

Problème 1 : refroidissement d'atomes par laser (20 pts)

A partir d'un article publié dans une revue scientifique (**doc 1**), une société de développement informatique souhaite concevoir une simulation pédagogique interactive sur le refroidissement des atomes par laser. Peu expert en physique, le programmeur demande de l'aide pour comprendre les phénomènes et lois qu'il aura à modéliser dans la simulation.

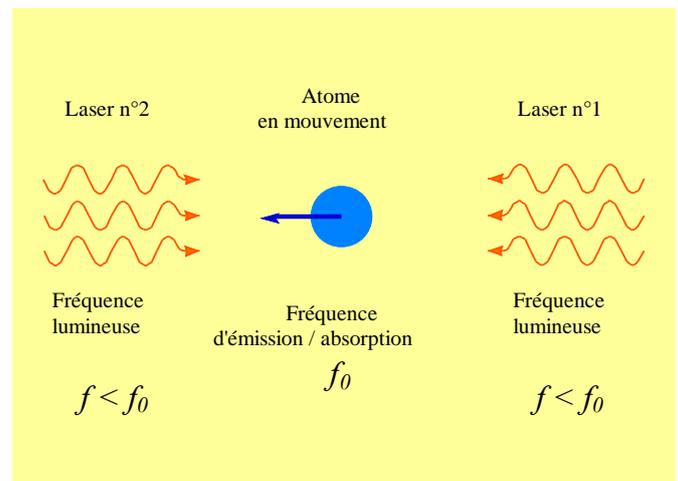
Des recherches complémentaires lui permettent de collecter les **documents 2, 3, 4 et 5**.

En utilisant l'ensemble des documents, répondre, en argumentant, aux questions du programmeur.

Doc 1 . L'article scientifique à l'origine de la simulation

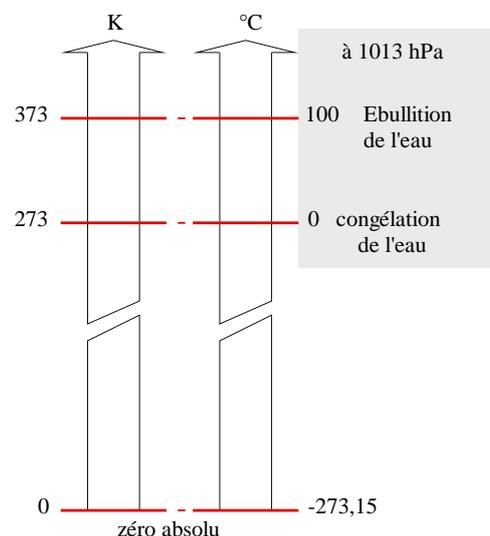
Les lasers peuvent être utilisés pour refroidir des atomes à des températures extrêmement basses, proches du zéro absolu qui vaut $-273,15\text{ °C}$. La température traduit le degré d'agitation thermique des atomes, lié à leur mouvement désordonné à l'échelle microscopique. Si l'on réduit la valeur de leur vitesse, la température diminue. La technique la plus « simple » consiste en un transfert de quantité de mouvement entre un photon et un atome se déplaçant dans la même direction, mais en sens opposé. Lorsqu'un photon est absorbé par l'atome, il lui transfère sa quantité de mouvement, ce qui se traduit par une diminution de la valeur de la vitesse de l'atome. On parle de recul. De même, l'émission d'un photon par un atome s'accompagne d'un recul de cet atome. Avec un seul photon, la variation de vitesse de l'atome est infime, mais avec un grand nombre de photons de direction convenable le bombardant, l'atome sera ralenti petit à petit. Le mouvement d'agitation thermique des atomes étant aléatoire, comment choisir la direction des photons incidents ? L'effet Doppler apporte une réponse. On utilise deux faisceaux laser de même direction, de sens opposés et de même fréquence f fixée précisément à une valeur légèrement inférieure à la fréquence f_0 d'absorption / émission de l'atome.

Les atomes se dirigeant vers un des deux lasers perçoivent des photons de fréquence supérieure à f et égale à f_0 . De l'autre laser, ils perçoivent de photons de fréquence inférieure à f . Seuls les photons de fréquence perçue f_0 peuvent être absorbés, ce qui permet de ralentir les atomes. Avec un jeu de 6 lasers, on pourra ainsi refroidir l'échantillon jusqu'à des températures de l'ordre de -273 °C . On ne peut cependant pas immobiliser complètement les atomes, car, après avoir absorbé un photon, l'atome se désexcite : il subit un effet de recul. Le photon étant émis dans une direction aléatoire, il subsiste un mouvement chaotique des atomes, ce qui correspond à une température légèrement supérieure au zéro absolu.

**Doc 2 . La physique du froid**

La définition la plus simple qu'on puisse donner du froid est l'absence de chaleur. Cette définition n'a de sens que si l'on sait mesurer la chaleur, en ajouter ou en retrancher à un objet. La thermodynamique statistique, dont les bases ont été posées par le physicien autrichien Ludwig Boltzmann dans les années 1870, montre que la chaleur contenue dans un objet n'est rien d'autre que l'énergie d'agitation désordonnée des molécules de cet objet : plus il est chaud, plus ses molécules s'agitent ; moins elles bougent, plus il est froid. L'immobilité absolue correspond alors au zéro de l'échelle de température.

Extrait de J.Matricon et G.Waysand, « Froid, physique », Encyclopédie Universalis.



Doc 3 . Rubidium 87

Le rubidium 87 de masse $m = 1,44.10^{-25}$ kg est souvent utilisé dans les recherches sur les atomes froids. La longueur d'onde dans le vide de la transition mise en jeu est $\lambda_0 = 780$ nm. A température ambiante, la valeur de la vitesse d'un atome dans un gaz est de l'ordre de 150 m.s⁻¹.

Doc 4 . Système atome / photon

Lors de l'émission ou de l'absorption d'un photon par un atome, le système atome / photon peut être considéré comme isolé. La somme vectorielle des quantités de mouvement du système à l'état final est donc égale à la somme vectorielle des quantités de mouvement à l'état initial.

Doc 5 . L'effet Doppler

L'effet Doppler, qui fait entendre la sirène d'un véhicule d'urgence plus aiguë lorsqu'il s'approche et plus grave lorsqu'il s'éloigne, est également observé avec les ondes lumineuses.

La fréquence lumineuse $f_{perçue}$ perçue par un atome mobile à la vitesse de valeur v est reliée à la fréquence émise $f_{émise}$ par une source lumineuse fixe (ici, le laser) par la relation :

Si l'atome se rapproche de la source :

$$f_{perçue} = f_{émise} \times \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

Si l'atome s'éloigne de la source :

$$f_{perçue} = f_{émise} \times \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}}$$

Dans ces relations, c est la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide : $c = 299\,792\,458$ m.s⁻¹

Questions

1 . A propos de la température

- 1.1. Peut-on comparer le processus de refroidissement des atomes par les photons à celui mis en œuvre à l'échelle des molécules lors du refroidissement d'une quantité d'eau chaude par mélange avec de l'eau froide ? (1 pt)
- 1.2. Comment justifier le fait que l'on ne puisse pas atteindre le zéro absolu avec la technique de refroidissement des atomes par laser ? (1 pt)

2 . A propos de la lumière laser

La constante de Planck vaut : $h = 6,63.10^{-34}$ J.s

- 2.1. Qu'est-ce qu'un photon ? Pourquoi lui associe-t-on une fréquence ? (1 pt)
- 2.2. D'après la relation de de Broglie, comment s'exprime la quantité de mouvement d'un photon en fonction de sa fréquence f ? (1 pt)
- 2.3. Quel est l'ordre de grandeur de la quantité de mouvement d'un photon de longueur d'onde dans le vide égale à $\lambda_0 = 780$ nm ? (1 pt)
- 2.4. Quelles sont les propriétés de la lumière laser utilisées pour mettre en œuvre cette technique de refroidissement des atomes ? (1 pt)
- 2.5. Sur le schéma de l'article scientifique, quel laser permet de ralentir l'atome ? (1 pt)

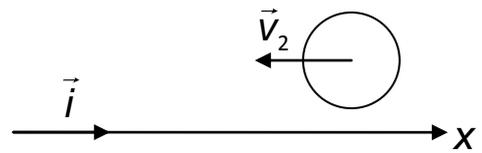
3 . A propos du ralentissement des atomes

- 3.1. Quelle est la valeur de la quantité de mouvement d'un atome de rubidium se déplaçant à la vitesse de valeur 150 m.s⁻¹ ? (1 pt)
- 3.2. On schématise la situation à l'origine du ralentissement des atomes de rubidium la façon suivante :

Avant l'absorption du photon



Après l'absorption du photon



3.2.1. Exprimer la quantité de mouvement \vec{p}_{lum} du photon avant son absorption en fonction de sa longueur d'onde λ , de h et du vecteur unitaire \vec{i} de l'axe Ox. (1 pt)

3.2.2. Exprimer la quantité de mouvement du système { atome de sodium + photon } avant l'absorption, puis après l'absorption du photon. (1 pt)

3.2.3. En supposant le système isolé, exprimer la variation de vitesse $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$ de l'atome de rubidium due à l'absorption du photon en fonction de λ , h , m et \vec{i} . (1 pt)

3.2.4. Montrer que l'atome est effectivement ralenti et préciser la valeur du ralentissement. (1 pt)

3.3. Comment vérifier, en utilisant les relations de l'effet Doppler, si la longueur d'onde de la radiation que doivent émettre les lasers est plus petite ou plus grande que λ_0 ? Est-ce en accord avec les informations du texte? (2 pts)

3.4. En supposant l'atome de rubidium initialement immobile, expliquer pourquoi le document parle « d'effet de recul » de l'atome lors de l'émission d'un photon. (1,5 pts)

4. A propos de l'effet Doppler

Les relations indiquées dans le document 5 sont celles de l'effet Doppler relativiste. Lorsqu'un observateur se rapproche d'une source avec une vitesse de valeur v très faible devant celle de l'onde, l'expression de la fréquence de l'onde lumineuse perçue se simplifie en :

$$f_{perçue} = f_{émise} \times \frac{c+v}{c}$$

4.1. Cette expression simplifiée est-elle homogène? (1 pt)

4.2. Si $v = 150 \text{ m.s}^{-1}$, l'application numérique de l'expression simplifiée conduit-elle à la même fréquence perçue que l'expression correspondante du document 5? (1,5 pts)

5. A propos de la relativité restreinte

Lorsqu'un observateur se rapproche d'une source avec une vitesse de valeur v , la dilatation du temps permet d'écrire que la période de l'onde lumineuse perçue est liée à celle de l'onde émise par :

$$T_{perçue} = T_{émise} \times \gamma \times \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

5.1. Pourquoi ne précise-t-on pas le référentiel lorsqu'on donne la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide? (1 pt)

5.2. Le coefficient gamma s'écrit :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}}$$

Comment la relation entre $T_{perçue}$ et $T_{émise}$ permet-elle de retrouver l'expression correspondante du document 5? (1 pt)

Problème 2 : mise en orbite d'un satellite artificiel par la fusée Ariane 5 (20 pts)

Document 1 : le lanceur européen Ariane 5

Ariane 5 est un lanceur de l'Agence spatiale européenne (ESA), développé pour placer des satellites sur orbite géostationnaire et des charges lourdes en orbite basse. Il fait partie de la famille des lanceurs Ariane et a été développé à compter de 1995 pour remplacer Ariane 4 dont les capacités limitées ne permettaient plus de lancer de manière concurrentielle les satellites de télécommunications de masses importantes.

Le lanceur Ariane 5 est une fusée à trois étages dont la hauteur totale est voisine de 50 m et qui pèse, avec sa charge utile (satellite), 750 tonnes au décollage.

Elle est propulsée par deux dispositifs :

- Les propulseurs d'appoint (EAP) : 480 tonnes de poudre au total (ergol solide) répartis dans les deux étages d'accélération à poudre mis en place dans le bâtiment d'intégration lanceur. Les EAP consomment chacun 2 tonnes de poudre par seconde pendant environ 2 minutes.
- L'étage principal cryogénique (EPC) constitué du moteur Vulcain et de ses réservoirs : 160 tonnes d'ergols liquides (dihydrogène et dioxygène), refroidis respectivement à -253 °C et -183 °C . Cet étage est mis à feu dès le décollage et fonctionne en tout durant neuf minutes

L'intensité de la force de poussée totale \vec{F} de ces dispositifs de propulsion est considérée comme constante pendant leur fonctionnement.

Elle a pour valeur $F = 11470\text{ kN}$.

Ce lanceur peut mettre en orbite circulaire basse deux satellites pour une charge totale allant jusqu'à 20 tonnes.

D'après www.esa.fr



Le lanceur Ariane 5

Document 2 : poussée d'un moteur-fusée

La force de poussée d'un moteur-fusée s'écrit :

$$\vec{F} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \vec{V}_e$$

\vec{V}_e est la vitesse d'éjection des gaz issus de la combustion des ergols et $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ est la variation de masse de la fusée par unité de temps et caractérise la consommation des moteurs.

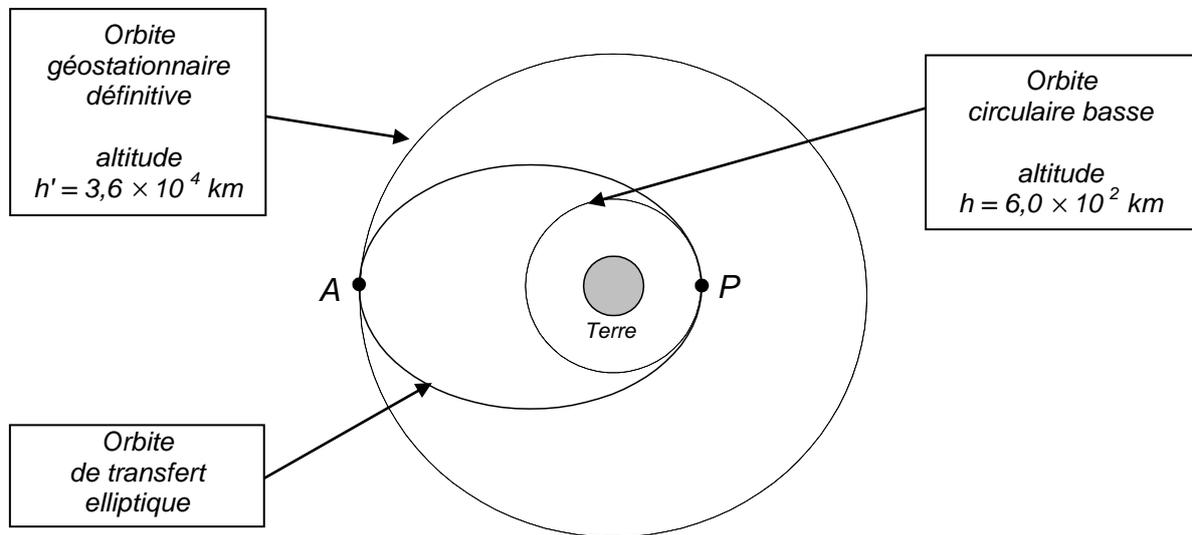
Document 3 : satellite géostationnaire TerreStar-1

Ariane 5 est souvent utilisé pour lancer des satellites de télécommunications lourds : le record est détenu par le satellite TerreStar-1 (6,9 tonnes) lancé le 1er juillet 2009.

En plus de la caractéristique de l'orbite géosynchrone qui fait qu'un corps se trouvant sur cette orbite possède une période de révolution très exactement égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même (23 heures 56 minutes et 4,1 secondes), l'orbite géostationnaire s'inscrit dans le plan équatorial de la Terre. Cette propriété supplémentaire fait que tout corps en orbite géostationnaire paraît immobile par rapport à tout point de la Terre.

Document 4 : orbite de transfert géostationnaire

Une fois le satellite placé sur son orbite circulaire basse par le lanceur, on le fait passer sur une orbite géostationnaire à l'altitude $h' = 3,6 \times 10^4\text{ km}$. Ce transit s'opère sur une orbite de transfert qui est elliptique. Le schéma de principe est représenté sur la figure suivante.



Le périgée P est sur l'orbite circulaire basse et l'apogée A est sur l'orbite définitive géostationnaire.

À un moment convenu, lorsque le satellite est au point P de son orbite circulaire basse, on augmente sa vitesse de façon bien précise : il décrit ainsi une orbite elliptique de transfert afin que l'apogée A de l'ellipse soit sur l'orbite géostationnaire définitive.

1. L'ascension de la fusée Ariane

Le champ de pesanteur \vec{g} est supposé uniforme : son intensité est $g_0 = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.

On choisit un axe Oz vertical dirigé vers le haut.

On étudie le mouvement de la fusée dans le référentiel terrestre qu'on suppose galiléen.

1.1. Représenter clairement, sur un schéma, en les nommant, les deux forces qui agissent sur la fusée Ariane lorsqu'elle s'élève verticalement. On néglige les frottements et la poussée d'Archimède dans l'air. **(1 pt)**

1.2. A un instant quelconque, la masse de la fusée est notée m . Montrer que l'accélération de la fusée s'écrit :

$$a = \frac{F}{m} - g \quad \text{(1 pt)}$$

1.3. On considère d'abord la situation au décollage et on suppose que la masse de la fusée reste constante pendant cette phase du mouvement. La masse de la fusée vaut alors m_1 . L'instant initial est celui de la mise à feu des moteurs. La position du centre de gravité de la fusée est alors $z_0 = 0$ et on suppose que la poussée arrive instantanément à sa valeur F .

1.3.1. Calculer la valeur numérique de l'accélération a_1 à cet instant. **(0,5 pt)**

1.3.2. Etablir l'équation horaire $z(t)$ du mouvement de la fusée en fonction de a_1 . **(2 pts)**

1.3.3. En déduire la distance parcourue par la fusée à l'instant $t_1 = 3,0 \text{ s}$. **(1 pt)**

1.3.4. Quelle est la vitesse atteinte par la fusée à l'instant t_1 ? **(1 pt)**

1.4. On envisage maintenant la situation qui est celle immédiatement avant que tout le carburant ne soit consommé. La masse de la fusée vaut alors m_2 .

1.4.1. Calculer la valeur numérique de m_2 . **(1 pt)**

1.4.2. En déduire l'accélération a_2 à cet instant. **(0,5 pt)**

1.5. Le mouvement d'ascension de la fusée est-il uniformément accéléré ? (1 pt)

1.6. Quel est le signe de la variation de masse $\frac{\Delta m}{\Delta t}$? En déduire le sens de \vec{V}_e . (1 pt)

1.7. A l'aide d'une loi connue qu'on énoncera, expliquer pourquoi l'éjection des gaz propulse la fusée vers le haut. (1 pt)

1.8. Calculer la valeur de \vec{V}_e supposée constante pendant le mouvement de la fusée. (1 pt)

2. Étude du satellite artificiel TerreStar-1 en orbite géostationnaire.

On s'intéresse au mouvement du satellite artificiel TerreStar-1, noté S, en orbite géostationnaire, de masse m_s , en orbite circulaire (rayon r) autour de la Terre de masse $M_T = 5,97 \cdot 10^{24}$ kg, de rayon $R_T = 6371$ km et de centre O. On donne $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ N.kg⁻²m².

On suppose que la Terre est une sphère et qu'elle présente une répartition de masse à symétrie sphérique et que le satellite peut être assimilé à un point.

2.1. Sur les figures 1 à 3, on a représenté plusieurs trajectoires hypothétiques d'un satellite géostationnaire. Montrer qu'une seule de ces figures correspond à un satellite géostationnaire. (1 pt)

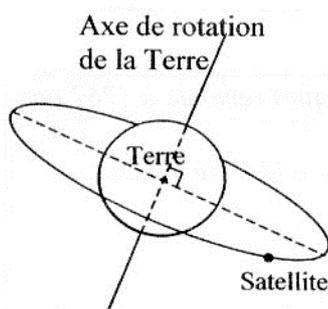


Figure 1

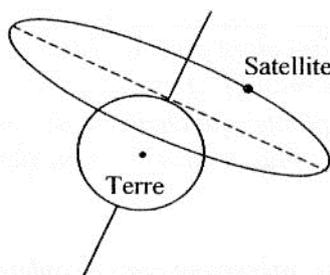


Figure 2

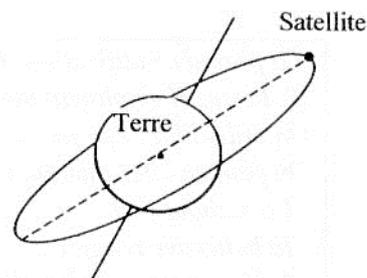


Figure 3

2.2. Préciser les caractéristiques générales du vecteur accélération \vec{a} d'un point animé d'un mouvement circulaire uniforme de rayon r et de vitesse v . (1 pt)

2.3. Appliquer la deuxième loi de NEWTON au satellite en orbite circulaire et exprimer l'accélération du satellite en fonction de G , R_T et h . (1,5 pts)

2.4. En déduire l'expression de la vitesse v_s du satellite en fonction de G , R_T et h . (1,5 pts)

2.5. Calculer v_s . (1 pt)

3. Transfert de l'orbite basse vers l'orbite géostationnaire.

3.1. Comparer les vitesses du Satellite sur son orbite elliptique de transfert en A et en P en précisant le raisonnement. (1 pt)

3.2. A l'aide de la 3^e loi de Kepler, déterminer la période de révolution du satellite sur son orbite circulaire basse. (1 pt)

Problème 3 : les fresques de pompeï (10 pts)



Intérieur de la villa des Mystères à Pompéi

Pompéi est une ville italienne située près de Naples, au pied du Vésuve. Fondée au VI^e siècle av. J.C., elle est célèbre pour avoir été détruite à la suite d'une éruption du Vésuve.

L'éruption créa une gaine protectrice sur le site qui provoqua l'oubli de la ville pendant 1 600 ans. Redécouverte par hasard au XVII^e siècle, la ville fut ainsi retrouvée dans un état de conservation inespéré : les fouilles exécutées à partir du XVIII^e siècle permirent d'exhumer une cité florissante, précieux témoignage de l'urbanisme et de la civilisation de l'Empire romain.

Lorsque l'on se rend à Pompéi, on peut admirer des fresques de l'antiquité. Ces fresques ont un aspect « ciré » ou « laqué ». L'objectif de cette activité est de comprendre l'origine de cet aspect.

Analyse et synthèse de documents

Questions préalables :

- D'après les documents, quels sont les produits susceptibles de donner un aspect ciré ou laqué ?
- Quels renseignements peut-on tirer du spectre IR ?

Synthèse argumentée :

A l'aide de vos connaissances et des documents mis à votre disposition, rédigez en 30 lignes maximum un paragraphe argumenté permettant de répondre à la problématique suivante :

Quel matériau peut donner l'aspect ciré (ou laqué) des fresques de Pompéi ?

Vous exposerez tous les arguments permettant de valider et d'invalidier chacune des hypothèses que vous avez retenues.

Document 1 : Technique de la fresque dite « a fresco »



La fresque est une technique particulière de peinture murale dont la réalisation s'opère sur un enduit appelé *intonaco*, avant qu'il ne soit sec. Le terme vient de l'italien « *a fresco* » qui signifie « dans le frais ».

Le fait de peindre sur un enduit qui n'a pas encore séché permet aux pigments de pénétrer dans la masse, et donc aux couleurs de durer plus longtemps qu'une simple peinture en surface sur un substrat. Son exécution nécessite une grande habileté, et se fait très rapidement, entre la pose de l'enduit et son séchage complet.

L'enduit contient de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cette espèce est susceptible de diffuser à travers les couches supérieures jusqu'à la surface de la fresque.

Document 2 : Effet de l'éruption du Vésuve sur les fresques

En 79 après J.-C., l'éruption du Vésuve a provoqué la destruction de la ville de Pompéi. Les fresques présentes sur certains murs de la ville ont été retrouvées quasiment intactes après cette catastrophe.

On a remarqué que, sur certaines peintures, l'ocre jaune a été transformé en ocre rouge. Cette transformation se produit seulement entre 300°C et 600°C.

Les fresques de Pompéi ont conservé le même aspect ciré malgré l'éruption.



Document 3 : Caractéristiques de la cire d'abeille

La peinture à la cire ou peinture à l'encaustique est une technique de peinture utilisant la cire d'abeille comme liant. Elle confère aux œuvres et aux peintures un aspect ciré.

L'utilisation de la peinture à la cire remonte, pour ce que nous en savons, aux portraits du Fayoum, datés du Ier au Ve siècle en Egypte). Ces œuvres et des peintures, intactes, sur des sarcophages prouvent, par leur persistance, la résistance de ce type de travail au temps.

Caractéristiques de cette cire

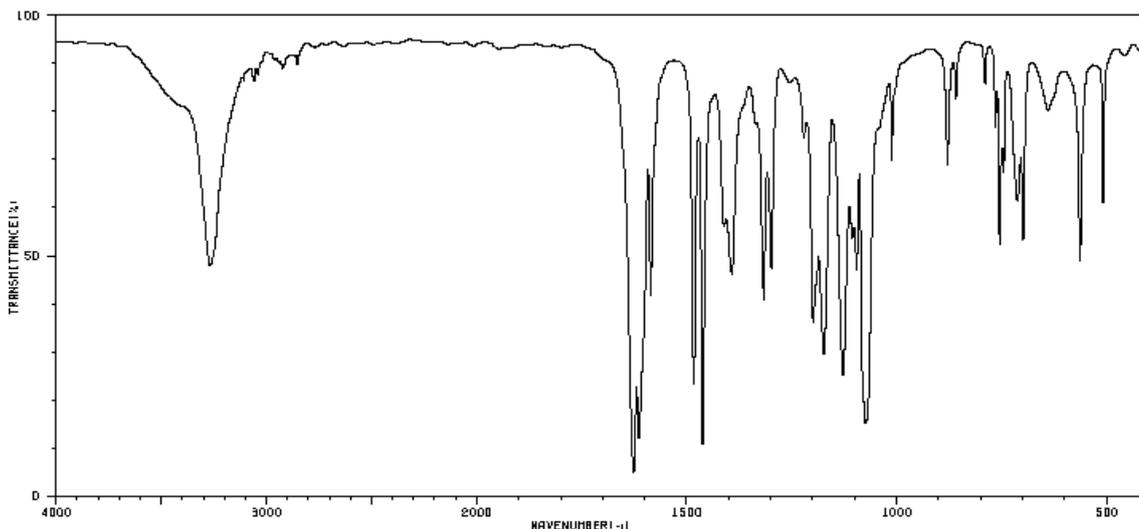
Composition <i>La cire d'abeille contient principalement des esters</i>	Température de fusion <i>Entre 60°C et 65°C</i>
Solubilité <i>La cire est insoluble dans l'eau</i>	Indice de réfraction <i>$n = 1,49$</i>

Document 4 : Table de données pour la spectroscopie infrarouge

Liaison	Nature	Nombre d'onde cm^{-1}	Intensité
O-H alcool libre	élongation	3580-3670	F, large
O-H alcool lié	élongation	3200-3400	F, large
N-H amine	élongation	3100-3500	m
C-H aromatique	élongation	3030-3080	m
C-H	élongation	2800-3000	m
C-H aldéhyde	élongation	2750-2900	F
O-H acide carboxylique	élongation	2500-3200	M
C=C	élongation	2100-2250	F à m; large
C=O (anhydride)	élongation	1700-1840	F ou m
C=O (chlorure d'acyle)	élongation	1770-1820	F ; 2 bandes
C=O (ester)	élongation	1700-1740	F
C=O (aldéhyde et cétone)	élongation	1650-1730	F
		(abaissement de 20 à 30 cm^{-1} si conjugaison)	F
C=O (acide)	élongation	1680-1710	F
C=C	élongation	1625-1685	m
C=C aromatique	élongation	1450-1600	(3 ou 4 bandes)
N=O	élongation	1510-1580 et 1325-1365	F ; 2 bandes
N-H amine ou amide	déformation	1560-1640	F ou m

1. F: fort, m : moyen; f: faible ;

Document 5 : Spectre infrarouge d'un échantillon de la fresque (prélèvement réalisé au XXI^e siècle)



Afin de ne pas détériorer en profondeur les fresques, l'échantillon analysé correspond aux couches superficielles et prend donc en compte uniquement les couches picturales (colorants divers, pigments, liant...) et la couche d'aspect laqué.

Document 6 : Caractéristiques du calcin

On appelle « calcin » le carbonate de calcium de formule CaCO_3 . Sa formation résulte de la réaction entre le dioxyde de carbone CO_2 gazeux et l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 solide selon l'équation de la réaction :

$$\text{Ca(OH)}_{2(s)} + \text{CO}_{2(g)} \rightarrow \text{CaCO}_{3(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$$

Le dépôt d'une couche de calcin sur une surface lui donne un aspect ciré.