

12.19 / 20

Epreuve - Matière : 103-3262 Session : 2026

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

Le fer, un élément majeur des processus géologiques

Le fer est une ressource métallifère que l'être humain a utilisé de différentes façons au cours des temps. Par exemple, lors de la révolution industrielle, des chemins de fer de plusieurs centaines à milliers de kilomètres furent construits afin de permettre la circulation de trains à vapeur dans le but de faciliter le commerce et la mondialisation. Le fer est un élément chimique du tableau périodique des éléments. Son isotope stable est le $^{56}_{26}\text{Fe}$. Cela signifie qu'il possède 26 nucléons dont 13 neutrons et 13 protons. Le fer possède différentes propriétés tels que sa conductivité, sa densité, son coefficient de pontage ou encore sa température de condensation qui font de lui un élément important dans la compréhension de divers processus géologiques de notre Terre et des autres planètes.

Comment le fer est-il créé? Comment est-il réparti dans notre

1 / 20

système solaire? Comment ses diverses propriétés permettent-elles de comprendre les processus géologiques en lien avec l'histoire de la Terre et des autres planètes et le fonctionnement actuel de la Terre?

Pour répondre à cette problématique, nous venons dans une première partie le processus de formation du fer et sa répartition dans les planètes du système solaire. Ensuite, nous nous intéresserons dans une seconde partie aux liens qui unissent le fer et les noyaux planétaires. Enfin, nous terminerons en expliquant le rôle du fer dans les processus de formation de roches magmatiques et sédimentaires.

I. Le fer est formé par nucléosynthèse stellaire dont la température de condensation explique sa répartition dans le système solaire

A Le fer est formé par fusion nucléaire au cœur des étoiles.

Tous les jours, nous pouvons observer la lumière du Soleil. Celle-ci chauffe la surface de notre planète, on peut sentir les rayons solaires chauffer notre peau lorsqu'elle y est exposée. La chaleur étant une forme d'énergie, on en déduit que le Soleil émet de l'énergie dans l'espace sous forme de radiations. C'est ces mêmes radiations énergétiques qui permettent aux organismes photosynthétiques de se développer et à l'Homme de produire de l'électricité via les panneaux solaires. Le soleil est donc une source d'énergie. On comprend pourquoi il est une source

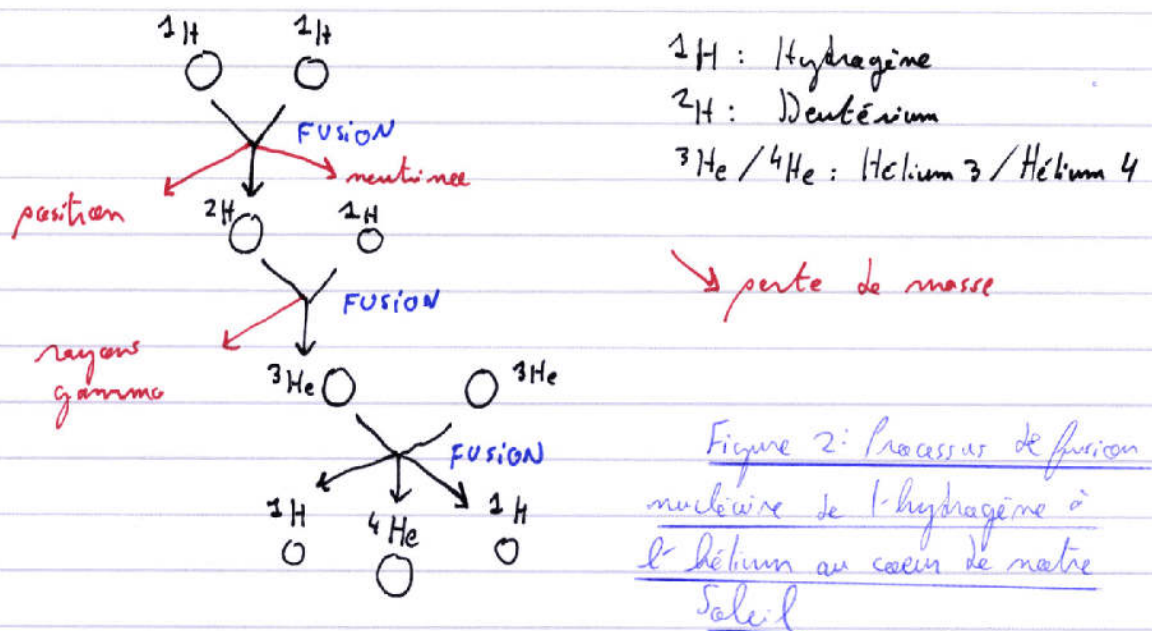
d'énergie, il faut utiliser la célèbre relation d'Einstein (Figure 1).

$$E = \Delta m c^2$$

énergie (en Joules) différentiel de masse célérité de la lumière (300 000 km/s)

Figure 1: Équation de l'énergie d'Einstein

Il y a donc un différentiel de masse créé au sein du Soleil. Celui-ci s'explique par la fusion nucléaire (Figure 2)



La masse finale n'est pas tout à fait équivalente à la masse initiale, ce qui explique la libération d'énergie. Dans certaines étoiles, les atomes fusionnent jusqu'au ^{26}Fe .

Ainsi, le fer est formé par fusion nucléaire au sein des étoiles.

B. La température de condensation élevée du fer explique sa répartition au sein de notre système solaire.

Si on chauffe le fer à pression atmosphérique (1 atm), on se rend compte qu'il passe sans former gazeuse à température très élevée ($> 1100^\circ\text{K}$). Sa température de condensation est donc très élevée, c'est à dire la

température à partir de laquelle il passe d'une forme gazeuse à une forme liquide. Il peut condenser à haute température, ce qui explique que les planètes proches du Soleil, les planètes internes, telluriques, contiennent plus de Fer que les planètes externes gazeuses. Si on effectue une spectrophotométrie pour analyser les longueurs d'onde émises par les planètes gazeuses (figure 3), on se rend compte qu'elles ont une enveloppe gazeuse majoritairement d'hélium et d'hydrogène qui eux ont au contraire une température de condensation basse, ce qui ne leur permet pas de condenser proche du Soleil.

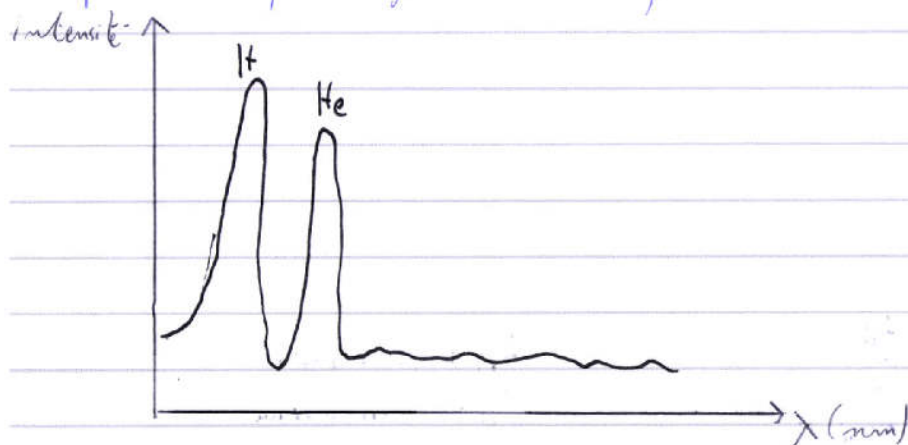
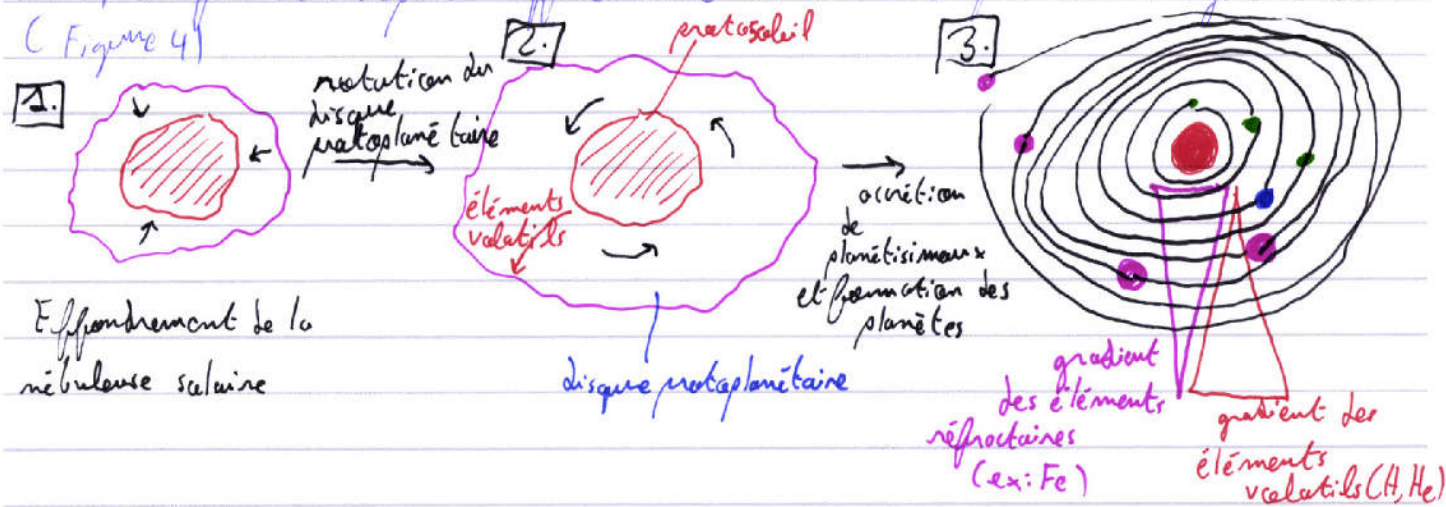


Figure 3: Analyse des longueurs d'onde émises par les planètes gazeuses avec un spectrophotomètre

L'orbite elliptique des planètes dépend de leur masse, leur rayon, la masse du soleil et de la constante de gravitation universelle. Il est donc possible en observant l'orbite et les rayons avec un télescope de déduire la masse des planètes. Or l'H et l'He sont trop légers pour que la masse corresponde au calcul. On en déduit qu'il y a donc un cœur plus dense au centre des planètes gazeuses dont une partie est du fer. Le même raisonnement avec le spectrophotomètre avec les planètes telluriques nous permet de déduire qu'elles possèdent un cœur riche en fer.

Ainsi, le fer s'est réparti différemment au cours de la formation du système solaire (Figure 4)



Ordre des planètes depuis le centre du Soleil : Mercure / Vénus / Terre / Mars / Jupiter / Saturne / Uranus / Neptune

planètes internes, telluriques

planètes externes, gazeuses

12.19 / 20

Epreuve - Matière : 103-3762 Session : 2026

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

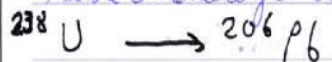
Figure 4: Formation du système solaire

Maintenant que nous avons vu comment le fer s'est formé et réparti dans le système solaire, nous allons discuter de sa répartition intraplanétaire.

II. La densité du fer est à l'origine de la différenciation noyau-manteau des planètes lisses que sa conductivité et son diagramme de phase expliquent la formation du champ magnétique terrestre

A. Le noyau terrestre est composé de fer liquide et de Fe solide

Les chondrites sont des météorites que l'on peut trouver à la surface de la Terre. On peut dater les inclusions calcium-aluminium des chondrites carbonées à l'aide de la radiochronologie Uranium-plomb. (Figure 1)

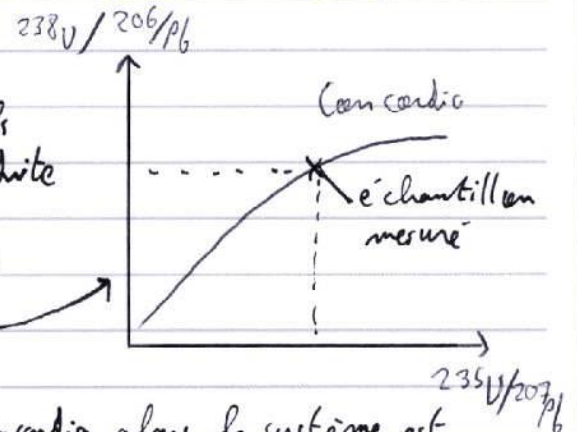


désintégration
radioactive

élément
père
radioactif $\longrightarrow$ élément
fils
radiogénique

1. Mesure les éléments père et fils
sur une inclusion calcique de chondrite

2. Placement du point sur le
graphique



3. Si le point tombe sur la Concordia, alors le système est

resté fermé et $\left(\frac{P}{F}\right) = e^{\lambda t} - 1$
mesurés $\rightarrow$ obtention de l'âge

5 / 20

Figure 1: Schéma explicatif de la radiochronologie Uranium - Plomb

L'âge des chondrites est de 4,56 Ga, c'est l'âge de formation du système solaire. Ainsi, les chondrites représentent la composition du matériel primitif. Si on regarde la composition en Fer des chondrites et de la croûte + manteau, on se rend compte qu'il y a bien plus de Fer dans les chondrites que dans le manteau + croûtes. Ainsi, le Fer s'est concentré dans le noyau. On connaît les épaisseurs des enveloppes terrestres grâce à la vitesse des ondes sismiques et des zones d'ombres (202° à 745° de l'épicentre du séisme). ~~Alors il est possible de calculer~~ On connaît également la densité des enveloppes terrestres grâce à la sismologie (les ondes traversent plus vite les milieux denses). Ainsi, on connaît la masse des enveloppes terrestres et on peut donc calculer le % de Fer comparant le noyau terrestre. On trouve ainsi qu'il est composé à 80% de Fer. (Figure 2)

$$[Fe]_N \times \frac{1}{3} M_N + [Fe]_m \times \frac{2}{3} M_m = [Fe]_T \times M_T$$

M: masse
 m: manteau
 N: noyau
 T: terre

$$\Rightarrow [Fe]_N = [Fe]_T \times M_T - [Fe]_m \times \frac{2}{3} M_m$$

$$\frac{1}{3} M_N$$

$$= 80\%$$

NB: on simplifie la masse de la Terre en $\frac{1}{3}$ pour le noyau et

$\frac{2}{3}$ pour le manteau

la sismologie qui a permis d'établir

Figure 2: Calcul de la concentration de Fer dans le noyau.

De plus, on connaît la vitesse des ondes P dans le noyau avec le modèle PREM. Byrch a alors fait une expérience en utilisant une cellule à enclume de diamant pour soumettre du fer à la pression et température du noyau, puis a regardé la vitesse des ondes sismiques dans le fer. (Figure 3) La vitesse des ondes sismiques dans le fer est très proche de la vitesse des ondes dans le noyau. Cela est un autre indice de la présence importante de fer dans le noyau.

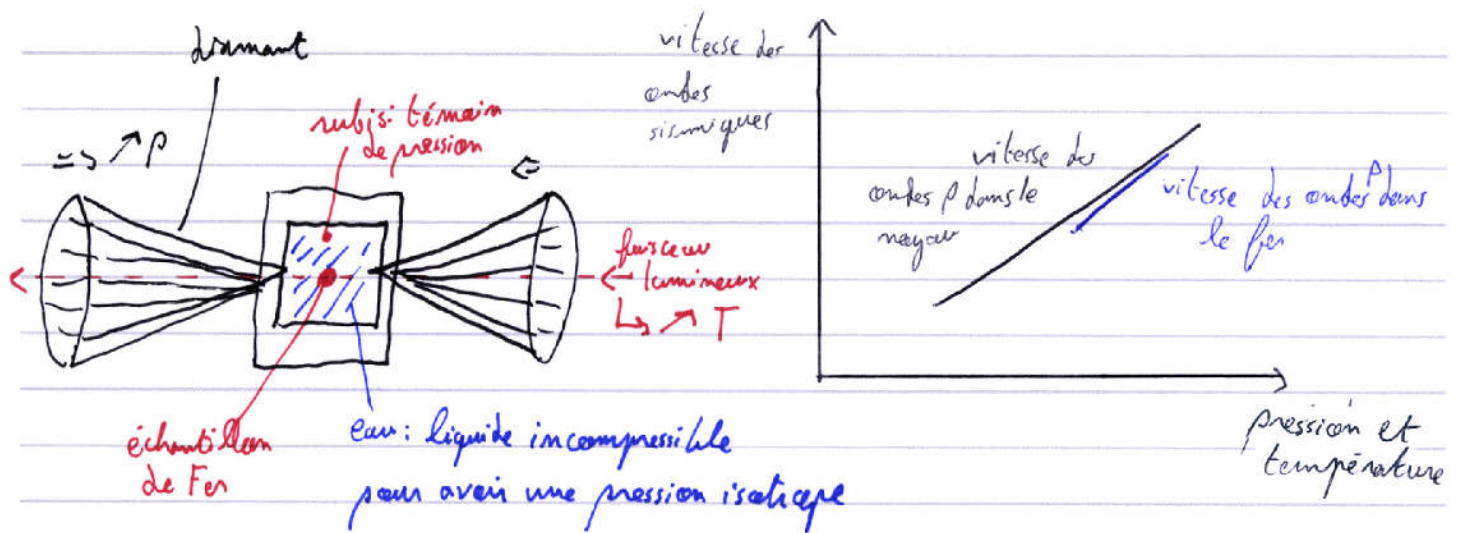
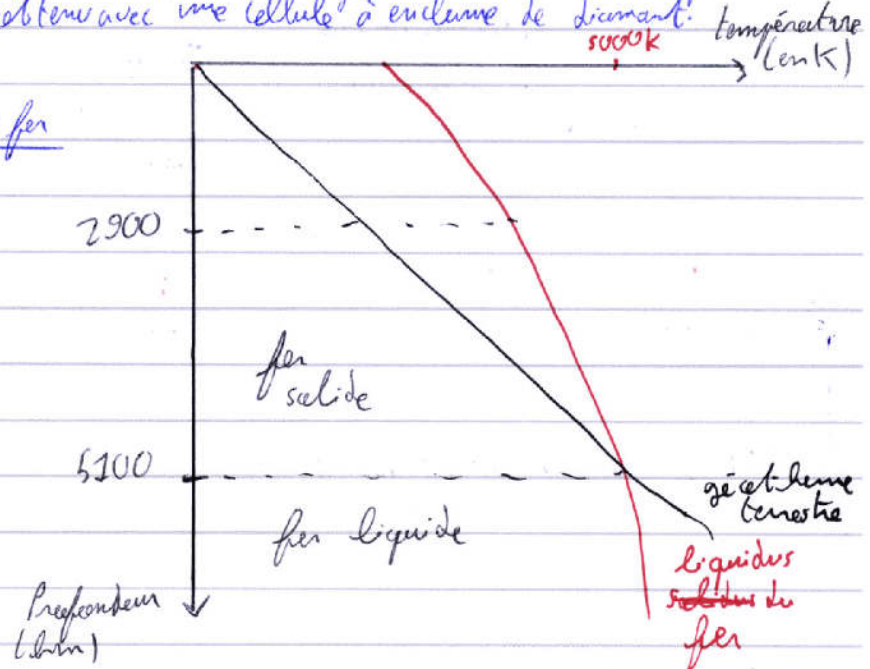


Figure 3: Schéma de la cellule à enclume de diamant et résultats de l'expérience de Pynch

De plus, on sait que le noyau interne est solide tandis que l'externe est liquide car les ondes S ne se propagent pas dans les liquides et après 142° (par rapport à l'épicentre du séisme) il n'y a que des ondes P qui réapparaissent. Le modèle PREM nous indique un noyau externe liquide à partir de 2900 km puis une croûte à partir de 5200 km de profondeur. Cela correspond bien au diagramme de phase du fer (Figure 4) obtenu avec une cellule à enclume de diamant.

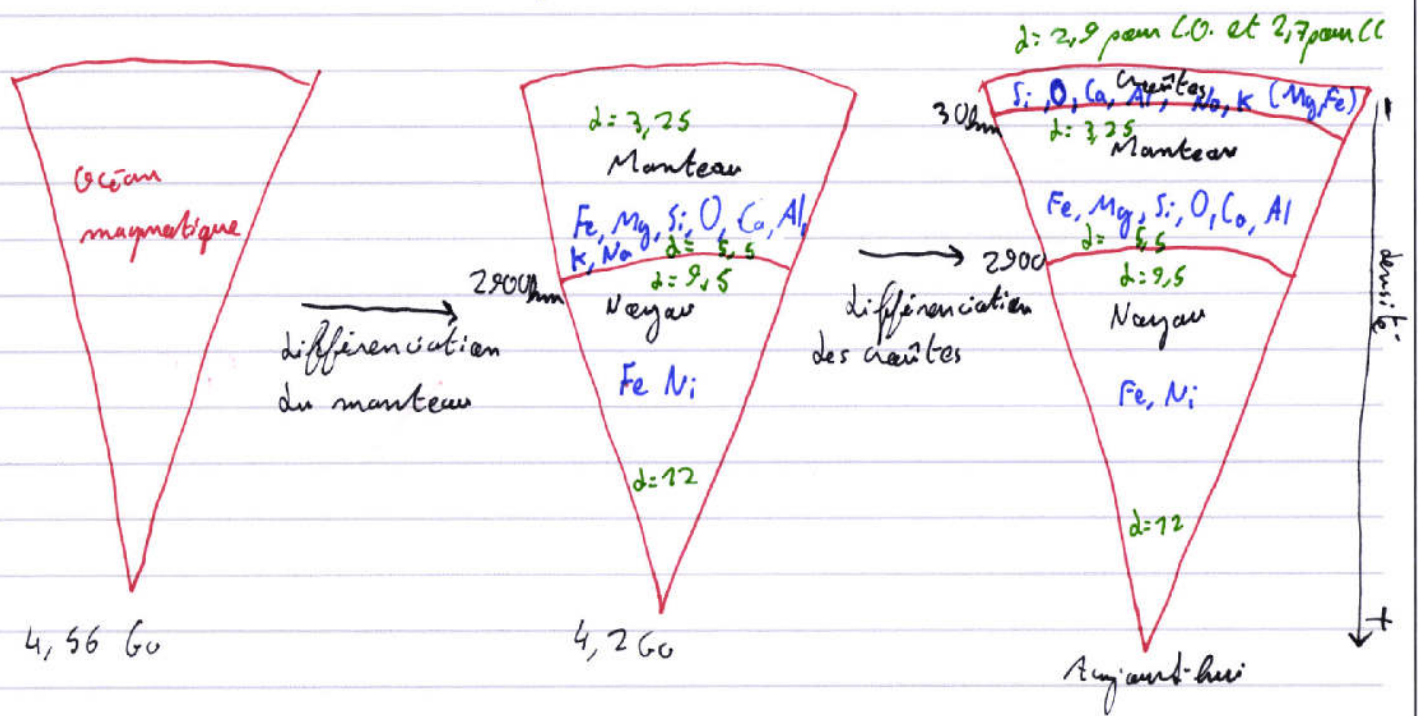
Figure 4: Diagramme de phase du fer



Tous ces arguments nous ont permis de déterminer la richesse du noyau terrestre en fer, nous allons maintenant voir pourquoi il s'est concentré dans le noyau.

B. La densité élevée du fer est la cause de sa concentration plus importante dans le noyau lors de la différenciation mantellique des planètes.

Si on mesure la densité du Fer et qu'on la compare à celle d'autres éléments tels que la silice SiO_2 , le potassium, le sodium, on se rend compte qu'elle est bien + élevée. Les éléments les plus denses ont toujours tendance à couler ou fonder. Par exemple, si on essaye de mélanger de l'huile avec de l'eau, les 2 phases vont se séparer puisque l'huile est hydrophobe et c'est toujours l'eau qui sera en dessous et l'huile au dessus car $\rho_{\text{eau}} > \rho_{\text{huile}}$. C'est le même principe pour le fer. Lors de l'Hadaen, il y a 4,56 Ga et ~~4,6 Ga~~, la Terre était un océan de magma. Son gradient thermique était bien plus élevé qu'aujourd'hui et donc la viscosité du magma était bien plus faible permettant ainsi des mouvements de convection rapide. Le manteau s'est différencié du noyau au cours de l'Hadaen en lien avec le refroidissement de la planète, ce qui entraîne le fer dans le noyau (figure 5)



Nb: Le schéma n'est pas à l'échelle

Figure 5: Différenciation du manteau terrestre

Le même processus de différenciation mantellique a lieu dans les autres planètes, cela explique la présence de noyaux riches en Fer pour les planètes telluriques.

C. La conductivité du fer et son caractère liquide dans le noyau externe génère le champ magnétique terrestre.

12.19 / 20

Epreuve - Matière : 103-3762 Session : 2026

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

Les lois de Maxwell nous indiquent que:

- la variation d'un champ électrique au cours du temps génère un champ magnétique (effet de l'électroaimant)
- la variation d'un champ magnétique au cours du temps génère un champ électrique (mis en évidence par la lampe dynamique)

Un moyen externe liquide est peu visqueux et augmente la rapidité des mouvements de convection (Figure 6)

$$Ra = \frac{\text{coefficient de dilatation thermique} \times \text{différence de température sur une distance } d \times \text{masse volumique}}{\text{viscosité} \times \text{diffusivité thermique}}$$

Nombre de Rayleigh

Figure 6: Nombre de Rayleigh

Le moyen externe est refroidi à sa limite moyen-manteau du côté mercuriel de cratères volcaniques subduits et réchauffé à son interface moyen externe-moyen interne par la cristallisation de la terre. De plus, la cristallisation de la graine libère des éléments chimiques légers dans le moyen externe, renforçant ainsi les mouvements de convection. On parle ainsi de convection thermochimique du moyen (Figure 7)

9. / 20

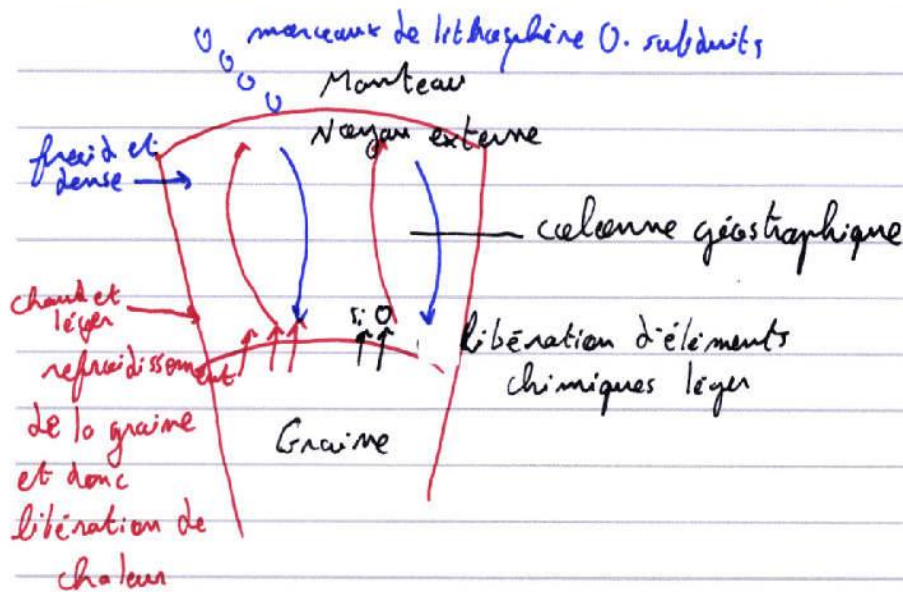


Figure 7: Schéma
représentant la convection
thermochimique du
manteau

Le fer étant un élément conducteur, il y a donc les mouvements d'un liquide conducteur et donc cela génère un champ magnétique (effet électromagnétique). Le champ magnétique varie dans le temps de la convection du noyau, ce qui génère un champ électrique. Le champ magnétique terrestre est ainsi auto-entretenu. On parle de magnétohydrodynamique.

Le champ magnétique terrestre protège notre planète des vents solaires et favorise l'apparition de la vie sur Terre.

La plupart des autres planètes ne possèdent pas de champ magnétique du système solaire aussi fort que celui de la Terre car leur noyau ne convecte pas autant.

III. Le fer est à l'origine de processus de formation de roches magmatiques et sédimentaires

A. Le coefficient de partage du fer explique le processus de cristallisation fractionnée à l'origine de la genèse des roches magmatiques mantelliques et crustales

Le coefficient de partage d'un élément renseigne sur sa compatibilité avec la phase minérale (Figure 1)

$$K_D = \frac{C_{\text{min}}}{C_{\text{liq}}}$$

coefficient de partage

concentration de l'élément dans le minéral

concentration de ... dans le liquide magmatique

→ $K_D > 1$ → éléments à comportement compatible
 → $K_D < 1$ → éléments à comportement incompatible

Figure 1: Schéma explicatif du coefficient de partage

Si on fait fondre expérimentalement une roche, qu'on sépare le liquide du solide non fondu, puis qu'on laisse cristalliser le liquide. Et qu'ensuite on analyse les éléments majeurs par fluorescence X des 2 échantillons. On se rend compte que la [Fe] est moins importante dans la roche nouvellement cristallisée. Cela signifie que le fer est resté préférentiellement dans la phase minérale, il a donc un $K_D > 1$. Le fer se comporte ainsi comme un élément compatible.

Cela signifie également que les minéraux contenant du fer et des éléments compatibles sont les premiers à cristalliser lors de la cristallisation fractionnée dans une chambre magmatique. (Figure 2)

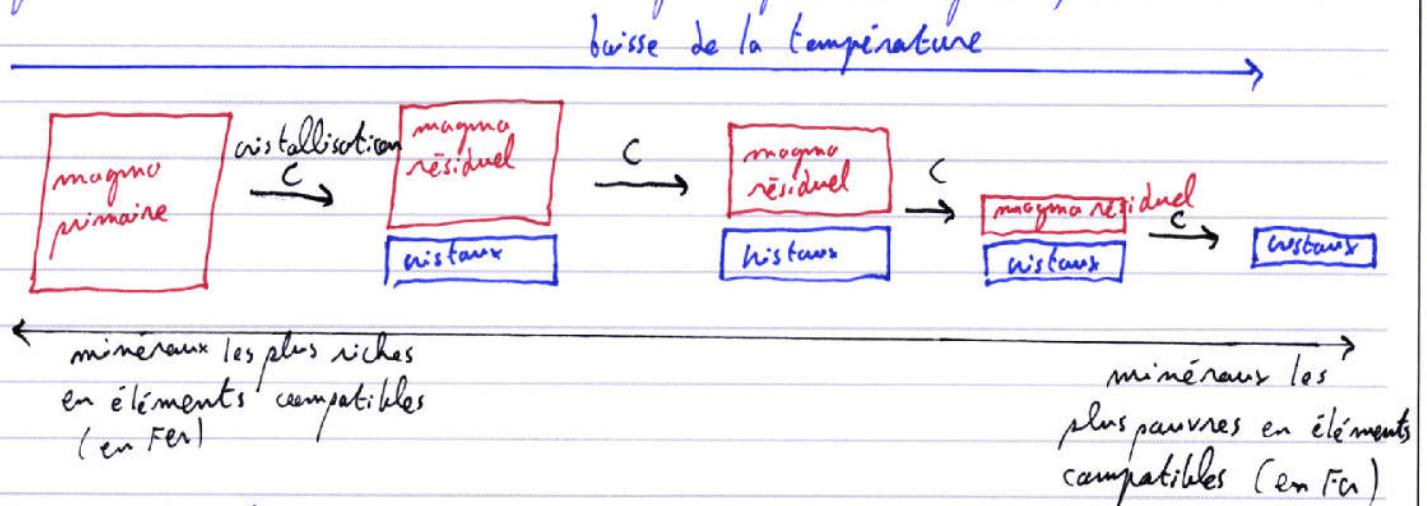


Figure 2: Schéma du processus de cristallisation fractionnée

Ainsi, si on analyse les éléments majeurs d'une roche et ~~sa~~ via fluorescence X et sa composition minéralogique via un microscope polarisant analysant (Figure 3), on remarque que les roches du manteau sont plus riches en

	Roche	enveloppe terrestre de la roche magmatique	Minéralogie				
FELSIQUE	Granite Rhyolite	croûte continentale	quartz SiO_2 micas K, Al, Si, O feldspath Ca, Na, K, Si, O	Temps en FeO, MgO	Temps en $\text{SiO}_2, \text{Na}_2\text{O, K}_2\text{O}$ différenciation de la roche		
	Gabbro basalte	croûte océanique	olivine pyroxènes plagioclase Ca, Na, Si, O				
ULTRAMAFIQUE	Péridotite	manteau	olivine $[\text{Mg, Fe}]_2\text{SiO}_4$ clinopyroxène $[\text{Mg, Fe, Ca}]_2\text{Si}_2\text{O}_6$ orthopyroxène $[\text{Mg, Fe}]_2\text{Si}_2\text{O}_6$				

Roche volcanique

Roche plutonique

Figure 3 : Compositions chimiques et minéralogiques de différentes roches de différentes enveloppes terrestres

par que les roches de la C.O., elles-mêmes plus riches en Fe que les roches de la C.C. Cela s'explique par les processus de cristallisation fractionnée et de différenciation magmatique mentionnés précédemment.

À noter que l'olivine est une solution solide et que le pôle ferreux correspond à la fayalite Fe_2SiO_4

Ainsi, le fer est réparti différemment dans les enveloppes terrestres car son K_D positif intervient dans les processus de cristallisation fractionnée et de différenciation magmatique. Il existe ^{aussi} du magmatisme sur les autres planètes telluriques comme Mars.

B. Le fer est à l'origine du processus de "diagenèse" de certaines roches sédimentaires et la latérisation du sol.

2/n

1. Le rapport ~~de~~ du Fe^{3+} explique la latérisation du sol.

Le Fe^{3+} est un hydrolysat (Figure 4), il n'est donc pas très soluble, cela explique la formation de cuirasse latéritique par lessivage des ions solubles comme Na^+ , K^+ (Figure 5)

12.19 / 20

Epreuve - Matière : 103-3762 Session : 2026

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

Figure 4: Diagramme de
Goldschmidt

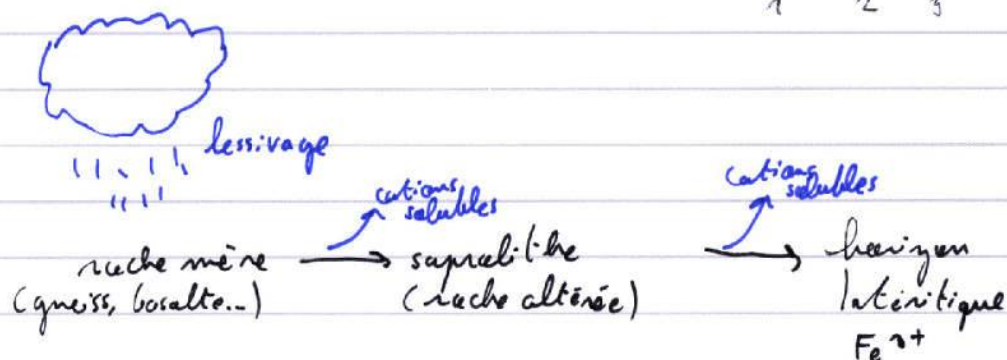
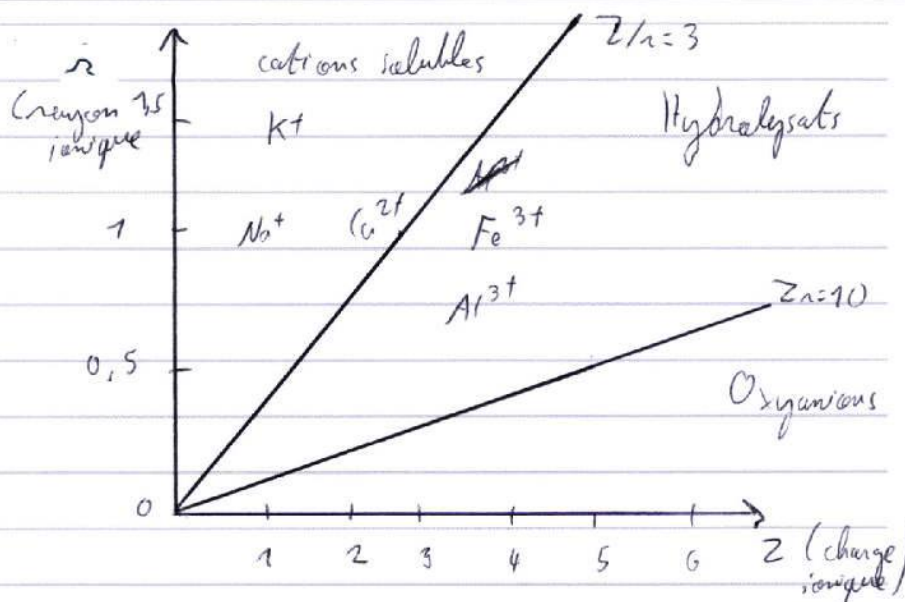


Figure 5: Schéma du processus de latérisation

On retrouve donc des roches plus riches en Fe à l'affleurement aux endroits où il y a beaucoup de lessivage, dans les zones à climat tropical.

13 / 20

2. Le fer formait des gisements de fer rubanés à l'archéen

Le fer sous forme d'ion existe sous la forme Fe^{3+} et Fe^{2+} .
Lors de l'archéen, il y avait du fer qui réagissait avec de l' O_2 .



L'oxydation du fer formait des gisements de fer rubané lors de l'archéen.

12.19 / 20

Epreuve - Matière : 103 - 376.2 Session : 2026

CONSIGNES

- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un stylo à encre foncée (bleue ou noire) et ne pas utiliser de stylo plume à encre claire.
- N'effectuer aucun collage ou découpage de sujets ou de feuillet officiel.
- Numéroté chaque PAGE (cadre en bas à droite de la page) sur le nombre total de pages que comporte la copie (y compris les pages vierges).
- Placer les feuilles dans le bon sens et dans l'ordre de numérotation des pages.

Pour conclure cette synthèse, le fer est un élément chimique
formé par fusion nucléaire au cœur des étoiles. Du à sa forte densité, On le retrouve en grande quantité dans
le noyau des planètes telluriques et un peu également dans ceux des planètes gazeuses. Sa
conductivité en tant que métal et le fait qu'il soit liquide dans le noyau externe
permettent la formation du champ magnétique terrestre. Son coefficient de pontage
élevé permet d'expliquer le processus de cristallisation fractionnée à l'origine de la
genèse de roches magmatiques mantelliques et crustales. Le fer existe sous forme
d'ions Fe^{3+} dont le rapport rayon ionique / charge explique la formation le
processus de latérisation. Ainsi, le fer est présent dans différentes enveloppes terrestres
que ce soit le noyau, le manteau ou les croûtes, avec un gradient: la proportion de
fer est plus élevée au cœur de la Terre qu'à sa surface.

Afin d'enrichir la réflexion, il serait intéressant de

17 / 20

Concours section : AGREG ext - SVT et Univ.

Epreuve matière : Connaissances générales secteur C

N° Anonymat : N260NAT1031353

Nombre de pages : 20

12.19 / 20

Discuter de la répartition du fer dans la Lune. En effet, le fer n'est pas uniquement présent dans les planètes, il l'est aussi dans les satellites naturels orbitant autour des planètes. On retrouve une majorité de fer au sein du noyau lunaire, mais on retrouve également dans les minéraux ferromagnésiens des basaltes lunaires situés dans les mers de Lune.

18. / 20

