiciel de vol, piloter les actionneurs et rester maîtrisable lorsqu'un capteur ou un calculateur tombe en panne. Ce module relie donc puissance électrique, électronique et logiciel critique.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Énergie, avionique & logiciel de vol: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « puissance électrique », et quel repère issu de « avionique » permet de vérifier la décision?

Intuition. Le véhicule perd momentanément une source d'énergie alors que ses calculateurs, capteurs et actionneurs doivent continuer à assurer les fonctions vitales.

1

Comprendre avant de calculer

Le véhicule perd momentanément une source d'énergie alors que ses calculateurs, capteurs et actionneurs doivent continuer à assurer les fonctions vitales.

2

puissance électrique

Définition sans prérequis.

3

avionique

Définition sans prérequis.

Repère concret. Un ordinateur de bord de 120 W et deux équipements de 80 W représentent ensemble 280 W tant qu'ils fonctionnent simultanément.

- Comprendre avant de calculer — Le véhicule perd momentanément une source d'énergie alors que ses calculateurs, capteurs et actionneurs doivent continuer à assurer les fonctions vitales.
- puissance électrique — Définition sans prérequis.
- avionique — Définition sans prérequis.

Pour aborder « Énergie, avionique & logiciel de vol », les prérequis conseillés sont modules 01 à 09 recommandés. Pour « Énergie, avionique & logiciel de vol », une notation technique n'est utilisée qu'après avoir été reliée à son sens physique ou opérationnel.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 20

Comprendre avant de calculer

Le véhicule perd momentanément une source d'énergie alors que ses calculateurs, capteurs et actionneurs doivent continuer à assurer les fonctions vitales.

Progression du module — puissance électrique; bus électrique; avionique; logiciel de vol.

puissance électrique

Définition sans prérequis. La [puissance électrique](#) mesure le rythme auquel l'énergie est fournie ou consommée. Dans un véhicule spatial, chaque charge contribue à un budget en watts.

Scène concrète. Un ordinateur de bord de 120 W et deux équipements de 80 W représentent ensemble 280 W tant qu'ils fonctionnent simultanément.

Contrôle mental. $P = U \times I$: à tension constante, doubler le courant doit doubler la puissance. Ce contrôle simple révèle vite une erreur de facteur ou d'unité.

Piège à éviter. Ne confondez pas puissance et énergie: 1 kW décrit un débit instantané, 1 kWh décrit une quantité accumulée.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [puissance électrique](#) » peut provoquer [délestage](#), redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Exercice guidé — puissance électrique

Situation à reconnaître. Un ordinateur de bord de 120 W et deux équipements de 80 W représentent ensemble 280 W tant qu'ils fonctionnent simultanément.

Vérification demandée. $P = U \times I$: à tension constante, doubler le courant doit doubler la puissance. Ce contrôle simple révèle vite une erreur de facteur ou d'unité.

Erreur à écarter. Ne confondez pas puissance et énergie: 1 kW décrit un débit instantané, 1 kWh décrit une quantité accumulée.

Corrigé raisonné

Sens précis

La puissance électrique mesure le rythme auquel l'énergie est fournie ou consommée. Dans un véhicule spatial, chaque charge contribue à un budget en watts.

Test du cas

$P = U \times I$: à tension constante, doubler le courant doit doubler la puissance. Ce contrôle simple révèle vite une erreur de facteur ou d'unité.

Piège exclu

Ne confondez pas puissance et énergie: 1 kW décrit un débit instantané, 1 kWh décrit une quantité accumulée.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « [puissance électrique](#) » peut provoquer [délestage](#), redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Termes du corrigé. [observation](#)

bus électrique

Définition sans prérequis. Le [bus électrique](#) est l'architecture qui distribue l'énergie entre sources, stockage, conversion, protections et charges.

Scène concrète. Une panne sur un bus peut isoler plusieurs équipements à la fois; l'architecture cherche donc à limiter les points de [défaillance](#) communs.

Contrôle mental. La somme des charges actives et des réserves doit rester sous la capacité du bus; une charge délestée doit faire baisser le courant ou la puissance demandée.

Piège à éviter. La présence de deux batteries ne garantit pas la [redondance](#) si elles dépendent du même contacteur, du même câblage critique ou du même logiciel de commande.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [bus électrique](#) » peut provoquer [délestage](#), redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Exercice guidé — bus électrique

Situation à reconnaître. Une panne sur un bus peut isoler plusieurs équipements à la fois; l'architecture cherche donc à limiter les points de défaillance communs.

Vérification demandée. La somme des charges actives et des réserves doit rester sous la capacité du bus; une charge délestée doit faire baisser le courant ou la puissance demandée.

Erreur à écarter. La présence de deux batteries ne garantit pas la redondance si elles dépendent du même contacteur, du même câblage critique ou du même logiciel de commande.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le bus électrique est l'architecture qui distribue l'énergie entre sources, stockage, conversion, protections et charges.

Test du cas

La somme des charges actives et des réserves doit rester sous la capacité du bus; une charge délestée doit faire baisser le courant ou la puissance demandée.

Piège exclu

La présence de deux batteries ne garantit pas la redondance si elles dépendent du même contacteur, du même câblage critique ou du même logiciel de commande.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « bus électrique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Quantification

bus électrique: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

bus électrique: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

avionique

Définition sans prérequis. L'**avionique** regroupe les calculateurs, réseaux de données, capteurs, interfaces et logiciels qui permettent au véhicule de mesurer, décider, commander et communiquer.

Scène concrète. Une chaîne avionique peut partir d'un capteur inertielle, traverser un réseau de bord, alimenter un filtre de navigation puis produire une commande d'attitude.

Contrôle mental. Testez la chaîne capteur → calcul → commande → actionneur: si une donnée critique n'a ni source, ni horodatage, ni chemin de secours, l'**avionique** n'est pas complètement définie.

Piège à éviter. L'avionique n'est pas seulement l'ordinateur central: elle inclut la chaîne complète jusqu'aux interfaces physiques et aux actionneurs.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **avionique** » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Exercice guidé — avionique

Situation à reconnaître. Une chaîne avionique peut partir d'un capteur inertielle, traverser un réseau de bord, alimenter un filtre de navigation puis produire une commande d'attitude.

Vérification demandée. Testez la chaîne capteur → calcul → commande → actionneur: si une donnée critique n'a ni source, ni horodatage, ni chemin de secours, l'avionique n'est pas complètement définie.

Erreur à écarter. L'avionique n'est pas seulement l'ordinateur central: elle inclut la chaîne complète jusqu'aux interfaces physiques et aux actionneurs.

Corrigé raisonné

Sens précis

L'avionique regroupe les calculateurs, réseaux de données, capteurs, interfaces et logiciels qui permettent au véhicule de mesurer, décider, commander et communiquer.

Test du cas

Testez la chaîne capteur → calcul → commande → actionneur: si une donnée critique n'a ni source, ni horodatage, ni chemin de secours, l'avionique n'est pas complètement définie.

Piège exclu

L'avionique n'est pas seulement l'ordinateur central: elle inclut la chaîne complète jusqu'aux interfaces physiques et aux actionneurs.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « avionique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Termes du corrigé. vérification

Quantification

avionique: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

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

logiciel de vol

Définition sans prérequis. Le **logiciel de vol** exécute à bord les fonctions nécessaires à la mission: gestion des modes, traitement des mesures, commande, protection, télémétrie et parfois autonomie.

Scène concrète. Lors d'une perte de communication, le logiciel peut détecter l'anomalie, passer en mode sûr, préserver l'énergie et attendre une séquence de récupération.

Contrôle mental. Un logiciel correct doit réagir de façon déterministe aux états prévus et basculer vers un comportement sûr aux entrées invalides; cherchez surtout les cas limites et les transitions, pas une notion d'« augmentation ».

Piège à éviter. Un logiciel correct dans un scénario nominal peut être dangereux si ses transitions de mode, délais, valeurs invalides ou états partiels ne sont pas maîtrisés.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « **logiciel de vol** » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Exercice guidé — logiciel de vol

Situation à reconnaître. Lors d'une perte de communication, le logiciel peut détecter l'anomalie, passer en mode sûr, préserver l'énergie et attendre une séquence de récupération.

Vérification demandée. Un logiciel correct doit réagir de façon déterministe aux états prévus et basculer vers un comportement sûr aux entrées invalides; cherchez surtout les cas limites et les transitions, pas une notion d'« augmentation ».

Erreur à écarter. Un logiciel correct dans un scénario nominal peut être dangereux si ses transitions de mode, délais, valeurs invalides ou états partiels ne sont pas maîtrisés.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le logiciel de vol exécute à bord les fonctions nécessaires à la mission: gestion des modes, traitement des mesures, commande, protection, télémétrie et parfois autonomie.

Test du cas

Un logiciel correct doit réagir de façon déterministe aux états prévus et basculer vers un comportement sûr aux entrées invalides; cherchez surtout les cas limites et les transitions, pas une notion d'« augmentation ».

Piège exclu

Un logiciel correct dans un scénario nominal peut être dangereux si ses transitions de mode, délais, valeurs invalides ou états partiels ne sont pas maîtrisés.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « logiciel de vol » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé.

Quantification

logiciel de vol: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

logiciel de vol: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Étude intégrée — Énergie, avionique & logiciel de vol

Situation à analyser. Le véhicule perd momentanément une source d'énergie alors que ses calculateurs, capteurs et actionneurs doivent continuer à assurer les fonctions vitales.

- **puissance électrique:** Un ordinateur de bord de 120 W et deux équipements de 80 W représentent ensemble 280 W tant qu'ils fonctionnent simultanément. Contrôle attendu: $P = U \times I$: à tension constante, doubler le courant doit doubler la puissance. Ce contrôle simple révèle vite une erreur de facteur ou d'unité.
- **bus électrique:** Une panne sur un bus peut isoler plusieurs équipements à la fois; l'architecture cherche donc à limiter les points de défaillance communs. Contrôle attendu: La somme des charges actives et des réserves doit rester sous la capacité du bus; une charge délestée doit faire baisser le courant ou la puissance demandée.
- **avionique:** Une chaîne avionique peut partir d'un capteur inertiel, traverser un réseau de bord, alimenter un filtre de navigation puis produire une commande d'attitude. Contrôle attendu: Testez la chaîne capteur → calcul → commande → actionneur: si une donnée critique n'a ni source, ni horodatage, ni chemin de secours, l'avionique n'est pas complètement définie.
- **logiciel de vol:** Lors d'une perte de communication, le logiciel peut détecter l'anomalie, passer en mode sûr, préserver l'énergie et attendre une séquence de récupération. Contrôle attendu: Un logiciel correct doit réagir de façon déterministe aux états prévus et basculer vers un comportement sûr aux entrées invalides; cherchez surtout les cas limites et les transitions, pas une notion d'« augmentation ».

Le diagnostic ne doit pas confondre « puissance électrique » et « bus électrique ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Un ordinateur de bord de 120 W et deux équipements de 80 W représentent ensemble 280 W tant qu'ils fonctionnent simultanément. Le second doit être contrôlé autrement: La somme des charges actives et des réserves doit rester sous la capacité du bus; une charge délestée doit faire baisser le courant ou la puissance demandée.

Une seconde vérification croise « avionique » et « logiciel de vol ». Gardez comme alerte « L'avionique n'est pas seulement l'ordinateur central: elle inclut la chaîne complète jusqu'aux interfaces physiques et aux actionneurs. »; pour « logiciel de vol », utilisez plutôt ce test: Un logiciel correct doit réagir de façon déterministe aux états prévus et basculer vers un comportement sûr aux entrées invalides; cherchez surtout les cas limites et les transitions, pas une notion d'« augmentation ».

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Énergie, avionique & logiciel de vol », classez les indices selon « puissance électrique » ($P = U \times I$: à tension constante, doubler le courant doit doubler la puissance. Ce contrôle simple révèle vite une erreur de facteur ou d'unité.), « bus électrique » (La somme des charges actives et des réserves doit rester sous la capacité du bus; une charge délestée doit faire baisser le courant ou la puissance demandée.), « avionique » (Testez la chaîne capteur → calcul → commande → actionneur: si une donnée critique n'a ni source, ni horodatage, ni chemin de secours, l'avionique n'est pas complètement définie.), « logiciel de vol » (Un logiciel correct doit réagir de façon déterministe aux états prévus et basculer vers un comportement sûr aux entrées invalides; cherchez surtout les cas limites et les transitions, pas une notion d'« augmentation ».) Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour puissance électrique, Dans ce module, une erreur sur « puissance électrique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé. Le garde-fou principal est: Ne confondez pas puissance et énergie: 1 kW décrit un débit instantané, 1 kWh décrit une quantité accumulée. Pour bus électrique, Dans ce module, une erreur sur « bus électrique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé. Le garde-fou principal est: La présence de deux batteries ne garantit pas la redondance si elles dépendent du même contacteur, du même câblage critique ou du même logiciel de commande. Pour avionique, Dans ce module, une erreur sur « avionique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé. Le garde-fou principal est: L'avionique n'est pas seulement l'ordinateur central: elle inclut la chaîne complète jusqu'aux interfaces physiques et aux actionneurs. Pour logiciel de vol, Dans ce module, une erreur sur « logiciel de vol » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé. Le garde-fou principal est: Un logiciel correct dans un scénario nominal peut être dangereux si ses transitions de mode, délais, valeurs invalides ou états partiels ne sont pas maîtrisés.

Données du cas

Exercice de synthèse — Dans la situation de « Énergie, avionique & logiciel de vol », classez les indices selon « puissance électrique » ($P = U \times I$: à tension constante, doubler le courant doit doubler la puissance. Ce contrôle

simple révèle vite une erreur de facteur ou d'unité.), « bus électrique » (La somme des charges actives et des réserves doit rester sous la capacité du bus; une charge délestée doit faire baisser le courant ou la puissance demandée.), « avionique » (Testez la chaîne capteur → calcul → commande → actionneur: si une

Relation

Dans la situation de « Énergie, avionique & logiciel de vol », classez les indices selon « puissance électrique » ($P = U \times I$: à tension constante, doubler le courant doit doubler la puissance.

Raisonnement

Corrigé de synthèse Pour puissance électrique, Dans ce module, une erreur sur « puissance électrique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé. Le garde-fou principal est: Ne confondez pas puissance et énergie: 1 kW décrit un débit instantané, 1 kWh décrit une quantité accumulée. Pour bus électrique, Dans ce module, une erreur sur « bus électrique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé. Le garde-fou principal est: La présence de deux batteries ne garantit pas la redondance si elles dépendent du même contacteur, du même câblage critique ou du même logiciel de commande. Pour avionique, Dans ce module, une erreur sur « avionique » peut provoquer délestage, redémarrage avionique, perte de commande ou comportement logiciel non maîtrisé. Le garde-fou principal es

Résultat

Le garde-fou principal est: Ne confondez pas puissance et énergie: 1 kW décrit un débit instantané, 1 kWh décrit une quantité accumulée.

Interprétation

Le garde-fou principal est: Un logiciel correct dans un scénario nominal peut être dangereux si ses transitions de mode, délais, valeurs invalides ou états partiels ne sont pas maîtrisés.

Mini-leçons quantitatives canoniques

Ce bloc constitue la référence quantitative du module; les valeurs d'exercice sont pédagogiques et ne doivent pas être confondues avec des données de mission.

Puissance électrique sur un bus continu

$$P = U \times I$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $P = U \times I$ » dans « Puissance électrique sur un bus continu » ?

2 — Intuition sans symboles

La puissance électrique instantanée est le produit de la tension par le courant sur un bus continu.

3 — Grandeurs

P: puissance; U: tension; I: courant

4 — Formule

$$P = U \times I$$

5 — Lecture

Lire « $P = U \times I$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

P: puissance; U: tension; I: courant

7 — Prononciation

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

8 — Unités

P en W; U en V; I en A

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 ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent décrire le même scénario et leurs unités doivent être compatibles.

12 — Contrôle d'unités

P en W; U en V; I en A Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $U=28\text{ V}$ et $I=10\text{ A}$, $P=280\text{ W}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

15 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver l'autre facteur.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément l'ordre de grandeur de chaque facteur permet de prévoir celui du produit.

17 — Interprétation

Le résultat instantané ne décrit pas encore l'énergie consommée sur une durée ni les pertes de conversion.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

À facteurs indépendants, une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $U=24\text{ V}$, $I=5\text{ A}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$U=24\text{ V}$, $I=5\text{ A}$. $P=120\text{ W}$.

Exercice autonome. $U=50\text{ V}$, $I=8\text{ A}$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$U=50\text{ V}$, $I=8\text{ A}$. $P=400\text{ W}$.

21 — Décision mission

Dimensionner câblage et convertisseurs avec courant, puissance, transitoires et marges appropriées.

Énergie consommée sur une durée

$$E = P \times t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E = P \times t$ » dans « Énergie consommée sur une durée » ?

2 — Intuition sans symboles

Une puissance devient une quantité d'énergie lorsqu'elle est intégrée sur la durée d'utilisation.

3 — Grandeurs

E: énergie; P: puissance moyenne; t: durée

4 — Formule

$$E = P \times t$$

5 — Lecture

Lire « $E = P \times t$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

E: énergie; P: puissance moyenne; t: durée

7 — Prononciation

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

8 — Unités

E en Wh si P en W et t en h; ou J si t en s

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 ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent décrire le même scénario et leurs unités doivent être compatibles.

12 — Contrôle d'unités

E en Wh si P en W et t en h; ou J si t en s Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $P=420\text{ W}$ et $t=3\text{ h}$, $E=1\,260\text{ Wh}=1,26\text{ kWh}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

15 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver l'autre facteur.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément l'ordre de grandeur de chaque facteur permet de prévoir celui du produit.

17 — Interprétation

Le profil réel doit être intégré si la puissance varie fortement au lieu d'utiliser une moyenne arbitraire.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

À facteurs indépendants, une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $P=800\text{ W}$, $t=2,5\text{ h}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$P=800\text{ W}$, $t=2,5\text{ h}$. $E=2\,000\text{ Wh}=2,0\text{ kWh}$.

Exercice autonome. $P=150\text{ W}$, $t=8\text{ h}$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$P=150\text{ W}$, $t=8\text{ h}$. $E=1\,200\text{ Wh}=1,2\text{ kWh}$.

21 — Décision mission

Comparer l'énergie de mission à l'énergie réellement utilisable après pertes et réserves.

Énergie utilisable d'une batterie

$$E_{\text{usable}} = V \times C_{\text{Ah}} \times \text{DoD} \times \eta$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E_{\text{usable}} = V \times C_{\text{Ah}} \times \text{DoD} \times \eta$ » dans « Énergie utilisable d'une batterie » ?

2 — Intuition sans symboles

La capacité nominale ne doit pas être confondue avec l'énergie réellement accessible après réserve et pertes.

3 — Grandeurs

E_{usable} : énergie utilisable; V : tension moyenne; C_{Ah} : capacité nominale; DoD: profondeur de décharge autorisée; η : rendement global

4 — Formule

$$E_{usable} = V \times C_{Ah} \times DoD \times \eta$$

5 — Lecture

Lire « $E_{usable} = V \times C_{Ah} \times DoD \times \eta$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

E_{usable} : énergie utilisable; V : tension moyenne; C_{Ah} : capacité nominale; DoD: profondeur de décharge autorisée; η : rendement global

7 — Prononciation

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

8 — Unités

E_{usable} en Wh; V en V; C_{Ah} en Ah; DoD et η sans dimension

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent décrire le même scénario et leurs unités doivent être compatibles.

12 — Contrôle d'unités

E_{usable} en Wh; V en V; C_{Ah} en Ah; DoD et η sans dimension Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $V=28$ V, $C_{Ah}=100$ Ah, DoD=0,70 et $\eta=0,90$, $E_{usable}=1\ 764$ Wh.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

15 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver l'autre facteur.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément l'ordre de grandeur de chaque facteur permet de prévoir celui du produit.

17 — Interprétation

Température, vieillissement et courant de décharge peuvent réduire encore l'énergie disponible.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

À facteurs indépendants, une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $V=26$ V, $C_{Ah}=90$ Ah, DoD=0,70, $\eta=0,95$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$V=26$ V, $C_{Ah}=90$ Ah, DoD=0,70, $\eta=0,95$. $E_{usable} \approx 1\ 556$ Wh.

Exercice autonome. $V=48$ V, $C_{Ah}=50$ Ah, DoD=0,80, $\eta=0,90$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$V=48$ V, $C_{Ah}=50$ Ah, DoD=0,80, $\eta=0,90$. $E_{usable}=1\ 728$ Wh.

21 — Décision mission

Dimensionner avec la capacité en fin de vie et les conditions thermiques de la mission.

Puissance solaire captée

$$P_{\text{solar}} = G \times A \times \eta \times \cos_{\text{theta}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $P_{\text{solar}} = G \times A \times \eta \times \cos_{\text{theta}}$ » dans « Puissance solaire captée » ?

2 — Intuition sans symboles

La production dépend du flux reçu, de la surface, du rendement et de l'orientation du panneau.

3 — Grandeurs

P_{solar} : puissance électrique produite; G : irradiance; A : aire active; η : rendement; $\cos_{\text{theta}}$: facteur d'incidence

4 — Formule

$$P_{\text{solar}} = G \times A \times \eta \times \cos_{\text{theta}}$$

5 — Lecture

Lire « $P_{\text{solar}} = G \times A \times \eta \times \cos_{\text{theta}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

P_{solar} : puissance électrique produite; G : irradiance; A : aire active; η : rendement; $\cos_{\text{theta}}$: facteur d'incidence

7 — Prononciation

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

8 — Unités

P_{solar} en W; G en W/m^2 ; A en m^2 ; η et $\cos_{\text{theta}}$ sans dimension

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent décrire le même scénario et leurs unités doivent être compatibles.

12 — Contrôle d'unités

P_{solar} en W; G en W/m^2 ; A en m^2 ; η et $\cos_{\text{theta}}$ sans dimension. Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $G=590 \text{ W/m}^2$, $A=20 \text{ m}^2$, $\eta=0,30$ et $\cos_{\text{theta}}=0,8$, $P_{\text{solar}}=2\,832 \text{ W}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

15 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver l'autre facteur.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément l'ordre de grandeur de chaque facteur permet de prévoir celui du produit.

17 — Interprétation

Poussière, température, occultations et vieillissement doivent être ajoutés au modèle de mission.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

À facteurs indépendants, une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $G=600$, $A=10$, $\eta=0,28$, $\cos_{\text{theta}}=1$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$G=600$, $A=10$, $\eta=0,28$, $\cos_{\text{theta}}=1$. $P_{\text{solar}}=1\,680 \text{ W}$.

Exercice autonome. $G=500$, $A=15$, $\eta=0,25$, $\cos_{\theta}=0,6$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$G=500$, $A=15$, $\eta=0,25$, $\cos_{\theta}=0,6$. $P_{\text{solar}}=1\,125\text{ W}$.

21 — Décision mission

Conserver la production minimale qualifiée au-dessus de la charge critique avec marge.

Courant demandé au bus

$$I_{\text{bus}} = P_{\text{load}} / V_{\text{bus}}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $I_{\text{bus}} = P_{\text{load}} / V_{\text{bus}}$ » dans « Courant demandé au bus » ?

2 — Intuition sans symboles

À puissance donnée, une tension de bus plus élevée réduit le courant nécessaire et donc certaines pertes résistives.

3 — Grandeurs

I_{bus} : courant du bus; P_{load} : puissance de charge; V_{bus} : tension du bus

4 — Formule

$$I_{\text{bus}} = P_{\text{load}} / V_{\text{bus}}$$

5 — Lecture

Lire « $I_{\text{bus}} = P_{\text{load}} / V_{\text{bus}}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

I_{bus} : courant du bus; P_{load} : puissance de charge; V_{bus} : tension du bus

7 — Prononciation

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

8 — Unités

I_{bus} en A; P_{load} en W; V_{bus} en V

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 compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.

11 — Hypothèses

Les deux quantités doivent appartenir au même périmètre et à la même période.

12 — Contrôle d'unités

I_{bus} en A; P_{load} en W; V_{bus} en V. Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $P_{\text{load}}=2\,800\text{ W}$ et $V_{\text{bus}}=28\text{ V}$, $I_{\text{bus}}=100\text{ A}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.

15 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit restituer le numérateur.

16 — Estimation mentale

Avant calcul, comparer mentalement le numérateur au dénominateur pour savoir si le résultat doit être inférieur, proche ou supérieur à un.

17 — Interprétation

La relation idéale ne remplace pas l'analyse des pertes, transitoires et limites des convertisseurs.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente si le numérateur augmente et diminue si le dénominateur augmente, toutes choses égales par ailleurs.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $P_{\text{load}}=1\,200\text{ W}$, $V_{\text{bus}}=24\text{ V}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$P_{\text{load}}=1\,200\text{ W}$, $V_{\text{bus}}=24\text{ V}$. $I_{\text{bus}}=50\text{ A}$.

Exercice autonome. $P_{\text{load}}=4\,800\text{ W}$, $V_{\text{bus}}=48\text{ V}$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$P_{\text{load}}=4\,800\text{ W}$, $V_{\text{bus}}=48\text{ V}$. $I_{\text{bus}}=100\text{ A}$.

21 — Décision mission

Vérifier que protections, câbles et convertisseurs supportent le courant maximal crédible.

Utilisation processeur de tâches périodiques

$$U_{\text{cpu}} = C1/T1 + C2/T2 + C3/T3$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $U_{\text{cpu}} = C1/T1 + C2/T2 + C3/T3$ » dans « Utilisation processeur de tâches périodiques » ?

2 — Intuition sans symboles

Chaque tâche périodique consomme une fraction du processeur; ces fractions s'additionnent pour estimer la charge temporelle.

3 — Grandeurs

U_{cpu} : fraction de temps processeur demandée; $C1$: temps calcul tâche un; $T1$: période tâche un; $C2$: temps calcul tâche deux; $T2$: période tâche deux; $C3$: temps calcul tâche trois; $T3$: période tâche trois

4 — Formule

$$U_{\text{cpu}} = C1/T1 + C2/T2 + C3/T3$$

5 — Lecture

Lire « $U_{\text{cpu}} = C1/T1 + C2/T2 + C3/T3$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

U_{cpu} : fraction de temps processeur demandée; $C1$: temps calcul tâche un; $T1$: période tâche un; $C2$: temps calcul tâche deux; $T2$: période tâche deux; $C3$: temps calcul tâche trois; $T3$: période tâche trois

7 — Prononciation

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

8 — Unités

chaque rapport C/T sans dimension; U_{cpu} sans dimension

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

L'addition rassemble des contributions exprimées sur la même base pour obtenir un total cohérent.

11 — Hypothèses

Toutes les contributions doivent employer une unité et un périmètre communs.

12 — Contrôle d'unités

chaque rapport C/T sans dimension; U_{cpu} sans dimension Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $C1/T1=2/10$, $C2/T2=1/5$ et $C3/T3=1/20$, $U_{cpu}=0,20+0,20+0,05=0,45$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

L'addition rassemble des contributions exprimées sur la même base pour obtenir un total cohérent.

15 — Contrôle indépendant

Retirer une contribution du total doit restituer la somme des autres.

16 — Estimation mentale

Additionner d'abord les termes dominants donne rapidement l'ordre de grandeur.

17 — Interprétation

Une utilisation inférieure à un ne suffit pas à prouver l'ordonnançabilité de toutes les échéances.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Le total varie linéairement avec chaque contribution si les autres restent constantes.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $C1/T1=1/4$, $C2/T2=1/10$, $C3/T3=1/20$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$C1/T1=1/4$, $C2/T2=1/10$, $C3/T3=1/20$. $U_{cpu}=0,25+0,10+0,05=0,40$.

Exercice autonome. $C1/T1=3/10$, $C2/T2=2/10$, $C3/T3=1/10$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$C1/T1=3/10$, $C2/T2=2/10$, $C3/T3=1/10$. $U_{cpu}=0,60$.

21 — Décision mission

Analyser temps réel, priorités, gigue et pire cas avant de certifier le logiciel de vol.

Progression de maîtrise

1. puissance électrique: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. bus électrique: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. avionique: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. logiciel de vol: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Énergie, avionique & logiciel de vol »: comparez « puissance électrique » à « bus électrique »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 20 — puissance électrique, bus électrique, avionique, logiciel de vol. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Reconstruire avec ses propres mots le mécanisme étudié dans « Comprendre avant de calculer ».
- Vérifier par un ordre de grandeur le résultat utilisé dans « puissance électrique ».
- Proposer un contrôle indépendant avant de conclure sur « bus électrique ».
- Justifier une action de mission à partir des limites observées dans « avionique ».

1. Budget de puissance et profil de mission

Le budget distingue puissance moyenne, puissance de pointe et énergie sur une durée. Une charge de 2 kW pendant dix minutes ne consomme pas la même énergie qu'une charge de 500 W pendant dix heures. Pour chaque [phase](#) de mission, on additionne les charges, les pertes et la marge puis on compare à la production et au stockage disponibles.

2. Production: solaire, sources alternatives et orientation

Un générateur solaire dépend du flux reçu, de la surface, du rendement, de la [température](#) et de l'orientation. Sur Mars, poussière et saison modifient encore la [disponibilité](#). D'autres architectures peuvent utiliser des sources nucléaires ou hybrides. La question système reste la même: quelle puissance garantie peut-on fournir dans le pire état crédible, pas seulement à midi dans le cas nominal?

3. Batteries: énergie, puissance, profondeur de décharge et vieillissement

Une batterie a une capacité énergétique mais aussi des limites de courant, température et état de charge. Des cycles profonds ou des températures défavorables accélèrent le vieillissement. Le dimensionnement doit donc conserver une marge après plusieurs années, pas uniquement le premier jour. Le système de gestion protège les cellules mais peut lui-même devenir une fonction critique.

4. Conversion et distribution

Les panneaux et batteries ne délivrent pas forcément la tension souhaitée par chaque équipement. Convertisseurs, bus, protections et interrupteurs distribuent l'énergie. Une architecture doit isoler un défaut sans éteindre tout le véhicule. Les courants de court-circuit, appels au démarrage et pertes de conversion appartiennent au budget, tout comme les chemins de retour et la compatibilité électromagnétique.

Approfondissement — Architecture électrique: un bus n'est pas seulement une tension nominale

Dire qu'un habitat utilise un bus de 120 V ne décrit presque rien de sa [résilience](#). Il faut connaître la puissance maximale, les courants de défaut, les protections, les convertisseurs, les [masses](#) communes, les modes d'ilotage et les charges prioritaires. La puissance électrique P vaut $P = U \times I$ en courant continu, où P est la puissance en watts, U la tension en volts et I le courant en ampères. Une charge de 6 kW sur 120 V consomme donc $6\,000 \div 120 = 50$ A. Dix charges identiques demanderaient 500 A si elles démarraient ensemble.

Le démarrage est justement critique: moteurs, compresseurs et convertisseurs peuvent produire des appels de courant. Le réseau doit empêcher une charge défaillante de faire tomber toutes les autres. Les protections sélectives cherchent à ouvrir le disjoncteur le plus proche du défaut avant les protections amont. Dans une base martienne, l'objectif n'est pas seulement d'éviter un incendie; il faut conserver l'oxygène, le refroidissement et les communications même lorsqu'un atelier industriel est isolé.

5. Capteurs, acquisition et calcul embarqué

L'avionique transforme le monde physique en données: tensions, températures, accélérations, images, pression. Le calculateur horodate, filtre et interprète ces mesures. Une valeur numérique n'est utile que si l'on connaît sa plage, sa précision, sa fréquence d'échantillonnage et son statut. Un capteur bloqué à une valeur plausible est souvent plus dangereux qu'un capteur manifestement mort.

6. Bus de données et interfaces

Les sous-systèmes échangent commandes et télémesures par des bus et réseaux. Les interfaces doivent préciser formats, unités, [cadence](#), latence, comportement en erreur et autorité. Deux équipements peuvent fonctionner parfaitement séparément et échouer une fois intégrés si l'un attend des degrés et l'autre envoie des radians, ou si une commande est interprétée avec un mauvais état.

7. Logiciel de vol: états, tâches et déterminisme

Le logiciel de vol exécute des tâches périodiques, gère des états de mission et applique des règles de sécurité. Dans un système critique, il faut pouvoir expliquer quelles conditions déclenchent une transition et quel composant a autorité. Le déterminisme signifie qu'une fonction critique respecte ses délais et son ordre d'exécution; il ne suffit pas qu'elle soit « rapide en moyenne ».

Approfondissement — Logiciel temps réel: être correct trop tard revient souvent à être faux

Un logiciel de vol doit produire le bon résultat dans une fenêtre de temps garantie. On distingue donc la logique fonctionnelle de la contrainte temporelle. Si une boucle de [guidage](#) doit s'exécuter toutes les 20 ms, où ms signifie milliseconde, une réponse calculée en 35 ms peut rendre le système instable même si l'algorithme mathématique est parfait. Le temps d'exécution au pire cas, souvent noté WCET pour *worst-case execution time*, doit rester inférieur au budget alloué avec une marge.

La concurrence entre tâches ajoute un autre risque: une fonction peu importante peut bloquer une ressource utilisée par une fonction critique. Les architectures temps réel imposent donc des priorités, des limites d'accès mémoire, des files de messages et des mécanismes de surveillance. Pour Mars, la lenteur du lien avec la Terre rend cette discipline encore plus importante. Un habitat ne peut pas attendre vingt minutes qu'un opérateur distant redémarre un processus chargé de maintenir la pression ou d'empêcher une batterie de dépasser sa température sûre.

8. FDIR et mode sûr

Fault Detection, Isolation and Recovery regroupe détection, localisation et réponse aux défauts. Une réaction automatique peut sauver un véhicule mais aussi aggraver une mauvaise mesure. Le [mode sûr](#) vise un état durable où énergie, thermique et communications sont stabilisés pendant que le diagnostic continue. Il doit être testé comme une vraie [configuration](#), pas seulement décrit dans un document.

Approfondissement — FDIR et modes dégradés: continuer à vivre après la première panne

FDIR signifie *Fault Detection, Isolation and Recovery*: détection, isolation et récupération après défaut. La première étape est de détecter qu'une observation est incompatible avec le comportement attendu. La seconde consiste à isoler la cause probable sans arrêter inutilement les fonctions saines. La troisième choisit un état de repli. Un mode sûr n'est pas nécessairement un mode confortable: il peut couper les charges non essentielles, réduire la production, fermer des vannes et attendre davantage d'informations.

La [qualité](#) d'un FDIR dépend de la distinction entre panne réelle et capteur trompeur. Si deux sondes de température se contredisent, le logiciel doit savoir quelles informations indépendantes peuvent départager le diagnostic: courant du chauffage, température d'une paroi voisine, pression ou modèle thermique. Sur Mars, les procédures de reprise doivent aussi préciser quand l'automatisme a le droit de redémarrer seul et quand il doit attendre un humain. L'autonomie utile n'est pas la liberté maximale du logiciel; c'est l'autorité minimale suffisante pour empêcher une panne locale de devenir une perte de l'habitat.

9. Logiciel critique: exigences, tests et configuration

Le logiciel évolue jusqu'au lancement et parfois après. Il faut donc versionner code, paramètres, interfaces et résultats d'essai. Chaque **exigence** critique doit être vérifiable. Les tests unitaires ne suffisent pas: intégration, simulation, matériel-dans-la-boucle, scénarios d'erreur et régression sont nécessaires pour comprendre le comportement du système complet.

Exemple calculé pas à pas

La méthode de travail est toujours la même: écrire ce que représente chaque symbole, convertir toutes les unités vers un système cohérent, effectuer l'opération, puis traduire le résultat en phrase — « Approfondissement — FDIR et modes dégradés ». Enfin, faire un contrôle d'ordre de grandeur. Pour « Approfondissement — FDIR et modes dégradés », si le résultat change de facteur mille lorsqu'on passe de millimètres à mètres, la conversion doit être visible dans le calcul.

Exercice progressif

1. Choisissez un cas élémentaire de « puissance électrique », puis dressez les données utiles à « Énergie, avionique & logiciel de vol », leur origine et leurs unités avant de calculer.
2. Calculer le résultat nominal sans marge.
3. Modifier le paramètre le plus incertain de $\pm 20\%$ et comparer — « Approfondissement — FDIR et modes dégradés ».
4. Ajouter une panne crédible et expliquer quel indicateur permet de la détecter — « Approfondissement — FDIR et modes dégradés ».
5. Décider si le système continue, se dégrade ou doit s'arrêter — « Approfondissement — FDIR et modes dégradés ».

Solution raisonnée

Pour « Énergie, avionique & logiciel de vol », le résultat final doit être accompagné de son unité, de l'hypothèse qui le domine et de ce qu'il change pour « puissance électrique ». Elle montre les conversions, la logique de la formule, la sensibilité et la décision — module 20 · Solution raisonnée. Si deux hypothèses différentes conduisent à la même décision opérationnelle, la conception est relativement robuste à cette **incertitude**. Dans le corrigé de « Énergie, avionique & logiciel de vol », une variation capable d'inverser la conclusion sur « puissance électrique » devient une priorité de mesure ou de marge.

Mini-projet de validation

Construisez un dossier de validation consacré à « Énergie, avionique & logiciel de vol »: il doit rendre vérifiable au moins un choix concernant « puissance électrique » et expliciter le cas qui ferait rejeter ce choix. Le mini-projet est accepté seulement si un autre équipier peut refaire le raisonnement sur Comprendre avant de calculer, retrouver la marge liée à puissance électrique et comprendre la décision prise pour bus électrique. Le mini-projet sur « Énergie, avionique & logiciel de vol » est recevable si un autre équipier peut reproduire la vérification de « puissance électrique » et retrouver la même décision à partir des mêmes données.

Erreurs classiques à détecter

- Attribuer une cause à « puissance électrique » sans vérifier un indice indépendant du même phénomène.
- Utiliser une valeur de « puissance électrique » sans indiquer son unité, son origine ou sa plage de validité.
- Conclure sur « bus électrique » à partir du cas nominal alors qu'un état dégradé change la décision.
- Dans « Énergie, avionique & logiciel de vol », ne laissez jamais une précision numérique masquer l'hypothèse qui commande réellement le résultat.

Sources primaires et passerelles

- [NASA — Small Spacecraft Avionics](#)
- [NASA-STD-8739.8 — Software Assurance and Software Safety](#)

Repères lexicaux du module. état dégradé

- [www.nasa.gov — documentation institutionnelle](#)
- [standards.nasa.gov — documentation institutionnelle](#)
- [Space Academy — parcours complet](#)

Matrice de parité FR ↔ EN

FR	EN
Puissance électrique sur un bus continu	Electrical power on a DC bus
Énergie consommée sur une durée	Energy consumed over time
Énergie utilisable d'une batterie	Usable battery energy
Puissance solaire captée	Captured solar power
Courant demandé au bus	Current demanded from a bus
Utilisation processeur de tâches périodiques	CPU utilisation of periodic tasks