

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.

Le fer, un élément majeur des processus géologiques

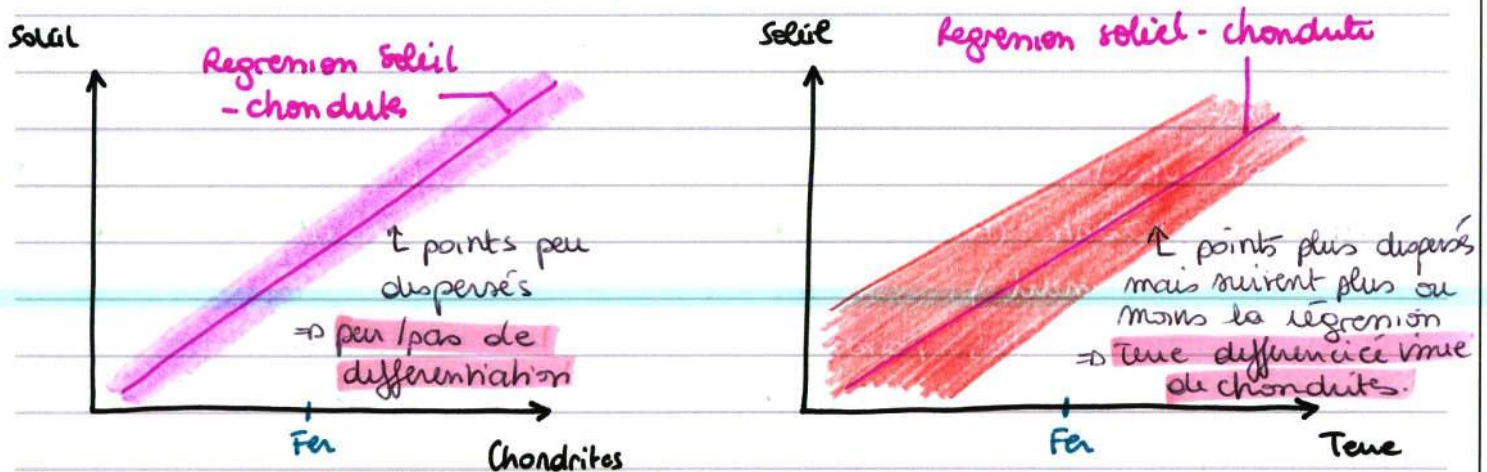
Le fer est un élément omniprésent dans les sociétés humaines, utilisé essentiellement pour sa résistance (constructions) ou pour ses propriétés magnétiques (aimant). Cet élément, de nombre atomique 26, classé comme **métal** dans la classification périodique est présent en **grande quantité sur Terre** : il est le **4^e élément le plus abondant** (après l'oxygène, le silicium et le magnésium). Il est essentiellement présent dans le **mantau terrestre** (**Péridotite** $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$) et dans le **noyau** (**fer et nickel** essentiellement). Comme expliqué précédemment, cet élément possède des propriétés notables telles que l'**enroulement d'une aimantation** dans certains contextes, une **densité importante** (supérieure à celles des roches de l'enveloppe terrestre, souvent proches de 3). Nous chercherons alors à comprendre en quoi **un unique élément et ses propriétés intrinsèques** permettent d'étudier les **processus géologiques internes et externes** (au sein de chaque enveloppe) de la Terre depuis sa formation jusqu'à aujourd'hui. Après avoir montré que le fer permet d'expliquer la **chronologie et l'origine des enveloppes d'une planète** telle que la Terre, nous étudierons l'importance du fer dans la compréhension de la **dynamique externe et interne de la Terre au cours du temps**.

I - le Fe permet de comprendre l'origine et la chronologie de la formation des planètes.

A. le Fe des planètes est issu de l'accrétion de chondrites

La réalisation de régression sur la composition du Soleil, de la Terre et de chondrites trouvées sur Terre permet de comprendre l'origine de la matière sur Terre (figure 1). Rappelons qu'une chondrite est une météorite **peu / pas différenciée** (n'ayant pas subi de processus géologiques modifiant sa composition) généralement composée de **minéraux silicatés** et de **métaux** (bien qu'il existe une diversité de chondrites).

Fig 1 : la Terre est issue de l'accrétion de chondrites



Chaque axe représente l'abondance ordonnée pour chaque élément de la classification périodique

Ces régressions montrent que la Terre est issue de l'accrétion de chondrites contenant du fer. Plus précisément, ces chondrites ferreuses sont par exemple des chondrites à **entstatite**, ou des **sidérites** (admis comme de composition proche au noyau terrestre).

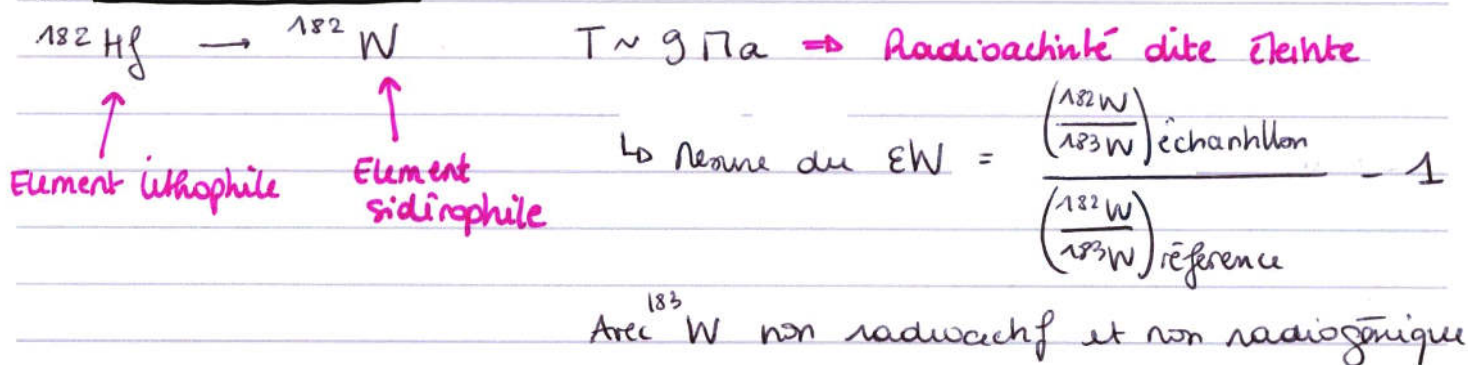
B. les propriétés du fn permettent de comprendre et dater la différenciation des enveloppes terrestres.

L'analyse expérimentale (de fusion notamment) permet de montrer que certains éléments peuvent préférentiellement s'associer (et ségréger) aux métaux (plus stable thermodynamiquement). Ces éléments sont qualifiés de **sidérophiles** (comme le tungstène W).

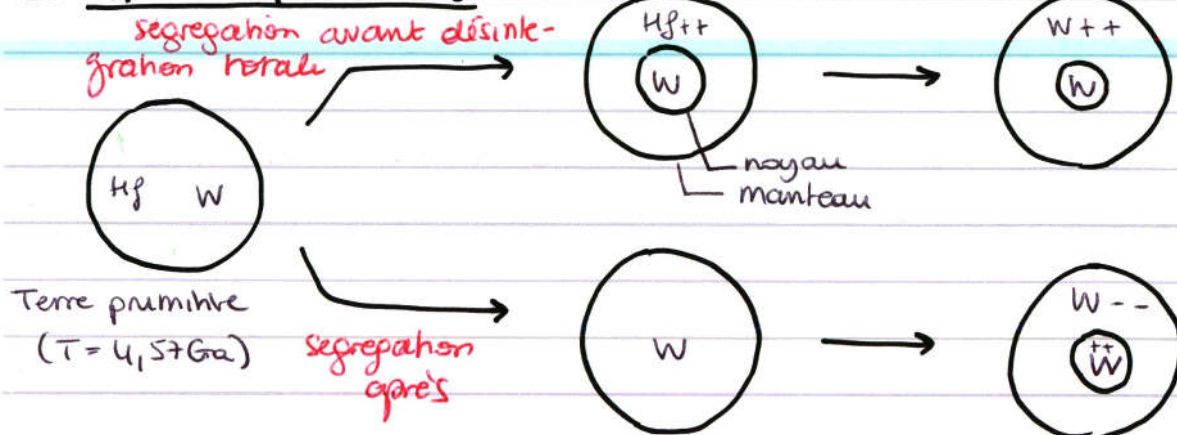
En supposant que la formation de la Terre est datée à environ 4,57 Ga (par datation Pb-Pb d'inclusions refractaires de chondrites), et en utilisant le **couple Hafnium 182 et tungstène 182**, il est possible d'étudier la séparation manteau-noyau (figure 2) et sa chronologie.

fig2: le noyau s'est formé très précocement après l'accrétion terrestre

[a] Radiochronomètre



[b] Hypothèses préliminaires



[c] Résultats

On mesure $\text{EW}(\text{manteau}) > \text{EW}(\text{chondrite})$

$\hookrightarrow$ cela suggère donc que le noyau et le manteau se sont séparés avant désintégration totale du ^{182}Hf , soit de façon très précoce car $T = 9 \text{ Ga}$ (vers 50 Ga).

Des **modélisations analogiques** (avec du gallium et du sirop de glucose pour modéliser le noyau liquide (dont fer) et le manteau liquide) ont proposé la **mise en place du noyau par coulée frontale de gouttelettes métalliques** suivie de **diapirs inverses** amenant le métal liquide au cœur de la Terre, dû à la **différence de densité fer - manteau**.

Bilan I Le fer permet donc de **comprendre l'origine des planètes**. Nous nous sommes intéressés à la Terre mais d'autres corps tels que **Mars sont assez similaires** (noyau solide et manteau silicaté) et leur formation peut être déduite des mêmes mécanismes. Noter aussi que la **proximité au soleil explique la condensation de silicates et métaux** (contre des glaces pour les géantes gazeuses). Quid du comportement du fer et de son importance dans la **géodynamique interne** ?

II. le fer sur Terre renseigne sur la dynamique interne terrestre.

A. le fer contenu dans certains minéraux enregistre le champ magnétique terrestre.

a- le noyau terrestre et d'origine du champ magnétique menant sur la planète

Un champ magnétique est caractérisé par deux vecteurs : l'**inclinaison** (par rapport à l'horizontale) et la **déclinaison** (par rapport au nord magnétique). Ceux-ci permettent la caractérisation du champ magnétique terrestre.

Au premier ordre, le champ magnétique peut être modélisé par un **dipôle** (figure 3a) : ce modèle décrit environ 90% du champ réel. À partir de l'observation de **dipôle induit** (circulation d'un courant dans un fil circulaire générant un champ magnétique) il a été proposé que le champ terrestre résulte de **mouvements convectifs au sein du noyau externe liquide** (figure 3b). Le modèle suppose l'existence d'un champ magnétique externe, induisant des mouvements dans le noyau qui génèrent à leur tour un champ magnétique **permettant l'auto-entretien de la géodynamo**. Le champ externe reste à déterminer. La **présence de métaux (dont fer) est nécessaire à cette géodynamo**.

Epreuve - Matière : 103-3762

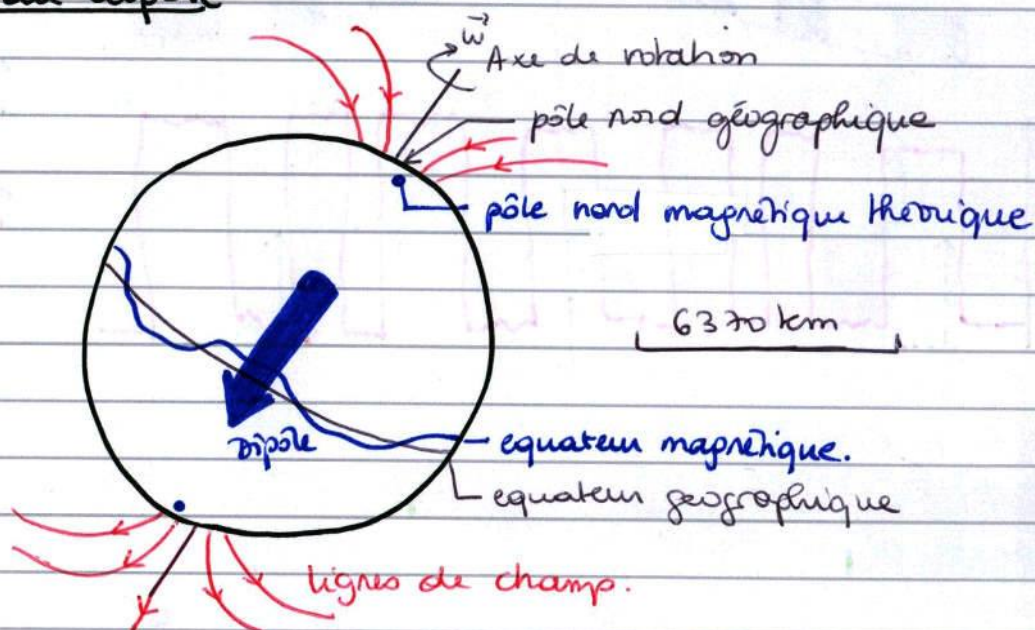
Session : 2026

CONSIGNES

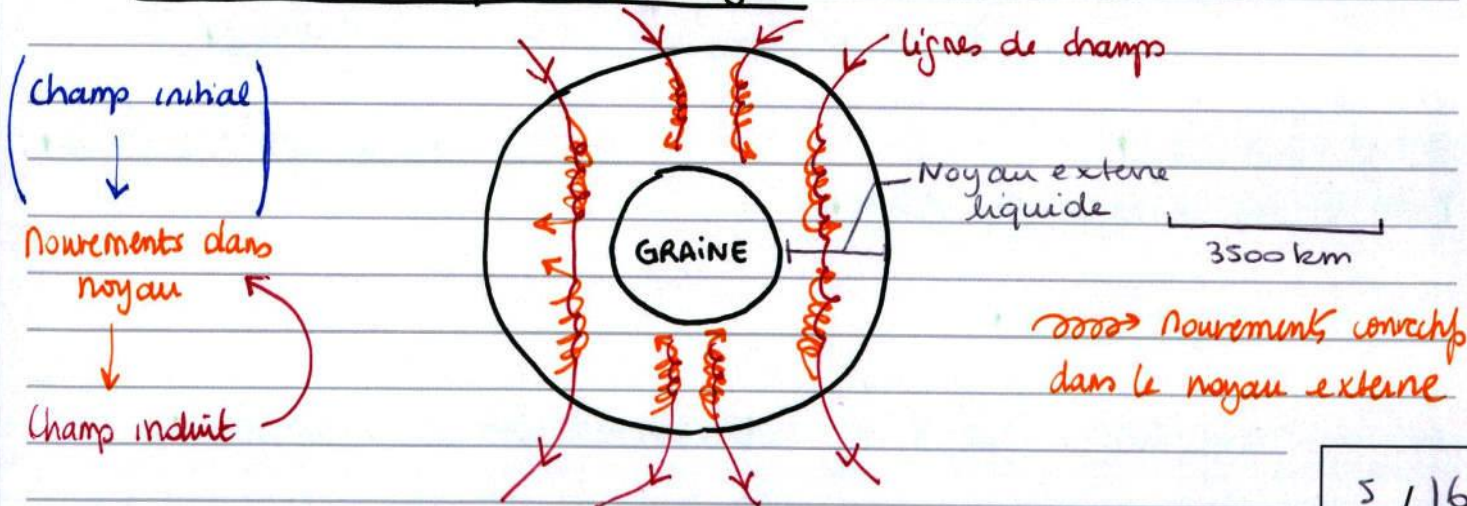
- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un 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 3: Modélisation et origine du champ magnétique terrestre.

a) Modèle réel du dipôle



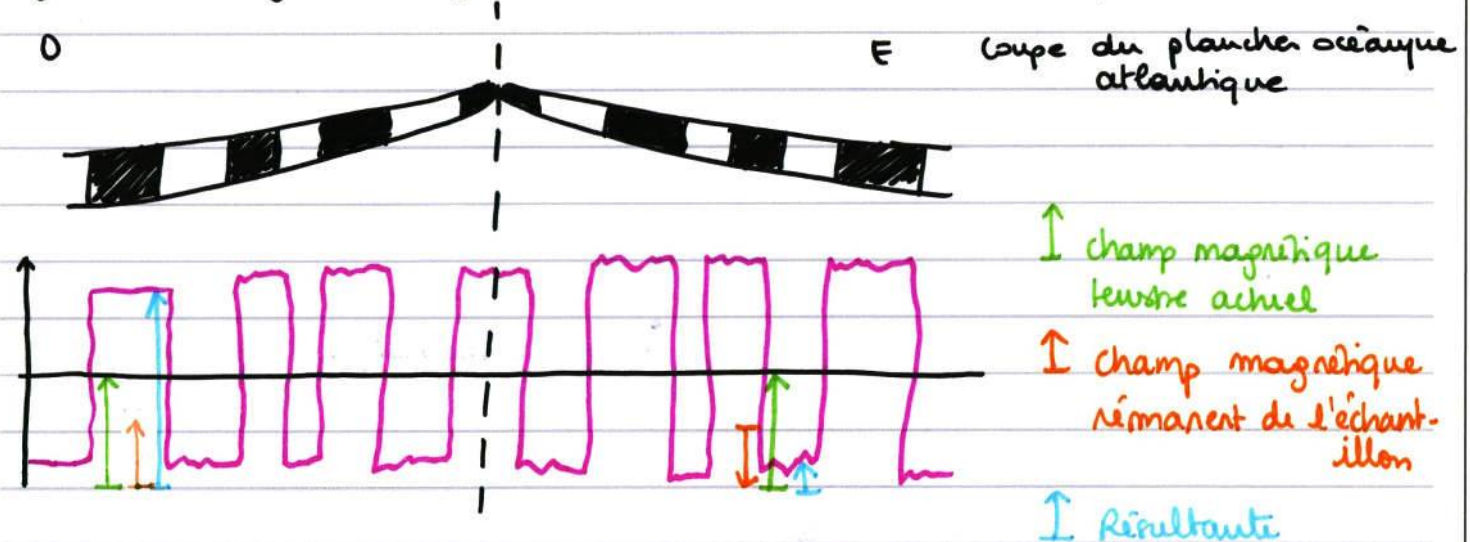
b) Génération du champ dans le noyau



b- les minéraux ferromagnétiques enregistrent le champ présent à leur formation

Si on mesure le **champ rémanent** de roches du plancher océanique, on remarque une symétrie de part et d'autre de la dorsale (fig 4).

Fig 4 : Paléomagnétisme grâce à la thermorémanence du plancher océanique.



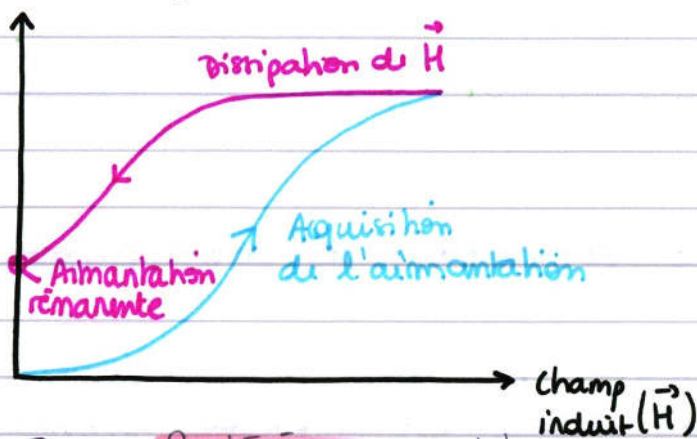
Cette alternance de bande sombre et claire représente l'**alternance du champ magnétique conforme** (noir, même orientation qu'actuellement) et **inverse** (blanc, champ inversé).

Ces alternances sont observables grâce aux propriétés de certains **minéraux dits ferromagnétiques** comme la **magnétite** (hydroxyde de fer) capables de **conserver une aimantation rémanente** suite à l'exposition à un champ magnétique (fig 5). Ici, il s'agit de **thermorémanence** : l'aimantation est **acquise suite au refroidissement sous la température de Curie** ($\sim 700^\circ\text{C}$ mais variable).

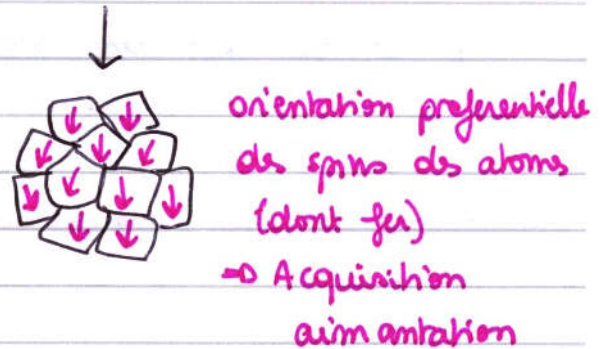
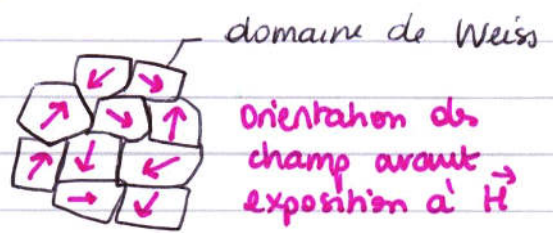
Ces données permettent d'établir l'existence de période longue sans inversions (**superchron**, au Néocène notamment). La combinaison de ces inversions à la datation absolue et relative du plancher océanique permet d'établir l'**échelle magnétostratigraphique**.

Fig 5: Aimantation rémanente sur la magnétite

Aimantation (J)



⇒ Il y a hystérèse du système



c. Les données de magnétostratigraphie et l'étude de l'aimantation des roches permet de retracer le déplacement de plaques lithosphériques.

L'existence de minéraux ferreux ferromagnétiques permet donc de retracer le champ magnétique terrestre passé.

En reprenant l'exemple précédent, ces études permettent de retracer l'expansion océanique à la dorsale.

Ensuite, l'analyse plus fine d'échantillons permet d'estimer les composantes (inclinaison / déclinaison) du champ au moment de la formation (par thermosuppression de différentes aimantations enregistrées, jusqu'à la plus forte). Or, il existe une relation entre inclinaison et paléolatitudes de formation ($I = 2 \tan(\lambda)$, λ la latitude) puisque l'inclinaison varie sensiblement uniformément avec celle-ci. De cette façon, l'analyse de plusieurs échantillons permet de déterminer un pôle paléomagnétique de formation et donc une position paléogéographique de formation de ces échantillons. Ces méthodes ont par exemple permis l'étude du déplacement de l'Inde jusqu'à la collision lors de l'orogénèse de l'Himalaya au crétacé et tertiaire précoc.

Bilan A Le fer contenu dans le noyau terrestre est à l'origine du champ magnétique selon le modèle de la géodynamo. Sa présence est par ailleurs un facteur important à l'apparition de la vie sur Terre puisque la magnétosphère dévie

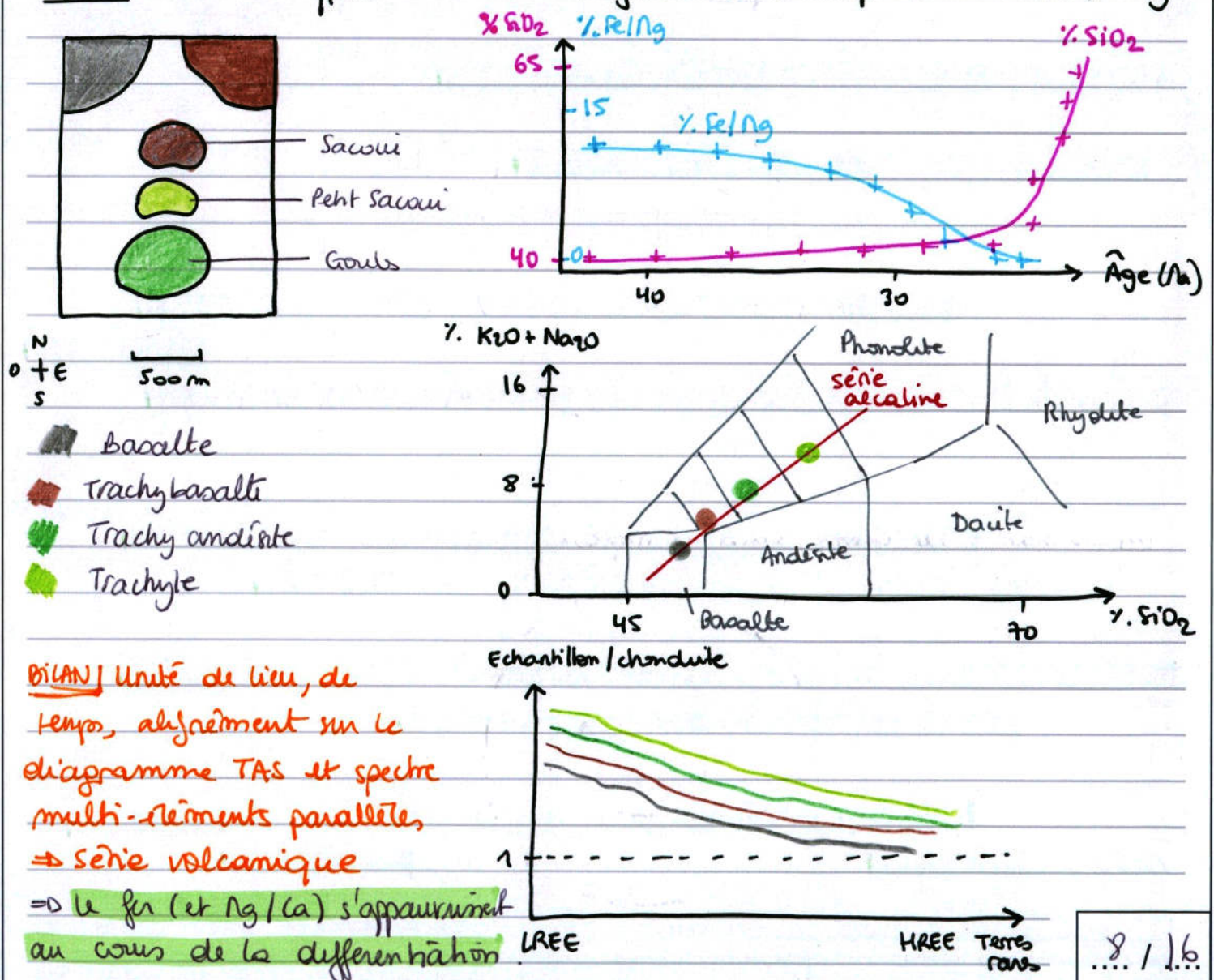
une grande partie des rayonnements solaires (UV...). la présence de Fe dans le manteau et la croûte terrestre permet l'**enrichissement du champ passé** et permet entre autre de **retracer les positions paléomagnétiques des plaques lithosphériques**.

B- le fer est un élément permettant de comprendre l'évolution des magmas.

a- les roches magmatiques possèdent des compositions variables en Fe , indicatrices d'une évolution directionnelle des magmas: la **différentiation**.

Preons l'exemple d'édifices volcaniques dans la chaîne du Puys (massif central).

Figure 6: Fer et différentiation des magmas sur l'exemple de la chaîne du Puys



Epreuve - Matière : 103 - 3762 Session : 2026

CONSIGNES

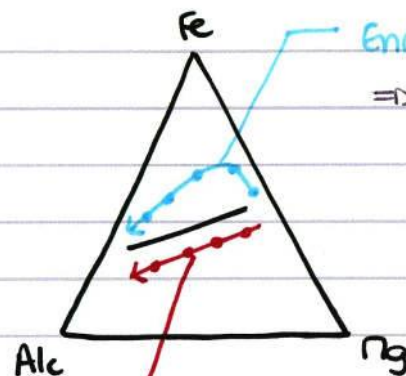
- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un 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.

Cet exemple montre l'évolution de la proportion en fer (une de la roche initiale par fusion partielle) au cours de la différenciation : l'évolution de la composition des magmas au cours du temps par cristallisation fractionnée inextinguible. Ici, le fer (et le Mg/Ca) cristallisent de façon précoce (séries de Bowen), formant des roches mafiques tels que le basalte et les trachybasaltes. Les roches suivantes sont de compositions plus felsique (trachyte). Donc le fer permet de retracer l'évolution des magmas.

(*) Nous d'une même roche initiale a pu être b. le fer permet de comprendre le contexte de formation des magmas.

Si on représente différents échantillons issus de volcanisme d'arrière arc et de volcanisme de dorsale sur un diagramme AFT (Alcalins - Fer - Naphtalène), 2 trajectoires sont observables (fig 7). La dynamique de cristallisation du fer au sein d'un magma hydrique ou non permet de discriminer les contextes géologiques associés à la mise en place de ces magmas et permet donc de comprendre la dynamique interne terrestre.

fig 7 : Séries calco-alcalines et tholéitiques discriminées grâce au fer



Enrichissement précoce en fer

⇒ Formation d'olivine magnésienne et de pyroxènes puis cristallisation du fer

⇒ Contexte du dorsale

SÉRIE THOLÉITIQUE

Appauvrissement simultané en fer et magnésium

⇒ Formation précoce d'oxydes de fer et de magnésium

⇒ Indique un magma hydraté en contexte de subduction

SÉRIE CALCO-ALCALINE

BILAN II L'abondance du fer dans les enveloppes internes terrestres permet l'étude et la compréhension de la dynamique du noyau et du manteau (magmatisme). Les roches cristallines (contenant aussi du fer) étant exposées aux enveloppes fluides, quel est l'importance du fer dans la géodynamique externe ?

III - Le fer sur Terre permet de comprendre l'histoire et la dynamique des enveloppes externes.

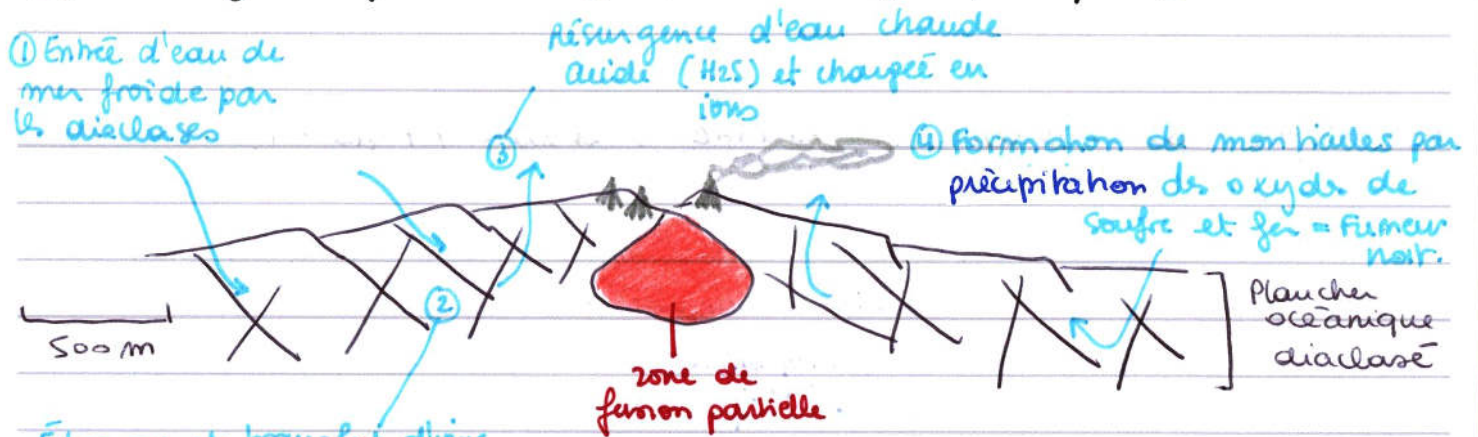
A. A l'interface entre la géodynamique interne et externe, des échanges de fer ont lieu lors de la circulation hydrothermale

L'exploration sous-marine a permis la découverte de structures minérales à proximité des dorsales : les fumeurs noirs.

L'analyse de leur composition révèle la présence d'oxydes

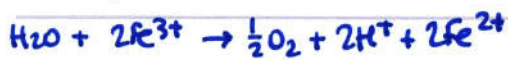
de soufre et de fer précipités. Leur formation s'explique selon le modèle suivant (figure 8).

Fig8: Echanges de fer entre la géosphère et l'hydrosphère par hydrothermalisme



Echanges et transfert d'ions des roches environnantes par metasomatisme (favorisé par température élevée à proximité de l'axe de la dorsale)

⇒ Oxydation du Fe^{3+} en Fe^{2+} par l'eau



Cet exemple montre l'existence d'échanges de fer entre les différents enveloppes de la Terre : la circulation hydrothermale enrichie les océans profonds en ions et métaux.

Ces environnements hydrothermaux sont peuplés de nombreux taxons et les conditions de ces milieux suggèrent une hypothèse plausible quant à l'apparition de la vie sur Terre.

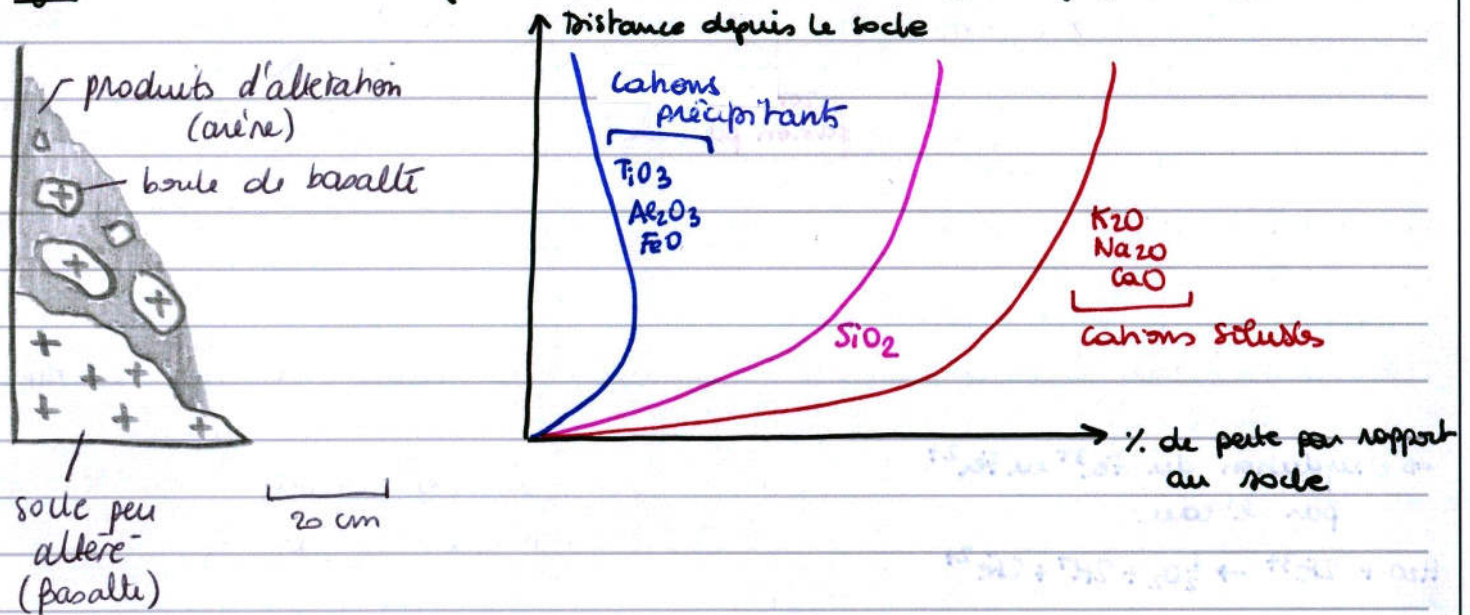
Les conditions physico-chimiques aux fumeurs noirs permettent la synthèse spontanée de molécules organiques ($+C15$) dont des dérivés d'Acetyl-CoA. Ces milieux sont riches en fer et en soufre, 2 atomes très souvent présent comme cofacteurs enzymatiques (protéines Fe S des chaînes de transport d'électrons). La polymérisation d'ARN a même été mise en évidence dans des conditions expérimentales proche (sur de la pyrite FeS). Ces milieux sont donc des candidats potentiels à l'apparition de la vie sur Terre (malgré certains contre-arguments comme la forte salinité...), soulignant l'importance du fer dans l'histoire de la vie terrestre.

B. Le fer est un élément important dans les processus d'altération.

a. Les roches enrichies en fer sont indicatrices de processus d'hydrolyse.

Si on analyse la composition chimique en oxydes d'un affleurement basalitique, on obtient les résultats suivants (figure).

Fig 9: Mobilisation du fer lors de l'altération (hydrolyse) d'un basalte



Cet exemple montre que plus l'altération est poussée

Cet exemple montre que les différents atomes réagissent différemment à l'altération (ici hydrolyse des minéraux du basalte puis qu'il reste des minéraux neoformés + résiduels). Les cations de grand rayon atomique et de faible charge sont facilement éliminés dans la solution de lixiviation : ces éléments sont qualifiés de cations solubles dans la classification de Goldschmidt (modèle expérimental simple basé sur l'hydrolyse de silicates). À l'inverse, certains atomes comme le fer, de plus petite taille atomique et de plus grande charge ne sont pas ou peu mobilisés par l'eau : ce sont des cations précipitants selon la classification de Goldschmidt.

Ainsi l'enrichissement de minéraux en fer (et aluminium par exemple) peut être marqueur de processus d'altération.

Epreuve - Matière : 103 - 3762 Session : 2026

CONSIGNES

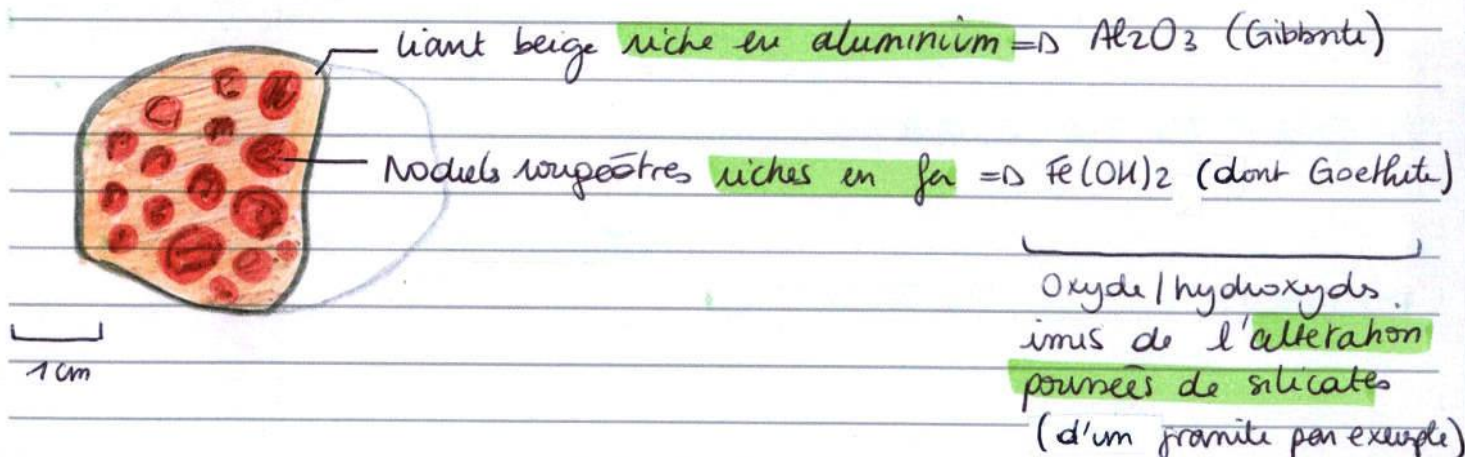
- Remplir soigneusement, sur CHAQUE feuillet officiel, la zone d'identification en MAJUSCULES.
- Remplir soigneusement le cadre relatif au concours OU à l'examen qui vous concerne.
- Ne pas signer la composition et ne pas y apporter de signe distinctif pouvant indiquer sa provenance.
- Rédiger avec un 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.

b. le fer est donc un indicateur de paléoclimats si il est issu de l'altération de minéraux.

Des modèles historiques simples comme le diagramme de Pedersen établissent un lien entre température, précipitation et altération : cette dernière est d'autant plus poussée que le climat est chaud et humide. Sur ce postulat, et en considérant les observations précédentes, la présence d'altérites riches en fer peut être un proxy de paléoclimats humides et chauds.

Prenons l'exemple de la carrière de Charancas en Provence française.

Fig10 : la Bauxite, altérite enrichie en fer et aluminium, marqueur de climat chaud et humide.



La bauxite est une roche formée aujourd'hui dans des climats tropicaux chauds et humides : sa présence dans le sud de la France indique donc un paléoclimat similaire. La datation de ces roches indiquent une formation au crétacé, lors du greenhouse mésozoïque associé à une paléolatitudes plus équatoriale de la France à cette période. Le fer peut donc être un indicateur de paléoclimats.

c- le fer issu de l'altération est un facteur de contrôle du climat terrestre

Des études expérimentales permettent de montrer que la présence de fer favorise la prolifération et l'activité photosynthétique de phytoplancton. Sur ce constat, des hypothèses ont été proposées quant à l'apport de fer dans les océans au cours de l'histoire de la Terre : c'est l'hypothèse du fer.

Le fer apporté par altération continentale et/ou activité des dorsales (associée à l'hydrothermalisme) pourrait favoriser la prolifération de phytoplancton à l'origine d'une chute de la pression partielle atmosphérique en CO_2 , et par conséquent des températures par chute de l'effet de serre.

Cette hypothèse pourrait expliquer l'entrée en icehouse carbonifère à l'échelle du paléozoïque mais aussi les variations climatiques de plus faible amplitude au cours du dernier million d'années (conjuguée aux paramètres orbitaux).

Ainsi, le fer pourrait être un facteur majeur de variations climatiques d'origines biologiques.

C - L'état d'oxydation du fer renseigne sur les événements d'oxygénation de l'atmosphère terrestre.

Peu d'échantillons pré-cambriens sont disponibles sur Terre. Parmi eux, le gabbro de Barberton en Afrique du Sud abrite des conglomérats siliceux (cherts) à lamines de fer (BIF), plus anciens que 2,5 Ga. Ces lamines de fer contiennent ensemble du fer réduit (Fe^{2+}).

À partir de 2,4 Ga, les roches contiennent de plus en plus de fer oxydé (strates rouges riches en fer oxyde Fe^{3+}), la présence de manganèse oxydé et la présence accrue d'édifices stromatolithiques. Ces observations ont permis de mettre en évidence un premier événement d'oxygénation dit GEO entre 2,4 et 2,2 Ga.

Le fer et son état d'oxydation sont donc des proxies du pouvoir oxydant de l'atmosphère et donc de l'évolution temporelle de sa composition en O_2 .

Conclusion

Le fer sur Terre (et sur les autres planètes telluriques du système solaire) provient donc de chondrites. Ses propriétés permettent de comprendre les mécanismes de formation des enveloppes terrestres (mise en place du noyau terrestre) et leur chronologie (radioactivité éteinte Hf/W).

La dynamique convective du noyau et la présence de fer permettent d'expliquer l'existence du champ magnétique terrestre et ses conséquences sur l'habitabilité de la Terre (protection par la magnétosphère), ainsi que l'apport du paléomagnétisme sur la compréhension du déplacement des plaques lithosphériques.

Le fer intervient à toute les échelles dans toute les enveloppes terrestres. Il permet de comprendre la genèse et l'évolution des magmas. Son abondance dans les roches magmatiques est à l'origine de transferts vers les enveloppes externes par métasomatisme (hydrothermalisme) et par altération.

Ces transferts permettent l'étude et la compréhension de l'évolution de la composition de l'atmosphère et du climat terrestre au travers d'arguments de terrain (fers oxydés et GEO) et de modèles (hypothèse du fer).

Son importance dans une diversité de processus géologiques et son implication potentielle dans l'apparition et le développement de la vie sur Terre en font un élément très intéressant dans la compréhension de l'histoire de la Terre. Il reste néanmoins important de rappeler que ce type d'études n'est robuste que si elles sont supportées par un faisceau d'arguments et que c'est la combinaison de marqueurs géochimiques qui permet d'aboutir à des modèles vraisemblables (traces rares, analyses d'isotopes différents, ...).

Comme illustré à plusieurs reprises, le fer est un élément potentiellement prépondérant dans l'apparition de la vie sur Terre. Son importance dans de nombreux systèmes biologiques actuels (protéines Fer-Soufre, fixation du dioxygène dans l'hème, co-facteur d'enzymes nécessaire pour certaines voies métaboliques comme la voie de l'acétyl-CoA chez les archées méthanogènes, ...) est remarquable, et ce dans tous les taxons. Les mécanismes sous-jacents à l'apparition de la vie reste très flous néanmoins et stimulent les communautés scientifiques de nombreux secteurs.