

Fiche-professeur :

Approvisionnement énergétique de la station spatiale internationale

Classes de 5e et 4e

Markus Nielbock
traduction française : Paola Kiehl

22 janvier 2019

Résumé

Cette fiche d'activité permet aux élèves de découvrir le fonctionnement du système d'alimentation énergétique de la station spatiale internationale. Les élèves ont à leur disposition l'outil de télémétrie de l'ISS qui collecte les données de la station en temps réel, ainsi que les données incluses dans le présent document et pourront donc calculer l'énergie électrique fournie par les panneaux photovoltaïques de l'ISS.

Objectifs

- Au travers de cette activité, les élèves pourront :
 - calculer la surface des panneaux photovoltaïques de l'ISS,
 - calculer la production d'énergie électrique à bord de l'ISS,
 - calculer la part d'énergie solaire convertie en énergie électrique,
 - tenir compte du coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques dans leurs calculs.

Matériel

- Fiches de travail (disponibles sur : <http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung>)
- Stylo
- Calculatrice
- Ordinateur/Tablette/Smartphone avec un accès internet (optionnel)

Mots-clés

Station spatiale internationale, ISS, panneaux photovoltaïques, constante solaire, électricité, voltage, intensité du courant, puissance.

Durée

90 minutes

Contexte

La station spatiale internationale (ISS)



Figure 1 – L'ISS en 2011 (Image : NASA).

La station spatiale internationale (ISS, Fig. 1) est en constante évolution : depuis sa construction en 1998, (Loff 2015) différents modules (Fig. 2) viennent régulièrement la compléter. (Zak 2017). La station restera en service jusqu'en 2024 au minimum, mais son exploitation se prolongera sûrement jusqu'en 2028 (Sputnik 2016 ; Ulmer 2015). La structure de l'ISS pèse 420 tonnes, mesure 109 mètres de long, 73 mètres de large (Garcia 2018b) et 45 mètres de haut (ESA 2014). Située à 400 kilomètres d'altitude, la station spatiale internationale parcourt l'orbite terrestre en 92 minutes (Howell 2018).

Configuration de la station spatiale internationale (ISS)

Juin 2017

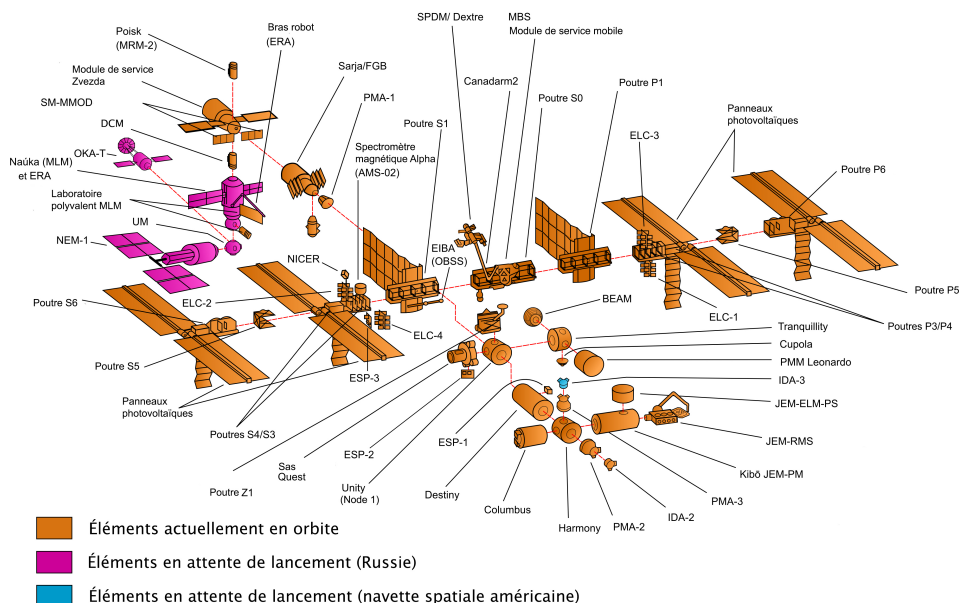


Figure 2 – Les modules de la station spatiale en juin 2017 (Image : NASA ; traduction française : P. Kiehl).

L'ISS est un programme international qui rassemble actuellement 15 pays (ESA 2013 ; Garcia 2018a). La station sert de laboratoire de recherche et permet ainsi de mener des expériences que certains facteurs comme la gravité terrestre sont susceptibles d'entraver. L'ISS permet également d'aborder la question de la médecine spatiale afin de préparer au mieux les futures missions au sein du système solaire.

La Fig. 2, représente les différents modules et capteurs solaires qui génèrent l'énergie nécessaire à l'approvisionnement énergétique de l'ISS. Au cours de ce chapitre consacré à l'approvisionnement énergétique de la station, nous reviendrons, dans un premier temps, sur quelques notions fondamentales.

Notions fondamentales de l'électricité

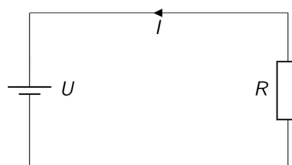
L'électromagnétisme est l'une des quatre forces fondamentales d'interaction de la matière. Cette force établit un lien entre électricité et magnétisme. La charge électrique est l'un des composants de base de l'électricité ; la charge peut être positive ou négative. Les charges de même signe se repoussent, tandis que celles de signes opposés s'attirent. La charge élémentaire e correspond à la valeur absolue de la charge d'un électron ; il s'agit d'une constante physique fondamentale. L'unité de mesure de la charge est le coulomb, unité qui doit son nom au physicien français Charles Augustin de Coulomb.

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

La charge électrique a pour symbole la lettre Q . Il y a généralement un équilibre entre les charges positives et négatives ; on parle alors de neutralité électrique. Lorsqu'un courant électrique circule, les particules chargées positivement et celles chargées négativement s'écoulent dans des sens opposés. On appelle tension électrique (U) la circulation du champ électrique le long d'un circuit électrique. Ainsi, à l'intérieur d'une pile, les porteurs de charges positives et négatives sont disposés séparément de sorte à produire une tension, sans compensation possible. Si les deux pôles électriques externes sont connectés par un objet conducteur, les charges se déplacent et le courant circule. Les porteurs de charges sont des entités qui, en se déplaçant, assurent le passage du courant. Ce mouvement entraîne une variation de la charge au cours du temps, variation que l'on appelle intensité du courant (I). Elle reflète la quantité et la vitesse du courant électrique qui circule en un point donné du circuit électrique. Si des charges de 1 coulomb par seconde traversent le conducteur, on obtient un courant de 1 ampère, unité qui doit son nom au physicien français André-Marie Ampère.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Si l'on branche un récepteur électrique, tel qu'une lampe ou un moteur, c'est le courant qui produit l'énergie électrique. En effet, le récepteur tire son énergie du courant électrique. On peut ainsi énoncer la loi d'Ohm qui établit que la tension U aux bornes d'une résistance R est proportionnelle à l'intensité du courant I . Le courant traverse alors le circuit électrique.



$$U = R \cdot I$$

La résistance électrique traduit la propriété d'un composant à s'opposer au passage d'un courant électrique. Son unité de mesure, l'ohm (Ω), doit son nom au physicien allemand Georg Simon Ohm. La résistance d'une ampoule est proportionnelle à la longueur et l'épaisseur du filament. L'unité de mesure de la tension électrique est le volt V , qui doit son nom au physicien italien Alessandro Volta. L'énergie consommée correspond à une puissance électrique P , qui dépend de la tension appliquée au récepteur ainsi que de l'intensité du courant. Son unité de mesure est le Watt (W), ainsi nommée en l'honneur du célèbre ingénieur écossais James Watt.

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Ainsi, un moteur alimenté par un courant de 1 A et une tension de 1 V génère une puissance électrique de 1 W.

Luminosité et constante solaire

Comme toutes les étoiles, le Soleil est une gigantesque sphère de gaz brûlants. À sa surface, la température est extrêmement élevée avec 5778 K, soit 6051 °C.

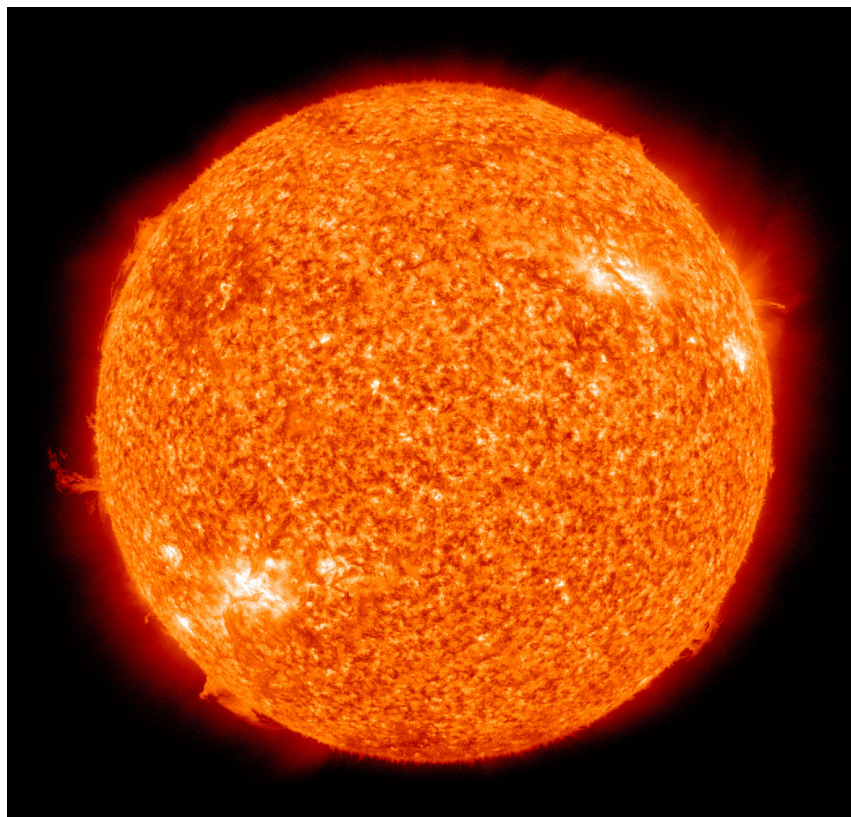


Figure 3 – Le Soleil photographié depuis l'Observatoire de la dynamique solaire (SDO). (Image : NASA/SDO (AIA)).

Le Soleil émet constamment de puissantes ondes électromagnétiques. Ce rayonnement solaire constitue une importante source d'énergie que l'on nomme *Luminance* L , soit l'énergie émise par unité de temps, exprimée en Watt.

$$L_{\odot} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Cependant, par rapport à d'autres étoiles plus brillantes, la luminance du Soleil est relativement faible. On peut également considérer l'énergie émise par unité de surface, que l'on nomme intensité \mathcal{I} . Le rayon du Soleil mesure $R_{\odot} = 695\,508 \text{ km}$. On calcule donc l'aire du Soleil à l'aide de la formule $O = 4 \cdot \pi \cdot r^2$. Ainsi :

$$\mathcal{I}_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{O_{\odot}} = \frac{L_{\odot}}{4 \cdot \pi \cdot R_{\odot}^2}$$

Après conversion on obtient 6300 W/cm^2 . L'équation permet également d'observer que l'intensité mesurée dépend du rayon de la sphère. Puisque la question de l'intensité à la surface terrestre est centrale dans ce chapitre, on considère une sphère dont le rayon correspond à la distance Terre-Soleil, soit en moyenne $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$.

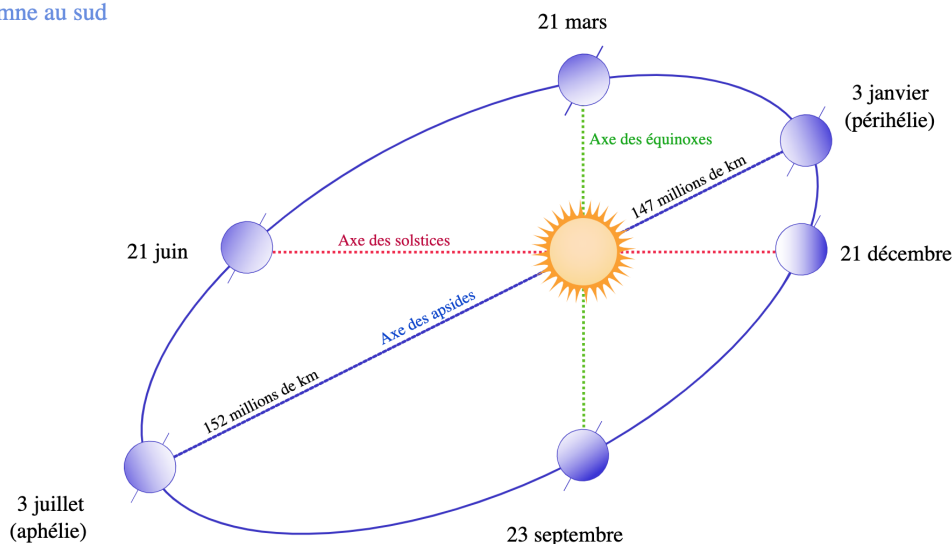
Ainsi :

$$\mathcal{I}_{\text{Terre}} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

On obtient ainsi la constante solaire (E_0). Cette dernière ne s'applique qu'à la distance moyenne entre la Terre et le Soleil. En raison de l'excentricité de l'orbite terrestre, la valeur réelle de l'intensité du Soleil varie entre 1325 et 1420 W/m^2 par an.

Printemps au nord
Automne au sud

Hiver au nord
Été au sud



Été au nord
Hiver au sud

Automne au nord
Printemps au sud

Figure 4 – Schéma de l'orbite de la Terre autour du Soleil. (Image : Gothika) (https://fr.wikipedia.org/wiki/Solstice#/media/File:Seasons_fr.svg), <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>).

L'approvisionnement énergétique de l'ISS

Le Soleil est la seule source d'énergie disponible pour alimenter la station spatiale internationale. C'est pourquoi 16 panneaux solaires, chacun composé de 16 400 cellules photovoltaïques, sont installés sur l'ISS, pour stocker et convertir l'énergie solaire en énergie électrique (Garcia 2017). Chaque panneau mesure environ 33,9 m de long et 4,7 m de large (McDonald 2010). Les ailes solaires, qui comprennent chacune deux panneaux, pivotent de manière à toujours positionner les cellules photovoltaïques face au Soleil (Fig. 5).



Figure 5 – L'ISS en 2009. On observe bien les modules solaires, composés chacun de deux surfaces de capteurs. Les modules pivotent sur leur axe afin d'être toujours alignés avec le Soleil. (Image : NASA).

La constante solaire détermine la quantité d'énergie solaire captée par les panneaux solaires et la quantité disponible pour produire de l'électricité. Cependant, les panneaux ne peuvent pas convertir l'intégralité de l'énergie solaire en énergie électrique. Les pertes sont parfois considérables. Ceci s'explique également par le fait que seule une infime partie du spectre lumineux peut être utilisée lors de cette conversion. L'efficacité énergétique η indique le taux d'énergie solaire pouvant être converti en électricité. Pour les panneaux de l'ISS, ce taux est de l'ordre de 14,5%. On retrouvera des données supplémentaires dans le tableau 1.

Lorsqu'elle orbite, l'ISS se retrouve parfois dans la zone d'ombre de la Terre. Alors, les panneaux solaires ne reçoivent plus la lumière du soleil et ne peuvent plus produire d'électricité. Des batteries, préalablement chargées lorsque l'ISS était encore éclairée par le Soleil, prennent le relais (Garcia 2017).

Table 1 – Degré d'efficacité des différents types de panneaux solaires (Dimroth et al. 2014 ; Quaschnig 2013)

Matériau	Efficacité maximale en laboratoire	Efficacité maximale (production en série)	Efficacité type du module
Silicium monocristallin	25,0%	22,9%	16%
Silicium polycristallin	20,4%	17,8%	15%
Silicium amorphe	12,5%	7,6%	6%
CIS/CIGS ^a	20,4%	15,1%	12%
CdTe	18,7%	12,8%	11%
Cellules photovoltaïques à concentration	43,6 – 44,7%	40,0%	30%

^a Séléniure de cuivre et d'indium (CIS) et séléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS)

Le programme SPARTAN

L'alimentation électrique (EPS, Electrical Power System) de l'ISS est surveillée par le programme informatique SPARTAN (Station Power, Articulation and Thermal Control). Les données de la station sont alors affichées sur différents écrans ou consoles (Fig. 6).

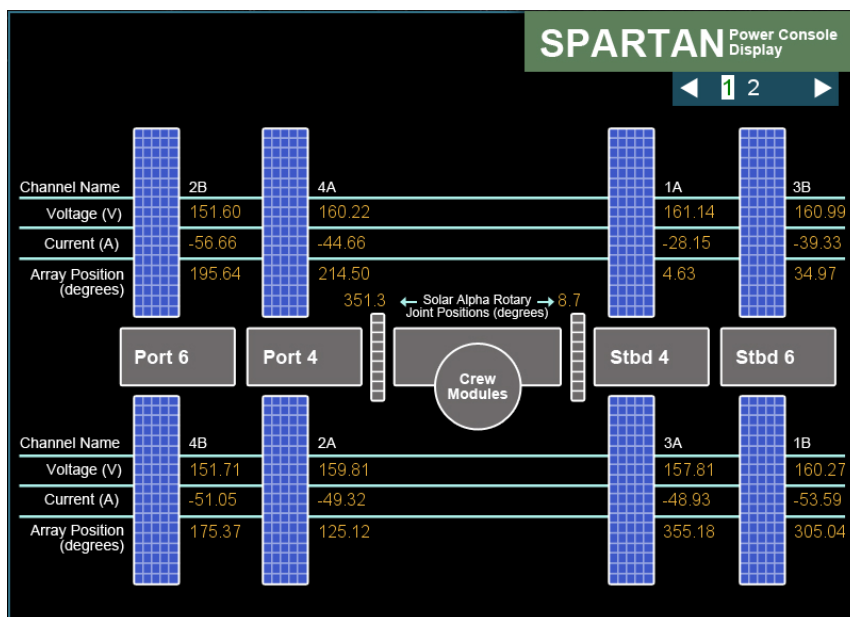


Figure 6 – Le logiciel SPARTAN permet de surveiller l'alimentation énergétique de l'ISS (Image : NASA, ISSLIVE).

On peut ainsi observer en temps réel et pour chaque module solaire, la tension (Voltage) et le courant (Current) générés ainsi que les angles de rotation des modules par rapport au soleil.

Fiche d'activité : l'ISS et l'énergie solaire

Fiche du professeur : prérequis à la pratique de l'activité

- Se familiariser avec le site <https://isslive.com>. Cette page en anglais donne accès à diverses informations concernant l'ISS ainsi qu'à la télémétrie de la station. Pour cette activité, on observera la télémétrie de l'EPS, accessible depuis la rubrique SPARTAN.
- Prévoir un nombre suffisant d'ordinateurs pour que les élèves puissent accéder au site internet. Si nécessaire, utiliser des smartphones ou tablettes ayant un accès internet. Si l'on ne dispose pas de tels outils, on se référera à l'exemple de la Fig. 6 et au tableau 2 pour réaliser l'activité.
- Se rendre sur l'interface SPARTAN (cf. Fig. 6). La page web permet de visualiser la position des huit modules solaires, chacun équipé de deux panneaux photovoltaïques, comme indiqué dans le tableau 2. Pour en savoir plus, on cliquera sur *Console Position Handbook*.
- Se familiariser avec les fiches d'exercices et prévoir le nombre requis de photocopies.

Proposition d'introduction

Ce chapitre nécessite une introduction succincte des concepts fondamentaux de l'électricité. Les élèves pourront ainsi appliquer leurs connaissances à la question de l'approvisionnement énergétique de la station spatiale internationale. On interrogera les élèves sur leur connaissance de l'ISS.

Il est possible de commencer l'activité par un quiz. On demandera aux élèves de deviner comment l'ISS produit son électricité : par le biais de piles à combustible, de panneaux solaires, de réacteurs nucléaires, ou d'énergie éolienne ? Pour réaliser un quiz en classe, on peut utiliser la plate-forme *Kahoot!* :

<https://play.kahoot.it/#/k/4c9c9430-ebb1-4a0f-84c2-2e583ec8e6f1>

Kahoot! est une plate-forme interactive en ligne qui permet à l'enseignant d'élaborer un quiz auquel les élèves répondent sur leur smartphone.

Cependant, cet outil n'est pas indispensable. On peut par ailleurs reprendre le principe de *Kahoot!* en élaborant un jeu de cartes pour lequel on attribuera une couleur par réponse possible.

Ce jeu introductif permet de lancer la discussion sur le sujet. Les élèves pourront effectuer des recherches en parallèle sur internet pour trouver des informations pertinentes et répondre à la question. On remarquera qu'en complément des panneaux photovoltaïques, des piles sont également utilisées lorsque l'ISS n'est pas éclairée par le soleil.

On demandera aux élèves de discuter en petits groupes des besoins énergétiques de la station spatiale. On distribuera ensuite les fiches d'activité.

Exercices

On effectuera les opérations suivantes :

- Calcul de la surface du collecteur de l'ISS
- Calcul de la puissance maximale du rayonnement solaire disponible pour la production d'électricité
- Calcul de la tension et du courant générés par les panneaux photovoltaïques
- Calcul de la puissance électrique disponible
- Résolution des questions

1. Superficie des panneaux photovoltaïques

À l'aide des données du chapitre "Contexte", calculez la surface d'un des 16 capteurs solaires ainsi que celle de l'ensemble des modules solaires. Comment peut-on déterminer la surface d'un rectangle ?

2. Puissance maximale

En prenant en compte la constante solaire E_0 , mesurez la puissance du rayonnement par capteur. L'efficacité énergétique η permet de connaître le pourcentage de la puissance de rayonnement qui peut être convertie en énergie électrique grâce aux panneaux solaires. En supposant $\eta = 0.145$, calculez la puissance électrique maximale produite par l'un des 16 modules de l'ISS.

3a. Puissance en temps réel (en ligne)

L'approvisionnement énergétique des panneaux photovoltaïques de l'ISS est contrôlé par différents systèmes. Ainsi, le système électrique (EPS, Electrical Power System) régule l'approvisionnement énergétique, tandis que le SPARTAN (Station Power, Articulation and Thermal Control) surveille les principaux paramètres.

De nombreuses informations sont disponibles en anglais sur le site internet <https://isslive.com>. Ainsi, on accède facilement à la télémétrie de l'ISS. Les paramètres de la station sont présentés sous la forme d'une console. Pour cet exercice, utilisez les données EPS que vous trouverez sous la rubrique SPARTAN.

Accédez à la page web à l'aide d'un ordinateur, d'une tablette ou d'un smartphone. Sélectionnez ensuite l'onglet *LiveData*, puis *SPARTAN*(Fig. 6). Sur la console, vous découvrirez l'emplacement des huit modules solaires, chacun composé de deux panneaux solaires Tab. 2. De telles consoles permettent aux techniciens du centre de contrôle de la NASA de vérifier l'état du système. Observez les valeurs de la tension (en anglais "voltage") et du courant (en anglais "current"), puis reportez-les dans le tableau 2. Enfin, calculez la puissance électrique P pour chaque module, faites la somme de ces valeurs et reportez-les dans le tableau.

Table 2 – Tension et courant des huit modules solaires.

Module	U (V)	I (A)	P (W)
1 A			
B			
2 A			
B			
3 A			
B			
4 A			
B			
Total			

3b. Puissance en temps réel (version papier)

L'approvisionnement énergétique des panneaux photovoltaïques de l'ISS est contrôlé par différents systèmes. La Fig.6 représente les valeurs de ces systèmes à par un graphique. De telles données permettent aux techniciens du centre de contrôle de la NASA de vérifier l'état du système. Observez les valeurs de la tension et du courant, puis reportez-les dans l'onglet 2. Enfin, calculez la puissance électrique P pour chaque module, faites la somme de ces valeurs et reportez-les dans le tableau.

4. Charge électrique

La puissance électrique maximale générée par les panneaux solaires est de 120 kW ou 120000 W. À l'aide des résultats de l'exercice 3, calculez le pourcentage de charge.

5. Discussion

Quelles sont les causes susceptibles d'empêcher les panneaux solaires de fonctionner à leur pleine capacité ?

Sur près d'un tiers de son orbite, l'ISS se trouve à l'ombre de la Terre, là où les panneaux solaires ne captent plus la lumière du soleil. Comment l'ISS s'alimente-t-elle alors en énergie ?

Solutions

1. Superficie des panneaux photovoltaïques

Dans le chapitre Contexte, on apprend qu'un module est composé de deux panneaux photovoltaïques, chacun mesurant 33,9 m de long et 4,7 m de large.

On calcule l'aire d'un rectangle en multipliant le côté long par le côté court. Ainsi :

$$A_{\text{pan}} = \ell \cdot b = 33,9 \text{ m} \cdot 4,7 \text{ m} = 159,33 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{total}} = 16 \cdot A_{\text{pan}} = 2549,28 \text{ m}^2$$

2. Puissance maximale

On peut déterminer la puissance maximale de rayonnement utilisable en multipliant la constante solaire (quantité d'énergie solaire reçue à la surface de la Terre) par la surface du capteur. Ainsi :

$$P_{\text{abs}} = E_0 \cdot A_{\text{pan}} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 159,33 \text{ m}^2 = 217804 \text{ W}$$

Afin de déterminer la puissance électrique maximale, on multiplie la puissance rayonnante absorbée par l'efficacité énergétique η .

$$P_{\text{el, pan}} = \eta \cdot P_{\text{abs}} = \eta \cdot E_0 \cdot A_{\text{pan}} = 0,145 \cdot 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 159,33 \text{ m}^2 = 31582 \text{ W}$$

3. Puissance en temps réel

Les valeurs réelles de tension et de courant varient dans le temps. Par conséquent, on ne trouvera ici que les résultats de la version papier.

On calcule la puissance électrique en multipliant la tension par le courant.

$$P_{el} = U \cdot I$$

Les résultats sont indiqués dans le Tab. 3.

Table 3 – Tension et courant des huit modules solaires.

Module	U (V)	I (A)	$P = U \cdot I$ (W)
1 A	161,14	28,15	4536
	160,27	53,59	8589
2 A	159,81	49,32	7882
	151,60	56,66	8590
3 A	157,81	48,93	7722
	160,99	39,33	6332
4 A	160,22	44,66	7155
	151,71	51,05	7745
Total			58555

4. Charge électrique

La charge électrique est le rapport entre la puissance électrique actuelle et la puissance électrique maximale disponible, générées par les modules solaires.

$$\frac{P_{act}}{P_{max}} = \frac{58555 \text{ W}}{120000 \text{ W}} = 0,488 = 48,8\%$$

Ici, les modules solaires ne sont utilisés qu'à la moitié de leur capacité.

5. Discussion

Quelles sont les causes susceptibles d'empêcher les panneaux solaires de fonctionner à leur pleine capacité ?

- Mauvais alignement des modules solaires
- Endommagement d'un module
- Usure du matériel, perte d'efficacité

L'ISS se retrouve parfois à l'ombre de la Terre, là où les panneaux solaires ne captent plus la lumière du soleil. D'où l'ISS tire-t-elle son énergie ?

- Des batteries, préalablement chargées lorsque l'ISS est encore éclairée par le Soleil, prennent le relais dans la zone d'ombre.

Références

- Dimroth, Frank et al. (2014). « Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency ». In : *Progress in Photovoltaics : Research and Applications* 22.3, p. 277–282. issn : 1099-159X. doi : [10.1002/pip.2475](https://doi.org/10.1002/pip.2475). url : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.2475> (visité le 17/07/2018).
- ESA (2013). *International Space Station legal framework*. European Space Agency. url : https://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/International_Space_Station_legal_framework (visité le 16/07/2018).
- (2014). *ISS : International Space Station*. European Space Agency. url : https://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/ISS_International_Space_Station (visité le 13/07/2018).
- Garcia, Mark (2017). *About the Space Station Solar Arrays*. NASA. url : http://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/solar_arrays-about.html (visité le 13/07/2018).
- (2018a). *20 Years Ago : Space Station Partners Sign Intergovernmental Agreement*. NASA. url : <http://www.nasa.gov/feature/20-years-ago-station-partners-sign-intergovernmental-agreement-iga> (visité le 16/07/2018).
- (2018b). *International Space Station Facts and Figures*. NASA. url : <http://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures> (visité le 13/07/2018).
- Howell, Elizabeth (2018). *International Space Station : Facts, History & Tracking*. Space.com. url : <https://www.space.com/16748-international-space-station.html> (visité le 13/07/2018).
- Loff, Sarah (2015). *Dec. 6, 1998, International Space Station Assembly Begins*. NASA. url : <http://www.nasa.gov/content/fifteen-years-ago-international-space-station-assembly-begins> (visité le 18/07/2018).
- McDonald, Terry (2010). *NASA - Scale Model Drawing Package*. International Space Station. url : https://www.nasa.gov/mission_pages/station/multimedia/scalemodel/ (visité le 13/07/2018).
- Quaschnig, Volker (2013). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. 3. München : Carl Hanser Verlag. 384 p. isbn : 978-3-446-43809-5. url : <https://www.volker-quaschnig.de/publis/klimaschutz/index.php>.
- Sputnik (2016). *ISS' Life Span Could Extend Into 2028 - Space Corporation Energia Director*. url : <https://sputniknews.com/russia/201611151047447591-russia-iss-rsc-lifespan/> (visité le 12/07/2018).
- Ulmer, Kenneth (2015). *NASA, Boeing Extend International Space Station Contract*. MediaRoom. url : <http://boeing.mediaroom.com/2015-09-29-NASA-Boeing-Extend-International-Space-Station-Contract> (visité le 12/07/2018).
- Zak, Anatoly (2017). *After a Decade of Delays, Russia's ISS Module Faces Even More Problems*. Popular Mechanics. url : <https://www.popularmechanics.com/space/satellites/a25773/mlm-delayed-russia/> (visité le 11/07/2018).

Remerciements

L'auteur tient à remercier Matthias Penselin, Florian Seitz et Martin Wetz pour leurs précieux conseils et leurs suggestions avisées, ainsi que Volker Kratzenberg-Annies pour l'excellence de son travail de révision. Merci également à Faustine Cantalloube pour la relecture.

Ces ressources pédagogiques ont été élaborées dans le cadre du projet *Raum für Bildung* de la *Haus der Astronomie* à Heidelberg. D'autres documents en français et en allemand sont disponibles sur :

<http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung> et <http://www.dlr.de/next>

Ce projet a été élaboré en coopération avec le *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique) avec le soutien de la Fondation Joachim Herz.

