

Vers une « Terre extrasolaire »

Le problème comporte 6 parties

Partie 1 Analyse de la composition chimique des météorites.

Partie 2 Décomposition de la lumière des étoiles.

Partie 3 Réalisation d'un spectre à l'aide d'un réseau de diffraction.

Partie 4 Analyse du spectre d'absorption des étoiles.

Partie 5 Etude cinétique de la formation des molécules prébiotiques.

Partie 6 Des planètes habitables ?

- Ces différentes parties abordent des domaines variés de la physique et de la chimie. Elles sont, dans une large mesure, indépendantes.
- La qualité de la rédaction et la propreté de la copie seront prises en compte dans la notation. En particulier la numérotation des questions devra figurer clairement sur la copie et les principaux résultats seront encadrés ou soulignés.
- Les résultats numériques seront présentés avec un nombre de chiffres significatifs raisonnables.

Sommes nous seuls dans l'Univers? Cette question, qui suscite de nombreux débats philosophiques, est source de nombreuses productions littéraires et artistiques. C'est aussi une interrogation qui anime de nombreuses recherches scientifiques. Après avoir longtemps rêvé de découvrir une civilisation avancée sur Mars, notre voisine dans le système solaire, les scientifiques analysent aujourd'hui la composition chimique des météorites qui véhiculent des composés susceptibles d'être à l'origine de la vie sur Terre et tournent leurs télescopes vers de lointaines étoiles espérant trouver dans leur environnement une « Terre » extrasolaire pouvant peut-être abriter la vie.

1 Analyse de la composition chimique des météorites

Certaines météorites sont riches en carbone et contiennent des molécules organiques susceptibles d'avoir joué un rôle dans l'apparition de la vie sur Terre. Les organismes terrestres dépendent d'acides nucléiques (ADN et ARN) qui utilisent des nucléobases dérivées de pyrimidine et de purine nécessaires à l'encodage de l'information génétique. Une extraction d'échantillons de météorites à l'acide méthanoïque a mis en évidence en 2011¹ des nucléobases peu courantes sur Terre et en particulier la 6,8-diaminopurine (**I**). Des échantillons de sols terrestres à proximité du point d'impact de la météorite n'ont pas conduit à la détection de (**I**). Les purines détectées sont probablement issues d'une synthèse dans la météorite même ce qui implique une origine extraterrestre.

Météorite	Présence de la 6,8-diaminopurine
Orgueil	-
Scott Glacier 06043	-
Meteorite Hill 01070	-
GRO 95577	-
Allan Hills 83100	+
Murchison	+
Lewis Cliff 90500	+
LON 94102	+
GRA 95229	+
EET 92042	+
QUE 99177	+
Almahata Sitta # 4	-

Tableau 1 – Présence de la 6,8-diaminopurine (6,8-DAPu)(**I**) dans différentes météorites

Dans cette première partie on s'intéresse à la synthèse de la 6,8-diaminopurine (**I**)² dans le but d'obtenir un échantillon de référence utile lors de l'analyse des extractions des échantillons des météorites.

La 4,5-diamino-6-hydroxypyrimidine (**II**) réagit avec de la thiourée pour donner la 6-hydroxy-8-purinethiol (**III**).

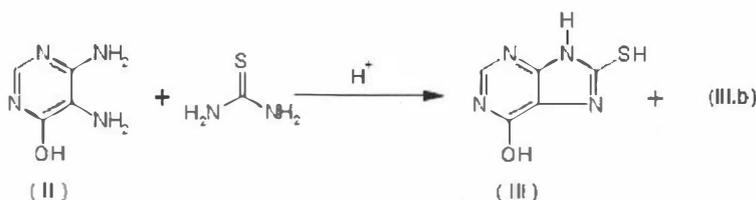


Figure 1 – Réaction de la 4,5-diamino-6-hydroxypyrimidine (**II**) avec la thiourée

1. Compléter l'équation de la réaction en trouvant la structure de (**III.b**) affectée du coefficient stœchiométrique adéquat.

On donne en figure 2 le début du mécanisme de formation de (**III**) à partir de (**II**).

1. M.P. Callahan, K.E. Smith, H.J. Cleaves II, J. Ruzicka, J.C. Stern, D.P. Glavin, C.H. House, J.P. Dworkin « Carbonaceous meteorites contain a wide range of extraterrestrial nucleobases » PNAS **2011**, 108, (34), 13995-13998.

2. R.K. Robins « Potential purine antagonists. 15. Preparation of some 6,8-disubstituted purines » J.Am.Chem.Soc. **1958**, 80, 6671-6679.

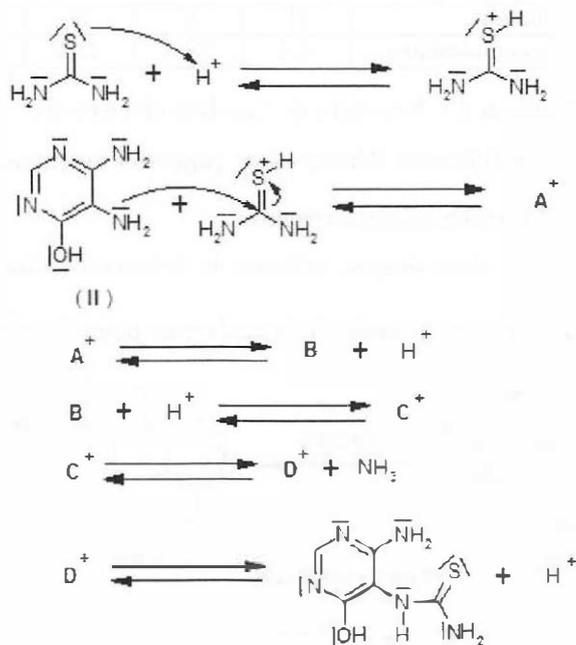


Figure 2 – Premières étapes du mécanisme de formation de (III) à partir de (II)

2. Déterminer les structures de A⁺, B, C⁺ et D⁺.

Un mélange de 6-hydroxy-8-purinethiol (III) et d'eau réagit avec de l'hydroxyde de potassium KOH en présence de glace de façon à maintenir le milieu réactionnel à 20°C. De l'iodométhane CH₃I est ensuite ajouté puis le mélange est agité énergiquement pendant 30 minutes jusqu'à ce qu'une seule phase subsiste. La solution est alors portée à ébullition, acidifiée avec de l'acide acétique et filtrée à chaud. Après lavage et séchage à 120°C le produit obtenu est un composé blanc de 6-hydroxy-8-méthylthiopurine (IV).

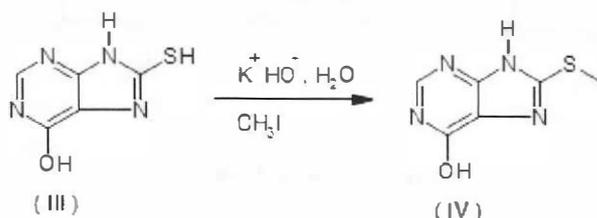


Figure 3 – Action de l'hydroxyde de potassium sur (III)

(IV) réagit ensuite avec POCl₃ pour donner (V), qui, chauffé en présence de NH₃, conduit à la 6,8-diaminopurine (I), produit qui doit être purifié et recristallisé.

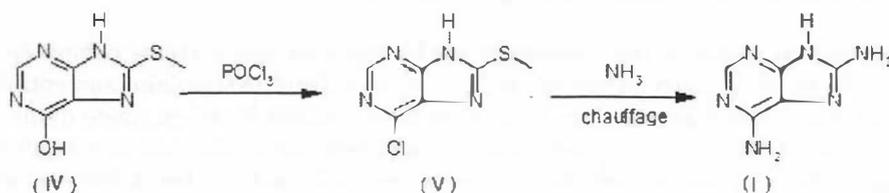


Figure 4 – Obtention de la 6,8-diaminopurine (I)

Le composé que l'on souhaite récupérer à l'issue de la recristallisation a pour formule chimique C₅H₆N₆·HCl·H₂O. L'échantillon obtenu est ensuite caractérisé par une analyse élémentaire dont les résultats sont précisés dans le tableau 2.

Elément	H	C	N	Cl
Pourcentage massique	4,4	29,3	41,1	17,4

Tableau 2 – Résultats de l'analyse élémentaire

Les masses molaires atomiques des différents éléments sont rappelées en Annexe III.

3. L'échantillon analysé est-il pur? Justifier quantitativement.

Une autre méthode de synthèse en deux étapes, utilisant la 8-bromo-adenine (VI), est aussi décrite pour la synthèse de (I)³.

Dans la première étape (VI) réagit avec un excès de benzylamine pour donner (VII).

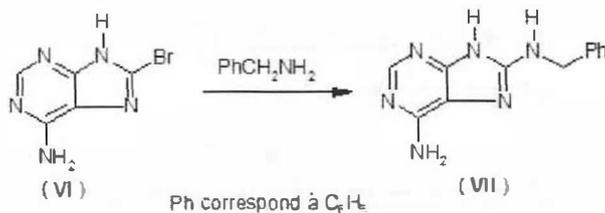


Figure 5 – Première étape

4. Proposer un mécanisme de type addition - élimination pour cette réaction.

5. Décrire le montage expérimental nécessaire à cette première étape sachant que le passage de (VI) à (VII) nécessite un chauffage à 150°C sous agitation pendant 2 heures.

Dans la seconde étape (VII) est dissous dans de l'ammoniac liquide et des petits morceaux de sodium solide sont ajoutés pendant trois heures sous vive agitation.

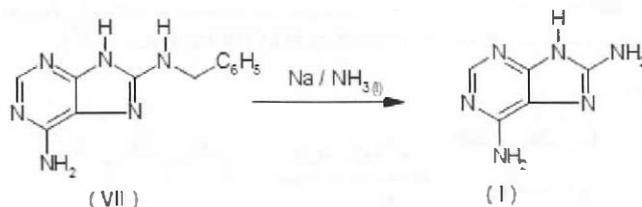


Figure 6 – Seconde étape

6. Quelles sont les précautions expérimentales particulières à prendre lors de cette seconde étape?

7. Sachant qu'il se forme également du toluène (C₆H₅CH₃), écrire l'équation de la réaction de passage de (VII) à (I). Montrer qu'elle constitue une réduction de (VII).

2 Décomposition de la lumière des étoiles

L'analyse de la composition chimique des météorites semble indiquer que certains composés nécessaires à la vie peuvent se trouver en dehors de la Terre. L'espoir de trouver une Terre extrasolaire susceptible d'abriter une vie similaire à celle que nous connaissons pousse alors les chercheurs à explorer le ciel en quête d'une planète comparable à la notre. Mais détecter un tel astre n'est pas chose facile et les observations directes sont rendues quasi impossibles à cause de la faible luminosité des planètes comparées à celles des étoiles autour desquelles elles gravitent. C'est donc à la lumière des étoiles elles-mêmes que les astrophysiciens s'intéressent dans le but de détecter, de manière indirecte, la présence d'une planète extrasolaire.

L'obtention puis l'analyse quantitative du spectre de la lumière provenant d'étoiles lointaines nécessitent un matériel de pointe. A l'inverse, les premières expériences d'analyse de la lumière solaire ont été réalisées il y a plusieurs siècles avec du matériel rudimentaire, comme l'illustre la figure 7.

3. R.C. Young, M. Jones, K.J. Milliner, K.K. Rana, J.G. Ward « Purine derivatives as competitive inhibitors of human erythrocyte membrane phosphatidylinositol 4-kinase » J. Med. Chem. 1990, 33, 2073-2080.

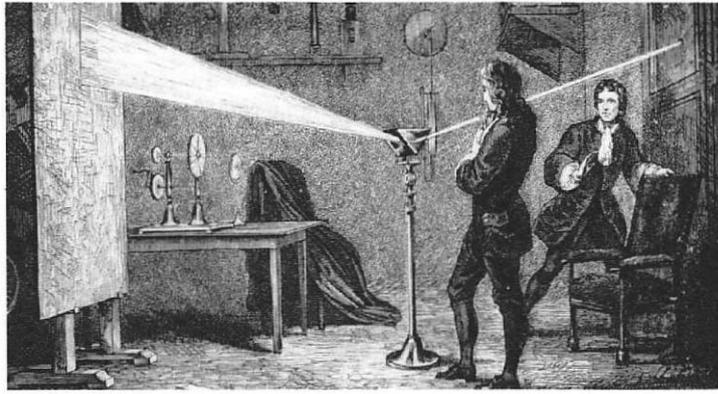


Figure 7 – Gravure datant du XIX^e siècle

8. Que représente cette célèbre gravure?
9. Un professeur souhaite réaliser en classe une expérience de cours pour des élèves de seconde illustrant la décomposition de la lumière blanche.
 - (a) Dresser la liste du matériel nécessaire à cette expérience.
 - (b) Réaliser un schéma légendé du montage. Représenter sur ce schéma le spectre coloré obtenu.
 - (c) Quelles sont les « compétences attendues » figurant au programme de la classe de Seconde qui peuvent être travaillées à l'occasion de cette expérience?
10. La figure 8 ci-après représente un spectre simplifié de la lumière émise par le Soleil.
 - (a) Justifier son allure.
 - (b) A l'aide de l'extrait du programme de la classe de Seconde fourni en Annexe II, de la figure 8 et du tableau 3, proposer une activité réalisable en classe.
 La réponse attendue comportera :
 - la problématique soumise aux élèves,
 - les prérequis (notions et contenus travaillés précédemment),
 - le questionnement accompagnant cette activité,
 - le corrigé rédigé par le professeur au regard des « compétences attendues » qui ont été travaillées dans cette activité.

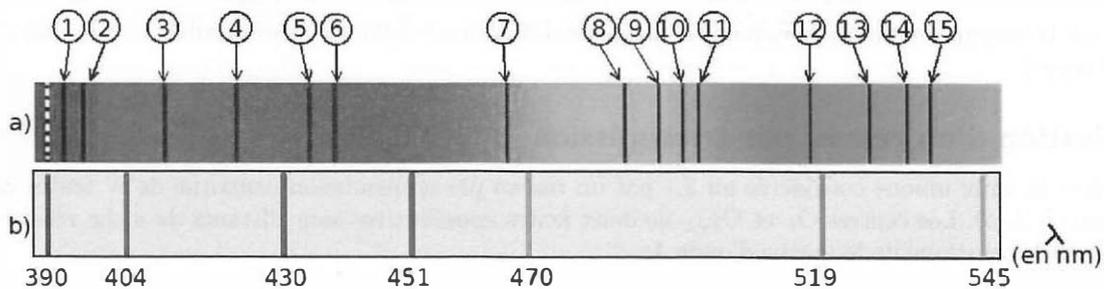


Figure 8 – Spectre simplifié du Soleil (a) et spectre d'émission de l'Argon (b) (D'après manuel scolaire)

H	410	434	486,1	656,3	
Na	589	589,6			
Mg	470,3	516,7			
Ca	422,7	458,2	526,2	527	
Ca ²⁺	393	396,8			
Fe	438,3	489,1	491,9	495,7	532,8
Ti	466,8	469,1	498,2		
Mn	403,6				
Ni	508				

Tableau 3 – Principales longueurs d'onde d'absorption de quelques entités chimiques (en nm) (D'après manuel scolaire)

3 Réalisation d'un spectre à l'aide d'un réseau de diffraction

Les prismes ont été utilisés dans les premiers dispositifs permettant de décomposer une lumière polychromatique. Néanmoins, leur précision étant limitée, ils ont été progressivement remplacés par des systèmes utilisant des réseaux de diffraction.

3.1 Diffraction par une fente

Un faisceau de lumière parallèle monochromatique de longueur d'onde λ et d'intensité I_0 éclaire, sous incidence quelconque (repérée par l'angle i), une fente fine de longueur L et de largeur $b \ll L$. A une distance suffisamment grande pour être considérée comme infinie, on place un détecteur photosensible dans une direction θ . On note $I_d(\theta)$ l'intensité lumineuse diffractée selon (Ox) dans la direction θ .

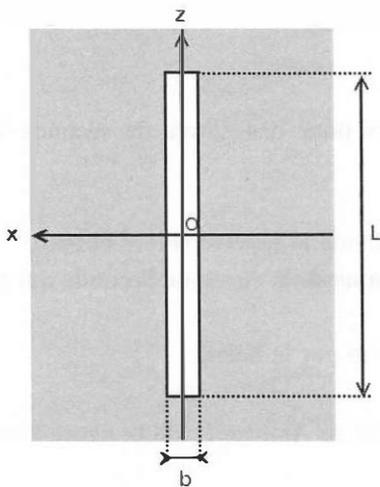


Figure 9 – Géométrie de la fente diffractante

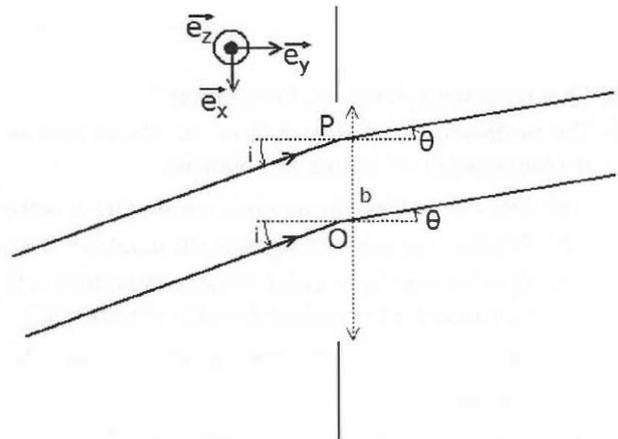


Figure 10 – Faisceau incident et lumière diffractée

11. De quoi dépend l'importance du phénomène de diffraction selon (Ox) ?
12. Justifier pourquoi on ne s'intéresse qu'à la diffraction de la lumière selon (Ox) .
13. Dans quelle direction doit-on placer le détecteur pour obtenir un maximum de luminosité? Justifier sans calcul.
14. Quelle est la largeur angulaire de la tache centrale de diffraction? Cela est-il compatible avec les lois de l'optique géométrique?

3.2 Utilisation d'un réseau par transmission

On remplace la fente unique considérée au 3.1 par un réseau par transmission constitué de N fentes de largeur b (et de longueur $L \gg b$). Les centres O_k et O_{k+1} de deux fentes consécutives sont distants de a . Le réseau est éclairé en lumière monochromatique de longueur d'onde λ .

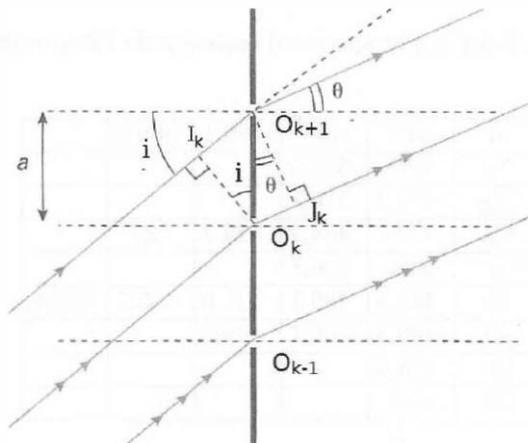


Figure 11 – Modélisation au niveau de deux motifs consécutifs

15. Exprimer la différence de marche δ_{O_{k+1}/O_k} entre deux rayons lumineux parallèles passant respectivement par O_{k+1} et O_k . En déduire le déphasage φ entre les ondes véhiculées par ces deux rayons au niveau du détecteur situé à l'infini dans une direction θ .
16. A quelle condition les ondes interfèrent - elles de façon constructive? En déduire la relation fondamentale des réseaux par transmission.

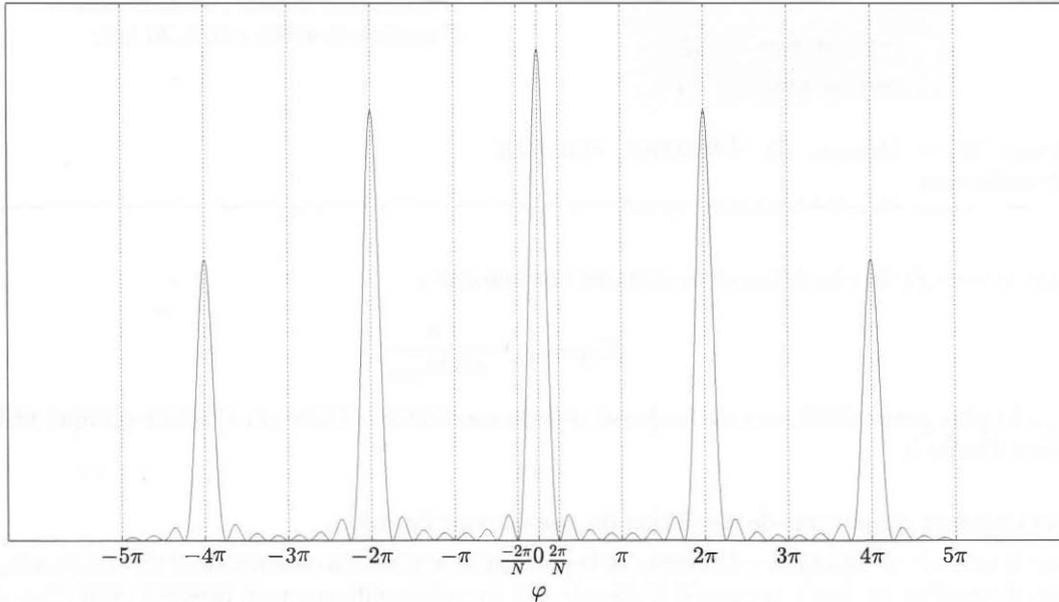


Figure 12 – Intensité de la lumière diffractée (en unité arbitraire) pour $N = 8$

17. Commenter l'allure du graphe (figure 12) qui représente l'intensité de la lumière diffractée en fonction du déphasage φ entre les ondes au niveau du détecteur.

Le réseau est éclairé en incidence normale ($i=0$) par une source de lumière polychromatique. Le pouvoir dispersif du réseau est défini par $\mathcal{D} = \left| \frac{d\theta}{d\lambda} \right|$.

18. Exprimer \mathcal{D} en fonction de θ , a et de l'ordre d'interférence p défini par $\varphi = 2\pi p$.
19. Quel(s) avantage(s) et quel(s) inconvénient(s) présente l'étude de spectres d'ordre d'interférence de plus en plus élevé?
20. Pour un ordre d'interférence donné, exprimer l'écart angulaire $\Delta\theta$ entre deux maxima principaux d'intensité correspondants respectivement à des radiations de longueurs d'onde λ_1 et $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ avec $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} \ll 1$.
21. Montrer que, pour une longueur d'onde donnée, la demi-largeur angulaire d'un pic principal $\delta\theta$ est donnée par

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{aN \cos(\theta)} \quad (1)$$

22. Énoncer le critère de Rayleigh. En déduire une relation entre $\delta\theta$ et $\Delta\theta$.

Un professeur dispose au lycée d'un réseau par transmission dont la fiche technique est donnée ci-après.

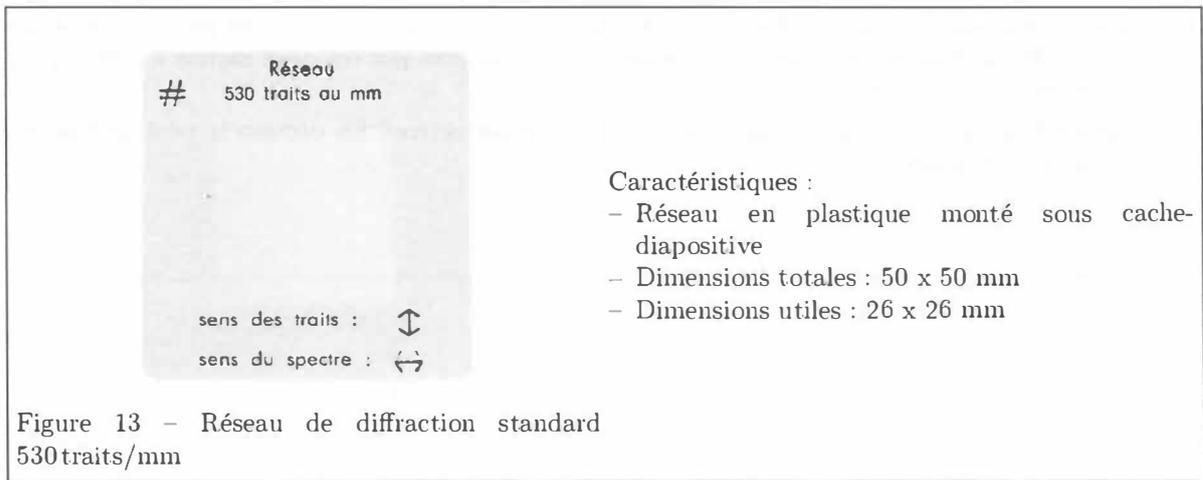


Figure 13 – Réseau de diffraction standard
530 traits/mm

On définit le pouvoir de résolution d'un système optique par :

$$P_{\text{système}} = \frac{\lambda}{(\Delta\lambda)_{\text{min}}}, \quad (2)$$

où $\Delta\lambda_{\text{min}}$ la plus petite différence de longueur d'onde mesurable à l'aide du système optique utilisé autour de la longueur d'onde λ .

23. Etablir l'expression du pouvoir de résolution du réseau pour l'ordre p .
24. Comparer le pouvoir de résolution du réseau et le pouvoir de résolution expérimental du spectrographe ELODIE. Le réseau disponible au lycée permet-il d'obtenir des mesures suffisamment précises pour être utilisé dans le spectrographe ELODIE décrit dans l'Annexe I?

3.3 Le spectrographe de l'observatoire de Haute Provence

La recherche des exoplanètes a connu une évolution décisive au cours des vingt dernières années. Depuis la détection de la première planète extrasolaire par le spectrographe ELODIE, de nombreux projets ont vu le jour permettant d'obtenir des données de plus en plus précises (comme les projets SOPHIE, CORALIE ou HARPS qui fonctionnent tous selon le même principe que le spectrographe ELODIE).

L'étude s'intéresse au réseau blazé qui constitue l'élément dispersif primaire du dispositif ELODIE (élément (2) de la figure 26 de l'Annexe I). Il s'agit d'un réseau utilisé en réflexion dont le motif a un profil en dents de scie (profil triangulaire représenté figure 14). Les faces réfléchissantes font un angle $\alpha = 75^\circ$ avec le plan du réseau, et la distance a entre les centres de deux miroirs consécutifs est $a = \frac{1}{n}$ avec $n = 31 \text{ mm}^{-1}$. Les angles orientés dans le sens \oplus seront comptés positivement (ainsi, selon cette convention $i > 0$ et $\theta < 0$ dans la figure 14).

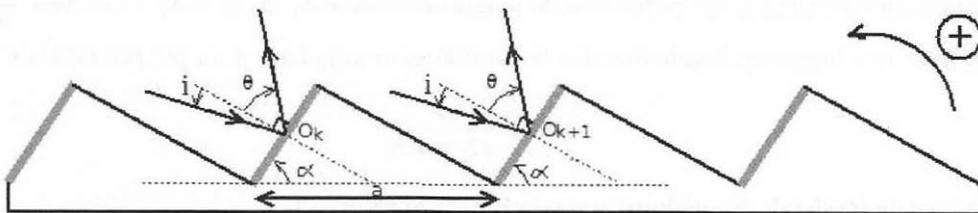


Figure 14 – Schéma du réseau blazé

Les faces réfléchissantes du réseau sont éclairées par une lumière monochromatique de longueur d'onde λ sous une incidence i . La lumière diffractée est analysée par un détecteur placé à l'infini dans la direction θ . On note O_k et O_{k+1} les positions des centres de deux facettes réfléchissantes consécutives.

25. Montrer que la différence de phase entre les ondes véhiculées par deux rayons successifs passant respectivement par O_{k+1} et O_k s'écrit :

$$\varphi = \frac{2\pi a}{\lambda} (\sin(i + \alpha) + \sin(\theta + \alpha)) \quad (3)$$

26. Indiquer la direction dans laquelle le détecteur doit être placé pour une observation optimale.

Dans la suite le réseau est éclairé sous incidence normale ($i = 0$) avec une lumière polychromatique dont le spectre couvre toute l'étendue spectrale du spectrographe.

27. Exprimer p_0 l'ordre en $\theta = 0$ en fonction de a , α et λ . Comparer avec l'ordre en $\theta = 0$ dans le cas du réseau par transmission (3.2)

28. Expliquer l'intérêt d'utiliser un réseau blazé plutôt qu'un réseau par transmission 3.2.

A l'aide des informations fournies dans l'Annexe I

29. Calculer les valeurs de $p_{0,max}$ et $p_{0,min}$ qui peuvent être obtenues avec le spectrographe ELODIE.

Le pouvoir de résolution du réseau s'écrit $\mathcal{P}_{réseau} = pN$ avec p l'ordre d'interférence considéré et N le nombre de motifs du réseau.

30. Estimer puis commenter la valeur de $\mathcal{P}_{réseau} = pN$ pour le réseau blazé utilisé par ELODIE ?

La lumière arrive dans le spectroscopie via la fibre optique qui constitue la pupille d'entrée. La section de sortie de la fibre correspond donc à une source étendue. Le pouvoir de résolution liée à la fibre vaut :

$$\mathcal{P}_{fibre} = 2 \frac{|f'|}{d} \tan \alpha \tag{4}$$

31. Qu'est-ce qui limite la résolution du spectrographe ELODIE ?

4 Analyse du spectre d'absorption des étoiles

Le spectre des étoiles nous fournit de nombreux renseignements sur leur composition chimique, leur température ou encore leur mouvement par rapport à la Terre. Cette partie traite d'une technique de détection des exoplanètes basée sur la modification du spectre des étoiles par effet Doppler - Fizeau.

4.1 Effet Doppler

Un émetteur d'onde sinusoïdale (sonore ou lumineuse) se déplace selon un axe (Ox) à une vitesse $\vec{v}_{em} = v_{em} \vec{e}_x$ par rapport à un récepteur fixe situé au point O d'un référentiel \mathcal{R}_0 . L'émetteur émet une onde de fréquence f_{em} qui se propage avec une célérité $v_{onde} \gg |v_{em}|$.

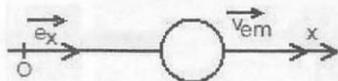


Figure 15 – Déplacement de l'émetteur dans le référentiel \mathcal{R}_0

32. Soit f_0 la fréquence de l'onde perçue par le récepteur placé en O dans \mathcal{R}_0 . Etablir, par une méthode de votre choix, l'expression

$$\frac{f_{em} - f_0}{f_{em}} = \frac{v_{em}}{v_{onde}} \tag{5}$$

Un professeur souhaite faire travailler des élèves de Terminale S sur les compétences du programme associées à l'effet Doppler. Pour cela il réalise un dispositif expérimental constitué :

- d'un petit buzzer émettant une onde sonore monochromatique de fréquence 4 kHz (dans son référentiel);
- d'une potence à laquelle est fixée une tige horizontale immobile;
- d'un fil dont l'une des extrémités est reliée au buzzer et l'autre extrémité à la tige horizontale (le dispositif réalisé peut alors osciller à la manière d'un pendule simple);
- d'un micro posé sur la table et relié à une carte d'acquisition.

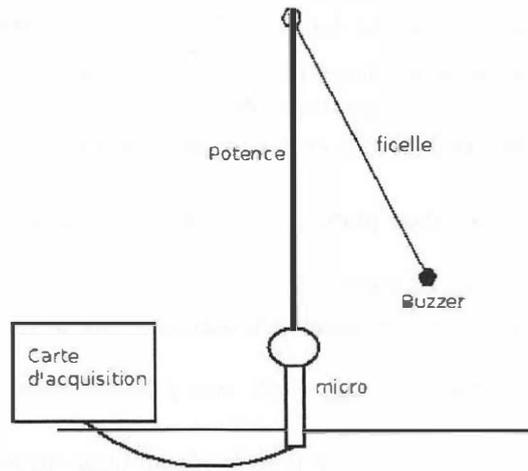


Figure 16 – Schema du dispositif

Lors de la préparation de cette expérience, le professeur réalise une vidéo du mouvement puis une acquisition, par pointage, des positions successives du buzzer initialement lâché avec un angle d'environ 45°. La figure 17 correspond aux résultats de cette acquisition.



Figure 17 – Positions successives du buzzer

33. En utilisant les résultats de l'acquisition décrite ci-dessus, estimer la valeur maximale du décalage en fréquence dû à l'effet Doppler. Comment détecter ce décalage en fréquence ?
34. Imaginer une contextualisation de la séance de travaux pratiques.

4.2 Analyse du mouvement d'un système à deux corps

Un système mécaniquement isolé est constitué d'une planète assimilée à un point matériel P de masse m_P en orbite autour d'une étoile assimilée à un point matériel E de masse m_E . Un observateur, situé au point O d'un référentiel \mathcal{R}_0 supposé galiléen, étudie le mouvement dans \mathcal{R}_0 de la planète autour de l'étoile avec :

$$\overrightarrow{OE} = \overrightarrow{r_E}; \overrightarrow{OP} = \overrightarrow{r_P} \quad \overrightarrow{v_E} = \frac{d\overrightarrow{r_E}}{dt}; \overrightarrow{v_P} = \frac{d\overrightarrow{r_P}}{dt} \quad \overrightarrow{r} = \overrightarrow{EP}; \overrightarrow{v} = \frac{d\overrightarrow{r}}{dt}$$

35. Exprimer $\frac{d\vec{v}}{dt}$ en fonction de G , m_P , m_E et \vec{r} .

36. On note G le centre de masse du système {étoile-planète}. Définir le référentiel du centre de masse \mathcal{R}^* et montrer qu'il est galiléen.

37. Dans le référentiel du centre de masse \mathcal{R}^* , la position de l'étoile est repérée par $\vec{r}_E^* = \vec{GE}$ et la position de la planète est repérée par $\vec{r}_P^* = \vec{GP}$. Montrer que

$$m_E r_E^* = m_P r_P^*, \quad (6)$$

avec $r_E^* = \|\vec{r}_E^*\|$ et $r_P^* = \|\vec{r}_P^*\|$.

38. Montrer que le mouvement relatif de P par rapport à E dans \mathcal{R}_O s'identifie au mouvement dans \mathcal{R}^* d'un point matériel fictif M de masse $\mu = \frac{m_E m_P}{m_E + m_P}$ soumis à une force gravitationnelle $\vec{F}(r) = -G \frac{m_P m_E}{r^3} \vec{r}$. Représenter sur un schéma les positions E , P , G et M .

39. Décrire le mouvement de l'étoile dans \mathcal{R}^* .

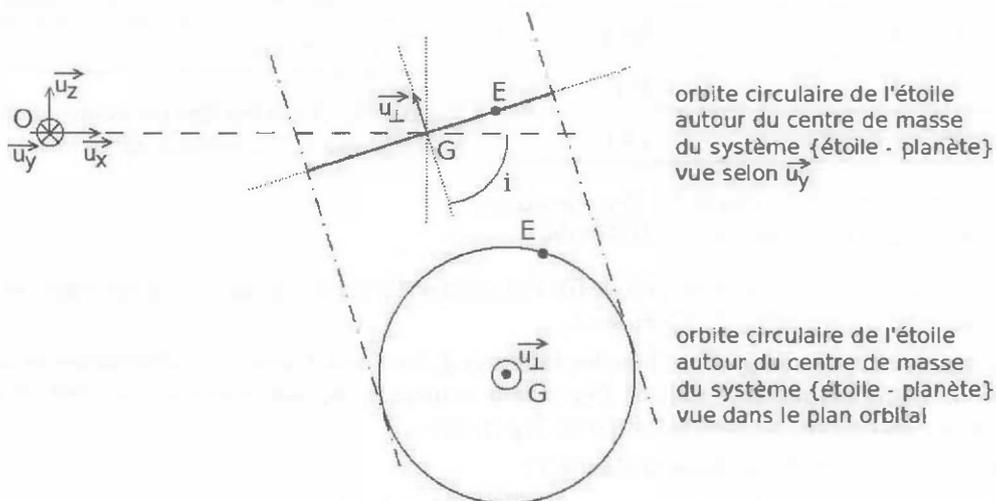
40. La planète possède une orbite circulaire autour de l'étoile. Montrer que sa période orbitale est :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{G(m_E + m_P)}} \quad (7)$$

41. Commenter le résultat obtenu lorsque l'étoile est beaucoup plus massive que la planète.

4.3 Détection de la première planète extrasolaire par la méthode des vitesses radiales

On considère à nouveau le système {étoile-planète} décrit dans la partie 4.2. L'étoile est en orbite circulaire de période T autour du centre de masse G du système et possède une vitesse \vec{v}_E^* dans le référentiel du centre de masse \mathcal{R}^* . \mathcal{R}_0 est le référentiel géocentrique supposé galiléen, et O la position du centre de la Terre. Un observateur situé en un point T à la surface de la Terre étudie la lumière de l'étoile. On note $\vec{v}_{E/T}$ la vitesse de l'étoile par rapport à l'observateur terrestre.



Une fréquence du spectre de l'étoile de valeur f_E dans le référentiel de l'étoile, est perçue avec une valeur f_T à la surface de la Terre.

42. La « vitesse radiale » notée v_r est la composante selon \vec{u}_x de \vec{v}_E^* . Montrer que $v_r(t)$ est de la forme :

$$v_r(t) = V_0 \cos(\phi(t)), \quad (8)$$

avec $V_0 = v_E^* \sin(i)$ et $\phi(t) = \omega t + \phi_0$.

43. Dans les spectres de la lumière de l'étoile obtenus au cours du temps, quelle information est à l'origine de la détermination de $v_r(t)$?

La toute première découverte, faite par la méthode des vitesses radiales, a été annoncée le 6 octobre 1995 dans la revue *Nature* par Michel Mayor et Didier Queloz de l'observatoire de Genève, d'après des observations qu'ils ont réalisées à l'observatoire de Haute-Provence entre septembre 1994 et septembre 1995. La planète 51 Peg b, orbite autour de l'étoile 51 Peg et se situe à environ 50,9 années-lumière de la Terre.

44. Le graphe expérimental de $v_r(t)$ (figure 19) a été obtenu suite à diverses corrections.
Citer quelques corrections à effectuer pour obtenir le graphe de la figure 19.

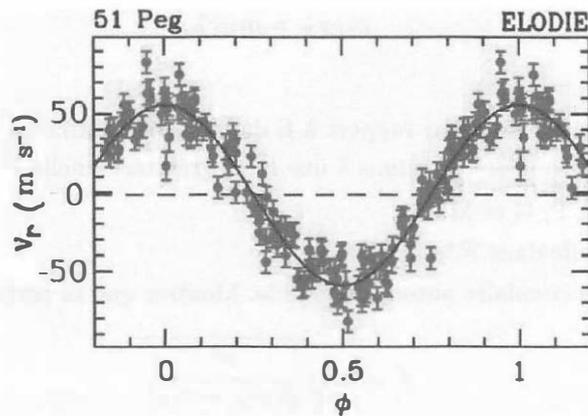


Figure 19 – Vitesse radiale de l'étoile 51 Peg en fonction de la phase orbitale (D'après image Observatoire de Genève)⁴

Etoile	51 Peg
Distance à la Terre	14,7 parsec
Type spectral	G2.5V
Masse	1,06 M_{\odot}
Température de surface	5793 K
Rayon	1,25 R_{\odot}
Magnitude apparente	5,49

Tableau 4 – Carte d'identité de l'étoile 51 Peg (données :
The Extrasolar Planet Encyclopaedia & Wikipedia)

Amplitude de vitesse radiale	$V_0 = 57,3 \text{ m/s}$
Période	$T = 4,23077 \text{ jours}$
Excentricité	$e = 0$

Tableau 5 – Modélisation du mouvement de 51 Peg dans \mathcal{R}^* (Données Observatoire de Genève)

45. Quelle est la nature du mouvement de l'étoile 51 Peg autour du centre de masse du système {étoile-planète} ? En déduire une relation entre V_0 , T , r_E^* et $\sin i$.
46. A l'aide des données à votre disposition dans les tableaux 4, 5 et de l'Annexe III, déterminer le rayon de l'orbite de la planète 51 Peg b autour de l'étoile 51 Peg puis la « masse minimale » $m_P \sin i$ de cette planète. Afin de simplifier les calculs, on pourra supposer $m_E \gg m_P$.
47. L'hypothèse $m_E \gg m_P$ est-elle justifiée si $\sin i \approx 1$?
48. Pourquoi dit-on que la planète 51 Peg b est un « Jupiter chaud » ?
49. A l'aide de la figure 19, estimer la plus petite variation de vitesse radiale détectable par le spectrographe ELODIE.
50. Pourrait-on détecter un système {Terre-Soleil} avec cet appareil ?

4.4 Etude du système planétaire de HD134987

Au début du XXI^e siècle, de nombreuses exoplanètes ont été détectées par la méthode des vitesses radiales. Ainsi dès 1999 une planète HD134987b orbitant autour de l'étoile HD134987 avait été identifiée. Cependant l'observation prolongée d'étoiles bien connues et l'amélioration des techniques ont permis d'affiner les observations⁵.

4. M. Mayor & D. Queloz, « A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star » *Nature*, **1995**, 378, 355

5. Jones, Hugh R.A. et al. « A long-period planet orbiting a nearby Sun-like star », **2009**, arXiv :0912.2716

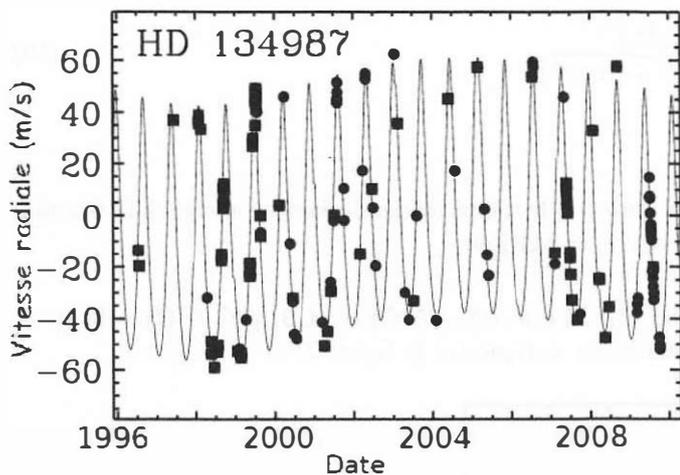


Figure 20 – Vitesse radiale de HD134987 de 1996 à 2010

Etoile	HD134987
Distance à la Terre	22,2 parsec
Type spectral	G5V
Masse	1,07 M_{\odot}
Température de surface	5740 K
Rayon	1,25 R_{\odot}
Magnitude apparente	6,45

Tableau 6 – Carte d'identité de HD134987 (données : *The Extrasolar Planet Encyclopaedia*)

51. Montrer que plusieurs planètes orbitent autour de l'étoile HD134987. Estimer leurs périodes orbitales. Calculer le rayon orbital et la masse minimale de celle qui est la plus proche de l'étoile.

Pour cette question, faisant appel à une démarche de résolution de problème, vous pourrez vous appuyer sur les informations et documents proposés ci-dessus, et sur vos connaissances.

Il vous appartient de modéliser la situation physique envisagée et de mettre cette situation en équation.

Il est par exemple attendu que :

- vous représentiez par un ou plusieurs schémas la situation physique envisagée ;
 - vous choisissiez les notations que vous utilisez en attribuant un nom à chacune des grandeurs physiques que vous êtes amené à introduire ;
 - que vous précisiez les lois physiques que vous appliquez et les différentes hypothèses et approximations que vous utilisez ;
 - que les éventuels calculs soient menés sous forme littérale, avec pour objectif d'obtenir une valeur numérique.
- Les éléments de réponse à cette question seront très significativement valorisés lors de l'évaluation des résultats.*

5 Etude cinétique de la formation de molécules prébiotiques

Il n'est pas scientifiquement prouvé que la présence d'eau soit indispensable à l'apparition de la vie. Sa présence constituerait néanmoins un facteur favorable car l'eau est un excellent solvant pour de nombreuses substances et permet aussi une grande variété de réactions chimiques susceptibles d'être à l'origine de la vie sur Terre.

La chimie prébiotique correspond à l'étude de l'apparition de la vie du point de vue de la chimie. Il a été montré que des solutions aqueuses concentrées d'acide cyanhydrique HCN conduisent par polymérisation à la production d'acides ou de bases nucléiques ainsi qu'à des acides aminés alors que dans des solutions diluées c'est l'hydrolyse de HCN qui prédomine pour donner en particulier de l'acide méthanoïque. Avec des pH compris entre 8 et 9 et des températures comprises entre 0 et 60 °C, les deux réactions sont d'égale importance pour des concentrations en HCN comprises entre 0,01 mol · L⁻¹ et 0,1 mol · L⁻¹. Les concentrations en HCN dans les océans primitifs ne sont pas estimées à des valeurs aussi élevées mais une hypothèse de travail⁶ suggérerait que dans l'eau à 0 °C, une polymérisation efficace pourrait être obtenue même à partir de solutions en HCN très diluées.

Dans cette partie on s'intéresse à la cinétique d'hydrolyse de l'acide cyanhydrique HCN.

Une étude a proposé que le mécanisme de cette hydrolyse est une réaction directe entre l'acide cyanhydrique et l'ion hydroxyde de constante de vitesse k_2 , et d'énergie d'activation $E_a = 7,5 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$. Ce modèle conduit à une évolution du premier ordre de la concentration totale en cyanure $[\text{CN}_{\text{total}}]$ ($[\text{CN}_{\text{total}}] = [\text{HCN}] + [\text{CN}^-]$) selon une relation du type :

$$-\frac{d[\text{CN}_{\text{total}}]}{dt} = k_1[\text{CN}_{\text{total}}] = k_2[\text{HCN}][\text{HO}^-] \quad (9)$$

6. R.A. Sanchez, J.P. Ferris, L.E. Orgel « Studies in prebiotic synthesis. II. Synthesis of purine precursors and amino acids from aqueous hydrogen cyanide » *J. Mol. Biol.* 1967, 30, 223-253.

52. Montrer que la constante de vitesse k_1 peut être exprimée par la relation :

$$k_1 = \frac{k_2 K_e C^{\circ 2}}{K_a C^{\circ} + [\text{H}_3\text{O}^+]} \quad (10)$$

avec $K_e = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{HO}^-]}{C^{\circ 2}}$ et $K_A = \frac{[\text{CN}^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{HCN}]C^{\circ}}$.

La valeur de k_1 a été mesurée à 100 °C et pH = 10,0. On note $t_{1/2}$ le temps de demi-réaction associé à la réaction de constante de vitesse k_1 . On trouve $k_1 = 2,47 \text{ jour}^{-1}$ et $t_{1/2} = 0,28 \text{ jour}$.

On donne :

La concentration standard $C^{\circ} = 1,00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{p}K_e(100^{\circ}\text{C}) = 11,9$; $\text{p}K_e(25^{\circ}\text{C}) = 14,0$; $\text{p}K_e(0^{\circ}\text{C}) = 14,9$.
Le $\text{p}K_a$ du couple HCN/CN^- varie avec la température comme indiqué sur la figure 21 :

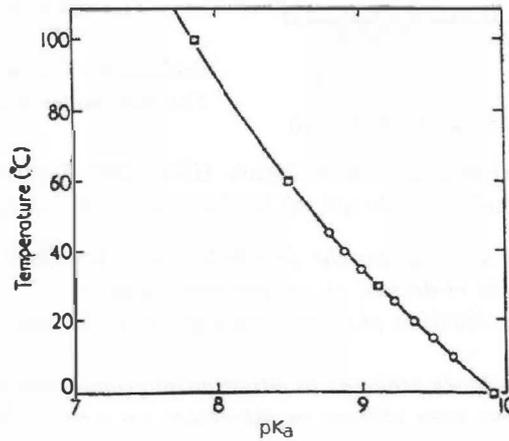


Figure 21 – Relation entre le $\text{p}K_a$ du couple HCN/CN^- et la température

53. Sachant que la valeur de k_2 ne dépend que de la température, calculer la valeur de k_2 à 100 °C. Déterminer la valeur de k_1 à 100 °C pour un pH de 8,0.
54. Donner la relation entre k_1 et $t_{1/2}$. En déduire le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ à pH = 8,0
55. Sachant que $E_a = 7,5 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, calculer la valeur de k_2 à 0 °C.
56. En déduire la valeur de k_1 à 0 °C et pH = 10,0 ainsi que $t_{1/2}$ dans les mêmes conditions.

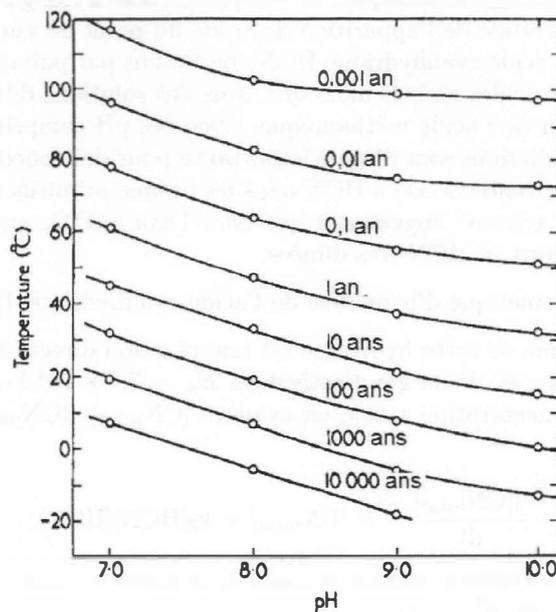


Figure 22 – Réseau de courbes liant $t_{1/2}$, la température et le pH

57. En utilisant la figure 22, estimer graphiquement le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ à 0°C pour $\text{pH} = 8,0$.
58. Indiquer de même :
- l'influence du pH à température constante,
 - l'influence de la température à pH constant,
- sur la vitesse de la réaction d'hydrolyse de HCN .
59. A partir de l'expression de k_1 (relation 10) justifier l'influence du pH sur la vitesse d'hydrolyse de HCN à température constante.
60. Commenter la phrase « Une hypothèse de travail suggérerait que dans l'eau à 0°C , une polymérisation efficace pourrait être obtenue même à partir de solutions en HCN très diluées. »

6 Des planètes habitables ?

Ces dernières années, les observations d'exoplanètes se sont multipliées. Des systèmes planétaires de plus en plus complexes ont été découverts ranimant la quête d'une planète pouvant abriter la vie.

La figure 23 repère une zone de l'espace entourant chaque étoile appelée « zone habitable ». Cette portion d'espace correspond à la zone d'un système planétaire où la température à la surface des planètes y orbitant permettrait l'existence d'eau liquide. La présence d'une planète dans la zone habitable dépend de sa distance par rapport à son étoile et de la masse de celle-ci.

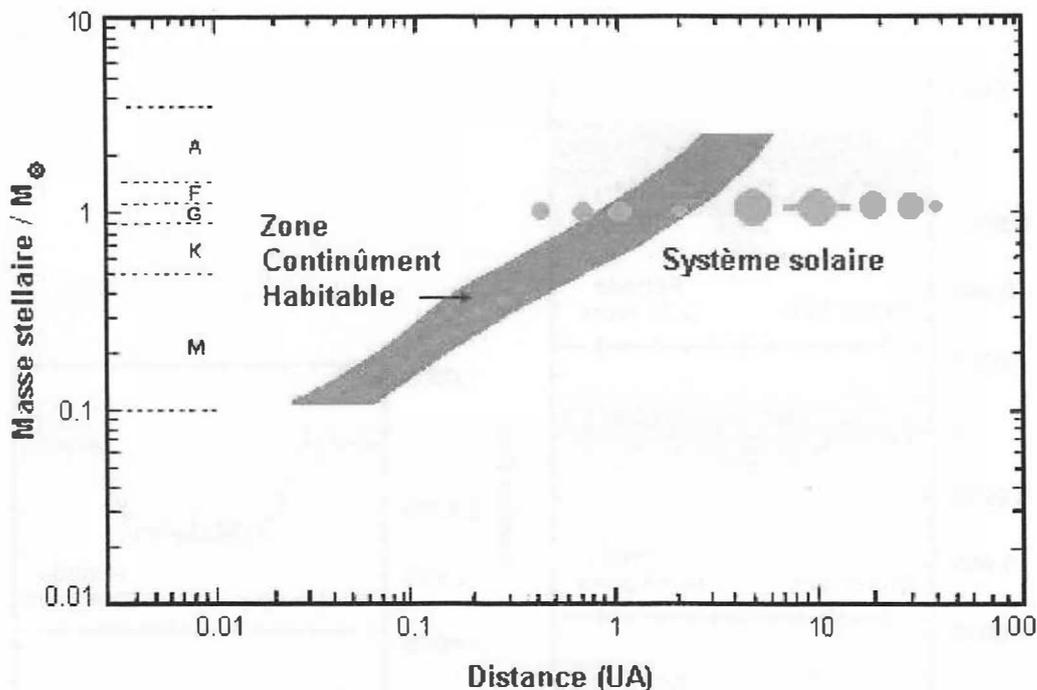
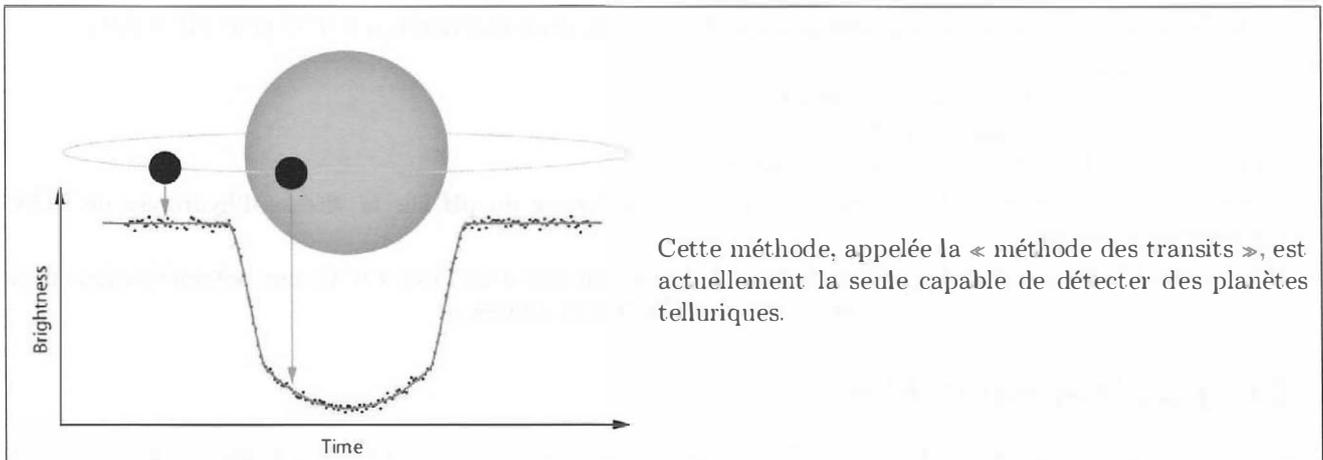


Figure 23 – Limite de la « zone habitable »

Lorsque l'inclinaison de l'orbite de la planète par rapport à l'observateur est proche de 90 degrés, le système est vu presque parfaitement par la tranche. Ainsi, la planète va passer devant son étoile et va faire baisser très légèrement sa luminosité. On parle alors de transit planétaire.

La méthode des transits consiste dans un premier temps à faire des observations répétées du maximum d'étoiles dans le ciel, pendant des années. Avec une efficacité qui dépend principalement du nombre d'observations, de leur précision et du nombre (inconnu) de planètes avec la bonne inclinaison et distance par rapport à leur étoile, il est possible de détecter des transits planétaires. Après une détection d'un tel transit, l'étoile est ensuite observée individuellement de nombreuses fois pour confirmer le transit. En effet, si celui-ci est bien réel, il doit se répéter. Si c'est le cas, l'étude de ce transit fournit de nombreuses informations.

Document Wikipédia



Cette méthode, appelée la « méthode des transits », est actuellement la seule capable de détecter des planètes telluriques.

Figure 24 – Luminosité d'une étoile durant un transit planétaire (*Document obspm*)

Des relevés photométriques effectués par le satellite spatial Kepler ont permis de détecter des baisses périodiques de luminosité de l'étoile alors baptisée Kepler 62. Ces données photométriques ont été traitées afin d'isoler chacune des baisses enregistrées. Les baisses de flux lumineux sont représentées dans la figure 25.

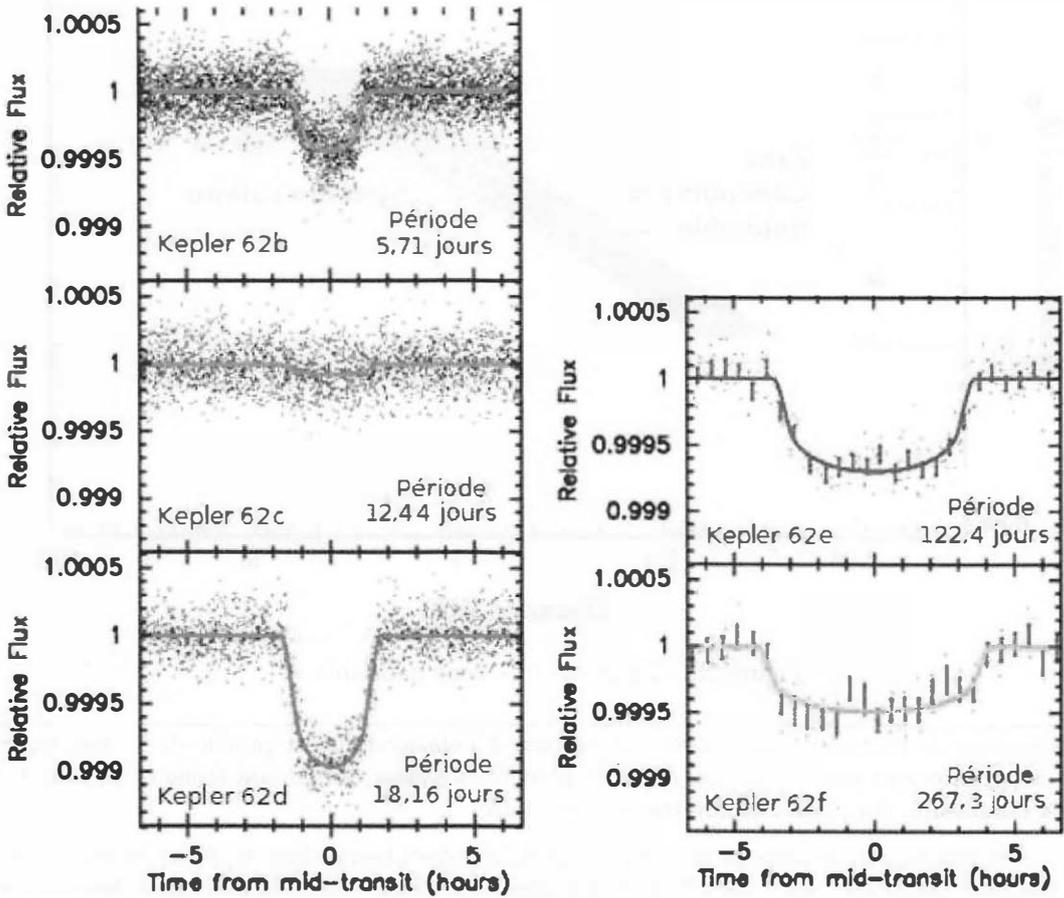


Figure 25 – Transits des planètes de Kepler 62 (*données NASA*)

Etoile	Kepler 62
Distance à la Terre	1200 al
Type spectral	K2V
Masse	0,69M _☉
Température de surface	4925 K
Rayon	0,64 R _☉
Magnitude apparente	13,75

Tableau 7 – Carte d'identité de Kepler 62 (*Données Wikipedia*)

61. Identifier, parmi les planètes en orbite autour de Kepler 62, une candidate au développement de la vie sous une forme similaire à celle présente sur Terre.

Cette identification devra s'appuyer sur l'estimation de valeurs numériques de grandeurs physiques.

Pour cette question, faisant appel à une démarche de résolution de problème, vous pourrez vous appuyer sur les informations et documents proposés ci-dessus, et sur vos connaissances. Les éléments de réponse à cette question seront très significativement valorisés lors de l'évaluation des résultats.

FIN DE L'ÉPREUVE

Annexe I Principe et caractéristiques techniques du spectrographe de l'Observatoire de Haute Provence spécialisé dans la détection des exoplanètes.⁷

Sur la figure 26, la lumière de l'étoile arrive via une fibre optique dans le spectrographe. Le faisceau de lumière divergent est alors réfléchi par le miroir parabolique (1) qui en donne un faisceau parallèle. Ce faisceau est réfléchi et dispersé par le réseau blazé (2), qui renvoie sur le miroir le spectre avec recouvrement des ordres. Ce spectre va devoir être dispersé orthogonalement : pour cela, le faisceau est réfléchi par un petit miroir plan (3) qui le redirige vers le miroir parabolique qui en donne à nouveau un faisceau parallèle dirigé cette fois vers le pré-disperseur (cross-disperser) modélisé par un second réseau (4). Ainsi, les ordres du spectre, qui étaient jusqu'alors superposés, se voient dispersés dans la direction perpendiculaire à leur dispersion initiale. Après passage dans un train de lentille (5) donnant un faisceau convergent, le spectre échelle se forme sur le capteur CCD (6).

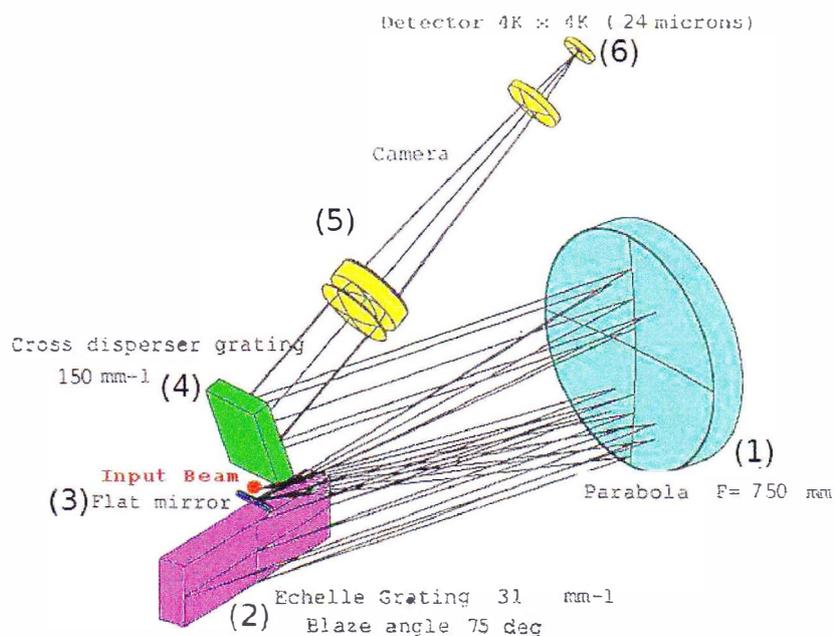


Figure 26 – Constitution du spectrographe (*image obspm*)

Champ de vue	1 arcsec
Etendue spectrale	390 – 690 nm
Pouvoir de résolution expérimental	45000
Format du spectre	environ 67 ordres 61,44 × 62,74 mm
Nature du bloc disperseur (réseau blazé)	Bloc monolithique de 408 × 102 mm
Diamètre de la fibre optique	100 μm

Tableau 8 – Fiche technique du spectrographe ELODIE (*données obspm*)

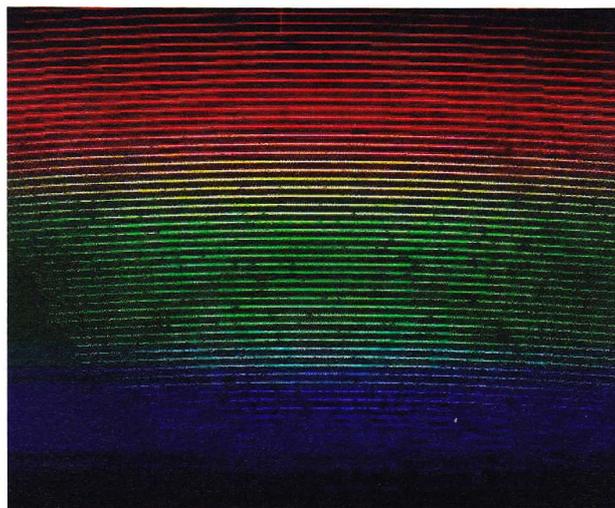


Figure 27 – Spectre échelle obtenu par ELODIE (*image obspm*)

7. Baranne et al., « ELODIE : A Spectrograph for Accurate Radial Velocity Measurements », 1996, A&A Suppl.Ser. 119.373

Annexe II Extraits des programmes officiels

Extrait du programme de Seconde

L'UNIVERS

L'Homme a de tout temps observé les astres afin de se situer dans l'Univers. L'analyse de la lumière émise par les étoiles lui a permis d'en connaître la composition ainsi que celle de leur atmosphère et de la matière interstellaire. L'étude du mouvement des planètes autour du Soleil l'a conduit à la loi de gravitation universelle.

Il apparaît ainsi que le monde matériel présente une unité structurale fondée sur l'universalité des atomes et des lois.

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
<p>Une première présentation de l'Univers : le remplissage de l'espace par la matière est essentiellement lacunaire aussi bien au niveau de l'atome qu'à l'échelle cosmique. Les dimensions de l'Univers sont telles que la distance parcourue par la lumière en une année est l'unité adaptée à leur mesure.</p>	
<p>Description de l'Univers : l'atome, la Terre, le système solaire, la Galaxie, les autres galaxies, exoplanètes et systèmes planétaires extrasolaires.</p> <p>Propagation rectiligne de la lumière. Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air. L'année de lumière.</p>	<p>Savoir que le remplissage de l'espace par la matière est essentiellement lacunaire, aussi bien au niveau de l'atome qu'à l'échelle cosmique.</p> <p>Connaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air). Connaître la définition de l'année de lumière et son intérêt. Expliquer l'expression : « voir loin, c'est voir dans le passé ». Utiliser les puissances de 10 dans l'évaluation des ordres de grandeur.</p>
<p>Les étoiles : l'analyse de la lumière provenant des étoiles donne des informations sur leur température et leur composition. Cette analyse nécessite l'utilisation de systèmes dispersifs.</p>	
<p>Les spectres d'émission et d'absorption : spectres continus d'origine thermique, spectres de raies. Raies d'émission ou d'absorption d'un atome ou d'un ion. Caractérisation d'une radiation par sa longueur d'onde.</p> <p>Dispersion de la lumière blanche par un prisme. Réfraction. Lois de Snell-Descartes.</p>	<p>Savoir qu'un corps chaud émet un rayonnement continu, dont les propriétés dépendent de la température.</p> <p>Repérer, par sa longueur d'onde dans un spectre d'émission ou d'absorption une radiation caractéristique d'une entité chimique. <i>Utiliser un système dispersif pour visualiser des spectres d'émission et d'absorption et comparer ces spectres à celui de la lumière blanche.</i> Savoir que la longueur d'onde caractérise dans l'air et dans le vide une radiation monochromatique. Interpréter le spectre de la lumière émise par une étoile : température de surface et entités chimiques présentes dans l'atmosphère de l'étoile. Connaître la composition chimique du Soleil.</p> <p><i>Pratiquer une démarche expérimentale pour établir un modèle à partir d'une série de mesures et pour déterminer l'indice de réfraction d'un milieu.</i> Interpréter qualitativement la dispersion de la lumière blanche par un prisme.</p>

Extraits du programme de Terminale S

Caractéristiques et propriétés des ondes

Notions et contenus	Compétences exigibles
<p>Propriétés des ondes</p> <p>Diffraction. Influence relative de la taille de l'ouverture ou de l'obstacle et de la longueur d'onde sur le phénomène de diffraction.</p> <p>Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche.</p> <p>Interférences.</p> <p>Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche. Couleurs interférentielles.</p> <p>Effet Doppler.</p>	<p>Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est liée au rapport de la longueur d'onde aux dimensions de l'ouverture ou de l'obstacle. Connaître et exploiter la relation $\theta = \lambda/a$. Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction. <i>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier ou utiliser le phénomène de diffraction dans le cas des ondes lumineuses.</i></p> <p>Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques. <i>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses.</i></p> <p><i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.</i> Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses. Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.</p>

Annexe III Données numériques

Eléments	Masses molaires atomiques (g/mol)
H	1,0
C	12,0
N	14,0
O	16,0
S	32,1
Cl	35,5
K	39,1
I	126,9

Tableau 9 – Masses molaires atomiques

Nom	Soleil	Nom	Jupiter	Terre
Distance à la Terre	1 ua	Distance moyenne au Soleil	5,2 ua	1 ua
Type spectral	G2-V	Excentricité	0,048	0,017
Masse	$M_{\odot} = 1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$	Masse	$M_J = 1,8986 \times 10^{27} \text{ kg}$	$M_T = 5,9736 \times 10^{24} \text{ kg}$
Température de surface	5750 K	Période de révolution	11,86 ans	365,25 jours
Rayon moyen	$R_{\odot} = 695\,500 \text{ km}$	Rayon moyen	$r_J = 69\,911 \text{ km}$	$r_T = 6371 \text{ km}$
Magnitude apparente	-26,74	Masse volumique	0,16 kg/m ³	5,515 kg/m ³

Tableau 10 – Quelques données numériques sur le système solaire

Constante de gravitation universelle	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$
Unité astronomique	1 ua = 149 597 871 km
Parsec	1 pc = $3,0857 \times 10^{16} \text{ m}$
Constante d'état des gaz parfaits	$R = 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

Tableau 11 – Unités et constantes fondamentales