

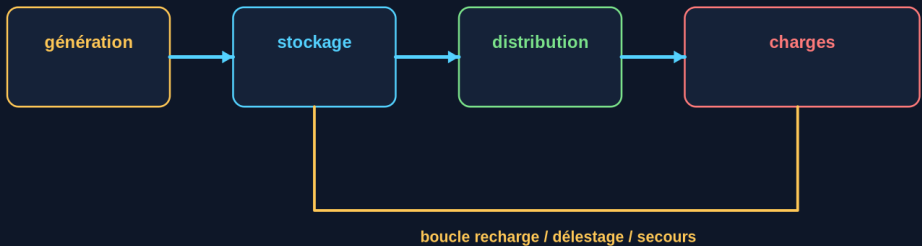
Énergie électrique : produire, stocker, distribuer et délester

Réponse essentielle

Énergie électrique : produire, stocker, distribuer et délester. La question à résoudre est la suivante : Comment avoir assez d'énergie sans manquer de puissance au mauvais moment ? Panneaux, batterie et distribution doivent supporter simultanément les charges critiques. Une grande batterie ne compense pas un convertisseur ou un câble trop faible. La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres et quelle décision d'ingénierie il éclaire.

Chaîne électrique du vaisseau

Produire → stocker → distribuer → protéger → délester les charges selon le mode de mission



Panneaux, batterie et distribution doivent supporter simultanément les charges critiques. Une grande batterie ne compense pas un convertisseur ou un câble trop faible.

Rythme de transfert d'énergie, en watts.

Avant de calculer

Grandeur:	Énergie électrique : produire, stocker, distribuer et délester
Contrôle:	unités + ordre de grandeur + hypothèses
Décision:	expliquer ce que le résultat autorise réellement à conclure

Énergie électrique : produire, stocker, distribuer et délester

2 — Les mots indispensables, expliqués avant de les utiliser

Rythme de transfert d'énergie, en watts.

Quantité accumulée sur une durée.

Adapte tension ou courant avec des pertes.

Couper des charges non prioritaires.

3 — Voir l'architecture avant de calculer

La capacité dépend illumination, orientation, température et vieillissement.

État de charge et puissance disponible sont deux notions différentes.

Câbles, protections et convertisseurs ont leurs propres limites.

Le mode dégradé coupe ce qui n'est pas vital.

4 — Les formules, seulement lorsqu'elles répondent à une question

Comment cela se lit : puissance égale tension multipliée par courant

U en volts, I en ampères.

Comment cela se lit : énergie égale puissance multipliée par temps

Avec P constant, les Wh s'obtiennent en multipliant W par heures.

Comment cela se lit : pertes égales courant au carré fois résistance

Doubler le courant multiplie cette perte par quatre.

5 — Ce que les unités et les marges veulent dire

V, A, W, Wh/J et Ω. 1 Wh = 3 600 J.

6 — Trois démonstrations concrètes, calculées pas à pas

300 W pendant 3 h.

Réserve pédagogique 20 % = 180 Wh

1 200 W sur 48 V.

Si $R=0,02\ \Omega$: pertes = $25^2 \times 0,02$

Capacité 2 000 W, demande 2 350 W.

Couper 500 W non critiques

7 — Approfondissement : ce que le schéma simplifié cache

La capacité vieillit et dépend de la température.

Un court-circuit doit être isolé sans éteindre tout le vaisseau.

Ondulation et transitoires peuvent perturber les équipements.

Lecture active

Sections: 2 — Les mots indispensables, expliqués avant de les utiliser ; 3 — Voir l'architecture avant de calculer

Vérification: Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.

Exercice: modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Énergie électrique : produire, stocker, distribuer et délester

Le pic dimensionne souvent plus que la moyenne.

Toute perte électrique finit en chaleur à évacuer.

8 — Application à un vaisseau Terre-Mars**9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte**

La puissance dit à quelle vitesse l'énergie est consommée ou produite ; l'énergie dit combien a été accumulé ou dépensé sur une durée. Un équipement de 1 000 watts pendant dix secondes n'impose pas la même capacité de batterie qu'un équipement de 200 watts pendant dix heures. Le générateur doit supporter certains pics ; la batterie doit couvrir les périodes sans production ou les pointes ; la distribution doit transporter le courant sans chute de tension excessive. Ces trois problèmes utilisent des unités et des horizons de temps différents.

Un bilan électrique sérieux liste chaque charge, son mode d'activité, son rendement, sa durée et sa priorité. Il distingue puissance moyenne, pointe transitoire et énergie quotidienne. Les marges sont appliquées selon les règles du projet. Les charges vitales - ordinateur de bord, chauffage antigel, communications de secours - doivent souvent rester alimentées même lorsqu'on déleste les charges non essentielles. Une table de délestage indique alors dans quel ordre couper les consommateurs lorsque la capacité disponible baisse.

La capacité utilisable dépend de la température, du courant, de l'état de charge, de la profondeur de décharge, du vieillissement et du nombre de cycles. Une batterie froide peut fournir moins de puissance ; une batterie trop chaude vieillit plus vite et peut présenter des risques de sécurité. Le système de gestion surveille tensions, courants et températures, équilibre les cellules et impose des limites. Sur une mission longue, la capacité en fin de vie est plus importante que la capacité du premier jour.

Les panneaux ou générateurs ne fournissent pas nécessairement la tension exacte demandée par chaque équipement. Convertisseurs et régulateurs adaptent la puissance, mais leur rendement est inférieur à 100 % : la différence devient chaleur. Fusibles, disjoncteurs électroniques ou limiteurs isolent les courts-circuits. L'architecture doit éviter qu'une panne locale fasse s'effondrer tout le bus électrique. Cela conduit à des branches protégées, parfois à plusieurs bus, et à une réflexion sur les défauts communs.

Une alimentation ne se résume pas à « 28 volts » ou « 120 volts ». Il faut aussi considérer ondulation, bruit, transitoires, courant d'appel, tolérance de tension et perturbations électromagnétiques. Un moteur ou un chauffage commuté peut injecter du bruit qui perturbe un capteur sensible. La conception des masses électriques, filtres, câblages et séquences d'allumage fait donc partie du système. Les essais de compatibilité vérifient que chaque équipement fonctionne lorsqu'il est réellement connecté aux autres.

Presque toute l'énergie électrique consommée finit finalement sous forme de chaleur à l'intérieur du véhicule, sauf la part exportée sous une autre forme - émission radio, travail mécanique externe, lumière quittant le véhicule, etc. Un ordinateur consommant 200 watts impose donc environ cet ordre de grandeur de chaleur à collecter et rejeter. Améliorer le rendement d'un convertisseur économise de l'énergie et réduit simultanément la charge thermique. C'est un exemple parfait d'optimisation système plutôt que d'optimisation isolée.

Lecture active

Sections: 8 — Application à un vaisseau Terre-Mars ; 9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte

Vérification: Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.

Exercice: modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Énergie électrique : produire, stocker, distribuer et délester

Un vaisseau de transit et une base martienne n’ont pas les mêmes profils. Sur la surface, l’alternance jour-nuit, la poussière et les saisons affectent le solaire ; une source nucléaire obéit à d’autres contraintes. Le stockage doit couvrir les périodes défavorables et les scénarios de panne. Il faut distinguer « énergie suffisante sur une journée moyenne » et « puissance garantie au pire moment ». Pour les fonctions vitales, le second critère est souvent celui qui détermine l’architecture.

10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions

Supposer qu’une batterie peut fournir toute puissance.

Le réseau électrique se dimensionne par modes, pas par moyenne

Une architecture électrique relie génération, stockage, conversion, distribution, protection et charges. Un panneau solaire peut produire assez d’énergie sur 24 heures tout en étant incapable de fournir un pic de quelques minutes sans batterie. Inversement, une grande batterie ne résout pas une génération insuffisante sur plusieurs jours.

Le budget doit donc séparer puissance en watts et énergie en wattheures. Pour chaque mode, on additionne charges permanentes et temporaires, pertes de conversion et marges. La fin de vie est souvent plus exigeante que le début de mission : cellules solaires dégradées, batterie vieillie, température différente et contamination éventuelle.

Le délestage est une fonction de sûreté, pas un échec. Lorsque production ou stockage deviennent insuffisants, le système coupe d’abord les charges non vitales afin de conserver ordinateur, thermique minimal, communications et fonctions de récupération. Cette hiérarchie doit être définie avant la panne.

11 — Exercices guidés

Question : Quelle question faut-il poser avant de choisir un équipement ?

Question : Pourquoi un résultat nominal ne suffit-il pas ?

12 — À retenir

Expliquer le sujet avec des mots simples avant les symboles.

Relier au moins quatre interfaces avec les autres sous-systèmes.

Refaire les trois exemples numériques sans saut de raisonnement.

Calculateur lié : solaire + batteries

Explorer l’effet de la charge, des heures solaires équivalentes, des pertes et de l’autonomie de batterie.

13 — Sources NASA pour approfondir

NASA - 2026 State-of-the-Art: Power

NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms

Lecture active

Sections: 10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions ; Le réseau électrique se dimensionne par modes, pas par moyenne

Vérification: NASA - 2026 State-of-the-Art: Power | NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms | NASA Systems Engineering Handbook

Exercice: modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer