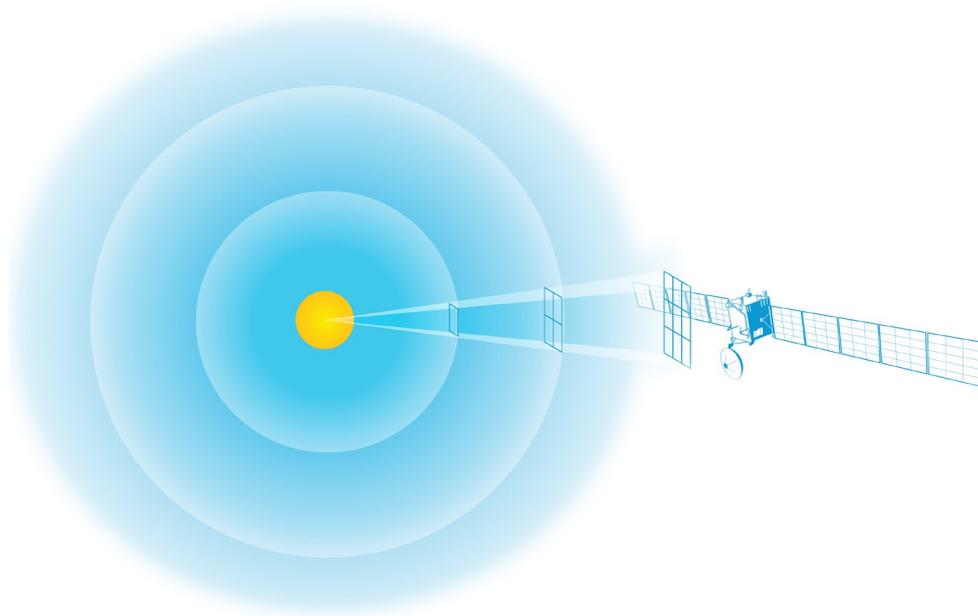
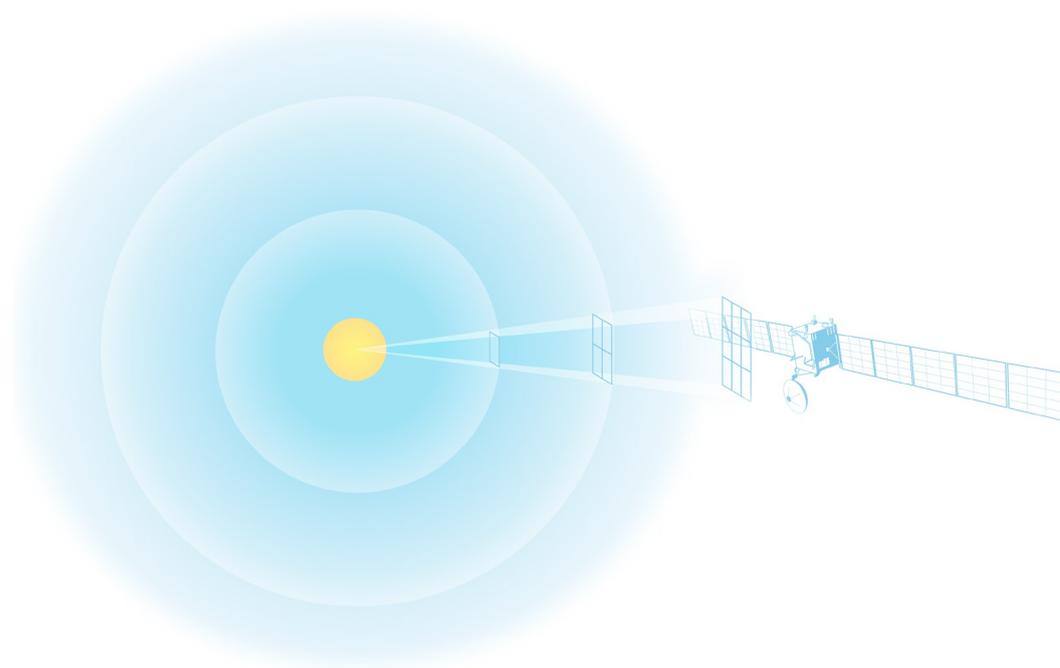


# teach with space

## → L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'exploration spatiale grâce à l'énergie solaire





## Guide du professeur

Éléments clés	page 3
Résumé des activités	page 4
Introduction	page 5
Activité 1 : La loi en carré inverse	page 7
Activité 2 : L'angle d'incidence	page 9
Activité 3 : Exploration de l'espace avec	page 11
Fiche élève	page 13
Liens Utiles	page 21
Annexe 1 : La loi en carré inverse	page 22
Annexe 2 : L'angle d'incidence	page 25

teach with space – L'énergie solaire | P09

[www.esa.int/education](http://www.esa.int/education)

[www.esero.fr](http://www.esero.fr) (FR)

Vos commentaires et retours d'expérience sont les bienvenus, contacter :

ESA Education à [teachers@esa.int](mailto:teachers@esa.int)

ESERO France à [esero.france@cnes.fr](mailto:esero.france@cnes.fr)

Une production ESA Education  
traduite et adaptée en français par ESERO France

Copyright 2018 © European Space Agency

Copyright 2020 © ESERO France, CNES

## → L'ÉNERGIE SOLAIRE

### L'exploration spatiale grâce à l'énergie solaire

#### Informations clés

**Matière :** physique

**Tranche d'âge :** de 14 à 18 ans

**Type :** activité pour les élèves

**Complexité :** moyenne

**Coût :** faible

**Durée de préparation de l'enseignant :** 1 heure

**Durée de la leçon :** 1 heure et 30 minutes (plus 20 minutes pour préparer l'expérience)

**Lieu :** en classe

**Inclut l'utilisation de :** cellules photovoltaïques

**Mots clés :** physique, puissance solaire, énergie solaire, loi en carré inverse, intensité de la lumière, angle d'incidence, système solaire

#### Description

Dans cet ensemble d'activités, les élèves découvriront deux notions qui ont une influence sur la conception des panneaux solaires pour les missions spatiales : la loi en carré inverse et l'angle d'incidence. Les élèves réaliseront deux expériences simples à l'aide d'une cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) et d'une source lumineuse. Tout d'abord, ils mesureront la variation de la puissance produite par les cellules photovoltaïques en fonction de la distance avec la source lumineuse, puis ils tenteront de vérifier la loi en carré inverse de façon expérimentale concernant l'intensité lumineuse. Les élèves réaliseront ensuite une deuxième expérience au cours de laquelle ils étudieront le lien entre la puissance produite par la cellule photovoltaïque et l'angle d'incidence. Enfin, ils appliqueront ces concepts à des missions spatiales réelles de l'ESA.

#### Objectifs d'apprentissage

- Comprendre ce qu'est l'intensité lumineuse et savoir la calculer.
- Comprendre ce qu'est l'angle d'incidence.
- Découvrir les cellules photovoltaïques.
- Réaliser des expériences pratiques pour étudier la loi en carré inverse de la lumière et l'influence de l'angle d'incidence de la lumière.
- Analyser et représenter des données.
- Construire des circuits électriques simples à l'aide de cellules photovoltaïques.
- En apprendre davantage sur la différence de potentiel électrique, le courant électrique, la puissance et l'intensité lumineuse.
- Étudier les exigences en termes d'énergie solaire pour les missions spatiales.

## Résumé des activités

Résumé des activités					
	Titre	Description	Résultat	Exigences	Durée
1	La loi en carré inverse	Étudier la loi en carré inverse de l'intensité lumineuse grâce à une expérience.	Comprendre ce qu'est la loi en carré inverse et la façon dont elle influence la puissance produite par les cellules photovoltaïques.	Aucune	20 minutes pour élaborer l'expérience, 30 minutes pour l'activité
2	L'angle d'incidence	Étudier l'angle d'incidence à l'aide d'une expérience.	Comprendre ce qu'est l'angle d'incidence et la façon dont il influence la puissance produite par les cellules photovoltaïques.	Réalisation de l'activité 1 recommandée .	30 minutes
3	Exploration de l'espace avec l'énergie solaire	S'exercer en appliquant la loi en carré inverse à des missions spatiales réelles de l'ESA.	Comprendre les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire pour l'exploration spatiale.	Réalisation de l'activité 1 recommandée .	30 minutes

## Introduction

L'énergie solaire est souvent utilisée dans les missions spatiales car c'est la seule source d'énergie qui n'a pas besoin d'être emmagasinée dans l'engin spatial et qui peut alimenter ce dernier pendant plusieurs années. Dans cette ressource, nous allons étudier deux facteurs importants qui doivent être pris en compte lors de la conception des panneaux solaires pour les missions spatiales : la loi en carré inverse et l'angle d'incidence.

### La loi en carré inverse

La loi en carré inverse stipule que la valeur d'une quantité physique est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine de cette quantité physique. L'un des exemples les plus connus en la matière est la loi en carré inverse de la lumière : le flux reçu d'une source lumineuse est inversement proportionnel à la distance au carré de cette source lumineuse. Pour la lumière, le flux est la quantité de puissance irradiée à travers une zone spécifique. Pour une source lumineuse sphérique, comme le soleil, le flux correspond à l'**intensité de rayonnement (I)**. Le soleil émet une lumière uniforme dans toutes les directions. De ce fait, l'intensité de rayonnement respectera la loi en carré inverse en fonction de la distance du soleil. Dans cette situation, on peut récapituler la loi en carré inverse avec l'équation suivante :

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

I = intensité de rayonnement du soleil, r = distance à partir du soleil

Cela signifie que, si la distance entre une planète ou un engin spatial et le soleil correspond à deux fois la distance qui sépare la Terre du soleil, l'intensité du rayonnement solaire correspondra à un quart de celle mesurée sur la Terre (Figure 1).

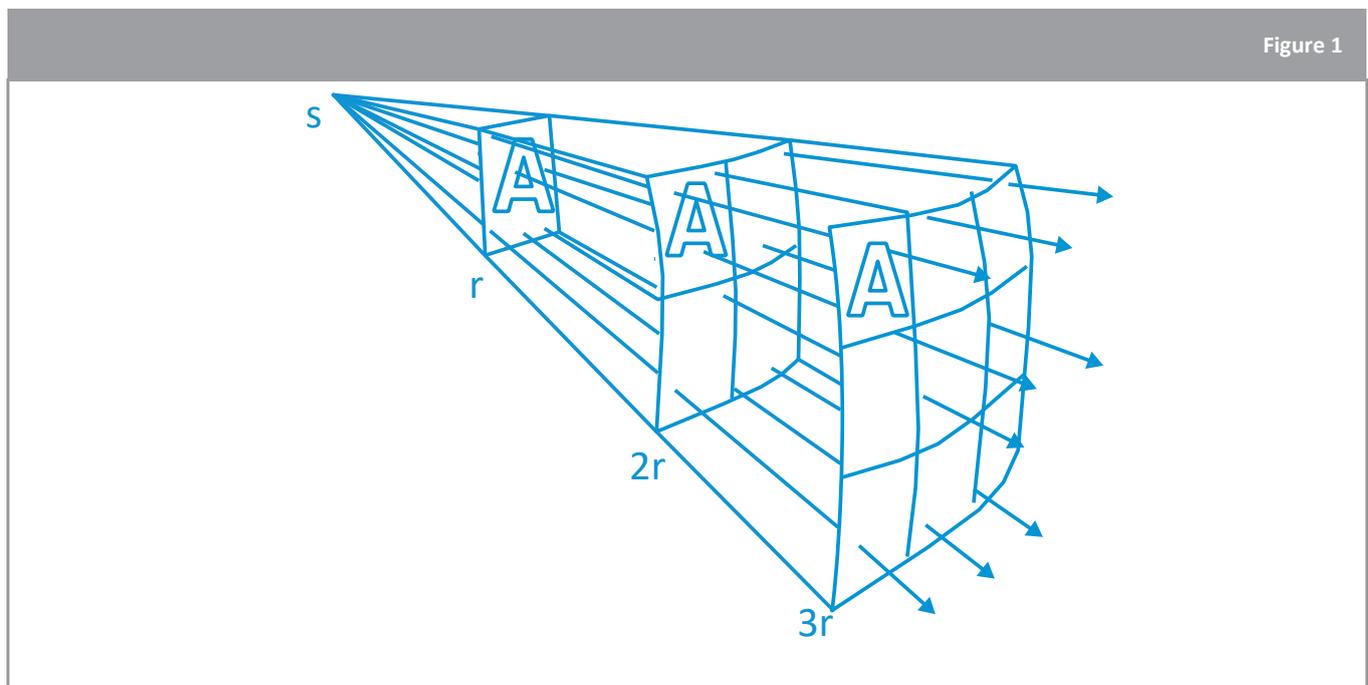


Figure 1

↑ Le soleil, au point S, émet une lumière uniforme dans toutes les directions. À une distance r, la lumière traverse une surface A. Lorsque la distance double (2r), la surface est multipliée par 4 (4A), et lorsque la distance triple (3r), la surface est multipliée par 9 (9A).

Il est important de bien comprendre la loi en carré inverse lors de la planification des missions spatiales exploitant des panneaux solaires. Plus l'engin spatial à énergie solaire s'éloigne du soleil, plus la surface de ses panneaux solaires doit être grande pour répondre aux exigences d'alimentation.

## L'angle d'incidence

L'angle d'incidence,  $\theta$ , de la lumière du soleil sur un panneau solaire est également un facteur important pour la production de puissance. Un panneau solaire recueillera l'énergie solaire avec plus d'efficacité si les rayons du soleil sont perpendiculaires à la surface du panneau, avec un angle d'incidence de  $0^\circ$ , car cela permet d'optimiser la surface de captage effective (voir la figure 2). Pour un panneau solaire de longueur  $L$ , la surface de captage effective correspond à  $L \cdot \cos(\theta)$ . Aussi, l'incidence de l'intensité sur le panneau solaire est également de  $L \cdot \cos(\theta)$ .

Pour les missions spatiales, l'angle d'incidence de la lumière du soleil est un facteur essentiel.

De nombreux engins spatiaux sont équipés de panneaux solaires rotatifs pour diminuer l'angle d'incidence de la lumière du soleil, et ainsi optimiser la production de puissance.

## La puissance solaire pour les missions spatiales.

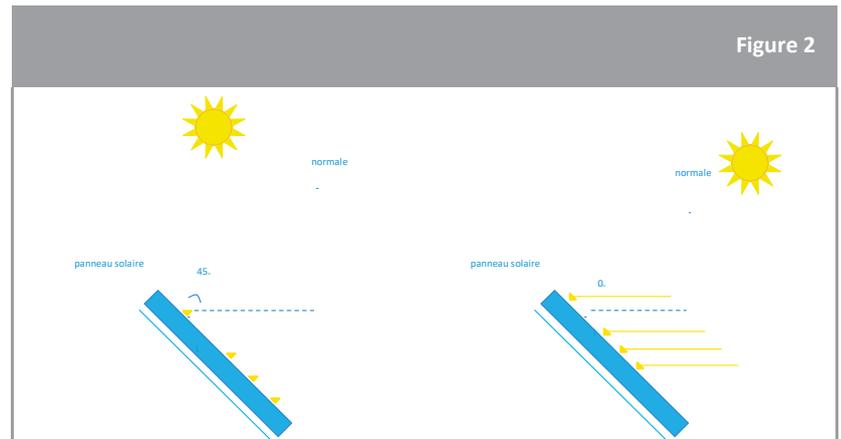
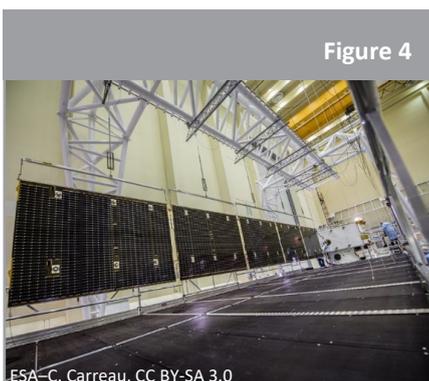
Exemples illustrant la façon dont la loi en carré inverse et l'angle d'incidence influent sur la conception des missions spatiales.

### Rosetta

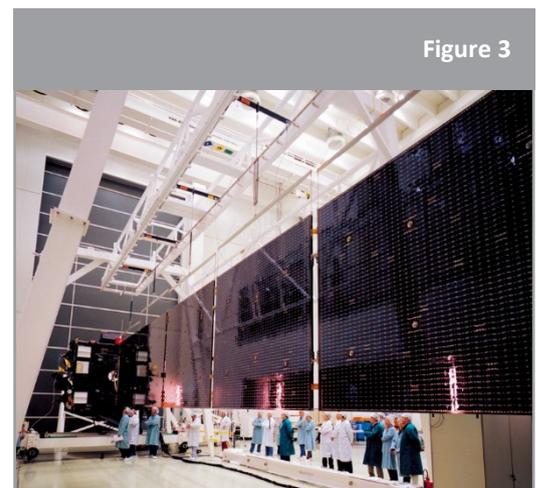
La mission Rosetta de l'ESA a voyagé plus de 10 ans pour aller à la rencontre de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Au point le plus éloigné de son voyage, Rosetta se trouvait à 800 millions de kilomètres du soleil, un point où les niveaux de la lumière du soleil sont seulement de 4 % par rapport à ceux reçus par la Terre. C'est la première mission qui va au-delà de la principale ceinture d'astéroïdes et qui compte uniquement sur des cellules photovoltaïques pour produire la puissance qui lui est nécessaire. Les panneaux solaires utilisés mesurent 32 mètres, pour une surface totale de  $64 \text{ m}^2$  (voir la figure 3).

### BepiColombo

Déploiement des panneaux solaires du module de transfert vers Mercure BepiColombo



↑ Un angle d'incidence de  $45^\circ$  (à gauche) et de  $0^\circ$  (à droite). L'angle d'incidence est l'angle entre les rayons incidents du soleil et la normale des panneaux solaires (d'une longueur  $L$ ). Lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires au panneau solaire, ils ont un angle d'incidence de  $0^\circ$ .



↑ Navette Rosetta avec l'un de ses deux panneaux solaires totalement déployé.

Une majeure partie de la lumière entrante qui atteint les panneaux solaires est convertie en chaleur. La mission BepiColombo de l'ESA, à destination de Mercure, sera plus proche du soleil. L'effet de chaleur sera donc plus important. Si les panneaux solaires de BepiColombo sont orientés directement vers le soleil pendant plusieurs secondes, les matériaux seront endommagés et les panneaux ne fonctionneront plus. Pour limiter la chaleur reçue par les panneaux solaires (environ à  $200^\circ\text{C}$ ), ceux-ci sont davantage inclinés pour offrir une surface réduite par rapport au soleil. Pour produire l'énergie électrique nécessaire à BepiColombo, les panneaux solaires doivent être bien plus larges que si nous calculions la surface uniquement à l'aide de la loi en carré inverse. Pour BepiColombo, les panneaux solaires doivent être de  $42 \text{ m}^2$  (voir la figure 4).

## → GUIDE DU PROFESSEUR

### Activité 1 : la loi en carré inverse

Dans cette activité pratique, les élèves calculeront la puissance générée par un panneau solaire en mesurant le courant électrique et la différence de potentiel électrique. Ils essayeront de vérifier la loi en carré inverse à partir des mesures qu'ils auront réalisées.

#### Équipement

- Fiche élève et Annexe 1 imprimés pour chaque groupe
- Un carton (ouvert d'un côté)
- Des câbles électriques
- Du ruban adhésif
- Une source lumineuse (petite ampoule de 4,5 V/0,3 A)
- Une règle
- Une tige de 30 cm (par exemple, un bâton de bois)
- Un élément pour bloquer la lumière (par exemple, une éponge, un chiffon)
- Un ampèremètre et un voltmètre (ou un multimètre)
- Des pinces crocodiles

#### Exercice

Répartissez les élèves en groupes de 3 ou 4. Distribuez la fiche élève et l'Annexe 1 à chaque groupe. Avant de commencer l'expérience, expliquez aux élèves la notion d'intensité de rayonnement.

#### Préparation de l'expérience

Tout d'abord, les élèves doivent préparer l'expérience. Pour cela, demandez-leur de compléter les étapes 1 à 9 de l'Annexe 1. À l'étape 9, assurez-vous que les élèves marquent une distance de zéro lorsque la source lumineuse touche la cellule photovoltaïque. Après avoir effectué cette phase de préparation, les élèves doivent vérifier que les équipements fonctionnent bien et qu'ils sont correctement branchés.

#### Expérience

Les élèves doivent réaliser des mesures de la différence de potentiel électrique (U) et du courant électrique (I) en suivant les étapes 10 à 12 de l'Annexe 1, et les consigner dans le tableau 1 de la fiche élève.

Avant d'effectuer la première mesure, les élèves doivent retirer la tige d'au moins 5 cm. Pour les mesures suivantes, les élèves doivent reculer la source lumineuse de 1 cm à chaque fois, jusqu'à atteindre environ 30 cm. Dans l'idéal, les élèves doivent effectuer 20 à 30 mesures à des distances différentes. Il est possible d'utiliser des intervalles plus larges. Néanmoins, la chute dans la production de puissance sera trop rapide pour observer la loi en carré inverse. La variation dépend de la source lumineuse et des cellules photovoltaïques. Nous vous recommandons de tester les distances optimales avant de réaliser l'expérience avec vos élèves.

Les élèves doivent reprendre chaque mesure deux fois, puis calculer la moyenne. Discutez de la fiabilité des résultats et du processus scientifique avec les élèves.

Demandez aux élèves de remplir le tableau 1 de leur fichier en calculant la quantité de puissance produite :

$$P (W) = I (A) * U (V)$$

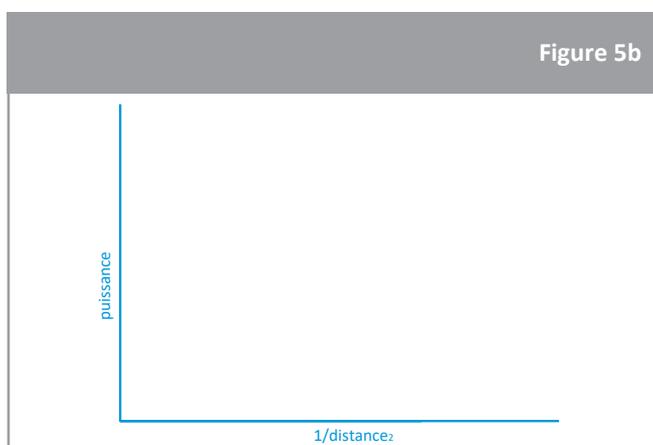
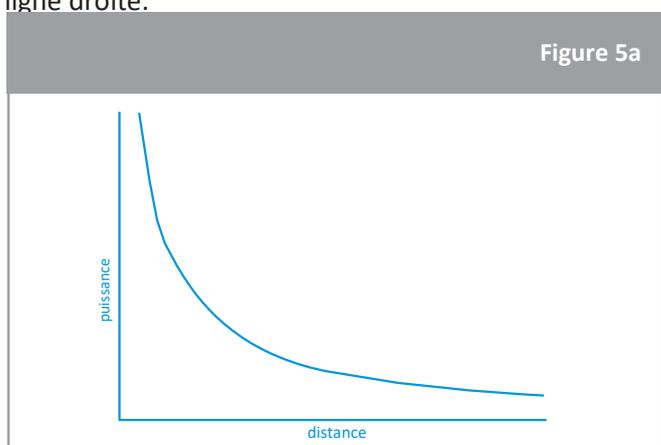
## Résultats

Pour l'analyse des résultats, nous partons du principe que la puissance produite par la cellule photovoltaïque est directement proportionnelle à la puissance reçue par la cellule photovoltaïque (puissance produite = puissance reçue x rendement de la cellule). La puissance reçue est proportionnelle à l'intensité de la source lumineuse (car intensité = puissance/surface, et la surface reste la même tout au long de l'expérience). Par conséquent, nous pouvons dire que la puissance produite par la cellule photovoltaïque est proportionnelle à l'intensité de la lumière.

Pour respecter la loi en carré inverse, la puissance produite par le panneau solaire (P) doit être proportionnelle à l'inverse de la distance au carré (r).

$$P \propto \frac{1}{r^2}$$

Pour analyser leurs données, les élèves doivent représenter la puissance comme une fonction de la distance (Figure 5a), ainsi que comme une fonction de  $1/\text{distance}^2$  (Figure 5b). La 2e représentation devrait aboutir à une ligne droite.



↑ Graphique attendu représentant la puissance produite par rapport à la distance.

↑ Graphique attendu représentant la puissance produite par rapport à  $1/\text{distance}^2$ .

Les élèves ne vérifieront peut-être pas exactement une loi en carré inverse. Certains facteurs peuvent influencer les résultats :

- Le carton peut ne pas être totalement obscur et les fluctuations de la lumière extérieure peuvent avoir un impact sur les mesures.
- Dans cette configuration, la mesure de la distance peut avoir une grande marge d'erreur.
- Il peut y avoir une dispersion de la lumière interne.
- La résistance interne de la cellule photovoltaïque peut varier au cours de l'expérience.
- Les mesures effectuées près de la cellule photovoltaïque peuvent ne pas respecter la loi en carré inverse car la source lumineuse ne peut pas être assimilée à une source ponctuelle.

Pour conclure, les élèves doivent déterminer que, si on double la distance par rapport à la source lumineuse, les panneaux solaires doivent être 4 fois plus grands pour produire la même quantité d'énergie.

## Activité 2 : L'angle d'incidence

Dans cette activité, les élèves découvriront l'importance de l'angle d'incidence et les avantages que présente le positionnement optimal des cellules photovoltaïques. Par le biais d'une expérience, ils mesureront la façon dont l'angle d'incidence influence la quantité de puissance produite.

### Équipement

- Fiche élève et Annexe 2 imprimées pour chaque groupe
- Préparation de l'expérience dans l'activité 1 (voir l'Annexe 2)
- Bâton pour orienter la cellule photovoltaïque (pic à brochettes, par exemple)
- Rapporteur

### Exercice

Pour cette activité, les élèves doivent être à nouveau par groupes de 3 ou 4. Distribuez la fiche élève et l'Annexe 2 à chaque groupe.

Avant de commencer l'expérience, expliquez aux élèves la notion d'angle d'incidence.

### Préparation de l'expérience

L'activité 2 est la suite de l'activité 1. Les élèves doivent mettre à jour la configuration expérimentale afin de pouvoir orienter le panneau solaire selon un angle spécifique. Les élèves doivent adapter l'expérience de l'activité 1 en suivant les étapes 1 à 7 de l'Annexe 2<sup>1</sup>. Avant d'effectuer les mesures, les élèves doivent vérifier que les équipements fonctionnent bien et qu'ils sont correctement branchés.

### Expérience

Les élèves doivent effectuer les mesures en suivant les étapes 8 à 10 de l'Annexe 2. Ils doivent les consigner dans le tableau 2 de la fiche élève. Les élèves doivent reprendre chaque mesure deux fois, en veillant à ce que toutes les conditions restent similaires, puis ils calculeront la puissance moyenne pour chaque angle d'incidence.

<sup>1</sup> Si les élèves n'ont pas réalisé l'activité 1 au préalable, ils doivent suivre les instructions de l'Annexe 1 pour préparer l'expérience en réalisant les étapes 1 à 7 (à l'exception de l'étape 5), puis suivre les instructions de l'Annexe 2.

## Résultats

Demandez aux élèves de représenter la puissance moyenne comme une fonction de l'angle d'incidence. Les élèves doivent trouver, à partir de leurs données, que la puissance produite est plus importante lorsque le panneau solaire est perpendiculaire aux rayons lumineux (angle d'incidence =  $0^\circ$ ).

Même si l'on devrait obtenir, en principe, une valeur de zéro lorsque la cellule photovoltaïque est parallèle à la source lumineuse (angle d'incidence =  $90^\circ$ ), ce ne sera pas le cas, notamment à cause de la dispersion de la lumière à l'intérieur du carton.

Même si la lampe est éteinte, il peut rester un courant résiduel mesurable dans le circuit (courant d'obscurité). Si les expériences scientifiques réalisées nécessitent des mesures précises, les valeurs doivent être corrigées en soustrayant cette erreur des relevés consignés.

Si les élèves inclinent leurs cellules photovoltaïques afin d'obtenir un angle d'incidence de  $-30^\circ$ ,  $-60^\circ$  ou  $-90^\circ$ , ils devraient obtenir des valeurs similaires, car le système est symétrique. D'un point de vue expérimental, cela dépendra de l'adéquation avec laquelle le système est aligné.

Certaines sources d'erreur ont déjà été mentionnées dans l'activité 1. Dans cette activité, nous devons également considérer l'incertitude dans la mesure de l'angle, ainsi que l'alignement du panneau solaire dans le carton, comme sources potentielles d'erreur.

Pour conclure, les élèves doivent répondre à la question 9 de la fiche élève en indiquant que, pour optimiser la puissance produite par le panneau solaire, l'angle d'incidence doit être proche de  $0^\circ$ . Ils peuvent suggérer de mettre en place un mécanisme de suivi du soleil, avec des panneaux solaires qui tournent et qui s'inclinent en fonction du mouvement apparent du soleil.

Dans ces expériences, l'effet de chaleur est négligeable, car l'énergie totale de l'ampoule n'est que de quelques watts. Pour les engins spatiaux volant près du soleil, comme BepiColombo, l'effet de chaleur est important et joue un rôle majeur dans la conception de la mission. Autre aspect à prendre en compte : sur Terre, les panneaux solaires peuvent être rafraîchis par l'air, ce qui n'est pas le cas dans le vide de l'espace.

### Activité 3 : Exploration de l'espace avec l'énergie solaire

Dans cette activité, les élèves vont s'entraîner en appliquant la loi en carré inverse à des missions spatiales réelles de l'ESA. Les élèves découvriront en quoi les propriétés de la loi en carré inverse ont une incidence sur la taille des panneaux solaires, et en quoi l'angle d'incidence joue un rôle essentiel pour les missions s'aventurant près du soleil.

#### Résultats

1. L'intensité lumineuse reçue à la distance moyenne séparant la Terre du soleil ( $I_{\text{Terre}}$ ) peut être calculée à l'aide de la loi en carré inverse et des valeurs fournies dans la fiche élève :

$$I_{\text{Earth}} = \frac{3.828 * 10^{26} \text{ W}}{4\pi(1.5 * 10^{11} \text{ m})^2} = 1354 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

2. À une distance de 45 millions de km du soleil, l'intensité lumineuse se calcule comme suit :

$$I_{\text{BepiColombo}} = \frac{3.828 * 10^{26} \text{ W}}{4\pi(4.5 * 10^{10} \text{ m})^2} = 15043 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$I_{\text{BepiColombo}} = 11 I_{\text{Earth}}$$

À cette distance du soleil, l'intensité lumineuse est 11 fois plus grande que celle que l'on trouve sur Terre. Les dommages provoqués par la chaleur sur les panneaux solaires seront très importants. Il faut donc incliner en permanence les panneaux par rapport au soleil. Cela signifie que la surface réelle des panneaux solaires, 42 m<sup>2</sup>, est bien plus large que s'il était possible de les orienter directement face au soleil.

3. La navette Rosetta de l'ESA a, quant à elle, suivi une trajectoire qui l'a amenée à 800 millions de km du soleil. À cette distance, l'intensité lumineuse se calcule comme suit :

$$I_{\text{Rosetta}} = \frac{3.828 * 10^{26} \text{ W}}{4\pi(8 * 10^{11} \text{ m})^2} = 47.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Par rapport à  $I_{\text{Terre}}$  :

$$I_{\text{Rosetta}} = 0,035 I_{\text{Terre}}$$

À 800 millions de km du soleil, l'intensité lumineuse correspond à environ 3,5 % de l'intensité lumineuse reçue sur Terre.

4. Bien qu'étant alimentés par des cellules photovoltaïques à haut rendement, les panneaux solaires de Rosetta avaient un rendement variant entre 18 % et 26 %. Si l'on prend en compte la faible intensité lumineuse au point le plus éloigné de l'orbite, les panneaux solaires de Rosetta devaient avoir une surface très large de 64 m<sup>2</sup>.

En supposant que Rosetta ait été en orbite à la distance de la Terre et que la seule variable fût la différence d'intensité lumineuse, la surface des panneaux solaires serait seulement de :

$$A_{\text{Terre}} = 0,035 * 64 \text{ m}^2 = 2,24 \text{ m}^2$$

5. À l'aide de la loi en carré inverse, l'intensité lumineuse à la distance de Saturne se calcule comme suit :

$$I_{\text{Saturn}} = \frac{3.828 * 10^{26} \text{ W}}{4\pi(1.4 * 10^{12} \text{ m})^2} = 15.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Même procédure de calcul que celle utilisée pour distance de la Terre :  $I_{\text{Rosetta}} = 3,1 I_{\text{Saturn}}$

Cela signifie que les panneaux solaires devraient être 3,1 fois plus gros, à une distance de 1,4 milliard de km du soleil, par rapport à une distance de 800 millions de km.

$$A_{\text{Saturne}} = 3,1 * 64 \text{ m}^2 = 198,4 \text{ m}^2$$

6. Les exigences de puissance de la mission Cassini-Huygens sont 2,2 fois plus importantes que celles de Rosetta (885 W/395 W= 2,2). C'est pourquoi cette mission s'est servie d'une source d'énergie nucléaire appelée « générateur thermoélectrique à radioisotope ». Si elle avait utilisé des panneaux solaires à la place, leur surface aurait dû être 2,2 fois plus grande que la valeur calculée à la question 4.

$$A_{\text{Cassini-Huygens}} = 2,2 * 198,4 \text{ m}^2 = 436,5 \text{ m}^2$$

7. Les panneaux solaires ont une masse par mètre carré de :

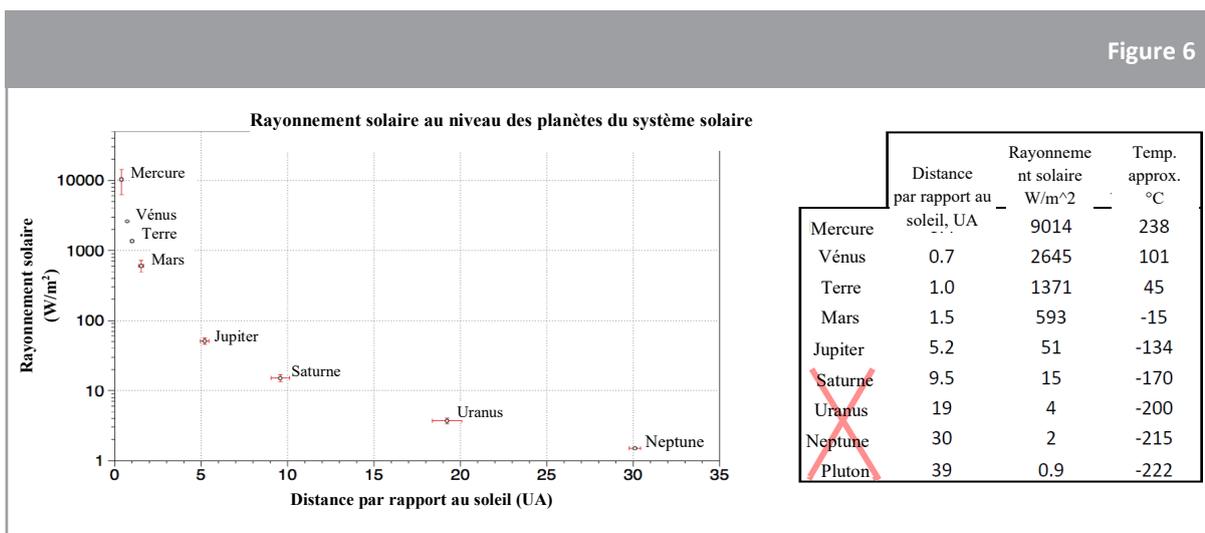
$$\frac{51,2\text{kg}}{64 \text{ m}^2} = 0,8 \text{ kg m}^{-2}$$

La masse totale des panneaux solaires nécessaires pour alimenter Cassini serait donc d'environ :

$$0,8 \text{ kg m}^{-2} * 436,5 \text{ m}^2 = 349,2 \text{ kg}$$

Un générateur thermoélectrique à radioisotope pèse 56,4 kg. L'augmentation de la masse serait donc de 292,8 kg.

8. L'énergie solaire est donc très importante car il s'agit d'une source d'énergie renouvelable qui n'a pas besoin d'être emmagasinée dans l'engin spatial. Comme le montre la loi en carré inverse, l'intensité de la lumière diminue rapidement lorsqu'on s'éloigne du soleil (voir la figure 6). Cela signifie que, plus la distance avec le soleil augmente, plus les panneaux solaires doivent être grands pour répondre aux besoins en puissance à bord. Au-delà de Jupiter, l'obscurité est trop importante pour permettre une exploitation efficace de l'énergie solaire.

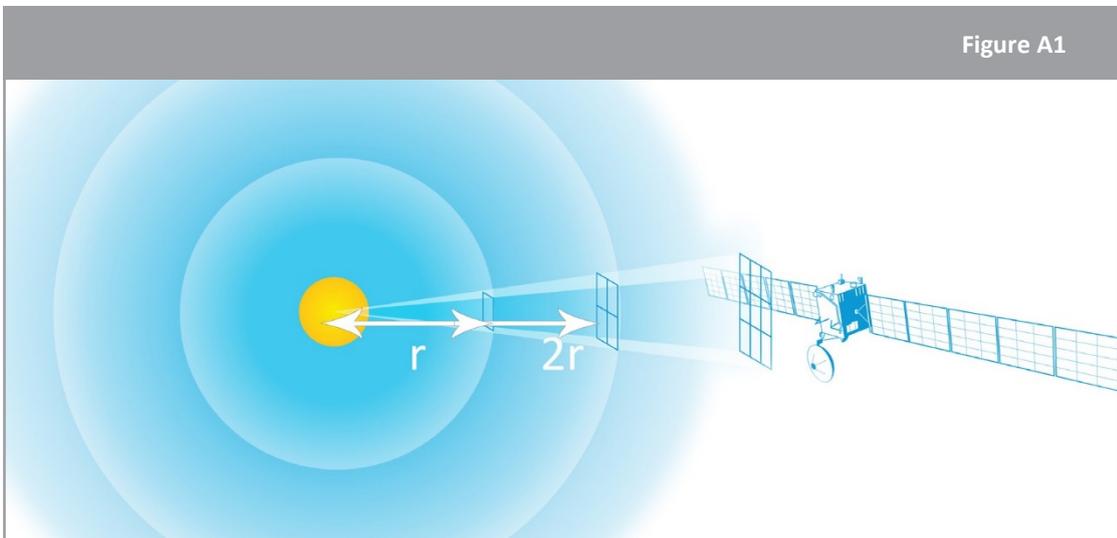


↑ Rayonnement solaire (intensité lumineuse) au niveau des planètes du système solaire.

Comme calculé à la question 6, si Cassini-Huygens devait se servir de panneaux solaires, ceux-ci auraient une masse multipliée par 6 par rapport à celle des générateurs thermoélectriques à radio isotope ! Il est essentiel que prendre la masse en compte lors de la conception des missions, car chaque kilogramme supplémentaire implique de prévoir une plus grande quantité de carburant pour échapper à la gravité terrestre. Néanmoins, il faut aussi prendre en compte les contraintes de sécurité liées à l'exploitation de l'énergie nucléaire.

→ FICHE ELEVE

Activité 1 : La loi en carré inverse



↑ Le soleil émet une lumière uniforme dans toutes les directions. À une distance  $r$ , la lumière traverse une surface  $A$ . Lorsque la distance double ( $2r$ ), la même quantité de lumière couvre une surface 4 fois plus grande ( $4A$ ).

Le soleil émet une lumière uniforme dans toutes les directions (voir la figure A1). Aussi, l'intensité lumineuse ( $I$ ) à une distance donnée ( $r$ ) sera équivalente à la puissance totale émise par le soleil, répartie sur une sphère de rayon ( $r$ ) avec une surface de  $4\pi r^2$ .

$$\text{Intensité du rayonnement solaire (W/m}^2\text{)} = \frac{\text{Puissance émise par le soleil (W)}}{4\pi r^2(\text{m}^2)} \quad (1)$$

Selon la distance à laquelle un engin spatial se trouve par rapport au soleil, on constate d'énormes différences dans la quantité de lumière solaire reçue.

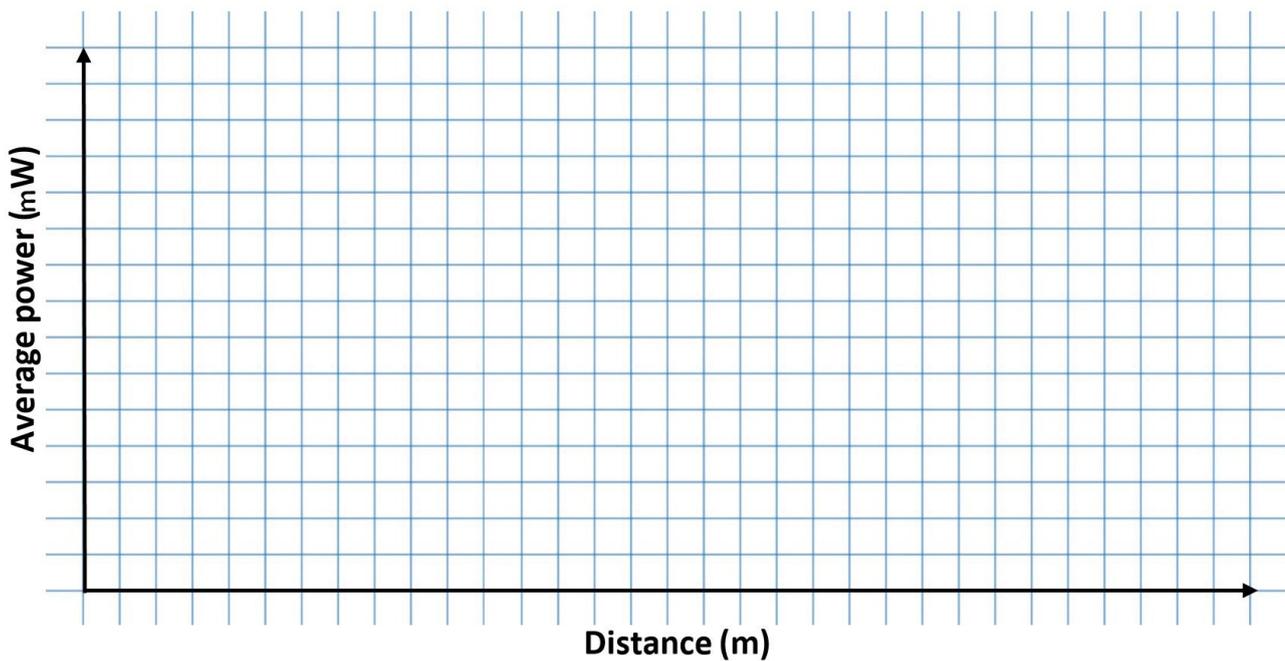
**Le saviez-vous ?**

Lancée en septembre 2003, SMART-1 est devenue la première mission de l'ESA vers la Lune. Cette mission inaugurale a quitté l'orbite de la Terre uniquement à l'aide de l'énergie solaire, lentement, établissant le record du plus long voyage vers la Lune (13 mois). SMART-1 a battu le record de la plus faible consommation de carburant par kilomètre, tous voyages vers la Lune confondus, en tirant la majorité de sa puissance électrique de ses panneaux solaires, qui faisaient chacun 7 m de long.





1. Représentez la puissance moyenne générée comme une fonction de la distance de la source lumineuse :



2. La puissance produite par la cellule photovoltaïque respecte-t-elle la loi en carré inverse ? Expliquez.

---



---



---

3. Quelles incertitudes comporte votre expérience ? Comment influencent-elles les résultats ?

---



---



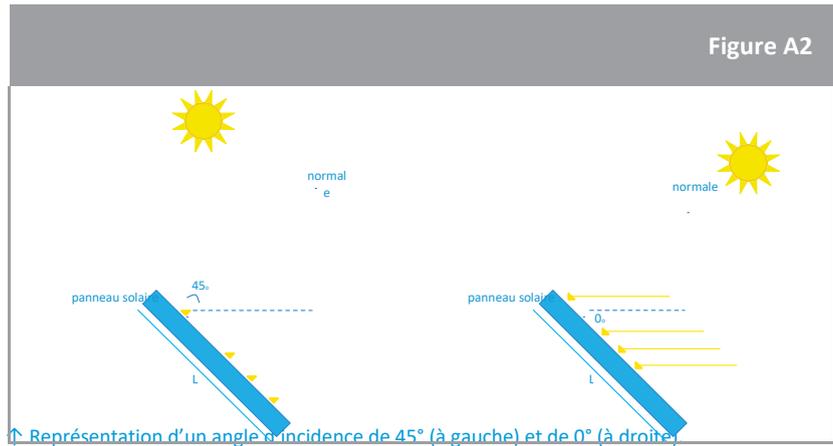
---

4. Si nous doublons la distance par rapport à la source lumineuse, quelle taille les panneaux solaires doivent-ils avoir pour produire la même puissance ?

- Ils doivent être plus petits
- Leur taille doit être multipliée par 2
- Leur taille doit être multipliée par 4
- Leur taille doit être multipliée par 9

## Activité 2 : L'angle d'incidence

L'angle d'incidence de la lumière du soleil sur les panneaux solaires joue un rôle important. L'angle d'incidence est l'angle entre les rayons incidents du soleil et la normale des panneaux solaires. Lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires au panneau solaire, ils ont un angle d'incidence de 0°.



1. Avant de commencer les mesures, essayez de deviner quel angle d'incidence génèrera le plus de puissance. Expliquez pourquoi.

### Expérience

Dans cette expérience, vous allez mesurer l'influence de l'angle d'incidence sur la puissance générée par des cellules photovoltaïques.

- Adaptez la configuration de l'activité 1 en suivant les étapes 1 à 7 indiquées dans les instructions fournies à l'Annexe 2.
- Réalisez l'expérience en suivant les instructions des étapes 8 à 10 de l'Annexe 2. Notez les mesures de différence de potentiel électrique (U) et de courant électrique (I) pour les différents angles d'incidence dans le tableau 2 ci-dessous.
- Reprenez chaque mesure deux fois.
- Calculez la puissance générée par la cellule photovoltaïque et remplissez le tableau 2.

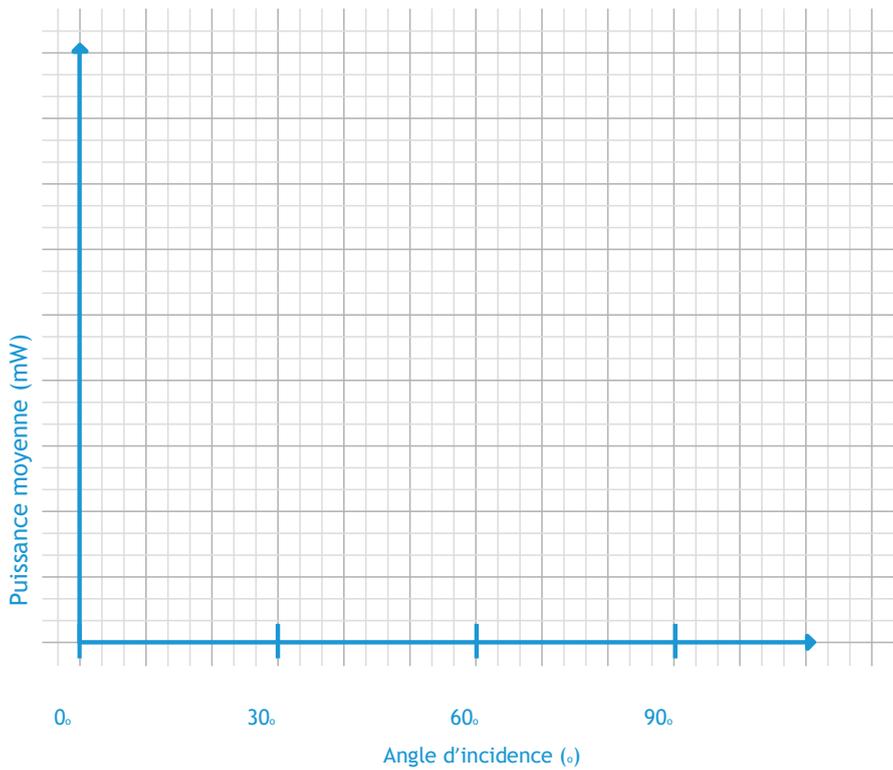
$$P \text{ (W)} = I \text{ (A)} * U \text{ (V)}$$

- Calculez la puissance moyenne pour chaque angle d'incidence.

Tableau 2										
Distance	Expérience 1			Expérience 2			Expérience 3			P moyenne (mW)
	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	
0°										
30°										
45°										
60°										
90°										

↑ Valeurs consignées pour la différence de potentiel électrique (U), le courant électrique (I) et la puissance générée (P) pour différents angles d'incidence.

2. Représentez la puissance moyenne comme une fonction de l'angle d'incidence :



3. Quel angle d'incidence génère le plus de puissance ? \_\_\_\_\_

4. Votre supposition à la question 1 était-elle correcte ? Dans le cas contraire, pouvez-vous expliquer pourquoi ?

---



---



---

5. D'après vous, pourquoi la puissance générée n'est pas nulle lorsque la cellule photovoltaïque est parallèle à la source lumineuse ? (Angle d'incidence = 90°)

---



---



---

6. Pensez-vous qu'une puissance sera générée si vous réalisez l'expérience alors que la lampe est éteinte ? Testez votre supposition et expliquez vos résultats.

---



---



---

7. D'après vous, quelles seront les valeurs de puissance générée si vous réalisez l'expérience avec un angle d'incidence de  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-60^\circ$  et  $-90^\circ$ ? Expliquez votre réponse.

---

---

---

8. Quelles sont les principales incertitudes de l'expérience ? Y a-t-il des erreurs dans vos mesures ?

---

---

---

9. Comme vous l'avez constaté en prenant vos mesures, la puissance générée dépend de l'angle d'incidence. Comment construiriez-vous vos panneaux solaires pour optimiser la quantité de puissance générée ?

---

---

---

## Le saviez-vous ?

La Station spatiale internationale (SSI) est alimentée par des panneaux solaires. L'image à droite montre plusieurs panneaux solaires de la SSI, laquelle peut accueillir jusqu'à 6 astronautes en même temps. Étant donné que la SSI est en orbite autour de la Terre, les panneaux solaires peuvent être pivotés de sorte à être orientés directement vers le soleil. Les panneaux couvrent une surface de  $2\,500\text{ m}^2$  – soit l'équivalent d'un demi-terrain de football !



## Activité 3 : Exploration de l'espace avec l'énergie solaire

Quand est-il approprié d'utiliser l'énergie solaire pour l'exploration de l'espace et comment pouvons-nous exploiter à notre avantage nos connaissances concernant la loi en carré inverse et l'angle d'incidence ?

**La mission Rosetta de l'ESA**, qui a voyagé à 800 millions de km du soleil, a eu besoin d'énormes panneaux solaires pour produire suffisamment de puissance pour alimenter ses systèmes embarqués. Par opposition, **la mission BepiColombo de l'ESA** à destination de Mercure, sera bien plus proche du soleil et subira de hauts niveaux de rayonnement qui peuvent gravement endommager les panneaux solaires.

### Exercice

1. La Terre est à une distance moyenne d'environ 150 millions de km du soleil. La puissance moyenne émise par le soleil est de  $3,828 \times 10^{26}$  W. Utilisez l'équation (1) de l'activité 1 pour calculer l'intensité lumineuse à la distance de la Terre ( $I_{\text{Terre}}$ )

2. La distance minimale de BepiColombo par rapport au soleil est d'environ 45 millions de km. Pour limiter l'endommagement des panneaux solaires par une chaleur trop intense, ceux-ci devront être inclinés. Calculez l'intensité lumineuse ( $I_{\text{BepiColombo}}$ ) à cette distance. Comparez-la à  $I_{\text{Terre}}$ .

3. La distance maximale de Rosetta par rapport au soleil était de 800 millions de km. Calculez l'intensité lumineuse ( $I_{\text{Rosetta}}$ ) à cette distance. Comparez-la à  $I_{\text{Terre}}$ .

4. Compte tenu du besoin d'énergie combiné à la faible intensité lumineuse au point le plus éloigné de l'orbite, les panneaux solaires de Rosetta devaient avoir une surface très large de 64 m<sup>2</sup>. Quelles seraient les dimensions des panneaux solaires si Rosetta se situait à la distance de la Terre ? Prenez uniquement en compte la différence d'intensité lumineuse et partez du principe que les autres variables restent constantes.

5. Maintenant, imaginez que Rosetta parte explorer Saturne, qui se situe à 1,4 milliard de km du soleil. Quelles seraient les dimensions requises des panneaux solaires à cette distance ? Prenez uniquement en compte la différence d'intensité lumineuse et partez du principe que les autres variables restent constantes.

6. La dernière mission vers Saturne, Cassini-Huygens, a été alimentée par des générateurs thermoélectriques à radioisotope. La puissance nécessaire à Cassini-Huygens était de 885 W, contre 395 W pour Rosetta. Calculez la taille des panneaux solaires qui seraient nécessaires pour alimenter Cassini-Huygens (à la distance de Saturne), en partant du principe qu'ils seraient similaires à ceux de Rosetta.

7. Les générateurs thermoélectriques à radioisotope utilisés pour Cassini-Huygens pesaient 56,4 kg. Les panneaux solaires de Rosetta, quant à eux, pesaient 51,2 kg. Quelle serait l'augmentation de la masse de Cassini-Huygens si la mission devait utiliser des panneaux solaires, d'après les calculs de la question 5 ?

8. Quels sont les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire pour l'exploration spatiale ?

---

---

---

---

## → Liens Utiles

### Ressources de l'ESA

Défi Moon Camp Challenge  
[esa.int/Education/Moon\\_Camp](https://esa.int/Education/Moon_Camp)

Animations concernant l'exploration de la Lune [esa.int/Education/Moon\\_Camp/Making\\_a\\_Home\\_on\\_the\\_Moon](https://esa.int/Education/Moon_Camp/Making_a_Home_on_the_Moon)

Ressources pédagogiques de l'ESA :  
[esa.int/Education/Classroom\\_resources](https://esa.int/Education/Classroom_resources)

### Projets spatiaux de l'ESA

Mission Rosetta de l'ESA  
[esa.int/rosetta](https://esa.int/rosetta)

Mission BepiColombo de l'ESA et de la JAXA  
[esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/BepiColombo\\_overview2](https://esa.int/Our_Activities/Space_Science/BepiColombo_overview2)

Mission Cassini-Huygens  
[esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Cassini-Huygens](https://esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini-Huygens)

### Informations techniques en lien avec les questions

Informations sur la masse des panneaux solaires de Rosetta (page 10)  
[lpi.usra.edu/opag/nov\\_2007\\_meeting/presentations/solar\\_power.pdf](https://lpi.usra.edu/opag/nov_2007_meeting/presentations/solar_power.pdf)

Puissance effective générée à 5,25 UA par Rosetta (395 W, 64 m<sup>2</sup>)  
[esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Rosetta/The\\_Rosetta\\_orbiter](https://esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/The_Rosetta_orbiter)

Spécifications de la sonde Cassini [fas.org/nuke/space/bennett0706.pdf](https://fas.org/nuke/space/bennett0706.pdf)

Informations sur l'estimation de la masse des panneaux solaires (diapo 10)  
[lpi.usra.edu/opag/nov\\_2007\\_meeting/presentations/solar\\_power.pdf](https://lpi.usra.edu/opag/nov_2007_meeting/presentations/solar_power.pdf)

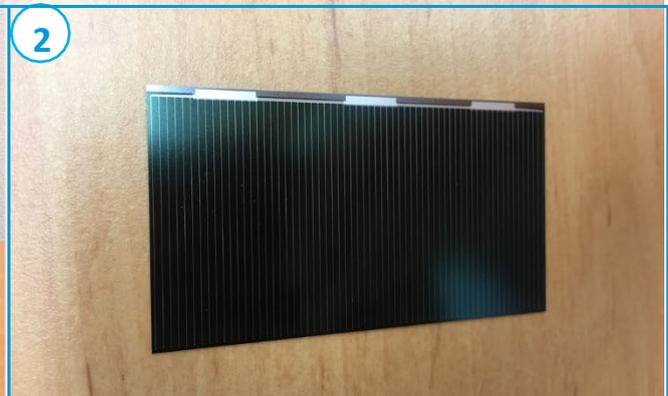
Déploiement des panneaux solaires de BepiColombo  
[youtube.com/watch?v=Lhw4aojbkvs](https://youtube.com/watch?v=Lhw4aojbkvs)

## → Annexe 1 – Loi en carré inverse



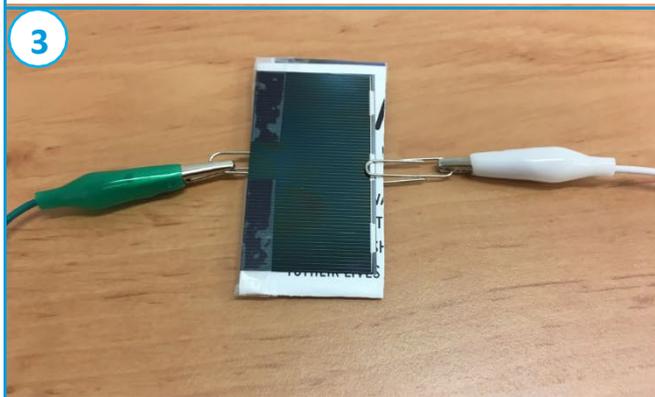
1

Vous aurez besoin d'un carton (une longueur de 20 à 30 cm est suffisante pour une petite ampoule).



2

Vous aurez également besoin d'une cellule photovoltaïque.



3

Branchez les pinces crocodiles sur la cellule photovoltaïque. Selon la cellule photovoltaïque utilisée, vous devrez peut-être créer des points de branchement pour les pinces crocodiles. Pour cela, vous pouvez tout simplement vous servir de trombones.

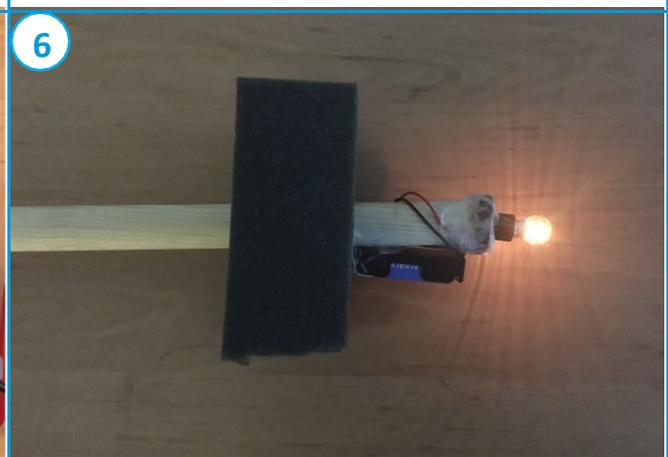


4

Vérifiez que votre cellule photovoltaïque fonctionne correctement en branchant un ampèremètre en série et un voltmètre en parallèle (ou en branchant un multimètre). Vous devriez voir s'afficher les valeurs du courant et de la différence de potentiel électrique.



5



6

Attachez la cellule photovoltaïque à l'intérieur du carton, comme montré sur l'image. Fermez le carton.

Placez la petite ampoule avec une pile au bout d'une tige. Découpez un élément aux dimensions de la section de jonction avec le carton pour bloquer toute lumière autre que la source lumineuse, comme le montre l'image.



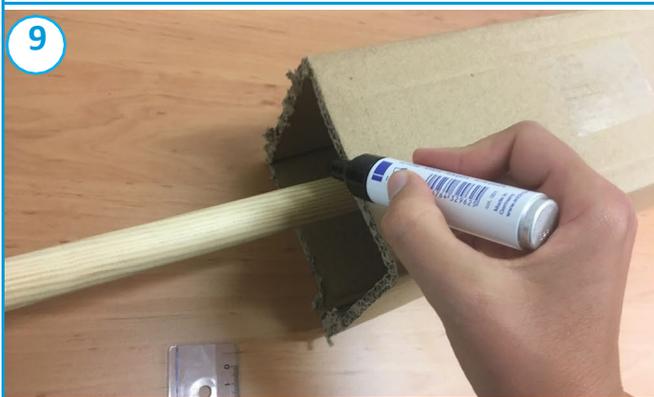
7

Allumez la source lumineuse et insérez la tige dans le carton. Faites en sorte que la pièce de mousse foncée s'adapte au maximum aux contours du carton. Si besoin, isolez le carton de la lumière en utilisant du ruban adhésif foncé ou réalisez vos mesures dans une pièce sombre.



8

Insérez précautionneusement la tige dans le carton jusqu'à ce que la source lumineuse touche la cellule photovoltaïque. Faites attention à ne pas endommager la cellule photovoltaïque.



9

Notez la position initiale de la tige avec un marqueur, ou placez un morceau de ruban adhésif dessus, et consignez la valeur.



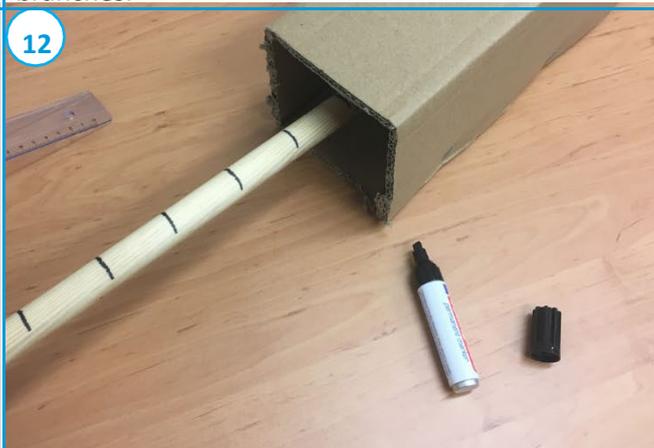
10

Vous avez à présent terminé la configuration de l'expérience. Vérifiez que tous les équipements fonctionnent bien et qu'ils sont correctement branchés.



11

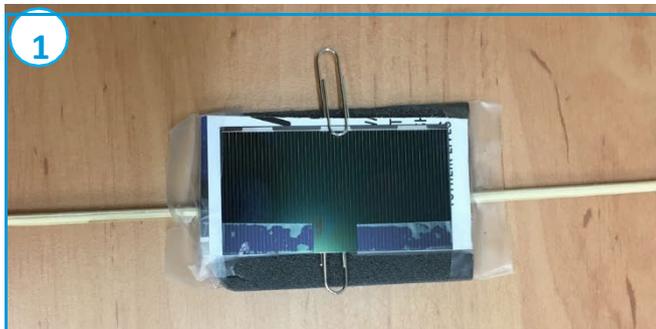
Éloignez la source lumineuse de la cellule photovoltaïque de 5 cm. Notez les mesures du courant et de la différence de potentiel électrique dans le tableau 1 de votre fiche.



12

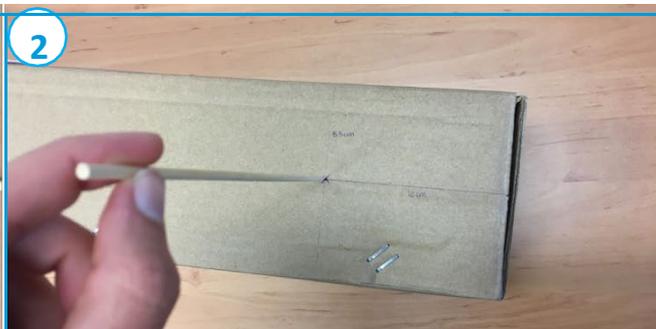
Éloignez la source lumineuse du panneau solaire cm par cm, jusqu'à ce que la source lumineuse atteigne le bout du carton. Notez à chaque fois les mesures de la différence de potentiel électrique et du courant. Reprenez-les deux fois dans les mêmes conditions et à la même distance.

## → Annexe 2 – Angle d’incidence



1

Utilisez les équipements de l’activité 1. Attachez la cellule photovoltaïque à un petit bâton. Ainsi, vous pourrez le tourner à l’intérieur du carton. L’axe de rotation doit se situer au centre de la cellule photovoltaïque.



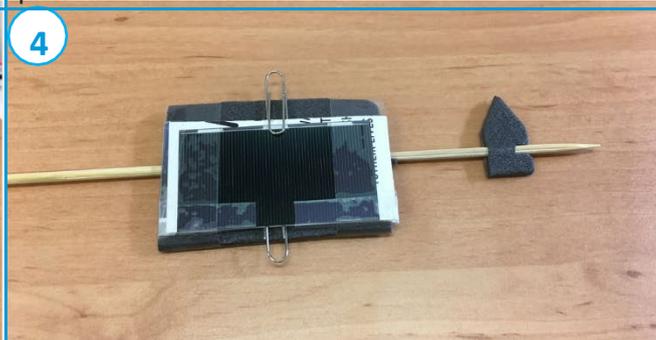
2

Utilisez le carton de l’activité 1. Marquez un point sur le côté du carton, par lequel le bâton traversera le carton. Veillez à ce qu’il soit centré verticalement, à la même distance du haut et du bas. Assurez-vous que la cellule photovoltaïque a assez d’espace pour pivoter librement.



3

Marquez les angles 0°, 30°, 45°, 60° et 90° en plaçant l’axe vertical sur un côté du carton (ou attachez un rapporteur).



4

Placez un morceau de carton noir sur le bâton, orienté dans la même direction que la cellule photovoltaïque. Ce morceau restera en dehors du carton et indiquera l’angle selon lequel la cellule photovoltaïque est inclinée dans le carton fermé.



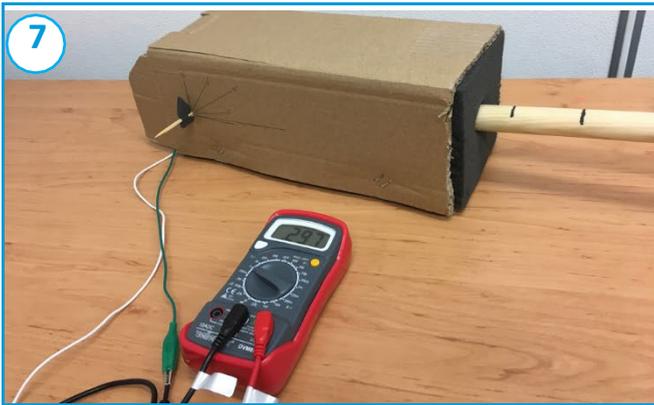
5

Insérez la cellule photovoltaïque dans le carton, puis branchez un ampèremètre en série et un voltmètre en parallèle (ou branchez un multimètre). Fermez le carton.



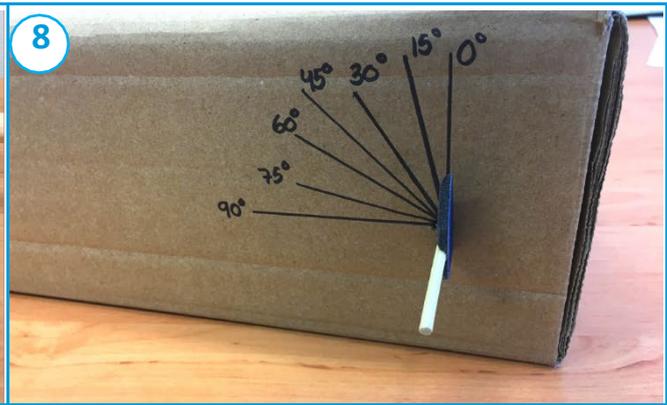
6

Allumez la source lumineuse et insérez-la dans le carton. La distance entre la source lumineuse et la cellule photovoltaïque doit être d’environ 10 cm. Elle ne doit pas changer au cours de l’expérience (le bâton ne doit pas être retiré du carton).



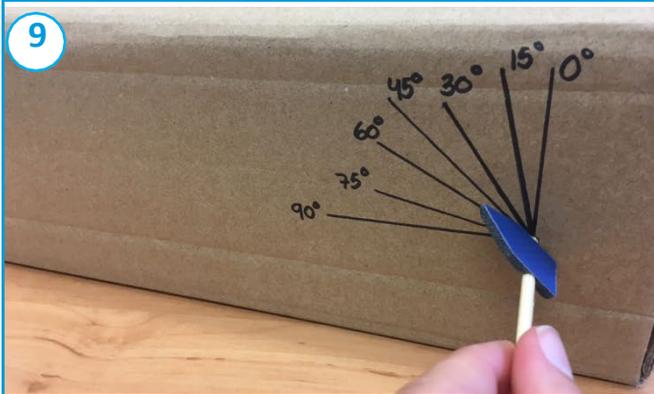
7

Vérifiez si tout fonctionne.



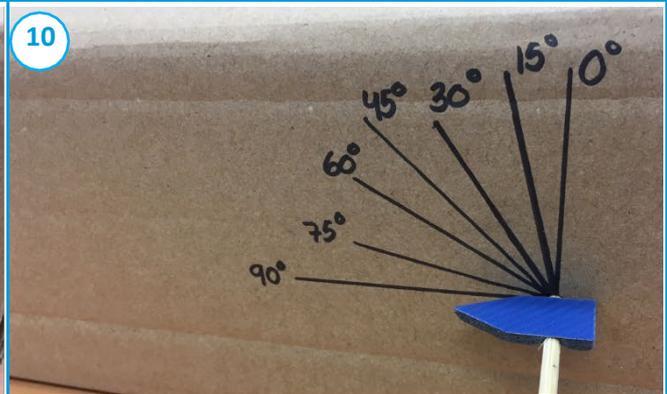
8

Relevez les mesures du courant et de la différence de potentiel électrique lorsque la cellule photovoltaïque est perpendiculaire à la source lumineuse (angle d'incidence  $0^\circ$ ). Consignez vos mesures dans le tableau 2 de votre fiche élève.



9

Inclinez la cellule photovoltaïque de manière graduelle en pivotant le petit bâton et en regardant l'angle sur le côté. Relevez les mesures du courant et de la différence de potentiel électrique à chaque angle, puis consignez-les dans le tableau 2 de votre fiche élève.



10

Pivotez la cellule photovoltaïque jusqu'à ce qu'elle soit parallèle à la source lumineuse (angle d'incidence de  $90^\circ$ ). Relevez les mesures du courant et de la différence de potentiel électrique à cette position, puis consignez-les dans le tableau 2. Reprenez chaque mesure deux fois.