

# OBSERVATOIRE DE PARIS

## Examen du DU ECU

Année 2024-2025

7 juin 2024

### CONSIGNES :

- Écrire au stylo ou feutre **noir**
- Écrire **uniquement** sur le recto pour toutes les questions. Pour les QCM inutile de réécrire la réponse en entier (préciser le n° de question et la/les bonne(s) réponse(s) ). **NE RIEN ÉCRIRE SUR LE SUJET**
- Recommencer une **nouvelle page** après chaque série de questions sur un thème pour faciliter la correction (Ex : Soleil, une feuille différente pour le sujet de JM. Malherbe et L. Klein)
- Le sujet « Hautes Energies » est uniquement pour les personnes en parcours à distance en vidéo. Il est compté dans la moyenne pour les parcours vidéo.

### Ondes et Instruments – Mathieu Puech (3 points)

#### Observations d'une galaxie très distante

Le *James Web Space Telescope* est en train de réaliser des avancées très importantes dans nos connaissances des galaxies les plus distantes, situées à des époques où l'Univers n'était âgé que de quelques centaines de millions d'années. A titre d'exemple, nous allons nous intéresser à la galaxie Gz9p3 (cf. <https://arxiv.org/abs/2303.00306>) qui est, à date, la 15<sup>ème</sup> galaxie la plus distante connue. Dans la figure ci-dessous, on peut voir les raies qui correspondent au doublet de [OII] détecté par des observations JWST avec l'instrument NIRSpec. On supposera par la suite que la longueur d'onde au repos du doublet est de 372,7 nm.

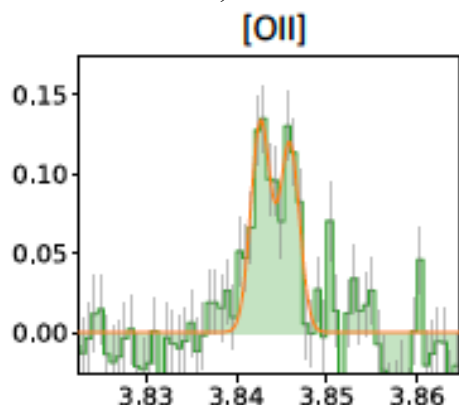


Figure 1 : doublet de [OII] détecté par JWST/NIRSpec. L'axe des abscisses donne la longueur d'onde observée en  $\mu\text{m}$  (Boyett et al. 2024, cf. référence donnée ci-dessus).

Q1. A partir de la figure 1 ci-dessus, quel est le décalage spectral  $z$  (ou « *redshift* ») de cette galaxie ?

- a)  $z=3,845$
- b)  $z=10,3$
- c)  $z=9,3$
- d)  $z=0,3727$

Q2. A quoi est principalement dû le décalage en longueur d'onde de la raie entre sa longueur d'onde au repos et la longueur d'onde à laquelle elle est détectée ?

- a) Au fait que l'on observe une galaxie spirale qui est en rotation
- b) Au fait qu'il y a de la poussière sur la ligne de visée qui affecte le rayonnement reçu
- c) A la loi de Hubble-Lemaître qui traduit l'expansion de l'Univers
- d) A une erreur de mesure

Q3. Ordonner qualitativement les domaines des ondes électromagnétiques suivants à l'aide d'un schéma simple : Visible, Radio, Gamma, UV, Infrarouge et X. Indiquer sur ce schéma quels sont les domaines qui sont accessibles depuis le sol. Dans quel domaine est observée la raie [OII] représentée en figure 1 ? Pourquoi avoir utilisé le JWST pour faire ces observations plutôt qu'un télescope au sol ?

Réponse : des plus petites aux plus grandes longueurs d'ondes : Gamma  $\rightarrow$  X  $\rightarrow$  UV  $\rightarrow$  Visible  $\rightarrow$  IR  $\rightarrow$  Radio. Seules les fenêtres Visible et Radio sont accessibles depuis le sol car les autres domaines sont fortement atténués par l'atmosphère terrestre. La raie [OII] tombe dans le domaine IR, qui est plus accessible depuis l'espace.

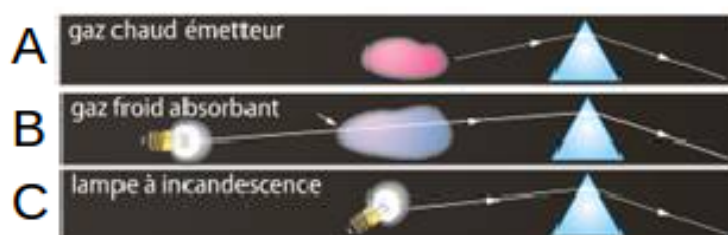
Q4. De quel type de raies s'agit-il ?

- a) des raies moléculaire
- b) des raies en émission
- c) les ray-ban® de J. Vaubaillon
- d) des raies en absorption

Q5. Quel phénomène physique est associé à la production de cette raie en émission ? [0,4 points]

- a) A l'excitation de l'électron autour du noyau d'hydrogène qui passe à un niveau d'énergie plus élevé
- b) A la désexcitation de l'électron autour du noyau d'hydrogène qui descend sur un niveau d'énergie moins élevé
- c) A l'ionisation de l'atome d'hydrogène qui perd son électron
- d) A la présence d'un champ magnétique qui interagit avec l'atome d'hydrogène

Q6. A quelle loi de Kirchhoff correspond le mieux cette observation ?



- a) le schéma A
- b) le schéma B
- c) le schéma C
- d) le schéma D (Si vous pensez choisir cette réponse : êtes-vous vraiment sûr ?)

La caméra NIRcam du JWST a également été utilisée pour obtenir une image de la galaxie Gz9p3 qui est représentée dans la figure 2, à gauche. L'image a été obtenue en combinant le flux reçu dans le filtre F150W centré sur la longueur d'onde à  $1,5 \mu\text{m}$  et le filtre F200W, centré sur la longueur d'onde  $1,988 \mu\text{m}$ .

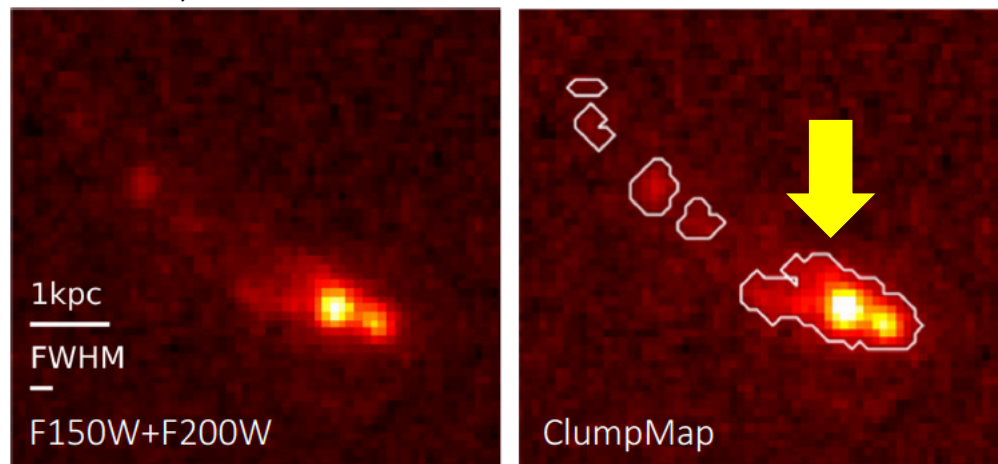


Figure 2 A gauche : image de la galaxie Gz9p3 obtenue par JWST/NIRcam dans les filtres F150W+F200W (Boyett et al. 2024, cf. référence donnée ci-dessus). A droite : sous-structures identifiées dans la galaxie Gz9p3.

Q7. Dans cette image produite par le JWST, quel est le phénomène physique qui limite la résolution spatiale ?

- a) La turbulence atmosphérique
- b) La quantité de poussière sur la ligne de visée
- c) La diffraction de la lumière par le télescope
- d) La réfraction des rayons lumineux par les miroirs du télescope

Q8. Le JWST est un télescope dont le miroir primaire a un diamètre de 6,5 mètres. Quelle est (approximativement) la résolution spatiale maximale atteignable par le télescope à la longueur d'onde centrale du filtre F150W ? (rappel :  $1 \text{ deg} = 3600 \text{ arcsec}$  ;  $\text{arcsec} = \text{secondes d'arc}$ ) ?

- a) 1 arcsec
- b) 0,05 deg
- c) 0,05 arcsec
- d) 0,5 arcsec

Q9. On s'intéresse à la sous-structure principale de la galaxies Gz9p3, identifiée par les contours blancs et la flèche jaune dans la partie droite de la figure 2. Des mesures montrent que cette région mesure environ 0.6 arcsec dans sa plus grande dimension. En considérant à la fois la figure 2 (à droite) et votre réponse à la Q8, parmi les affirmations suivantes, lesquelles sont exactes ?

- a) La sous-structure est résolue spatialement par le JWST
- b) La galaxie n'est pas résolue spatialement par le JWST
- c) Cette galaxie pourrait être également résolue par des observations menées depuis un simple télescope (sans optique adaptative) au sol
- d) Le télescope spatial Hubble, avec un diamètre de 2,4 mètres et à la même longueur d'onde pourrait tout juste résoudre spatialement cette galaxie

*Commentaire final.* L'ensemble des mesures photométriques réalisées par le JWST permettent d'estimer la masse « stellaire » de la galaxie, c'est-à-dire la masse correspondant à la totalité des étoiles qui forme la galaxie. Celle-ci est estimée à environ 1,6 millions de masses solaires (c'est-à-dire 1,6 millions de fois la masse du Soleil). A titre de comparaison, la masse de la Voie lactée est estimée à environ 5,2 millions de masses solaires, soit seulement environ 3 fois plus. Cela a été une vraie surprise de découvrir des galaxies aussi massives aussi tôt dans l'histoire de l'Univers !

## Astrométrie et mécanique céleste – Jérémie Vaubillon (3 points)

Astronomie fondamentale :

Mathieu Puech veut faire un spectre de la galaxie M82 de coordonnées  $\alpha \sim 10^h$ , déclinaison  $= +79^\circ$ . Il souhaite observer ce soir à 23h. Le temps sidéral sera de  $\sim 16^h$ . Est-ce l'instant idéal pour l'observation ? Expliquer.

L'instant idéal pour observer est quand le temps sidéral est égal à l'ascension droite  $\alpha$ , c'est à dire il y a  $\sim 6^h$  (ou bien dans  $18^h$ ). À ce moment il fait jour ( $19^h$  heure locale en juin). L'instant n'est pas idéal, mais ce dernier n'est pas accessible. Mathieu Puech n'a donc pas le choix que d'observer ce soir quand il pourra.

Phénomènes :

En quelques mots, expliquez à Mathieu Puech pourquoi il est scientifiquement plus intéressant d'observer le passage d'un astéroïde devant une étoile plutôt que devant la galaxie M82 qu'il s'apprête à observer.

Une occultation stellaire par un astéroïde présente une chute brutale de la luminosité, qui permet de mesurer la taille de l'astéroïde (en mesurant le temps de l'occultation). Dans le cas d'une galaxie, l'objet étant étendu, il n'y aura pas de chute brutale de luminosité, donc aucune mesure scientifiquement exploitable a priori.

Mécanique Céleste :

Dans le roman de sciences fiction "Le problème à 3 corps", la planète Trisolaris orbite autour de 3 étoiles. Les Trisolariens connaissent des périodes dites "chaotiques" pendant lesquelles l'heure du lever du Soleil est quasi impossible à prévoir et irrégulier. Expliquer pourquoi.

Le problème à trois corps est connu pour ne pas avoir de solution analytique simple (sauf cas très particulier), et présenter une forte chaoticité : c'est la raison pour laquelle le lever d'un des 3 Soleils de cette planète est impossible à prévoir. Note : avec 3 étoiles et une planète, le titre du livre devrait être : le problème à 4 corps...

Astronautique :

La sonde interplanétaire Kosmos 482 a été lancée en 1972. Malheureusement, le lancement a échoué et elle est restée incontrôlée depuis, et en orbite terrestre. Sa chute au sol a été envisagée dès 2022, et a suscité un intérêt particulier en avril 2025, avant de tomber effectivement en mai 2025. Pourquoi est-ce si difficile de prévoir plusieurs années à l'avance la date d'une rentrée atmosphérique de ce type ? Et pourquoi est-ce encore plus difficile de prévoir le lieu de chute ?

L'instant de chute est régi par le frottement atmosphérique. Or la densité de la haute atmosphère change constamment en fonction de l'ensoleillement et est difficile à mesurer et encore plus difficile à prévoir. L'instant de la chute est donc difficile à prévoir. L'objet étant en orbite terrestre basse (car sur le point de retomber au sol), il tourne rapidement autour de notre planète (note : en moins de  $2^h$ ) : en quelques minutes il parcourt donc des centaines de km. Le lieu de chute est donc encore plus difficile à prévoir. Ceci dit, l'orbite de l'objet (avant sa chute) reste bien connu grâce aux observations.

Temps :

Dans la bande dessinée “Mars Horizon, l'héroïne va passer plusieurs années sur Mars. Elle cherche à définir un calendrier martien et décide de conserver la seconde, comme définie sur Terre. Ceci dit, elle cherche un phénomène astronomique pour définir le calendrier Martien. À votre avis, pourquoi ? Lequel est utilisé sur Terre pour définir l'année ?

La définition d'un calendrier reste un choix, à partir d'un phénomène périodique. L'avantage d'utiliser un événement astronomique est son caractère périodique. Ceci dit, cette périodicité peut changer à moyen terme (quelques siècles).

Sur Terre, c'est l'équinoxe de printemps qui est utilisé pour définir l'année (dite tropique).

Météores :

La bande dessinée “Chasseurs d'étoiles” met en scène un chasseur de météorites peu soucieux de leur intérêt scientifique. Expliquez en quelques mots pourquoi il est intéressant d'observer les chutes de météorites (par exemple avec un réseau de caméras comme le projet FRIPON).

Une chute de météorite s'accompagne d'un phénomène lumineux appelé météore. Son observation à partir de plusieurs caméras disposées en réseau (comme FRIPON) permet de calculer sa trajectoire et sa vitesse en 3D, et d'en déduire son orbite avant de sa chute, et donc sa provenance dans le système Solaire. Note : par extension, on peut évaluer son âge dynamique.

### Soleil – Frédéric Baudin (2 points)

1) Quelle est (en ordre de grandeur) la température du centre du Soleil :

150 000 K

1 500 000 K

15 000 000 K

2) Quelle est (en ordre de grandeur) la température de la photosphère :

600 K

6000K

60 000K

3) Quelle est (en ordre de grandeur) la température de la couronne :

10 000 K

100 000 K

1 000 000 K

4) Sachant que le volume d'une sphère est  $V = 4\pi R^3/3$  et que le rayon et la masse du Soleil valent respectivement  $R = 7.10^8\text{m}$  et  $M = 2.10^{30}\text{kg}$ , quelle est la masse volumique  $\rho$  du Soleil ? Que vaudra-t-elle quand le Soleil sera une géante rouge (son rayon sera 100 fois son rayon actuel, en considérant la masse constante) ? Que vaudra-t-elle quand il sera une naine blanche (son rayon sera 100 fois plus petit que son rayon actuel, toujours à masse constante) ?

A l'heure actuelle,  $\rho = M/V = 1,4.10^3 \text{ kg/m}^3$

Au stade de géante rouge, si R est multiplié par 100,  $\rho$  est divisé par  $100^3 = 10^6 \Rightarrow \rho = 1,4.10^{-3} \text{ kg/m}^3$

Au stade de naine blanche, si R est divisé par 100,  $\rho$  est multiplié par  $100^3 = 10^6 \Rightarrow \rho = 1,4.10^9 \text{ kg/m}^3$

5) Sachant que la gravité à la surface du Soleil vaut  $g = GM/R^2$ , (où G est la constante gravitationnelle,  $G = 6,67.10^{-11}$  en unité du Système International), que vaut g actuellement ? Quelle sera sa valeur quand le Soleil sera une géante rouge ? Et une naine blanche ?

A l'heure actuelle,  $g = 274 \text{ m/s}^2$

Au stade de géante rouge, si  $R$  est multiplié par 100,  $g$  est divisé par  $100^2 = 10^4 \Rightarrow g = 2,74 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2$

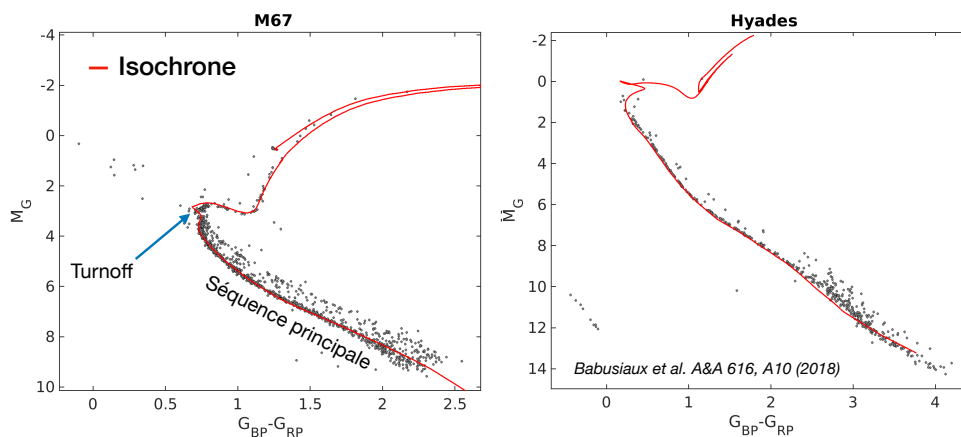
Au stade de naine blanche, si  $R$  est divisé par 100,  $g$  est multiplié par  $100^2 = 10^4 \Rightarrow g = 2,74 \cdot 10^6 \text{ m/s}^2$

6) Considérant la gravité de surface au stade de géante, que peut-on en déduire concernant l'évolution des couches superficielles de l'étoile ?

La gravité devient tellement faible que ces couches superficielles peuvent s'échapper, menant au stade de naine blanche

## Etoiles et milieu interstellaire – Pierre Kervella (3 points)

### A) Âge de deux amas ouverts



La figure ci-dessus montre les **diagrammes de Hertzsprung-Russell** de deux amas ouverts de la Voie Lactée, M67 et les Hyades. Ils sont construits à l'aide des données du satellite *Gaia*. L'axe horizontal donne la **couleur**  $G_{BP} - G_{RP}$  de chaque étoile (plus rouge à droite) et l'axe vertical sa **magnitude absolue**  $M_G$  (reliée à sa luminosité absolue).  $M_G$  est numériquement *plus petite* pour une étoile plus brillante.

- 1) Qu'est-ce qu'une **isochrone** (courbes rouges) ?
- 2) Estimer la **magnitude absolue**  $M_G$  du « **turnoff** » pour chacun des deux amas.
- 3) Conclure sur **lequel des deux amas est le plus jeune** et justifier brièvement.

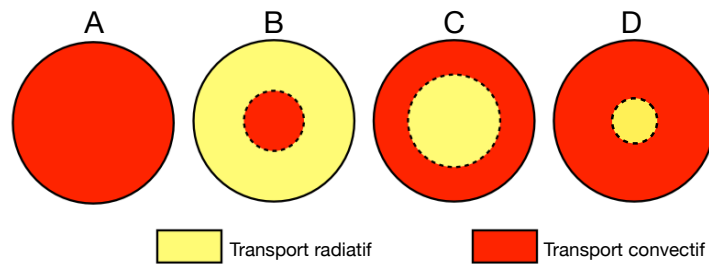
Réponses :

- 1) Une isochrone est le lieu du diagramme HR où se répartissent toutes les étoiles qui ont un âge donné.
- 2) Turnoff de M67 :  $M_G = 3$ , et des Hyades :  $M_G = 1$  (environ).
- 3) L'amas des Hyades est plus jeune (600 Ma) des deux amas, car le turnoff se produit à une luminosité, donc une masse, plus élevée que M67 (4 Ga).

### B) La structure des étoiles

- 1) Citer les **deux principales réactions de fusion nucléaire** se produisant dans les étoiles de la séquence principale.

- 2) Classer les étoiles dont la structure est représentée ci-dessus par **ordre de masse croissante**. Toutes les étoiles sont **des naines de la séquence principale**, dont les tailles relatives ne sont pas respectées.



Réponses :

- 1) Chaîne proton-proton et cycle CNO.
- 2) A, D, C, B

### C) Le milieu interstellaire

- 1) Dans le milieu interstellaire, quelles sont les forces qui régissent l'équilibre d'un nuage moléculaire ?
- 2) Citer deux exemples d'événements qui peuvent déstabiliser le nuage et causer son effondrement.
- 3) Comment appelle-t-on la distribution de la masse des étoiles formées après cet effondrement ?

Réponses:

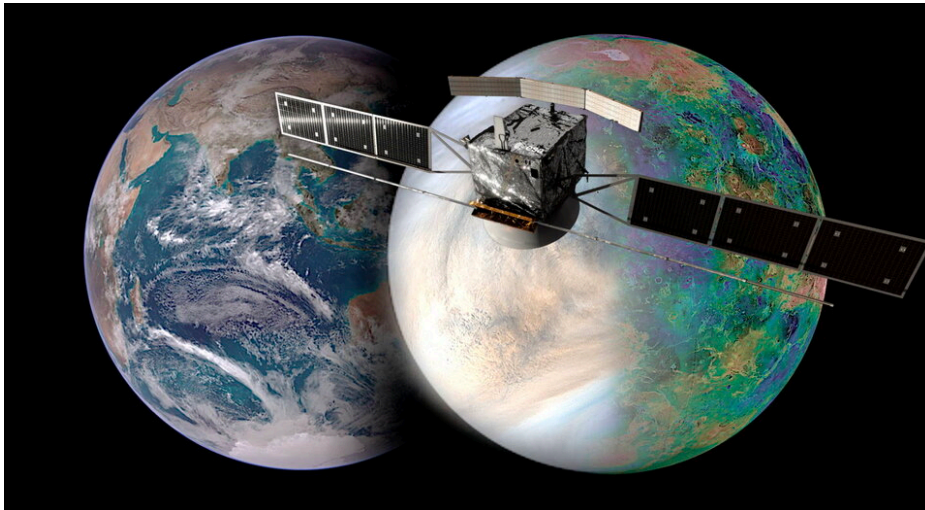
- 1) Pression et gravité.
- 2) Passage d'une onde de densité galactique, supernova proche, étoiles massives proches, etc...
- 3) La fonction de masse initiale.

## Planétologie comparée - Alain Doressoundiram (3 points)

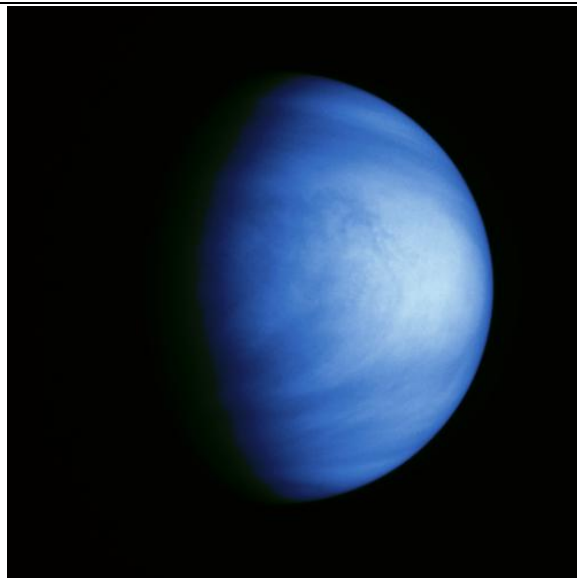
### Vénus, sœur jumelle de la Terre ?

La planète Vénus est l'objet d'une très grande attention de la communauté scientifique européenne avec pas moins de trois missions spatiales programmées pour les années 2030 : les américaines DAVINCI+ et VERITAS, et l'européenne En Vision. Vénus est la planète rocheuse la plus semblable à la Terre en termes de taille, de composition et de distance par rapport au Soleil. Pourtant, à un moment donné de l'histoire de la planète, les deux ont commencé à évoluer très différemment. Vénus est aujourd'hui beaucoup trop chaude pour abriter de l'eau liquide à sa surface, mais il est possible qu'elle ait eu un climat plus proche de celui de la Terre pendant des milliards d'années avant de développer un effet de serre excessif. Vénus constitue donc un laboratoire naturel pour étudier l'évolution de l'habitabilité - ou de l'absence d'habitabilité - dans le Système solaire.





Vue d'artiste de la sonde spatiale En Vision. Crédits : ESA

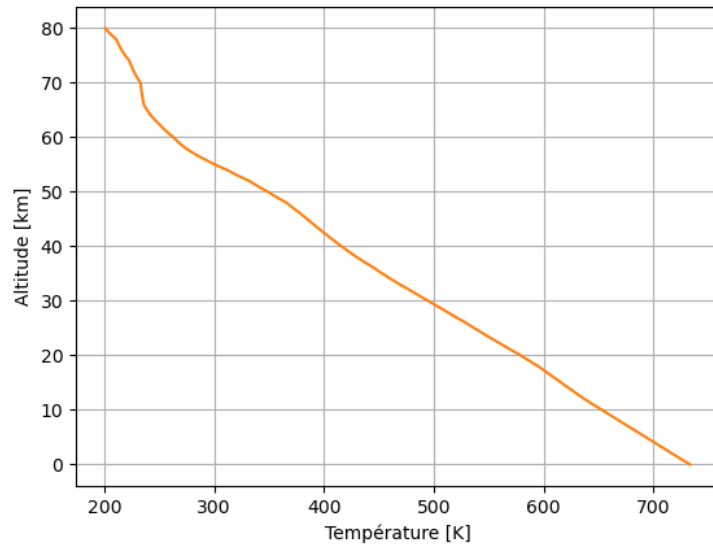
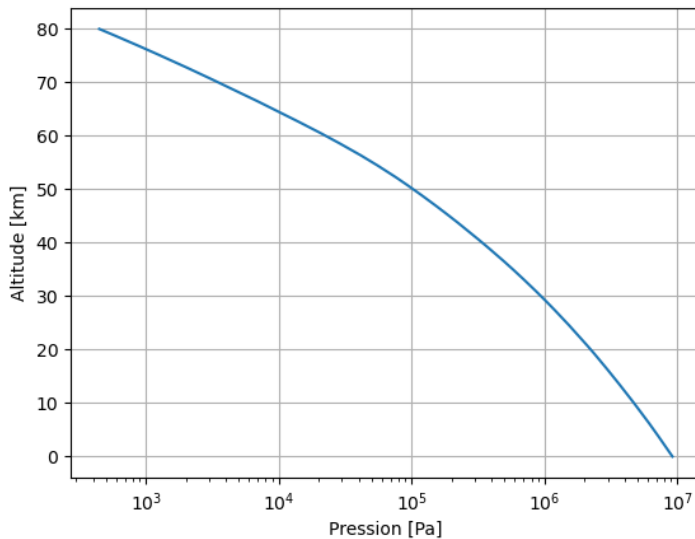


Vénus vue par la sonde Galileo dans l'UV  
(source NASA)

Planète rocheuse  
 Période de révolution : 225 jours  
 Demi grand axe : 0,723 UA  
 Périhélie (au plus près du Soleil) : 0,718 UA  
 Aphélie (au plus loin du Soleil) : 0,728 UA  
 Inclinaison de l'axe de rotation sur l'orbite : 177°  
 Période de rotation : 243 jours  
 Albédo (géométrique) : 0,689  
 Rayon équatorial : 6052 km (0,949 Terre)  
 Masse :  $4,87 \cdot 10^{24}$  kg (0,815 Terre)  
 Atmosphère : 96,5% CO<sub>2</sub>, 3,5% N<sub>2</sub>  
 Champ magnétique : non

**DOCUMENT 1** : *Carte d'identité de Vénus.*





**DOCUMENT 2 :** Évolution de la température et de la pression au sein de l'atmosphère de Vénus en fonction de l'altitude. La pression au sol vaut près de 100 bars !

Q1. À quelle altitude la pression dans l'atmosphère de Vénus est-elle approximativement égale à la pression atmosphérique à la surface de la Terre ? Que vaut alors la température à cette altitude ?

- A. 0 km ; 1006 °C
- B. 0 km ; 460 °C
- C. 30 km ; 220 °C
- D. 30 km ; 766 °C
- E. 50 km ; 75 °C
- F. 50 km ; 621 °C
- G. 60 km ; -10 °C
- H. 60 km ; 536 °C

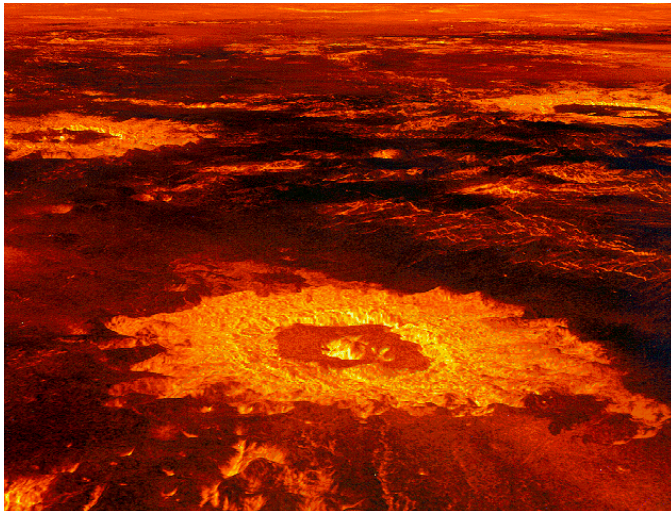
Q2. La masse molaire de l'atmosphère de Vénus (composée majoritairement à 96,5 % de  $\text{CO}_2$  et 3,5 % de  $\text{N}_2$ ) vaut  $M=43,4$  g/mol. En supposant que l'atmosphère se comporte comme un gaz parfait, que vaut alors la masse volumique de l'atmosphère de Vénus au niveau de sa surface ? On prendra  $R = 8,314$  J/mol/K

- A. 66 kg/m<sup>3</sup>
- B. 10 kg/m<sup>3</sup>
- C. 1,6 kg/m<sup>3</sup>
- D. 0,5 kg/m<sup>3</sup>
- E. 0,03 kg/m<sup>3</sup>

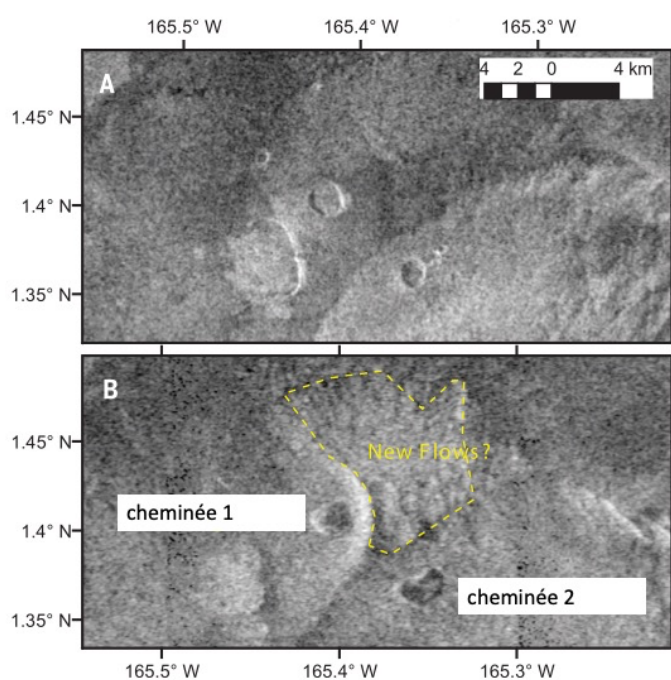
(à titre de comparaison, la masse volumique de l'atmosphère terrestre au niveau de la surface vaut environ 1,3 kg/m<sup>3</sup>)

Q3. En utilisant vos connaissances ainsi que les informations extraites du document 1, choisissez les propositions exactes parmi les suivantes.

- A. Sur Vénus, on ne peut pas avoir de saisons car son axe de rotation est pas/peu incliné sur son orbite
- B. Sur Vénus, on ne peut pas avoir de saisons car on est trop près du Soleil
- C. Sur Vénus, l'été a lieu obligatoirement au périhélie
- D. Vénus a une orbite légèrement elliptique autour du Soleil



**DOCUMENT 3 :** Vue oblique de 3 cratères vénusiens : Saskia (37km) au centre, Danilova (47km) à gauche et Aglaonice (62km) à droite. (Image en fausses couleurs reconstruite à partir de données radar) Chaque cratère est entouré d'une couche brillante, rugueuse d'éjectas qui sont les débris excavés et éjectés par l'impact. Au centre des cratères, on reconnaît le pic central caractéristique des cratères d'impacts = rebond élastique de la croûte suite à la collision. On dénombre un millier de cratères vénusiens entre 3 et 280 km de diamètre, ce qui est comparable à la Terre. Par contre, On ne recense aucun cratère plus petit que 3 km. Crédit : Magellan/NASA



**DOCUMENT 4 :** Plus de 85000 édifices volcaniques ont été identifiés à la surface, mais il est encore incertain si Vénus a actuellement du volcanisme actif. Ce document présente à partir des images radar de la sonde Magellan, l'évolution d'une région volcanique sur 8 mois d'intervalle, entre la période A et B. Deux cheminées volcaniques sont repérées pour comparaison. D'après Herrick et al., Science 379 (2023)

Q4. En utilisant vos connaissances ainsi que les informations extraites du document 3, choisissez les propositions exactes parmi les suivantes.

- A. Sur Vénus, le peu de cratères s'explique par le fait que peu de collisions affectent la planète
- B. Sur Vénus, le peu de cratères s'explique par le bouclier magnétique de la planète
- C. Sur Vénus, le peu de cratères s'explique par un processus de resurfaçage global
- D. Aucun cratère n'est plus petit que 3 km, en raison de l'atmosphère dense de la planète
- E. Aucun cratère n'est plus petit que 3 km, car les petits astéroïdes sont plus rares que les plus gros
- F. Aucun cratère n'est plus petit que 3 km, ces derniers sont immédiatement recouverts de lave

Q5 : En utilisant vos connaissances ainsi que les informations extraites du document 4, quelles sont les arguments en faveur d'un volcanisme actif sur Vénus ?

- A. Vénus est proche du Soleil, favorisant ainsi la fusion du cœur de la planète
- B. Vénus a quasiment les mêmes taille et masse que la Terre
- C. Vénus a une température record de plus de 700 K, permettant ainsi l'éruption de laves.
- D. Les contraintes de composition sont compatibles avec la présence sur Vénus d'une abondance d'éléments radioactifs comparable à celle de la Terre, qui dégagent de la chaleur susceptible d'alimenter l'activité volcanique.
- E. Le nombre et la morphologie des cratères vénusiens sur certaines régions localisées indiquent que l'âge de la surface de Vénus n'est que de quelques dizaines de millions d'années, aussi jeune que les bassins océaniques de la Terre.

Q6. En utilisant vos connaissances ainsi que les informations extraites du document 4, choisissez les propositions exactes parmi les suivantes.

- A. La région étudiée correspond à l'hémisphère nord de la planète
- B. La région étudiée correspond à l'hémisphère sud de la planète
- C. Entre les périodes A et B, la cheminée volcanique b a changé de forme et s'est élargie
- D. Entre les périodes A et B, la cheminée volcanique b est resté inchangée
- E. Ces images radars sont en vraies couleurs
- F. Ces images radars sont en fausses couleurs
- G. Ce document prouve l'existence d'une activité volcanique en cours sur Vénus

## Galaxies – Paola Di Matteo (3 points)

**Q1 :** En 1920 a lieu le “grand débat” qui voit les astronomes Harlow Shapley et Heber Curtis défendre deux visions différentes sur une des questions qui passionnaient le plus la communauté astronomique à l'époque. Le Grand débat tournait autour de :

1. La structure spirale d'Andromède
2. L'origine des Nuages de Magellan
3. La nature galactique ou extragalactique des “nébuleuses”

**Q2 :** Il y a deux processus clé dans l'étude des interactions et fusions de galaxies : les phénomènes de marée et la friction dynamique. Donnez une courte description des deux processus.

Les phénomènes de marée sont dus à la variation de la force de gravitation en deux points d'une même galaxie, exercée par une autre galaxie. Cette variation porte à la formation de queues de marée dans les régions externes des galaxies en interaction

La friction dynamique a lieu à chaque fois qu'un objet massif se déplace à travers un nuage d'objets plus petits. L'effet gravitationnel du grand objet attire les petits objets vers lui. Il existe alors une concentration de petits objets derrière le grand corps, car celui-ci a déjà dépassé sa position précédente. Cette concentration de petits objets derrière

le grand corps exerce une force gravitationnelle collective sur le grand objet, le ralentissant. La friction dynamique est responsable de la perte d'énergie orbitale d'une galaxie et de sa fusion éventuelle avec une autre.

**Q3 :** Les galaxies de la séquence rouge sont des galaxies spirales barrées riches en gaz moléculaire.

1. Vrai
2. Faux

### **Cosmologie – Mathieu Langer (3 points)**

1) Qu'est-ce que le principe cosmologique? Quels sont les éléments observationnels qui sous-tendent son application pour construire le modèle cosmologique?

Une façon de formuler le principe cosmologique est d'énoncer que l'univers apparaît identique à tout observateur, quelle que soit la direction dans laquelle il regarde. À toutes fins utiles, cela revient à dire que l'univers est homogène et isotrope. Les éléments observationnels qui sous-tendent l'applicabilité de ce principe à notre univers pour construire le modèle cosmologique sont la très forte uniformité du fond diffus cosmologique, la distribution statistiquement isotrope des galaxies dans le ciel, la distribution des galaxies en volume à suffisamment grande échelle, etc. Bien sûr, ce principe est régulièrement mis à l'épreuve des mesures des plus en plus fines et précises.

2) Qu'est-ce que le facteur d'échelle? Comment définit-on le taux d'expansion? Comment évoluent les densités d'énergie de la matière, du rayonnement et de la constante cosmologique avec le facteur d'échelle ?

Le facteur d'échelle  $a(t)$  est une grandeur sans dimension, variable dans le temps, qui permet de rendre compte de la variation des distances physiques au cours du temps à grande échelle. Plus précisément, en appelant  $L_0$  la distance entre deux masses test (e.g. galaxies) non liées gravitationnellement à l'instant  $t_0$  (aujourd'hui), alors la distance  $L(t)$  entre ces mêmes deux points à tout autre instant  $t$  est donnée par  $L(t) = a(t)/a(t_0) L_0$ . Le taux d'expansion  $H(t)$  à tout instant  $t$  est défini par la variation de  $a$  dans le temps ramenée à  $a$  lui-même, i.e.  $H(t) = (1/a) \times da/dt$ . Les densités d'énergie de la matière, du rayonnement et de la constante cosmologique varient respectivement comme  $a^{-3}$ ,  $a^{-4}$  et  $a^0$ .

3) Pourquoi est-il nécessaire, voire indispensable, de combiner les observations de plusieurs sondes cosmologiques indépendantes (e.g. fond diffus cosmologique, supernovæ de type Ia, amas de galaxies, etc.) pour obtenir des contraintes précises sur les paramètres cosmologiques ?

Les grandeurs physiques issues des observations cosmologiques, telles que les distances angulaire et de luminosité, dépendent simultanément de plusieurs paramètres cosmologiques. Il en résulte que différentes combinaisons de ces paramètres peuvent conduire aux mêmes valeurs observées, un phénomène connu sous le nom de dégénérescence. Pour lever (ou du moins réduire) ces

dégénérescences, il est essentiel de combiner des observations indépendantes reposant sur des sondes cosmologiques différentes, chacune étant sensible à des combinaisons distinctes de paramètres. Cette complémentarité permet d'obtenir des contraintes plus précises et robustes sur les paramètres cosmologiques.

### Traitements de données – Pierre Baudoz (2 points)

On a observé une nébuleuse diffuse avec une caméra CCD. On dispose de :

- A) Une image  $I_A$  enregistrée avec un temps de pose très court et avec l'obturateur de l'instrument fermé.
- B) Une image moyenne  $I_B$  qui correspond à la moyenne de 100 images  $I_A$  enregistrées à la suite des observations.
- C) La moyenne  $I_C$  d'images enregistrées avec une source uniforme placée à l'entrée de l'instrument et à laquelle on a déjà retiré le master-biais
- D) Une image  $I_D$  non traitée de l'objet astronomique.
- E) Une image traitée  $I_E$  de l'objet astronomique

Q1 : À quelle donnée correspond le master-biais :

- 1)  $I_A$
- 2)  $I_B$
- 3)  $I_C$
- 4)  $I_D$
- 5)  $I_E$
- 6) Aucune

Q2 : À quelle donnée correspond le Master-Flat :

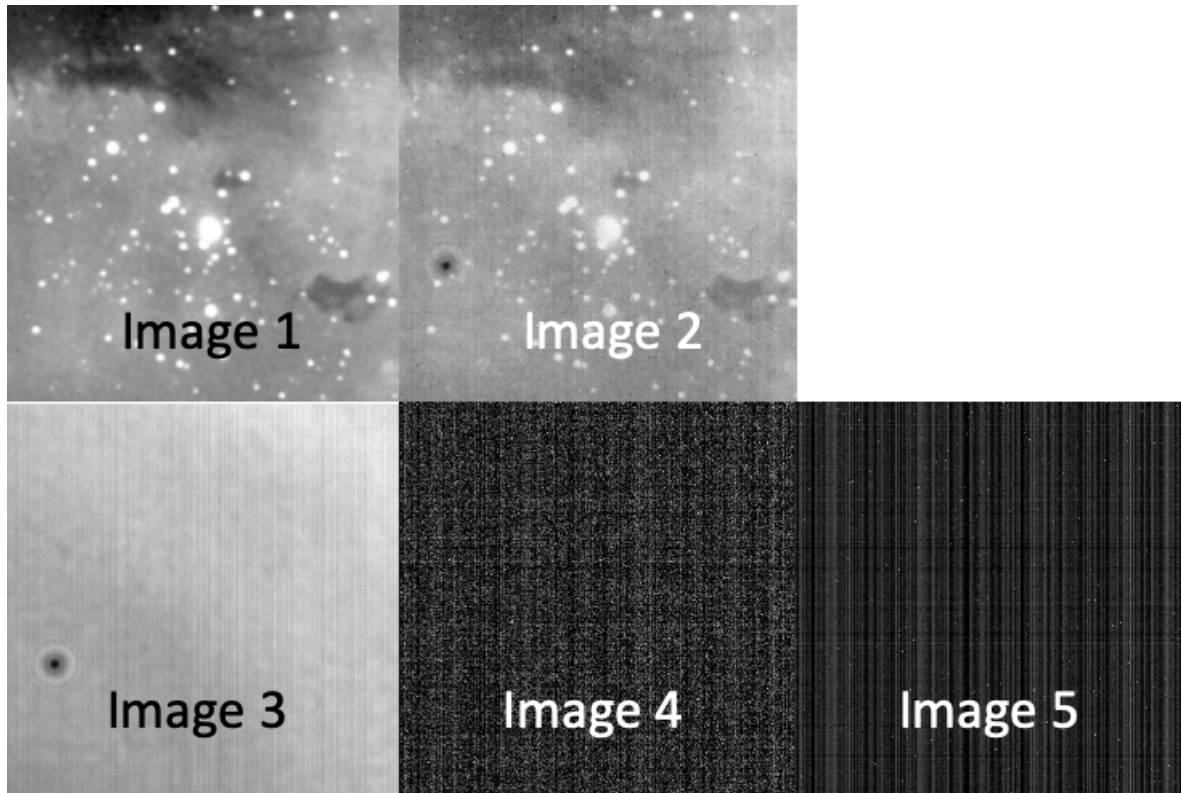
- 1)  $I_A$
- 2)  $I_B$
- 3)  $I_C$
- 4)  $I_D$
- 5)  $I_E$
- 6) Aucune

Q3 : Quelle équation va-t-on utiliser pour soustraire les effets de la CCD des données brutes de  $I_D$  :

- 1)  $I_E = (I_D - I_C) / (I_C - I_B)$
- 2)  $I_E = (I_D - I_B) \times (I_C - I_B)$
- 3)  $I_E = (I_D - I_B) / I_C$
- 4)  $I_E = (I_D - I_A) / (I_C - I_A)$
- 5)  $I_E = (I_D - I_A) / I_C$

3)  $I_E = (I_D - I_B) / I_C$ . Puisqu' $I_C$  est le master-Flat et le  $I_B$  master-Biais. On rappelle ici que le Master-Biais a déjà été retiré de la moyenne des images correspondant à l'observation d'une source uniforme dans le Master-flat.

Les images ci-dessous correspondent à  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_D$ ,  $I_E$  mais dans le désordre.



Q4 : A quelle image correspond le master-biais:

- 1) Image 1
- 2) Image 2
- 3) Image 3
- 4) Image 4
- 5) Image 5

5) Image 5= master-biais =  $I_B$ . Remarque : On voit du bruit de lecture sur l'image 4 alors que ce bruit est minimisé sur l'image 5 ou l'on n'aperçoit plus que les biais de lecture sur les colonnes du détecteur. L'image 4 correspond donc à une image de biais individuelle et l'image 5 au master-biais.

Q5 : A quelle image correspond le master-flat:

- 1) Image 1
- 2) Image 2
- 3) Image 3
- 4) Image 4
- 5) Image 5

3) master-flat = Image 3 =  $I_C$

Q6 : A quelle image correspond l'image astronomique traitée :

- 1) Image 1
- 2) Image 2



- 3) Image 3
- 4) Image 4
- 5) Image 5

1) Image astronomique traitée = Image 1 =  $I_E$ . On voit des défauts du flat sur l'image 2 qui sont compensés sur l'image 1 (notamment la partie sombre en bas à gauche).

Q7 : Par rapport à une seule image, lorsqu'on calcule la moyenne de 25 images, le rapport signal sur bruit sur cette image moyennée:

- 1) Augmente d'un facteur 25
- 2) Augmente d'un facteur 5
- 3) Augmente d'un facteur 2
- 4) Diminue d'un facteur 25
- 5) Diminue d'un facteur 5
- 6) Diminue d'un facteur 2
- 7) Reste inchangé

2) Le rapport signal sur bruit augmente d'un facteur 5. La somme de 25 images augmente le signal d'un facteur 25 et le bruit d'un facteur 5 si le bruit est bien un processus aléatoire non corrélé. Le rapport signal à bruit est donc augmenté d'un facteur 5.

## Histoire - Jérôme LAMY (2 points)

### 1- Expliquer les deux propositions d'Appolonius de Perga dans le domaine de l'astronomie antique ?

Appolonius a très probablement été le premier à utiliser les épicycles et les excentriques pour les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes.

Pour les épicycles, la Terre est au centre d'un cercle nommé déferent (du latin *deferens*, portant). Le centre C de l'épicycle se meut sur le déferent autour de la Terre dans la période où la planète fait un tour du ciel (sa révolution sidérale), tandis que la planète parcourt son épicycle.

En ce qui concerne la théorie des excentriques, le corps céleste se déplace le long de la circonférence d'un cercle « excentrique », c'est-à-dire un cercle dont le centre ne coïncide pas avec la Terre.

En règle générale, l'hypothèse excentrique est utilisée pour le Soleil et les hypothèses épicycliques pour la Lune et les planètes.

### 2- Quelles ont été les stratégies des astronomes du 17<sup>e</sup> siècle pour contrer les effets de l'aberration dans l'usage des lunettes ?

Les astronomes du 17<sup>e</sup> siècle ont tenté de résoudre les problèmes d'aberration d'abord en employant des lentilles avec une toute petite courbure ; mais cela obligeait la mise en place d'un tube de très grande taille pour avoir une plus grande distance focale. C'est comme cela qu'en 1673, l'astronome Johannes Hevelius invente une « machine céleste » hors normes qui fait 45,70 mètres de longueur. L'instrument n'a rien de commode (le vent, la température et l'humidité affectent l'observation). Autre tentative de dépasser la question des aberrations, celle de Christiaan Huygens. L'idée de Huygens était de ne pas avoir de tube. Un objectif est monté en haut d'un mât, un oculaire lui est associé en bas. Malgré tout, et avec la distance, il est bien difficile d'arriver à bien viser. Il existe un procédé presque semblable à l'Observatoire de Paris.

Les difficultés sont trop nombreuses pour dépasser la question des aberrations. Ces limites ouvrent donc la voie à une bifurcation technologique et instrumentale : celle du collecteur de lumière, le télescope.



**Hautes Énergies – Alexandre le Tiec, Andreas Zech, Susanna Vergani (2 points)**  
**Réservé aux parcours vidéo à distance : sujet compté dans la moyenne**

AGN 2025

1- La forme géométrique des disques d'accrétion est due

- a) à la conservation de l'énergie pendant l'accrétion
- b) au champ magnétique
- c) à la vitesse du jet
- d) à la conservation du moment cinétique pendant l'accrétion

2- Laquelle de ces assertions est incorrecte ?

- a) La lumière Cherenkov est un rayonnement émis par des particules chargées relativistes.
- b) Les blazars émettent de la lumière seulement dans le domaine des rayons gamma.
- c) Les rayons gamma de très hautes énergies génèrent des cascades de particules chargées dans l'atmosphère.
- d) Les jets relativistes des blazars peuvent émettre des rayons gamma.

Ondes gravitationnelles

3- Les ondes gravitationnelles se propagent

- a) à la vitesse du son.
- b) à la vitesse de la lumière dans le vide.
- c) à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide.

Sursauts Gamma

- 1) Dans quel domaine de fréquence on observe l'émission rémanente des sursauts gamma?
- a. seulement en rayons gamma
  - b. dans tout le spectre électromagnétique
  - c. seulement en rayons X
  - d. seulement dans le visible

**Introduction à la Philosophie des sciences – Gauvain Leconte (1 points)**

Parmi les affirmations suivantes, lesquelles sont correctes ? (3 réponses valides. Si trois bonnes réponses : 1 point. Si deux bonnes réponses : 0,5 point. Sinon : 0 point.) Vous n'êtes pas obligé·e de justifier vos réponses mais vous pouvez le faire si vous souhaitez expliquer le raisonnement qui vous y a amené·e.

- A. D'après Karl Popper, ce qui distingue la connaissance scientifique des croyances non-scientifiques c'est que la connaissance scientifique est absolument vraie et définitive.
- B. D'après Karl Popper, ce qui distingue la connaissance scientifique des croyances non-scientifiques c'est que la connaissance scientifique est réfutable, faillible et en progrès.
- C. Si on déduit une prédiction P d'une hypothèse H et qu'ensuite on observe que P est vraie, cela prouve que H est vraie.
- D. Si on déduit une prédiction P d'une hypothèse H et qu'ensuite on observe que P est fausse, cela prouve que H est fausse.

- E. D'après Imre Lakatos, les hypothèses auxiliaires sont indispensables pour les scientifiques.
- F. D'après Imre Lakatos, il faut interdire l'usage de toute hypothèse auxiliaire aux scientifiques.