

## Titre : Persévérance et spectre de raies

### DESCRIPTIF DE L'ACTIVITÉ

<b>Objectif</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produire et exploiter un spectre d'émission obtenu à l'aide d'un système dispersif et d'un analyseur de spectre.</li> <li>• Caractériser un rayonnement monochromatique par sa longueur d'onde dans l'air.</li> <li>• Exploiter un spectre de raies, déterminer et utiliser une échelle.</li> <li>• Comparer un résultat expérimental à une donnée de référence.</li> </ul>	
<b>Niveau concerné</b>	Seconde	
<b>Programme</b>	<i>Notion et contenus</i>	<b>Capacités exigibles</b> <i>Activités expérimentales support</i>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractériser un rayonnement monochromatique par sa longueur d'onde dans le vide ou dans l'air.</li> <li>• Exploiter un spectre de raies.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produire et exploiter des spectres d'émission obtenus à l'aide d'un système dispersif et d'un analyseur de spectre</li> </ul>
<b>Place de l'activité dans la progression</b>	Activité d'application du chapitre "Spectres d'émission".  Pré requis : Vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou dans l'air ; Dispersion de la lumière blanche par un prisme ou un réseau ; Spectre atomique d'émission de raies.	
<b>Compétences de la démarche scientifique évaluées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Approprier (App)</b> : Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée.</li> <li>• <b>Raisonner (RAI)</b> : Proposer une stratégie de résolution.</li> <li>• <b>Réaliser (REA)</b> : Réaliser une expérience en respectant les consignes de sécurité.</li> <li>• <b>Valider (VAL)</b> : Comparer des résultats expérimentaux à une donnée de référence.</li> </ul>	
<b>Mode d'évaluation</b>	Evaluation formative.	
<b>Mise en œuvre de l'activité</b>	Après un court extrait vidéo, les élèves suivent les premières questions afin de s'approprier l'activité. Puis ils doivent proposer et réaliser des expériences pour vérifier une information. Plusieurs niveaux d'aide sont proposés.  Travail par groupe.	
<b>Outils numériques utilisés</b>	Spectromètre à fibre type spid HR relié à un ordinateur avec une connexion réseau	
<b>Remarques</b>	Le nombre de postes proposés aux élèves peut être limité du fait du matériel utilisé : spectromètre à fibre relié à un ordinateur, photophore coloré enflammé, lampe spectrale à vapeur de sodium.	
<b>Auteur(s)</b>	Yves Duarte	

## L'ACTIVITÉ

### Persévérance et spectre de raies

Nom, Prénom :

autoéval

eval

#### Compétences travaillées

Approprier : Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée.

Raisonner : Proposer une stratégie de résolution

Réaliser : Réaliser une expérience en respectant les consignes de sécurité

Valider : Comparer des résultats expérimentaux à des données

#### Objectifs :

- Produire et exploiter des spectres d'émission obtenus à l'aide d'un système dispersif et d'un analyseur de spectre
- Caractériser un rayonnement monochromatique par sa longueur d'onde dans le vide ou dans l'air.
- Exploiter un spectre de raies.



Photo : <https://cnes.fr/fr/mars-la-nouvelle-frontiere>

### CONTEXTE

Le 18 février 2021, Persévérance, le rover de la mission Mars 2020, s'est posé sur Mars. Laboratoire de haute technologie, Persévérance comprend de nombreux instruments dont un sur lequel la France a beaucoup travaillé : SuperCam. Cet appareil, descendant du chemcam du rover Curiosity, analyse par spectrométrie la lumière d'un plasma issue d'un tir laser sur les roches, permettant de remonter à la composition du sol.



Photo : CNES

### QUESTION

Comment Persévérance détecte les éléments contenus dans un échantillon de roche ?

### DOCUMENTS

**Document n°1 : Vidéo** « Persévérance : une année sur Mars » - Arte - 52 min

De 11 min à 13 min : <https://www.youtube.com/watch?v=r7tJsfSuUK4>

**Document n°2 : Super Cam et spectromètre LIBS**

Véritable « couteau suisse » de la mission, SuperCam réunit cinq techniques de mesures destinées à étudier la géologie de Mars et aider à la sélection des échantillons que collectera le rover.

L'une d'elles, le LIBS utilise un laser infra rouge à 1064 nm de longueur d'onde et un spectromètre.

Le laser infrarouge du LIBS de SuperCam chauffe et pulvérise jusqu'à sept mètres de distance de très petites quantités de roche en produisant un plasma (un gaz chaud).

Les atomes et les ions sont alors dans des niveaux d'énergie excités. En se déséxcitant, ils émettent un rayonnement qui est analysé par spectroscopie entre 250 et 900 nm.

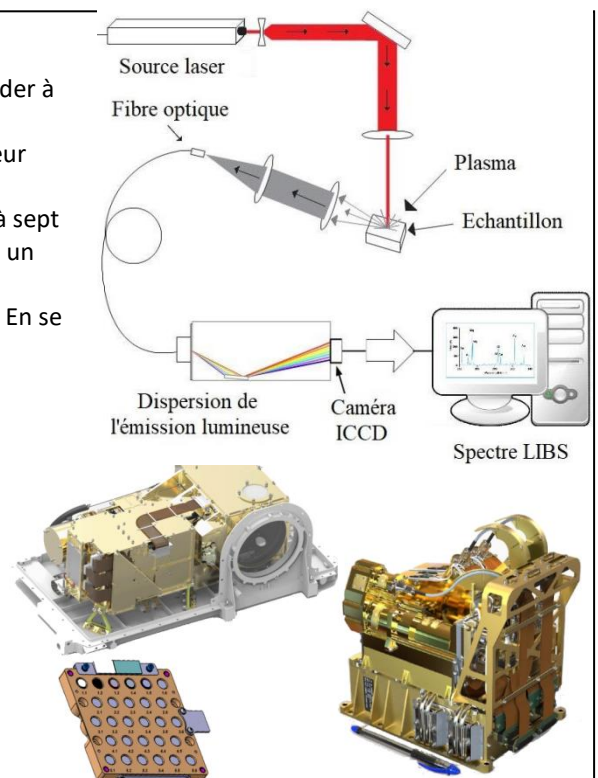
On obtient ainsi un spectre d'émission atomique.

La détermination des longueurs d'onde de raies présentes sur ce spectre permet d'identifier les atomes ou ions présents dans la cible et donne accès à la composition atomique des roches martiennes.

La technique s'appelle **LIBS** (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, ou spectrométrie sur plasma induit par laser).

CNES

Ci-contre les trois composants de la SuperCam : partie optique (en haut à gauche), spectromètres (à droite) et cibles utilisées pour l'étalonnage.

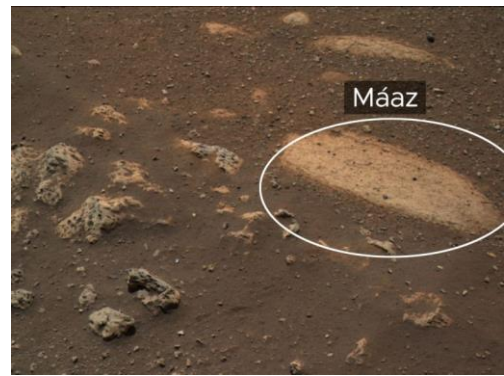


### Document n°3 : Mááz, la première cible de Supercam

Au sol 12 (au 12ème jour martien d'exploration), la première cible de SuperCam était une roche plate et blanchâtre que les chercheurs ont nommée Mááz, qui est le mot Navajo pour Mars.

Un tir du laser infrarouge du Libs a permis d'obtenir un premier spectre d'émission atomique.

Une analyse préliminaire montre que Mááz est de composition basaltique et est soit igné (volcanique), soit composé de grains fins de matière ignée cimentés ensemble par de l'eau. Une étude plus approfondie sera nécessaire pour déterminer de quoi il s'agit, puisque Persévérance a atterri dans un ancien lit de lac, mais il existe également d'autres dépôts volcaniques dans la région.



*Ci-dessous le premier spectre de Supercam Libs sur la cible Mááz*

### SuperCam First LIBS Spectrum: Mááz

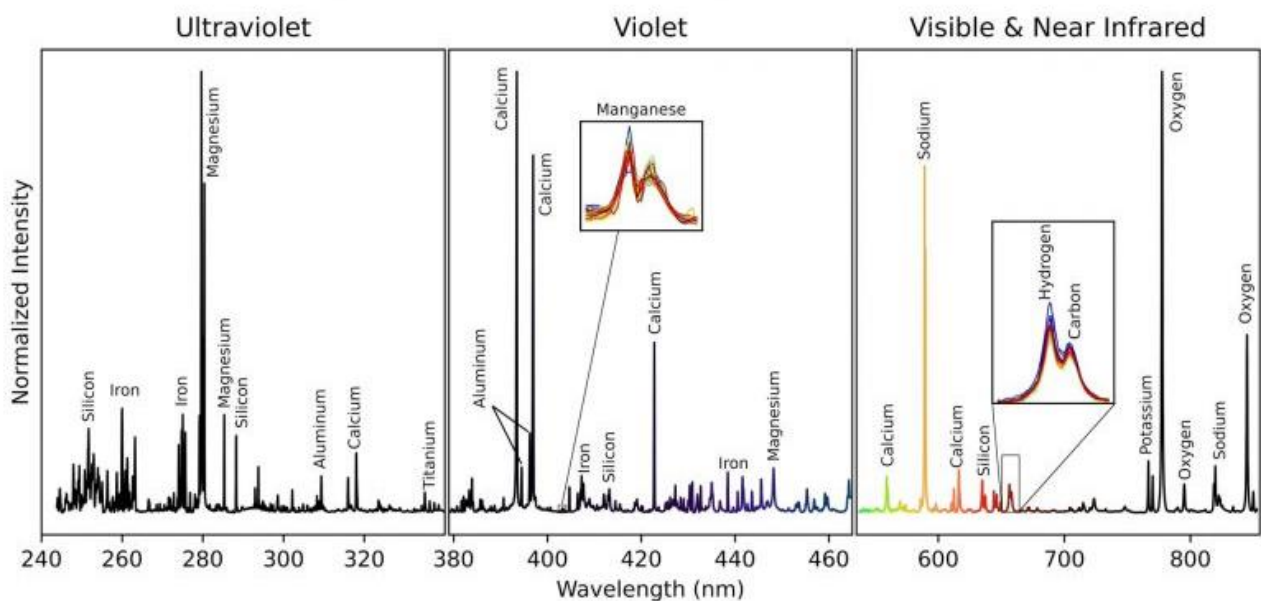


Image via NASA/ JPL-Caltech

### Document n°4 : Photophores colorés



Ci-contre, photophores aux sels de NaCl ; CaCl<sub>2</sub> et CuCl<sub>2</sub>.

Les sels étant légèrement solubles dans l'éthanol ou le méthanol on peut en dissoudre l'équivalent d'une spatule dans quelques mL, et placer

ces solutions dans un bol avec un coton imbibé.

On allume le coton. Au début, la flamme est peu colorée, mais à mesure que la température augmente la flamme prend une belle coloration.

Attention à **placer les coupelles sur un support stable et hors de portée** d'enfants ou animaux.

*Sels métalliques en poudre utilisables :*

- [Chlorure de sodium](#) NaCl (sel de cuisine)
- [Chlorure de potassium](#) KCl
- [Chlorure de lithium](#) LiCl
- [Chlorure de calcium](#) CaCl<sub>2</sub>
- [Sulfate de cuivre \(II\)](#) CuSO<sub>4</sub>
- [Chlorure de cuivre \(II\)](#) CuCl<sub>2</sub>
- [Chlorure de baryum](#) BaCl<sub>2</sub>
- [Chlorure de strontium](#) SrCl<sub>2</sub>

**En vidéo : Les flammes colorées** : les incroyables expériences de chimie - Futura - 4min47 :

<https://ladigitale.dev/digiview/#/v/647f08da4fcd2>

**Document n°5 : Simulateur de spectre** - Ostralo : [http://physique.ostralo.net/spectre\\_em\\_abs/](http://physique.ostralo.net/spectre_em_abs/)

**Document n°6 : Liste de matériel**

- Photophore coloré et sa solution alcoolique de chlorure de sodium NaCl
- Lampe spectrale à vapeur de sodium
- Un spectroscopie plat gradué
- Un spectromètre à fibre dont l'incertitude-type donnée par le constructeur est  $U_1(m) = \pm 1 \text{ nm}$ , relié à un ordinateur.
- Condenseur optique pour focaliser la lumière du photophore sur l'entrée optique du spectromètre.
- Ordinateur

**TRAVAIL A EFFECTUER**

1. L'outil Supercam du rover Persévérance, tire au laser sur une cible à 7,0 m. Déterminer la durée entre le moment où le tir laser est effectué et celui où Supercam reçoit la lumière émise par l'échantillon.
2. Quelle est la longueur d'onde du laser de Supercam ? A quel domaine du spectre électromagnétique correspond-il ?
3. Expliquer pourquoi un laser monochromatique est envoyé sur la cible et qu'ensuite une multitude de radiations monochromatiques est récoltée par l'analyseur de spectre ?
4. Une partie de la lumière émise par les éléments constituant le plasma est captée par le spectromètre du Libs, par quel dispositif cette lumière peut-elle être décomposée ?
5. Le spectre obtenu est-il continu ou discontinu ?
6. **Démarche experte :** En proposant une ou plusieurs expériences et en s'appuyant sur les documents, vérifier que la raie identifiée comme celle du sodium dans le spectre du LIBS correspond bien à celle du sodium. Identifier les pictogrammes de sécurité associés au matériel ainsi que les risques liés à cette manipulation et indiquer les précautions à prendre.



**Appeler le professeur pour lui présenter la démarche ou en cas de difficulté**



**Démarche avancée :**

Déterminer la longueur d'onde correspondant au sodium dans le spectre de Maaz (doc 3) en ayant préalablement établi l'échelle du spectre de Máaz.  
Proposer et réaliser une ou plusieurs expériences permettant de déterminer expérimentalement la longueur d'onde de la raie principale du spectre d'émission du sodium.  
Identifier les pictogrammes de sécurité associés au matériel ainsi que les risques liés à cette manipulation et indiquer les précautions à prendre.  
Vérifier alors que la raie identifiée comme celle du sodium dans le spectre du LIBS correspond bien à celle du sodium.



**Appeler le professeur pour lui présenter la démarche ou en cas de difficulté**



**Démarche d'initiation :**

**A demander au professeur**

## Validation

7. Validation en tenant compte de l'incertitude-type du spectromètre donnée par le constructeur
  - a. Exprimer la valeur mesurée  $m$  de longueur d'onde de la raie principale du sodium déterminée expérimentalement, avec l'incertitude type  $U_1(m)$  associée à l'appareil de mesure sous la forme :
$$\lambda_{\text{Na mesurée}} = m \pm U_1(m)$$
  - b. Déterminer la longueur d'onde de la raie la plus intense du Sodium avec le simulateur de spectre : [http://physique.ostralo.net/spectre\\_em\\_abs/](http://physique.ostralo.net/spectre_em_abs/)
  - c. Vérifier si la longueur d'onde du sodium déterminée expérimentalement est compatible avec la longueur d'onde du simulateur.
8. Validation en tenant compte de l'incertitude-type calculée à partir de données statistiques
  - a. Relever les  $N$  valeurs de longueur d'onde de la raie principale du sodium obtenues avec les spectromètres par chacun des groupes puis, calculer la moyenne  $\bar{m}$  et l'écart type expérimental  $S_m$  en utilisant le mode statistique de votre calculatrice  
Calculer alors l'incertitude-type associée en utilisant la relation :
$$U_2(\bar{m}) = \frac{S_m}{\sqrt{N}}$$
Cette dernière relation est établie mathématiquement pour qu'il y ait 68% de probabilité que toutes les valeurs mesurées soient à  $\pm U_2(\bar{m})$ .  
Ecrire alors la valeur de la longueur d'onde de la raie du sodium sous la forme :
$$\lambda_{\text{Na mesurée}} = \bar{m} \pm U_2(\bar{m})$$
  - b. Vérifier si la longueur d'onde du sodium déterminée est compatible avec la longueur d'onde du simulateur.

## Conclusion

9. Répondre à la question posée au début de l'activité.

## Annexes

### Démarche d'initiation :

#### Détermination de la longueur d'onde de la raie du sodium à partir du spectre de Máaz :

Dans le document 3, déterminer l'échelle horizontale (..... cm sur le graphique correspond à ..... nm dans la réalité). Déterminer la distance en cm de la raie du sodium à la graduation de 600 nm ; utiliser l'échelle pour déterminer la correspondance en nm.

Déterminer alors la longueur d'onde de la raie du sodium à partir du spectre de Máaz.

#### Détermination expérimentale de la longueur d'onde de la raie du sodium :

Identifier et choisir un ou plusieurs dispositifs permettant d'obtenir une lumière directement émise par une source contenant l'élément sodium.

Identifier et choisir un ou plusieurs dispositifs permettant de décomposer la lumière et d'obtenir un spectre de lumière. Imaginer alors une expérience permettant de déterminer la longueur d'onde de la raie principale du spectre d'émission du sodium.

Identifier les pictogrammes de sécurité associés au matériel ainsi que les risques liés à cette manipulation et indiquer les précautions à prendre. Visionner la vidéo sur les flammes colorées.

Réaliser l'expérience et déterminer alors la longueur d'onde de la raie principale du sodium.

#### Conclusion :

Comparer alors la valeur de longueur d'onde du sodium mesurée avec celle déterminée dans le document 3 et vérifier si la raie identifiée comme celle du sodium dans le spectre du LIBS correspond bien à celle du sodium



Appeler le professeur pour lui présenter la démarche ou en cas de difficulté



Sources : CNES ; NASA/ JPL-Caltech ; [http://wiki.scienceamusante.net/index.php?title=Flammes\\_color%C3%A9es](http://wiki.scienceamusante.net/index.php?title=Flammes_color%C3%A9es)

## Elements de correction

- On sait que la vitesse de la lumière (dans le vide, dans l'air et à fortiori dans l'atmosphère martienne) est  $c = 3,00.10^8 m.s^{-1}$ , que  $v = \frac{D}{\Delta t}$  et que la distance parcourue par la lumière laser "aller" et la lumière "retour" émise par les atomes est :  $D = 2 \times 7,0 m$   
Alors :  $\Delta t = \frac{D}{v} = \frac{7,0 \times 2}{3,00.10^8} = 4,7.10^{-8} s$  (on néglige la durée de désexcitation des éléments)
- La longueur d'onde du laser de Supercam est 1064 nm, ce qui correspond à un rayonnement infrarouge.
- Le laser de Supercam chauffe et excite les éléments de l'échantillon, une seule longueur d'onde suffit. Ensuite les éléments se désexcitent en émettant plusieurs radiations monochromatiques qui les caractérisent, plusieurs longueurs d'onde différentes sont donc émises.
- Le spectromètre peut contenir un prisme ou un réseau pour décomposer la lumière.
- C'est un spectre de raie, il est donc discontinu (doc 3).
- Il faut déjà évaluer la longueur d'onde correspondant au sodium dans le spectre de Maaz :  
Échelle : 3,2 cm = 200 nm soit  $1,0.10^{-2} cm = 63 nm$   
La raie du sodium se trouve à 1,5 mm de 600 nm soit  $\frac{1,5.10^{-3} \times 63}{1,0.10^{-2}} = 9,4 nm$   
La raie du sodium se situe donc sur le spectre de Maaz à 600-9 nm = 591 nm

Puis il faut mesurer la longueur d'onde du Sodium.

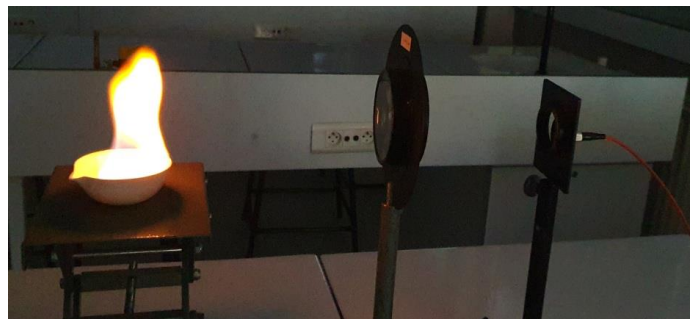
Plusieurs expériences peuvent être proposées, réalisées et discutées :

Attention, L'utilisation du photophore contenant de l'alcool inflammable et de feu nécessite de manipuler éloigner d'autres combustibles et avec les cheveux attachés, la blouse et les lunettes.

La source de lumière peut être le photophore au chlorure de sodium et/ou de la lampe spectrale.

Avec le spectroscope gradué on estime la longueur d'onde de la raie du sodium  $\lambda_{Na}$  entre 550 et 600 nm

Avec le spectromètre on mesure  $\lambda_{Na} = 588 nm$



La valeur mesurée  $\lambda_{Na} = 588 nm$  est proche de la valeur lue graphiquement sur le spectre de Maaz :  $\lambda_{Na} = 591 nm$ , on peut conclure que la raie attribuée au sodium sur le spectre de Maaz est compatible avec celle du sodium.

- La valeur mesurée est  $\lambda_{Na} = 588 nm \pm 1 nm$ .
  - Avec le simulateur on trouve une valeur de référence de  $\lambda_{Na} = 589 nm$ ,
  - Avec le simulateur on trouve une valeur de référence de  $\lambda_{Na} = 589 nm$ , ce qui est compatible avec la valeur mesurée avec le spectromètre :  $\lambda_{Na} = 588 \pm 1 nm$  à une incertitude près.
- -
- Grace à son laser, supercam de Persévérance envoie de l'énergie aux éléments de l'échantillon ciblé. Chaque élément, en se désexcitant ( en perdant l'excès d'énergie accumulé) émet une ou plusieurs radiations dont les longueurs d'onde le caractérise.  
La mesure de la longueur d'onde de ces raies grâce au spectromètre permet d'identifier les éléments de l'échantillon de roche