

ÉTUDE DE LA SPECTROSCOPIE ET DE SUPERCAM

ÉLÈVES

PHYSIQUE • SVT

Première • Terminale



OBJECTIFS

- Découvrir le fonctionnement de la caméra SuperCam
- Découvrir le principe de la spectroscopie
- Comprendre l'intérêt géologique de la mission



COMPÉTENCES ACQUISES

- Comprendre les caractéristiques d'un laser (APP/ANA/REA)
- Notions de thermodynamique (REA)
- Notions de physique quantique (ANA/REA)
- Savoir exploiter des données depuis des images (ANA/VAL)

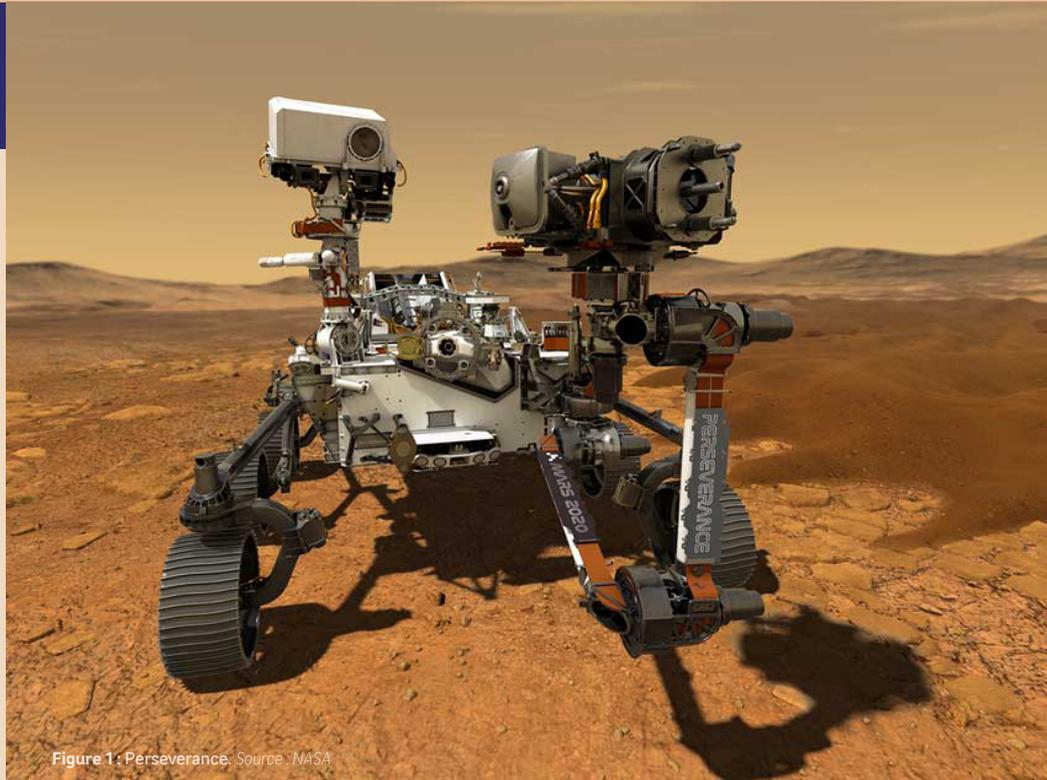


Figure 1 : Perseverance. Source : NASA

Introduction

Durant cette activité, vous allez découvrir le fonctionnement d'un des instruments du rover martien Perseverance de la NASA (qui a atterri le 18 février 2021 dans le cratère Jezero) : **SUPERCAM**. Cet instrument (made in France) est composé de 3 spectromètres (**LIBS**, **RAMAN** ET **INFRAROUGE**), d'une caméra et d'un microphone. **SUPERCAM** a pour but d'analyser la composition chimique des roches en leur tirant dessus avec un laser d'une portée de 7m ! Ce laser crée un plasma (gaz ionisé) et analyse ensuite la lumière qui en ressort grâce au spectromètre **LIBS**. Les deux autres spectromètres analysent quant à eux la composition minéralogique des roches. **RAMAN** a une portée de 12 m tandis que l'infrarouge et la caméra peuvent voir jusqu'à l'horizon. Ainsi, **SUPERCAM** n'a pas besoin d'être trop proche de ses cibles pour les étudier, ce qui est un énorme avantage pour étudier des zones accidentées inaccessibles pour un rover. Nous allons nous concentrer notamment sur le spectromètre **LIBS**. Nous allons tout d'abord comprendre comment fonctionne un laser, ensuite nous verrons comment marche un spectroscope, et enfin nous nous attarderons sur l'intérêt géologique de ces observations.

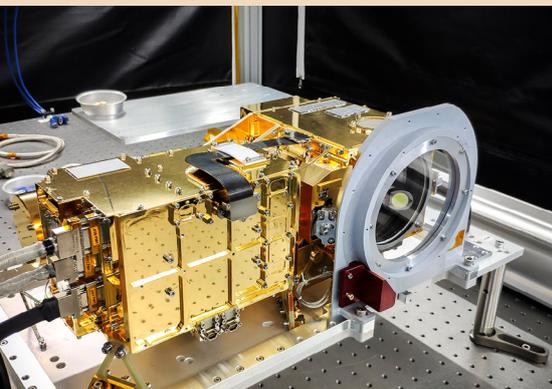


Figure 2 : L'instrument SuperCam. Source : CNES

SUPERCAM
EXPLORATION
MARTIENNE

Spectroscopie

Le laser de LIBS : un outil très puissant

Un laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation en anglais*) est un concentré de photons (particules qui véhiculent la lumière) que l'on dirige dans une direction unique. On parle d'onde électromagnétique cohérente, monochromatique et unidirectionnelle. Cette technologie a des applications dans bien des domaines : la médecine, la physique, la communication, la découpe de matériaux, etc.

SUPERCAM utilise aussi un laser, avec l'instrument **LIBS** en particulier.

LIBS envoie un faisceau laser sur une cible à examiner (une roche martienne).

La puissance énorme de son laser permet de fondre la roche jusqu'à la transformer en un plasma très chaud (10000°C!). Pour indication, un plasma est un gaz tellement chaud qu'il est ionisé (sa charge n'est plus neutre).

On se propose dans cette partie de déterminer le temps nécessaire pour faire fondre un petit volume de roche martienne.

Q 1 : À votre avis, pourquoi le laser LIBS a-t-il une portée limitée ?

On suppose maintenant que le laser a une portée illimitée.

On rappelle la célérité de la lumière : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Q. 2 : Combien de temps met le laser pour atteindre une roche à une distance de 7m de **SUPERCAM** ?

Le laser **LIBS** de **SUPERCAM** émet des photons à une longueur d'onde $\lambda = 1064 \text{ nm}$. La fréquence d'un photon se propageant dans le vide est donnée par cette relation : $Nv = \frac{c}{\lambda}$. On donne aussi la relation de Planck-Einstein pour un photon : $E = hNv$. E est l'énergie d'un photon en Joule, et h la constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Figure 3 : Un tir de laser. Source : CNES

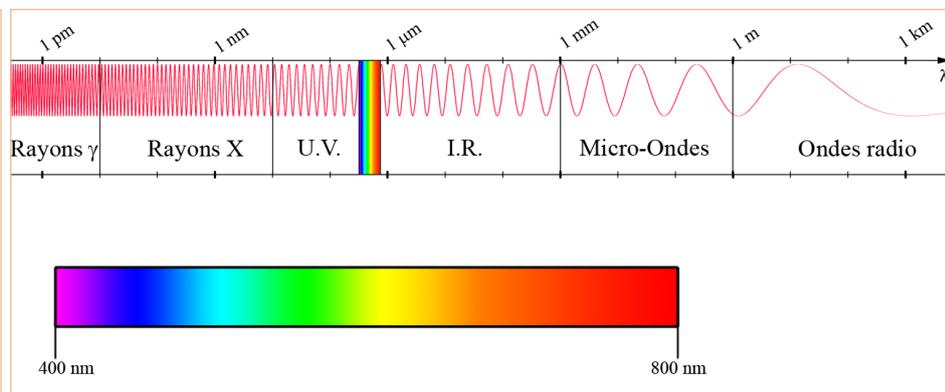
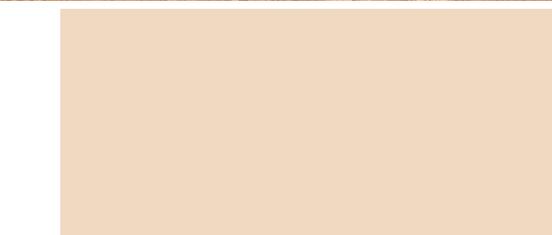
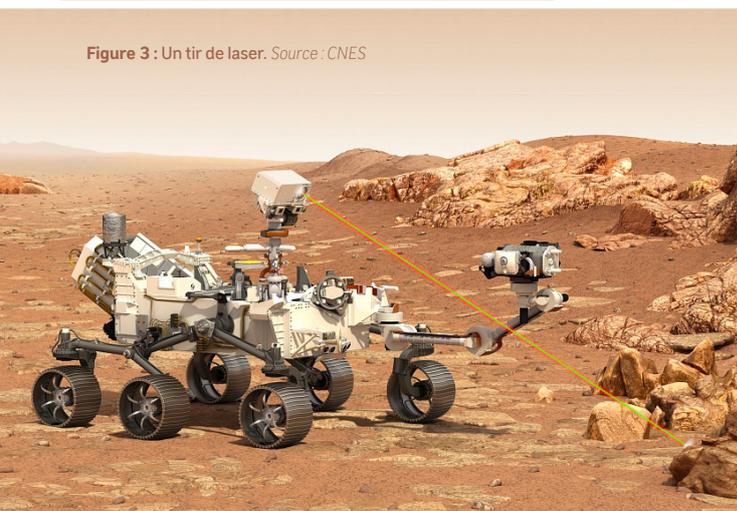


Figure 4 : Schéma simplifié de SuperCam. Source : spectroscopyonline.com

Figure 5 : Le spectre électromagnétique. Source : Wikimedia

Q. 3 : Dans quel domaine du spectre électromagnétique se trouve λ ? Quelle est l'énergie d'un photon émis par le LIBS de **SUPERCAM** ? Donner le résultat en Joule et en électronVolt ($1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

SUPERCAM
EXPLORATION
MARTIENNE

Spectroscopie

Q. 4 : Sachant que la puissance allouée à SUPERCAM est de $17,9 \text{ W}$, et en supposant que LIBS utilise toute cette puissance à lui seul, calculer le nombre de photons émis en une seconde.

Maintenant que vous avez compris comment marche le laser, on va pointer celui-ci vers une roche martienne.

On concentre tous les photons générés par le laser vers un seul et unique point, ce qui fait "fondre" la roche visée.

Q. 5 : Rappeler les différents types de transfert thermique. Duquel s'agit-il ici ?

Grâce aux nombreuses missions vers **MARS**, on a pu découvrir des traces d'eau liquide, voire même de l'argile à sa surface ! Ce composant minéral est indicateur qu'une rivière est passée par là, et donc peut-être de la vie ! **PERSEVERANCE** aura entre autres pour mission de trouver des composés minéraux, dont l'argile fait partie. Il devra ensuite essayer de détecter d'éventuelles traces de vie. Voici quelques propriétés d'une argile que l'on appelle kaolinite : $T_{\text{fusion}} = 2073\text{K}$ et $C_v = 7,802\text{kcal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Composition : $[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]_2$. C_v représente la capacité thermique à volume constant du matériau.

On rappelle aussi quelques propriétés de la surface de Mars : $T_{\text{Mars}} = 210\text{K}$; $\rho_{\text{Mars}} = 2900\text{kg.m}^{-3}$; ainsi que les masses molaires de certains éléments : $M_{\text{Si}} = 28,1\text{g.mol}^{-1}$; $M_{\text{Al}} = 27,0\text{g.mol}^{-1}$; $M_{\text{O}} = 16,0\text{g.mol}^{-1}$; $M_{\text{H}} = 1,0\text{g.mol}^{-1}$.

Q. 6 : Supposons que le rayon laser se concentre sur le cylindre de rayon $R = 175\mu\text{m}$ et d'épaisseur $e = 1\text{nm}$ de roche martienne. En utilisant un résultat intermédiaire de la question 4, déterminer le temps nécessaire pour la faire fondre. On utilisera pour cela la première loi de Joule : $\Delta E = nC_v\Delta T$, avec n la quantité de matière (mol). Rappel : $1\text{kcal} = 4184\text{J}$.

C'est très rapide, vous ne trouvez pas ? Et pourtant, **SUPERCAM** n'a le droit qu'à une très faible puissance. Pourquoi ? Car le rover fonctionne grâce à un RTG (*Radioisotope Thermoelectric Generator*), un appareil générant de l'électricité à partir de la chaleur obtenue par la désintégration radioactive du plutonium 238. Il a l'inconvénient de générer une faible puissance, mais en contrepartie sa durée de vie est extrêmement longue comparée aux autres types de générateurs (panneaux solaires) : plus de 14 ans ! La sonde New Horizons, qui aujourd'hui se dirige au-delà du Système Solaire, en possède un conçu pour durer 50 ans à pleine puissance !

La Spectroscopie

Lorsque le laser **LIBS** fait fondre la roche martienne, celle-ci émet de la lumière. Ce rayonnement est caractéristique des éléments présents dans la roche. Pour déterminer de quoi elle est faite, on utilise un spectroscope. C'est un instrument permettant de "séparer" les différentes longueurs d'onde de lumière émises et de les "étaler" sur un spectre. Le principe est le suivant : la rayon émis passe d'abord par une fente, puis à travers un prisme. Chaque longueur d'onde de lumière est déviée d'un certain angle, permettant ainsi de les différencier. Nous nous attarderons ici principalement sur les raies d'émission.

On peut obtenir ainsi le spectre d'émission du mercure (Hg) :

Plus concrètement, les électrons chauffés par le laser émettent des photons pour se stabiliser. Comment arrive-t-on à reconnaître différents atomes ? Les émissions de photons par un atome sont en fait quantifiées : il ne peut émettre que dans quelques longueurs

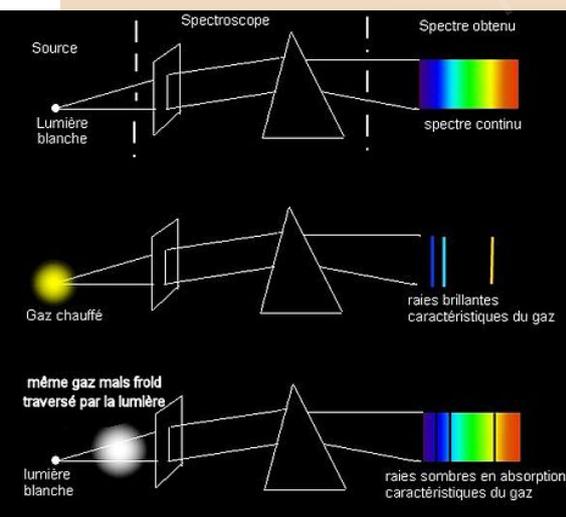


Figure 6 : Le principe de spectroscope. Source : Wikipedia

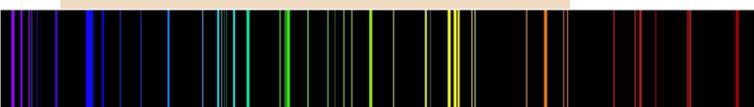
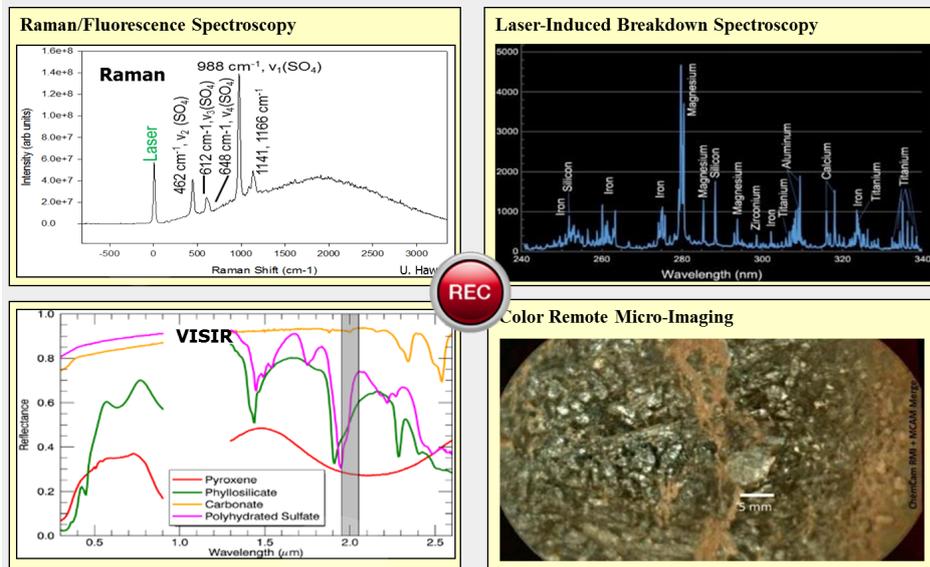


Figure 7 : Le spectre d'émission du mercure.

SUPERCAM
EXPLORATION
MARTIENNE

Spectroscopie

Figure 9 : Spectres de détection des spectromètre et image de Mars prise par ChemCam. Source : LANL/IRAP



d'onde. Cela est dû au fait que les électrons de cet atome ne peuvent avoir eux-mêmes que certains niveaux d'énergie. Le passage d'un niveau d'énergie à l'autre implique l'émission ou absorption d'un photon d'une longueur d'onde précise.

On se propose d'étudier les raies d'émission principales du mercure, dont vous avez son spectre ci-dessus. On donne les principales raies d'émission du mercure : 266nm, 404nm, 436nm, 546nm, 577nm, 579nm.

Q.7 : À quels domaines électromagnétiques appartiennent ces longueurs d'onde ? Si elles appartiennent au domaine visible, donner leur(s) couleur(s).

Q.8 : On donne ci-contre les niveaux d'énergie pour le mercure. À quelle transition d'énergie correspond l'émission d'un photon de longueur d'onde 266nm ? Comment est appelé le niveau d'énergie E_1 ?

Le spectromètre **LIBS** n'est qu'un des nombreux instruments de spectroscopie de **SUPERCAM**. Il y en a deux autres :

RAMAN et **VISIR**. Voici des graphiques représentant ce que ces spectromètres détectent ainsi qu'une image prise par le micro-imageur **CHEMCAM** de **CURIOSITY** : En haut à gauche est affiché le spectre IR du spectromètre **RAMAN**. En haut à droite, le spectre de détection du **LIBS**. En bas à gauche, celui de **VISIR**. En bas à droite, une image de **MARS** prise par **CHEMCAM**.

Q.9 : À votre avis, pourquoi avoir mis 3 spectromètres sur SuperCam ?

Parmi les détecteurs de **SUPERCAM**, il y a aussi un microphone d'une portée de 4m, qui enregistrera entre autres le son émis par le claquement de la roche touchée par le laser lors de son passage à l'état de plasma. Cela permettra d'obtenir d'autres propriétés de la roche martienne, comme sa dureté ou sa porosité.

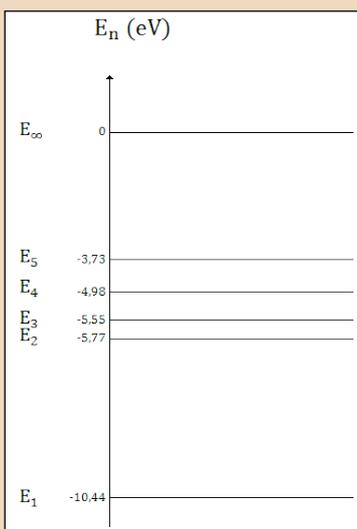


Figure 8 : Les niveaux d'énergie du mercure



SUPERCAM
EXPLORATION
MARTIENNE

Spectroscopie

Les enjeux géologiques de SuperCam



On surnommait le **Rover CURIOSITY** "chercheur d'eau". Et il en a trouvé des traces. Maintenant, **PERSEVERANCE**, s'attaque à l'étape suivante : trouver des traces d'une vie passée. Pour cela, il doit trouver des composés minéraux tels que l'argile, ou des composés organiques tels que des acides aminés. Peut-être les découvrira-t-on avec des traces de vie microbienne ? Ce sera alors un pas de plus vers l'hypothèse que **MARS** aurait un jour peut-être abrité la vie. Mais où faut-il chercher toutes ces traces ?

Q. 10 : À quoi vous fait penser le cratère Jezero dont l'image est ci-dessous ? À votre avis, pourquoi a-t-on choisi cet endroit pour le rover Perseverance ?

L'ellipse en bleu représente la zone où le rover était censé atterrir.

Le point de localisation bleu représente l'endroit où le rover a atterri.

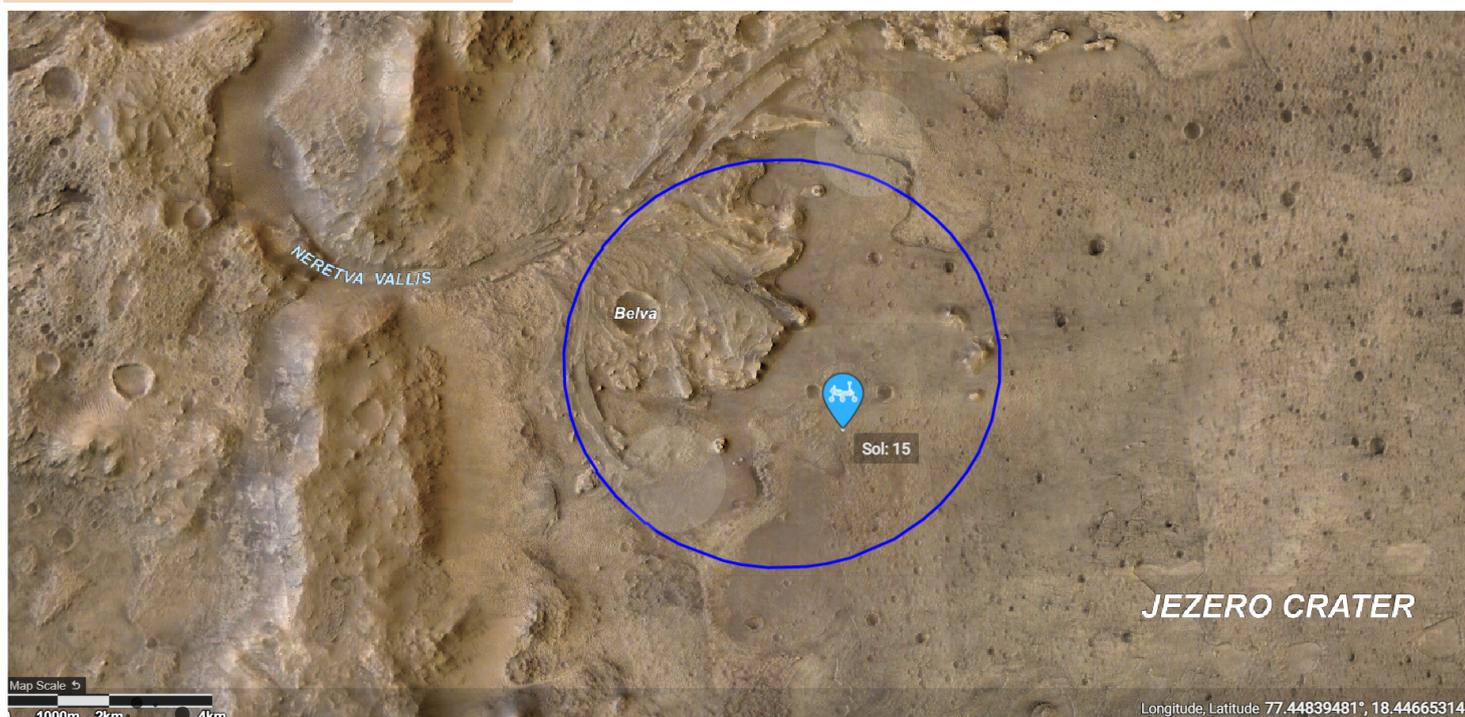


Figure 10 : Le cratère Jezero. Source : NASA



Conclusion

Faisons un petit bilan de l'activité : nous avons tout d'abord étudié le laser de **LIBS** et les propriétés de celui-ci. Nous avons constaté qu'il mettait un temps très court pour faire fondre la roche martienne. Cependant, on est encore loin de la réalité : dans les faits, le laser mettrait à peine quelques nanosecondes pour la transformer en plasma ! Certaines hypothèses seraient donc à reconsidérer, comme la composition de la roche, qui n'est en fait pas constituée que d'argile.

Nous avons ensuite étudié la spectroscopie et les spectres d'émission puis nous avons vu l'intérêt d'avoir plusieurs spectroscopes à la fois.

Enfin, nous avons fait une étude géologique du cratère Jezero observé depuis l'orbite. Vous aurez constaté sa similitude avec une certaine planète, ce qui en fait logiquement une cible de choix pour les scientifiques.



Spectroscopie

Pour aller plus loin...



La page Wikipedia SuperCam

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_2020_\(mission_spatiale\)#Spectrom%C3%A8tre_imageur_SuperCam](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_2020_(mission_spatiale)#Spectrom%C3%A8tre_imageur_SuperCam)



La page Wikipedia de la spectroscopie

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectroscopie>



Vous aimez les lasers ? Vous voulez approfondir vos connaissances sur la lumière ? Je vous conseille un excellent ouvrage écrit par le prix Nobel de physique 2012 Serge Haroche : La Lumière Révélée

La Lumière Révélée, Serge Haroche, éditions Odile Jacob



Chaînes You Tube suivant de près l'actualité spatiale. Dans l'ordre : Hugo Lisoir et Stardust – La Chaîne Air et Espace

<https://www.youtube.com/channel/UCDC6DBi0kRp6Jk21xqfvFLA>

<https://www.youtube.com/channel/UCdL3UpiseRlvxXuORJjmqZw>



Chaîne Youtube du CNES

<https://www.youtube.com/user/CNESespace>



Premiers résultats de SuperCam : conférence de presse du 10/03/2021

<https://www.youtube.com/watch?v=0DAhLuUnDwE>



Spectroscopie

Quizz de fin d'activité

→ Il peut y avoir plusieurs réponses par question

- 1) Qu'est-ce qu'un plasma ?
A) De la lave en fusion B) Du gaz ionisé C) De la roche fondue D) De la glace

- 2) Combien de photons par seconde SuperCam émet-il à pleine puissance ?
A) 10^{18} B) 10^{19} C) 10^{20} D) 10^{21}

- 3) Quels sont les différents types de transfert thermique ?
A) Rayonnement B) Écoulement C) Conduction D) Convection

- 4) Combien de temps met un cylindre de rayon $175\mu\text{m}$ et de hauteur 1nm de roche martienne pour fondre sous l'action du laser ?
A) 10^{-9}s B) 10^{-8}s C) 10^{-7}s D) 10^{-6}s

- 5) Quelle sera la longueur d'onde d'un photon émis par une transition énergétique d'un électron de $-3,73\text{eV}$ à $-5,77\text{eV}$?
A) 348nm B) 609nm C) 579nm D) 266nm

- 6) Quel spectroscope permet de détecter du fer ?
A) RAMAN B) VISIR C) La caméra D) LIBS

- 7) Lequel de ces instruments a une portée de détection de 12m ?
A) RAMAN B) VISIR C) Le microphone D) LIBS

- 8) Pourquoi a-t-on choisi le cratère Jezero ?
A) Pour trouver la météorite responsable du cratère
B) Pour explorer les traces d'un ancien delta
C) Car Jezero était anciennement un lac
D) Car l'orbiteur MRO y a repéré des petits hommes verts

Spectroscopie

Synthèse



OBJECTIFS

- Découvrir le fonctionnement de la caméra Supercam
- Découvrir le principe de la spectroscopie
- Comprendre l'intérêt géologique de la mission



COMPÉTENCES ACQUISES

- Comprendre les caractéristiques d'un laser (APP/ANA/REA)
- Notions de thermodynamique (REA)
- Notions de physique quantique (ANA/REA)
- Savoir exploiter des données depuis des images (ANA/VAL)

Lors de cette activité, nous avons :

- Fait une étude qualitative du laser et des photons : nous avons établi pourquoi le laser a une portée limitée, puis la relation reliant l'énergie d'un photon à sa longueur d'onde :

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

- Regardé l'impact du laser sur la roche d'un point de vue thermodynamique : nous avons construit une relation simple reliant le temps nécessaire pour faire fondre une surface mince de roche martienne sous l'action du laser :

$$\frac{\rho_{Mars} \pi R^2 e C_v \Delta T}{M}$$

- Cette relation est cependant très simplifiée : elle ne prend pas en compte certains facteurs, comme la diffusion de la chaleur en profondeur et le fait que ce n'est que la surface exposée à la radiation qui reçoit initialement l'énergie si l'épaisseur du volume est trop élevée.

- Étudié la physique de l'atome : à quelle transition électronique correspondait l'émission/absorption d'un photon d'une certaine longueur d'onde ; à quels domaines du spectre électromagnétique appartenaient des photons de différentes longueurs d'onde.
- Constaté la nécessité d'embarquer plusieurs spectroscopes sur Perseverance : chacun de ces spectroscopes a été conçu pour détecter des éléments précis : des atomes pour LIBS, des molécules pour RAMAN (en particulier les sulfates) et VISIR (des molécules plus complexes encore).
- Compris les enjeux géologiques de la mission, pourquoi Perseverance s'est posé dans le cratère Jezero : ce cratère est en effet un vestige d'un ancien lac, dans lequel se déversait une rivière des milliards d'années auparavant.

On a donc grand espoir d'y trouver des traces de vie (si elle a existé sur Mars).