

ÉCOLES NORMALES SUPÉRIEURES
ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES
ÉCOLE DES MINES DE PARIS

CONCOURS D'ADMISSION SESSION 2023

FILIÈRE BCPST

COMPOSITION DE SCIENCES DE LA TERRE

Épreuve commune aux ENS de Lyon, Paris, Paris-Saclay, à l'ENPC et aux Mines Paris

Durée : 4 heures

L'utilisation des calculatrices est autorisée pour cette épreuve.

L'épreuve est composée de quatre parties indépendantes.
La qualité de la rédaction, la concision des réponses et le respect des consignes seront pris en compte dans l'évaluation.

1 Sismicité martienne

La planète Mars a d'abord été observée depuis la Terre avant l'envoi de satellites d'observation puis de modules fixes et robots équipés de moyens d'analyse variés. Avec la mission *InSight*, des instruments sismiques (SEIS) ont été déposés pour la première fois en novembre 2018 en station fixe. En juillet 2020, la mission Mars 2020 a déposé le rover *Perseverance* dont l'arrivée (entrée dans l'atmosphère, séparation du bouclier thermique, ...) a pu être suivie par les satellites en orbite autour de Mars.

1.1 Un seul sismomètre disponible

L'un des objectifs de la mission *InSight* est de déterminer la structure interne de Mars, et particulièrement la taille et l'état du noyau, par l'obtention de données sismiques. Ceci nécessite de pouvoir localiser les foyers des séismes.

1.1.1 L'observation d'une zone d'ombre sismique sur Terre a permis la mise en évidence d'un noyau (donc d'une limite noyau-manteau) de composition très différente de celle du manteau. Rappelez ce qu'est une « zone d'ombre », comment on la met en évidence et ce qui l'explique sismiquement. Quelle observation complémentaire a-t-elle permis de montrer que le noyau terrestre est, à cette limite, liquide ?

1.1.2 Mars est recouverte d'une croûte continue d'épaisseur variable permettant la propagation d'ondes de surface pouvant faire plus d'un tour complet de la planète pour les séismes les plus énergétiques attendus. SEIS comprend un appareillage permettant de détecter d'éventuelles ondes de surface et d'en déterminer la direction et le sens de provenance précis.

Expliquez très brièvement pourquoi la connaissance du seul temps d'arrivée d'une onde enregistrée sur un sismomètre ne permet pas de déterminer la distance au foyer, même en connaissant ou estimant la vitesse de propagation des ondes.

1.1.3 Une onde de surface est enregistrée à un instant t_1 sur SEIS. Plus tard, au temps t_2 , une onde de surface de même direction mais de sens opposé est enregistrée.

Donnez la relation entre t_1 , t_2 , la vitesse V des ondes de surface et la distance α , distance angulaire dite épacentrale, angle sismomètre-centre de Mars-foyer, et tout autre paramètre utile.

1.1.4 Un évènement sismique a généré des enregistrements d'ondes de surface de sens opposés arrivant à $t_1=837s$ et $t_2=5290s$.

Supposant une vitesse des ondes de surface de l'ordre de 4,1 km/s, calculez la distance épacentrale exprimée en degrés.

1.1.5 Pour ce même évènement, une troisième arrivée d'ondes de surface, de plus faible amplitude, de même direction et sens que la première, est enregistrée au temps $t_3=6229s$.

Montrez que cette information permet d'améliorer la connaissance de la propagation des ondes de surface et recalculez alors la distance épacentrale en intégrant cette donnée.

1.1.6 Mars étant en permanence « scrutée », proposez deux évènements possibles observables par les satellites d'observation (en temps réel ou non) et laissant une signature sismique enregistrable par SEIS, l'un d'origine anthropique, l'autre d'origine naturelle, évènements qui permettraient de valider ou consolider la méthode de localisation des épacentres sismiques.

1.2 Le manteau martien

SEIS est bien sûr aussi équipé de sismomètres sensibles aux ondes de volume qui « auscultent » l'intérieur de Mars. Les principaux types d'ondes enregistrées sont des ondes P directes (ondes de compression, transmises par les solides et les liquides), des ondes S directes (ondes de cisaillement ne se propageant pas

dans les liquides), et des ondes ScS (ondes de cisaillement réfléchies à une limite de contraste physique important, la limite manteau-noyau).

L'investigation sismique de l'intérieur de Mars part d'un modèle préalable que les données permettent ensuite d'affiner.

1.2.1 Utilisons les données sismiques du tableau 2, dans un modèle très simplifié de sismique réflexion, "à plat", en considérant que sismomètre et foyer sont en surface et que les ondes ont des trajets rectilignes. On notera d la distance sismomètre-foyer, h la longueur du trajet foyer-limite manteau-noyau, et H la profondeur de cette limite.

Proposez un schéma simple représentant ces paramètres.

1.2.2 En notant V_p et V_s les vitesses respectives des ondes P et S dans la partie superficielle de Mars, exprimez d en faisant apparaître la donnée $t_s - t_p$, puis exprimez h en fonction uniquement des données de vitesse et de différences de temps d'arrivée $t_s - t_p$ et $t_{scs} - t_p$.

Rappelez la relation liant d , h et H .

1.2.3 À partir des données des séismes s173a et s235b (Tableau 2), déterminez pour chacun les valeurs de d , h et H , en prenant les valeurs $V_p = 7,8$ km/s et $V_s = 4,5$ km/s.

1.2.4 En gardant les valeurs calculées mais en se plaçant dans une géométrie "courbe" (prenant en compte la sphéricité de Mars), la profondeur de la limite manteau-noyau est-elle alors supérieure ou inférieure à la valeur H calculée (un schéma simple explicatif sera le bienvenu) ?

1.2.5 L'accumulation de données aboutit à des valeurs variées de profondeur H . En réalité, la vitesse de propagation des ondes sismiques varie avec la profondeur.

Expliquez brièvement comment la détermination de distances épacentrales plus précises par d'autres études (par exemple grâce à des données d'ondes de surface) peuvent permettre d'améliorer le modèle de vitesses.

Expliquez comment l'accumulation d'estimations de la profondeur de la limite manteau-noyau permet, elle aussi, de contraindre le modèle de vitesse.

1.2.6 On aboutit à un profil de vitesses de propagation des ondes en profondeur sur Mars, à comparer à celui de la Terre (Figure 2).

Rappelez les principaux enseignements de ce profil de vitesses sur la structure de la Terre et l'état de son noyau.

Analysez le profil martien pour en tirer les principales informations sur la structure interne de Mars.

1.2.7 La dissociation de l'olivine en brighmanite et ferro-périclase au passage manteau supérieur / manteau inférieur a lieu sur Terre vers 670 km de profondeur. On se pose la question de l'existence ou non d'un manteau inférieur de type terrestre sur Mars.

En utilisant une estimation de la pression dans le manteau silicaté comme une pression lithostatique et en prenant comme valeur moyenne de densité de la couche silicatée terrestre de 4,6 et de 3,4 pour Mars, estimez, à l'aide des données disponibles, la pression à la base du manteau supérieur terrestre et à la base du manteau martien.

La pression étant le facteur principal de la dissociation de l'olivine, indiquez si les conditions sur Mars sont a priori favorables à la présence d'un manteau inférieur de type terrestre sur Mars.

Indiquez si les informations tirées de l'étude des profils de vitesses sismiques (Figure 2) vont dans le même sens.

1.3 Le noyau martien

1.3.1 Mars et la Terre ayant une composition globale et une évolution semblable, expliquez pourquoi, à priori, Mars se refroidit plus vite que la Terre depuis sa formation.

1.3.2 D'après la Figure 1, à quelle gamme de températures pourrait se situer le sommet du noyau martien ?

1.3.3 En se basant sur la courbe de Boehler (Figure 1), quelle est la température minimale / maximale au centre de Mars (pression de 40 GPa) selon qu'un noyau solide existe ou non ?

1.3.4 À partir des données précédemment obtenues et de celles du Tableau 1, comparez les masses volumiques moyennes des noyaux terrestre et martien (on considère juste une couche silicatée et un noyau pour chaque planète).

1.3.5 La composition du noyau détermine sa courbe de fusion. La température de fusion est supérieure pour du fer pur par rapport à un mélange fer-éléments "légers", comme le soufre par exemple. Pour comparer correctement les densités des noyaux, il faudrait faire une correction de pression (ramener les noyaux à une pression équivalente car la pression induit une compaction et donc une augmentation de la densité). Correction faite, la densité la plus forte déterminée dans le calcul précédent reste la plus forte.

Quelle est alors l'incidence de la détermination de la masse volumique du noyau martien sur la température du noyau martien ?

2 Aux limites des plaques

La Figure 3 est un extrait de la carte géologique du monde publiée en 2000 par la Commission de la carte géologique mondiale (CCGM) et l'UNESCO.

- 2.1 Sept points sont numérotés de 1 à 7, de gauche à droite. Pour chacun, donnez le nom de la plaque lithosphérique qui le porte.
- 2.2 Que représente la ligne horizontale en tiretés qui passe par exemple entre Miami (en Floride) et l'île de Cuba ?
- 2.3 Comment appelle-t-on une structure telle que celle présente au centre du cercle bleu noté A ?
- 2.4 À quel type de structure correspond la ligne noire surlignée de bleu et repérée par la lettre B ?
- 2.5 Que repère l'astérisque juste au Nord de la ville de Merida, au centre du cercle bleu noté C ?
- 2.6 Donnez le type de limite de plaque à l'Est et à l'Ouest de la plaque portant le point 5, en pointant caractéristiques, similitudes et différences.
- 2.7 La ville de Port-au-Prince (cadre bleu) et ses environs subissent régulièrement des séismes. D'après le contexte régional, quel est le type de mécanisme au foyer attendu ?

3 Ça pousse et ça casse

Supposons une région initialement peu déformée dans laquelle se met en place l'une des 3 configurations de contraintes locales suivantes :

- a) contrainte maximale (σ_1) de direction Nord-Sud, contrainte minimale (σ_3) verticale ;
 - b) contrainte maximale (σ_1) de direction Nord-Sud, contrainte minimale (σ_3) horizontale de direction Est-Ouest ;
 - c) contrainte intermédiaire (σ_2) de direction Nord-Sud et contrainte minimale (σ_3) de direction Est-Ouest.
- 3.1 Pour chaque configuration, à l'aide par exemple d'une carte et d'une coupe d'orientations judicieusement choisies, nommez et illustrez schématiquement la structure de déformation fragile (cassante) attendue.
 - 3.2 Pour la configuration a), à l'aide par exemple d'une carte et d'une coupe d'orientations judicieusement choisies, nommez et illustrez schématiquement la structure de déformation ductile attendue.

4 Eau et magmatisme

L'eau est omniprésente à la surface de la Terre et ne peut être négligée dans les processus et phénomènes magmatiques.

4.1 Laves en coussins

4.1.1 À partir des photographies des Figures 4 et 5, expliquez la morphologie "en coussins" des laves en expliquant le contexte et la différence par rapport aux grandes coulées de laves fluides de composition équivalente.

4.1.2 Proposez un schéma simple de la Figure 6, en se focalisant sur une partie favorable, permettant de comprendre l'orientation initiale de l'affleurement observé. On commentera brièvement le schéma et on notera le haut, le bas et la direction d'écoulement de la lave lors de sa mise en place.

4.1.3 À La Réunion, un plongeur apnéiste a observé la mise en place de laves en coussin dans l'Océan Indien. Expliquez le contexte de formation de ces pillows lavas en le comparant aux coussins précédents (différences, similitudes).

4.2 De l'eau sur le trajet du magma

4.2.1 Lors de sa remontée vers la surface, du magma peut rencontrer de l'eau (nappe phréatique, par exemple). On supposera l'eau initialement à 10°C et le magma à 900°C.

En supposant l'eau comme un liquide incompressible et la vapeur d'eau comme un gaz parfait, estimez l'expansion volumique d'une eau réchauffée et vaporisée par le magma mais en se plaçant dans des conditions de surface (pression ambiante d'1 kbar). On s'intéressera, pour cette estimation, au devenir d'un litre d'eau initialement à 10°C et vaporisé à 900°C.

4.2.2 Si l'eau est non pas libre en surface mais contenue dans un réservoir peu profond, quel est l'effet attendu de ce potentiel d'expansion ?

4.2.3 Pourquoi cet effet n'est-il pas observé à l'aplomb des rides océaniques ?

4.3. Des magmas divers à expliquer

4.3.1 Considérons le volcanisme des Antilles (Martinique, Guadeloupe, etc.). Exposez les caractéristiques observables de ce volcanisme, pour en proposer une explication possible replacée dans le contexte géodynamique local.

4.3.2 Comparez le volcanisme des Antilles au volcanisme récent des Andes centrales : similitudes, différences, explication possible replacée dans le contexte géodynamique local.

Illustrations et données

La norme, F , de la force d'attraction exercée sur une masse ponctuelle de masse m posée à la surface d'un corps de masse M et de rayon R est donnée par la formule : $F = (G.m.M) / R^2$, avec G la constante de gravitation universelle ($G = 6,6743.10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$).

	Masse (10^{24} kg)	Rayon (km)	Distance moyenne au Soleil (10^6 km)
Terre	5,97	6370	150
Mars	0,64	3390	228

Tableau 1 : Quelques caractéristiques de la Terre et de Mars.

	$t_s - t_p$	$t_{scs} - t_p$
s173a	167	511
s235b	173	512

Tableau 2 : Données temporelles pour deux séismes martiens.

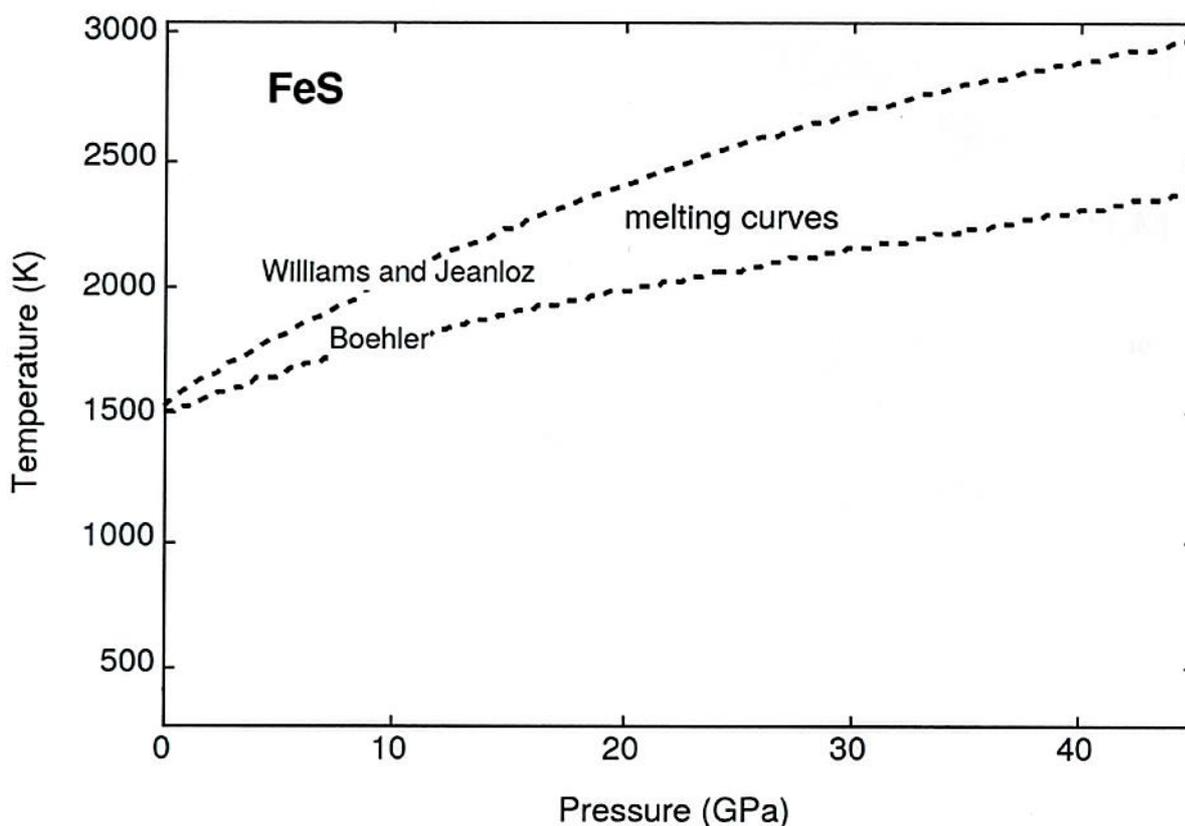
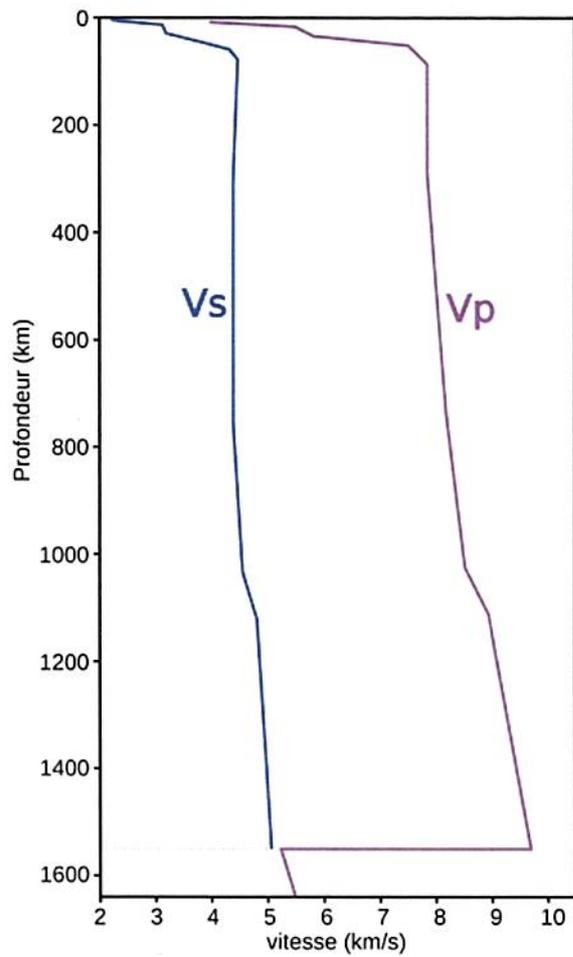
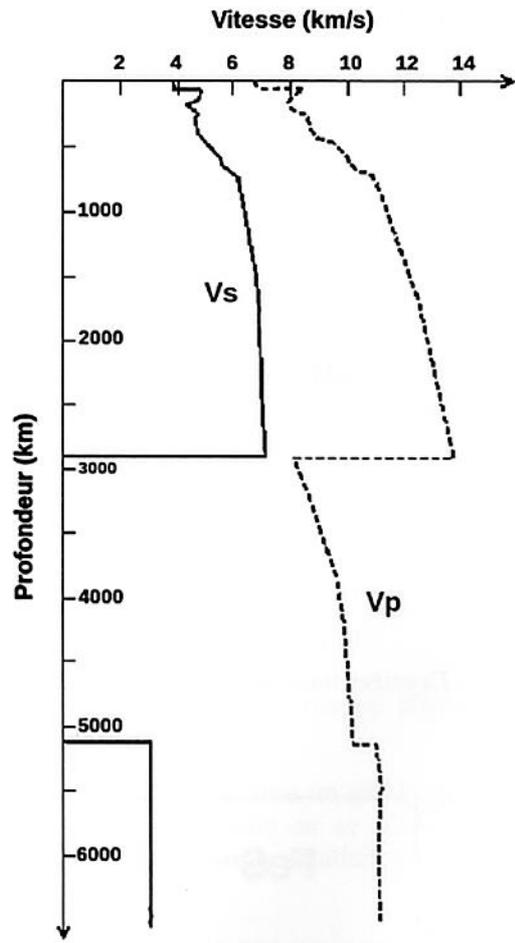


Figure 1. Courbes de fusion (*melting curves*) d'un mélange fer-soufre dans un diagramme température - pression, selon deux études sur le noyau des planètes.



Mars



Terre

Figure 2. Profils de vitesse des ondes sismiques avec la profondeur sur Mars et sur Terre

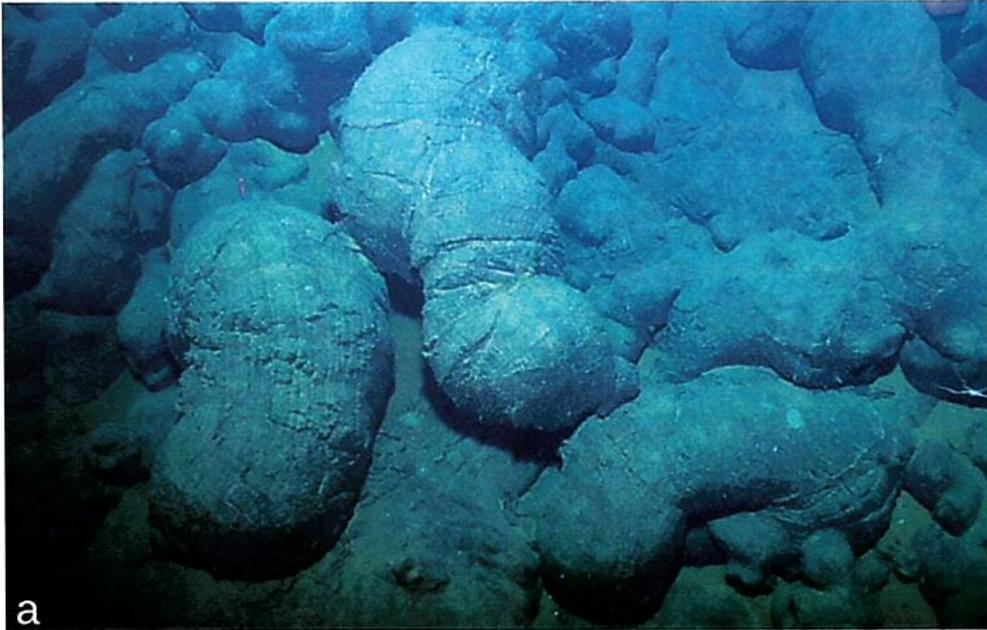


Figure 4 : Laves en coussins (*pillow lavas*), près de la ride Est-Pacifique.



Figure 5 : Laves en coussins (*pillow lavas*), ophiolite d'Oman.

Le personnage en haut à droite de la Figure 5 donne l'échelle. La taille des structures est similaire pour les figures 4, 5 et 6.



Figure 6 : Formation de laves en coussins (*pillow lavas*), ophiolite d'Oman.

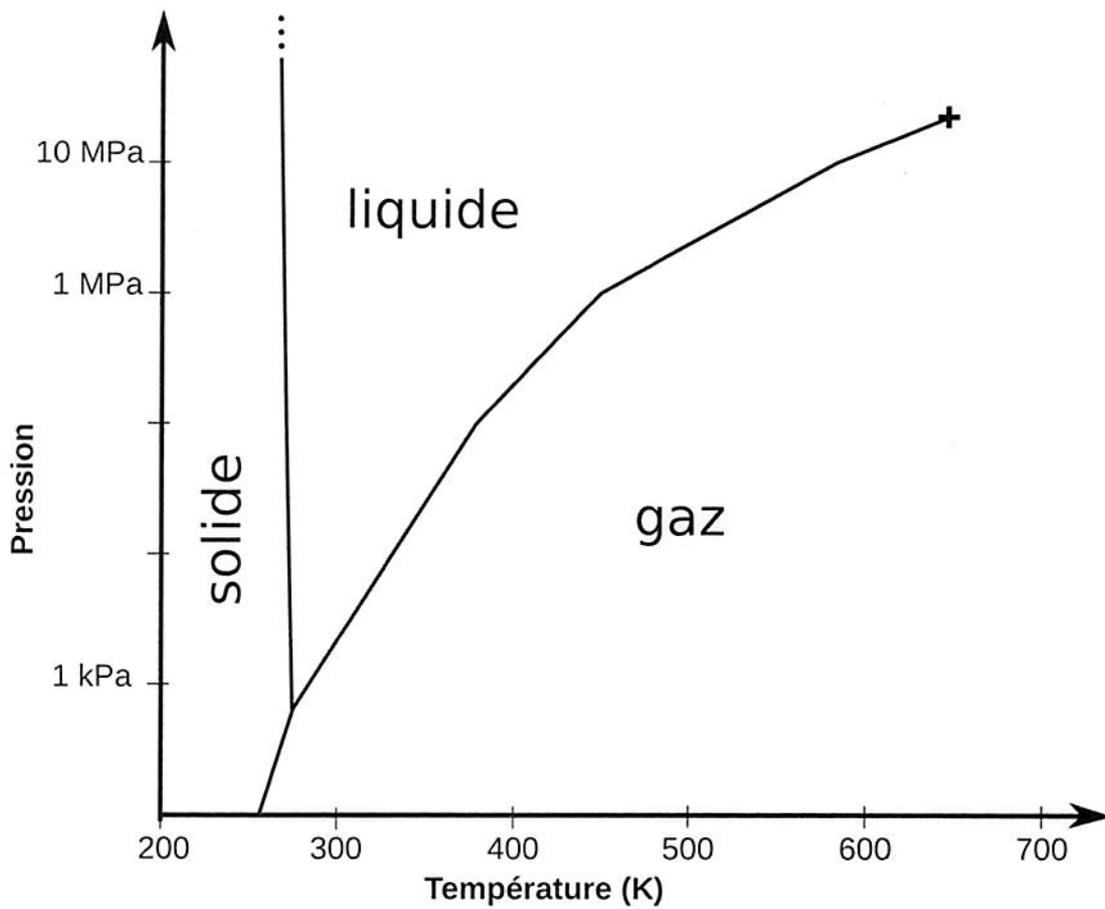


Figure 7 : Diagramme de phases de l'eau à basse pression. Point triple : $T= 273,16 \text{ K}$, $P= 611 \text{ Pa}$ - Point critique : $T= 647,3 \text{ K}$, $P= 22,11 \text{ MPa}$.

Fin du sujet