

Révisions pour le concours blanc : optique

La SuperCam est une version fortement améliorée de l'instrument franco-américain ChemCam embarqué sur l'astromobile Curiosity, qui se trouve sur la planète Mars. Elle utilise un laser et trois spectromètres pour analyser à distance la composition élémentaire et minérale des roches ciblées. Un microphone, appelé Mars Microphone, est disposé sur la tête optique au sommet du mât du rover. Il enregistre, entre autres, les sons de claquage des étincelles des plasmas produits par le laser qui permettent d'en déduire différents paramètres physiques venant ainsi améliorer l'analyse des spectres LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, que l'on peut traduire par spectroscopie à dégradation induite par laser). Ces sons, souvent appelés de manière imagée "impacts laser", sont audibles jusqu'à une distance de 4 mètres.

Q1. L'atmosphère martienne est principalement constituée de dioxyde de carbone CO_2 . Calculer la masse molaire de ce gaz en $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$.

La thermodynamique permet d'estimer le calcul de la célérité d'une onde sonore dans un gaz parfait par

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

où γ est le coefficient adiabatique (que l'on estimera à 1,4), R la constante des gaz parfaits, M la masse molaire et T la température en kelvins.

Q2. Sachant que la température moyenne sur Mars est de -63°C , montrer qu'on retrouve la valeur de la célérité d'une onde sonore sur Mars égale à environ $240 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Document 2 - Descriptif du laser de SuperCam et ChemCam

Son laser pulsé émet un rayonnement à 1067 nm délivrant environ 15 mJ pour une durée d'impulsion de 5 ns. L'interaction du faisceau laser pulsé de forte puissance avec un matériau provoque un échauffement brutal de la surface éclairée, une vaporisation et une ionisation sous forme d'un plasma. Il est important de comprendre que le plasma se formera si, au niveau de la cible, la puissance par unité de surface (ou l'irradiance) est supérieure à un seuil de $1,0 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$. C'est pourquoi SuperCam est pourvue d'un système de focalisation du faisceau laser qui est tel qu'au niveau de la cible le diamètre du faisceau est d'environ $D = 400 \mu\text{m}$. Dans ces conditions, les atomes et les ions éjectés sont alors dans des niveaux d'énergie excités. En se désexcitant, 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.

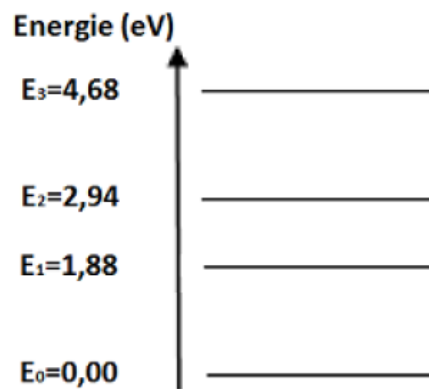
Source : <http://www.msl-chemcam.com/>

Q3. Dans quel domaine émet le laser? Justifier.

Q4. Un laser émet une lumière quasi-monochromatique. Définir le terme quasi-monochromatique.

Q5. Montrer que les caractéristiques du faisceau laser utilisé par SuperCam permettent bien d'obtenir une irradiance suffisante pour créer un plasma. Afin de vérifier que l'analyseur spectral de SuperCam fonctionne bien, on réalise en laboratoire le spectre d'émission atomique d'une roche témoin contenant l'élément calcium.

Document 3 - Diagramme des niveaux énergétiques de l'ion Ca^+



Q6. Justifier pourquoi deux atomes (ou ions) différents ne donnent pas le même spectre d'émission. On expliquera notamment la notion de niveaux d'énergie quantifiés grâce au diagramme représentant les niveaux d'énergie de l'ion Ca^+ .

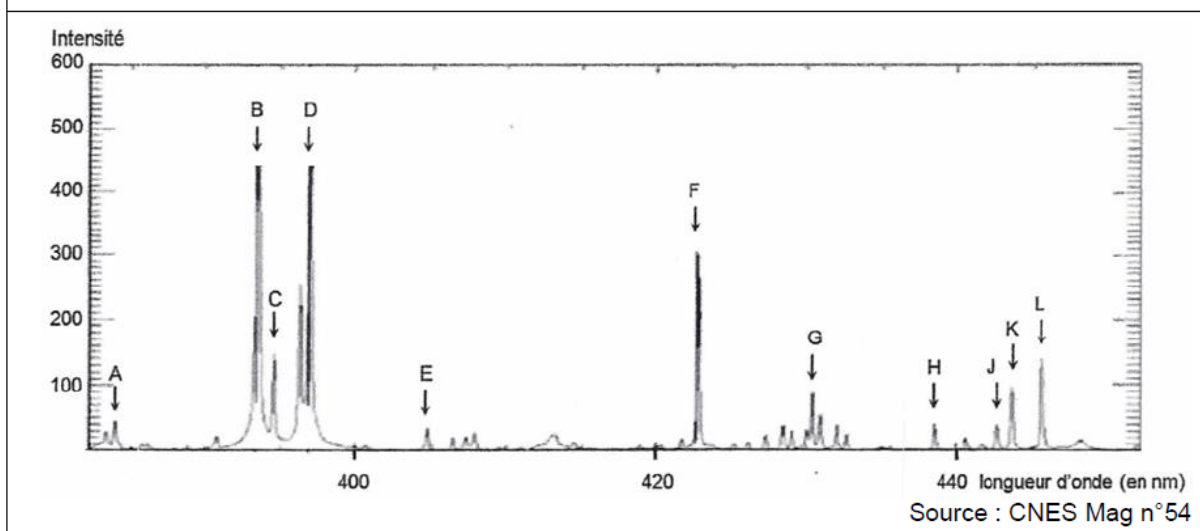
Le tableau 1 donne les longueurs d'onde en nm des raies d'émission de l'ion Ca^+ :

Longueur d'onde (nm)	394	397	423	443	444	446
----------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tableau 1 - Raies d'émission de l'ion Ca^+

Q7. À quelle transition énergétique du document 3 correspond, pour l'ion Ca^+ , la raie de longueur d'onde 423 nm? On justifiera précisément la réponse.

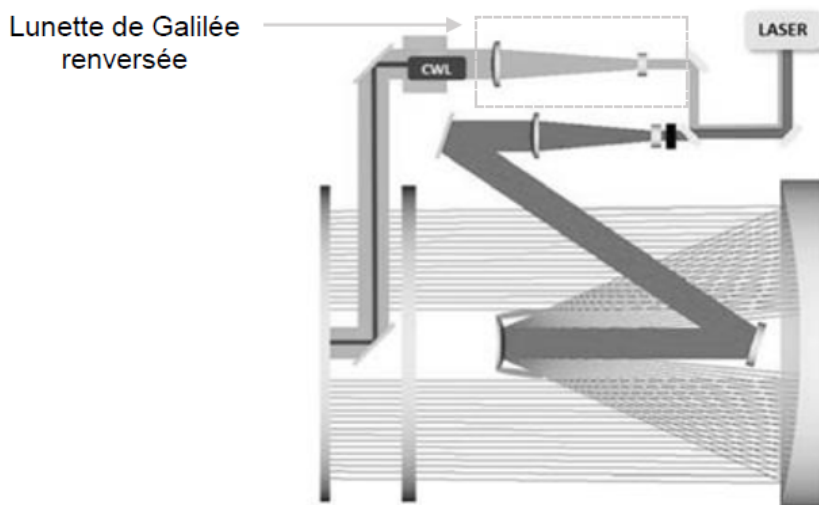
Document 4 - Spectre d'émission d'une roche témoin



Q8. D'après le document 4, préciser si le plasma issu de la roche témoin contient des ions Ca^+ . Justifier.

Il est nécessaire de faire converger le faisceau laser de diamètre 3,0 mm pour atteindre le seuil de $1 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ sur la cible. Le dispositif est schématisé dans le document 5. À la sortie du laser, on s'intéresse à un doublet afocal (lunette de Galilée renversée) qui élargit le faisceau. Celui-ci est ensuite injecté dans un télescope de type Cassegrain utilisé en émetteur. Le même télescope est aussi utilisé en "récepteur" pour collecter la lumière émise par la cible mais cette partie ne sera pas étudiée.

Document 5 - Schéma global du télescope



Source : www.photoniques.com, De ChemCam à SuperCam, Cécile Fabre

Le dispositif décrit correspond à un système en configuration afocale qui sera modélisé à l'aide de deux doublets afocaux constitués de lentilles simples positionnées sur un axe optique unique.

La lunette de Galilée renversée est modélisée par une lentille divergente L_1 de distance focale $f_1' = -20 \text{ mm}$ suivie d'une lentille convergente L_2 de distance focale $f_2' = 100 \text{ mm}$. Ces deux lentilles constituent le premier doublet afocal : le foyer image de la première lentille coïncide avec le foyer objet de la seconde. Les lentilles ne limitent pas l'étendue du faisceau. On suppose que le faisceau lumineux incident modélisant le faisceau laser est cylindrique et avec un diamètre de 3,0 mm.

Q9. Le système est utilisé dans les conditions de l'approximation de Gauss, ce qui permet un stigmatisme approché. Énoncer ces conditions et définir la notion de stigmatisme.

Q10. Schématiser le modèle optique proposé pour la lunette de Galilée renversée en illustrant la marche du faisceau cylindrique incident (rayons parallèles à l'axe optique) à travers le système des deux lentilles L_1 et L_2 . On prendra soin d'indiquer la position des foyers utiles de chacune des lentilles, ainsi que les centres de celles-ci. On choisira librement une échelle adaptée.

Q11. Dans cette configuration, calculer le diamètre du faisceau à la sortie de la lunette de Galilée renversée.

Données :

- ▷ Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$;
- ▷ Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- ▷ Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- ▷ $1 \text{eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{J}$;
- ▷ Échelles de température : $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$;
- ▷ Masses molaires atomiques : $M(\text{C}) = 12 \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $M(\text{O}) = 16 \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Aide au calcul			
$633^2 \approx 4,0 \cdot 10^5$	$\frac{6,63 \times 3,00}{423} \approx 4,7 \cdot 10^{-2}$	$\frac{4,7}{1,6} \approx 2,9$	$750 \times 8,31 \times 293 \approx 1,8 \cdot 10^6$