

L'écrit de géologie

SUJET

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Remarques importantes

- 1 - Le sujet est organisé en quatre parties et comprend 13 documents, dont l'un (doc. 6) est à rendre avec la copie.
- 2 - Seront prises en compte dans la notation : la clarté de la présentation, la précision et la rigueur de l'analyse des documents, les illustrations personnelles et la rigueur des raisonnements.
- 3 - Certaines des figures pourront être jointes à la copie si le candidat considère que des annotations en surcharge constituent des éléments appréciables de réponse aux questions. Il devra alors les coller sur la copie.
- 4 - Si au cours de l'épreuve le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les initiatives qu'il est amené à prendre de ce fait.

La différenciation des planètes telluriques

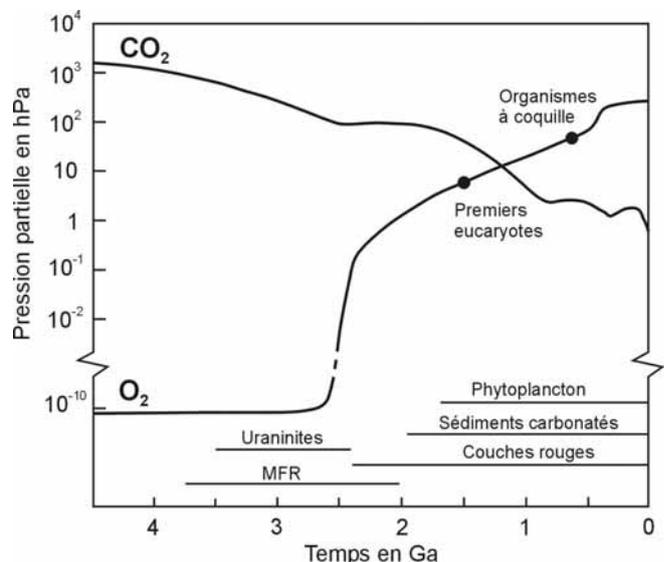
Le sujet proposé traite de la structure et de la dynamique de quelques objets telluriques du système solaire : Vénus, la Terre, la Lune, Mars et les météorites. Plusieurs aspects seront abordés : les atmosphères, les surfaces, les processus conduisant à la différenciation des enveloppes internes. Enfin la formation de la croûte continentale terrestre sera étudiée à partir de la carte structurale de l'Europe.

1. Les atmosphères

En utilisant les documents 1a et 1b ci-dessous, expliquez en quoi l'évolution physicochimique de l'atmosphère terrestre se différencie de celle des autres planètes telluriques Vénus et Mars. Quelles en sont les conséquences en termes de développement et d'évolution de la vie ?

en %	Vénus	Terre	Mars
CO ₂	96,5	0,037	95,3
N ₂	3,5	78,08	2,7
O ₂	--	20,95	--
Ar	0,007	0,93	1,6
H ₂ O	--	0 à 4	0,03
T en °C au sol	+ 457	+ 15	- 55
P en hPa	90000	1000	6
g en m.s ⁻²	8,88	9,81	3,73
vitesse de libération km.s ⁻¹	10,3	11,2	5,0

Document 1a. Paramètres physicochimiques des atmosphères et valeur de la pesanteur sur Vénus, la Terre et Mars



Document 1b. Evolution chimique de l'atmosphère terrestre au cours du temps
MFR : Minerais de fer rubanés

2. Les surfaces

Les surfaces des objets telluriques du système solaire présentent une cratérisation contrastée. Vous commenterez le document 2 qui en fournit plusieurs exemples. Après avoir expliqué ce phénomène, vous-en développerez des applications à l'étude des surfaces des corps telluriques (document 3).

Le document 4 est un extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Rochechouart (Haute-Vienne).

En utilisant les documents 4 et 5, identifiez et commentez l'ensemble des marqueurs pétrographiques et géophysiques qui permettent de caractériser un des événements géologiques majeurs subis par la région.

Complétez votre argumentation en construisant et interprétant une coupe géologique dessinée à main levée sur le profil topographique du document 6 (à rendre avec la copie).

3. Les météorites et la différenciation interne

Des échantillons de météorites sont présentés sur les photos du document 7. Identifiez chacun d'eux à partir d'une description et d'une analyse rigoureuse. Le tableau du document 8a complète l'échantillonnage. Vous montrerez qu'il est possible d'établir une classification raisonnée de ces objets en utilisant leurs caractéristiques minéralogiques et physiques.

En intégrant les données des documents 8a et 8b, montrez comment l'étude des météorites nous renseigne sur la différenciation interne des corps telluriques tels que la Terre ou la Lune (doc. 9).

4. Les dynamiques globales et l'originalité de la Terre

A. Le volcanisme

Les modelés des surfaces des corps telluriques résultent également de l'activité volcanique actuelle ou passée. En utilisant le document 10, vous comparerez la répartition des appareils volcaniques à la surface des planètes Vénus, Terre et Mars. Quelles conclusions peut-on en tirer quant à l'originalité de la dynamique interne de la Terre ?

B. Formation et évolution des continents : l'exemple de l'Europe

La planète Terre se distingue des autres planètes par l'existence d'une croûte continentale dont la formation remonte à l'Archéen. Les photographies du document 11 présentent des roches caractéristiques de cette croûte. Après les avoir identifiées, et en vous aidant du document 8, vous proposerez des processus généraux pouvant conduire à la formation de la croûte continentale terrestre.

En Europe, la plus ancienne croûte continentale (3,2 Ga) se trouve au nord de la Scandinavie (péninsule de Kola) ainsi que le montre la carte structurale du document 12. À l'aide de vos connaissances et en vous aidant du document 13, vous reconstituerez les grands processus géologiques qui ont abouti à l'édification de la croûte continentale de l'Europe actuelle.

Origine des documents

Document 2a. Lick Observatory

Documents 2b, 2c, 9, 10a et 10c. NASA

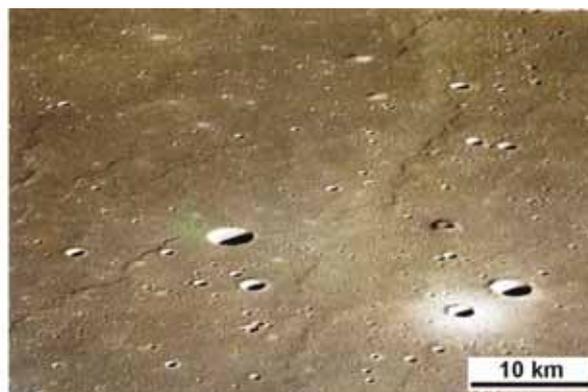
Documents 4a, 4b et 5b. BRGM, Carte de Rochechouart 1/50000

Document 7c. Alain Carion, Météorites en France, 2003

Document 13. Derek Blundell, The European Geotraverse, 1992



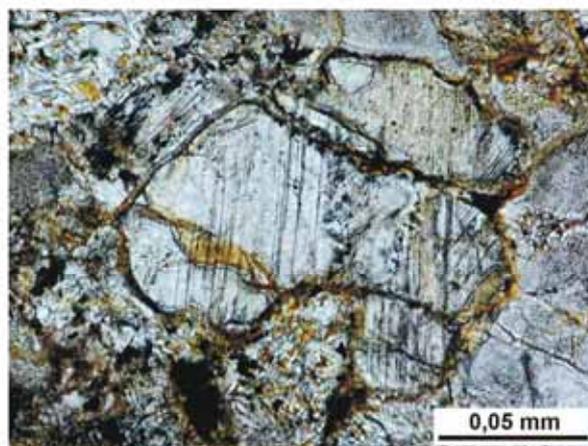
Document 2a. Image de la pleine Lune vue de la Terre



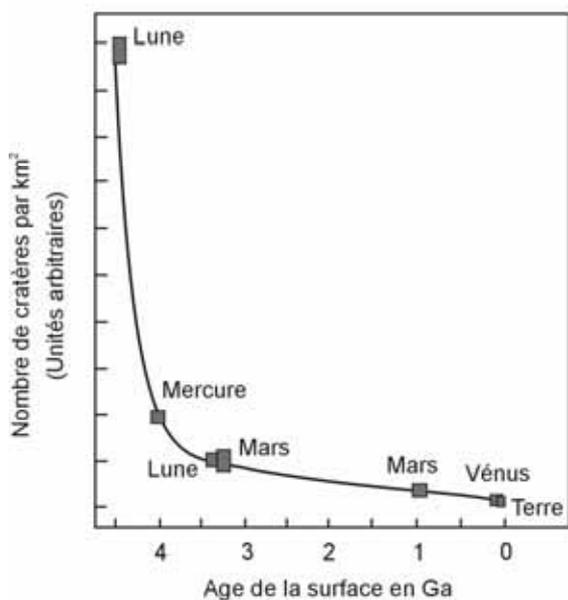
Document 2b. Une "mer" lunaire, vue prise par la mission Apollo 16



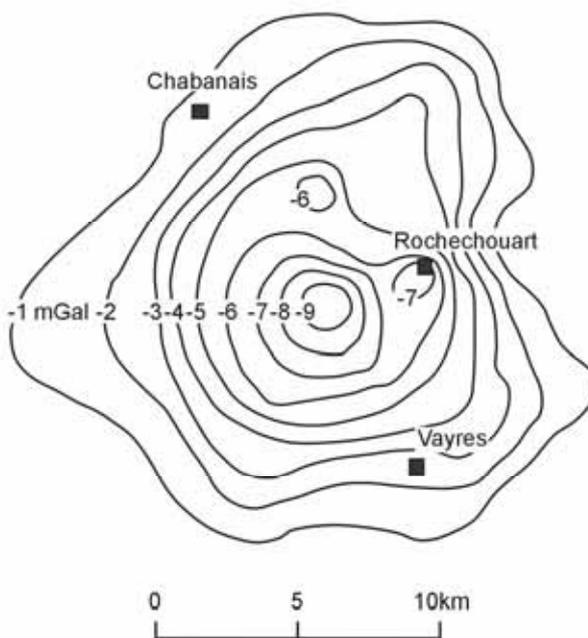
Document 2c. Une "terre" lunaire, vue prise par la mission Apollo 17



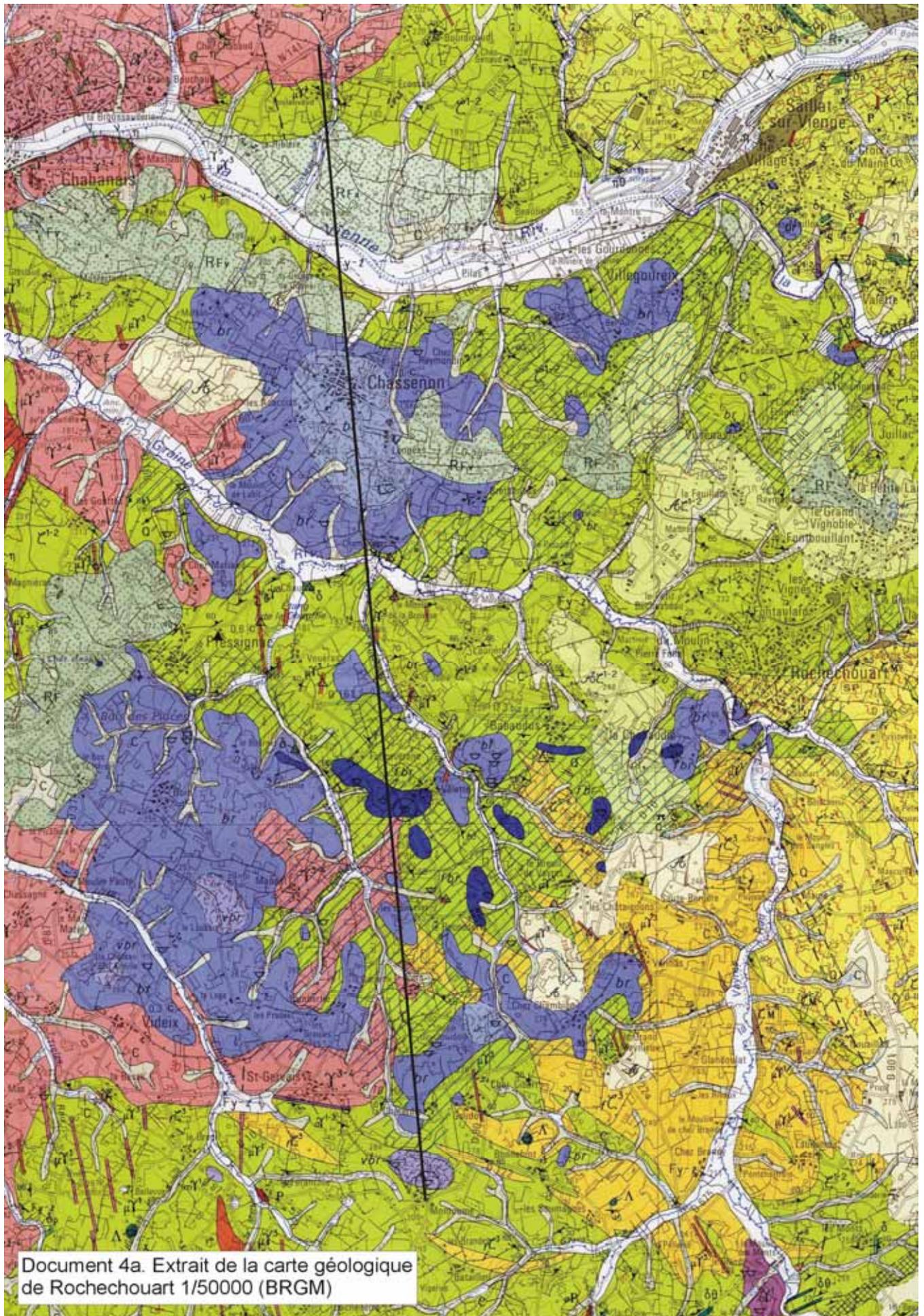
Document 5a. Microphotographie de cristaux de quartz provenant de la région de Rochechouart. En lumière polarisée non analysée



Document 3. Cratérisation des surfaces des corps telluriques du système solaire en fonction de l'âge



Document 5b. Anomalie gravimétrique de Rochechouart



FORMATIONS SUPERFICIELLES

Dépôts anthropiques

Altérites

Formations colluviales

Formations fluviales

Brèches

Cônes de percussion :

Impactites

ROCHES MÉTAMORPHIQUES

Paragneiss plagioclasiques

Gneiss leptynitiques (gneiss clairs généralement à deux feldspaths, orthodérivés pour l'essentiel)

Gneiss à silicates-calciques

Intercalations de roches basiques et ultrabasiques

Amphibolites

Roches ultrabasiques

ROCHES PLUTONIQUES EN MASSIFS

Association alumineuse leucocrate

Association alumineuse mésocrate à subleucocrate

Association hybride, calco-alcaline à alumineuse

Association calco-alcaline

Roches intermédiaires à basiques, orientées

ROCHES FILONIENNES OU EN PETITS CORPS INTRUSIFS

Roches subvolcaniques

Microleucogranites

Microgranites porphyriques

Microgranites - granodiorites porphyriques

Lamprophyres

ÉLÉMENTS STRUCTURAUX

Foliation métamorphique

Foliation et pitch de la linéation

Foliation et linéation

Linéation d'étirement, linéation minérale

Cisaillement fragile

Cisaillement ductile

Contour géologique

Cataclastes

Mylonites

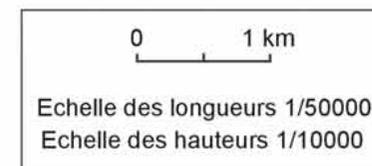
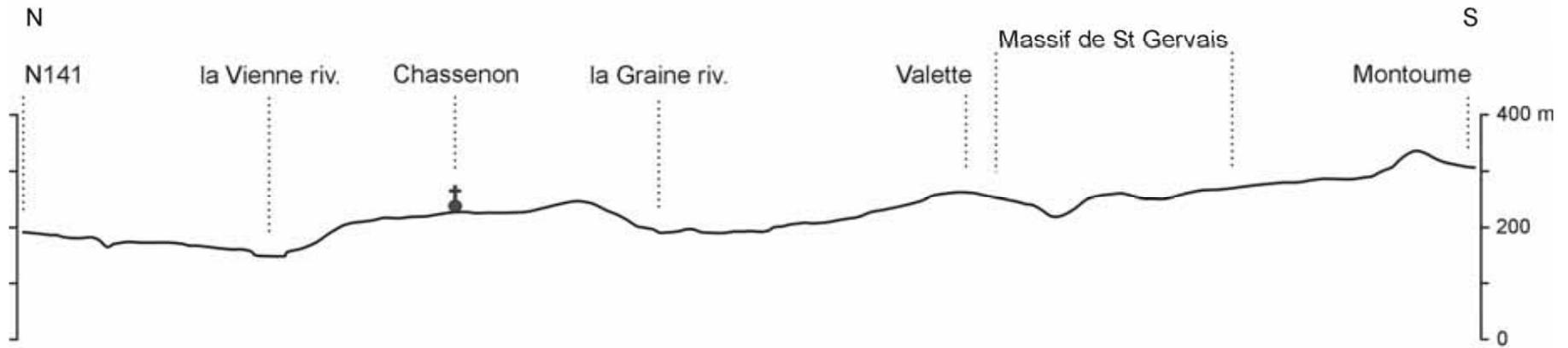
RESSOURCES DU SOUS-SOL ET EXPLOITATIONS

Carrière à ciel ouvert :

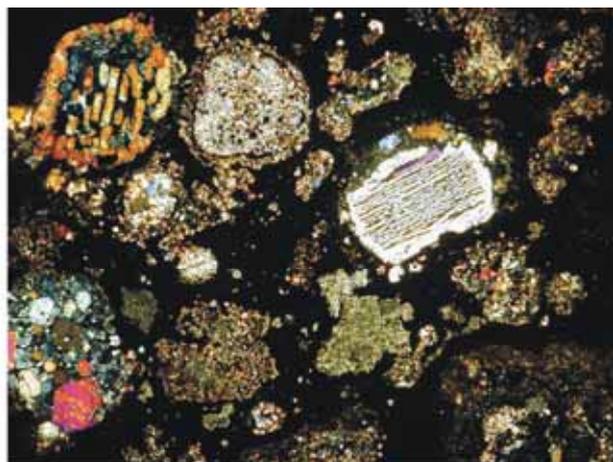
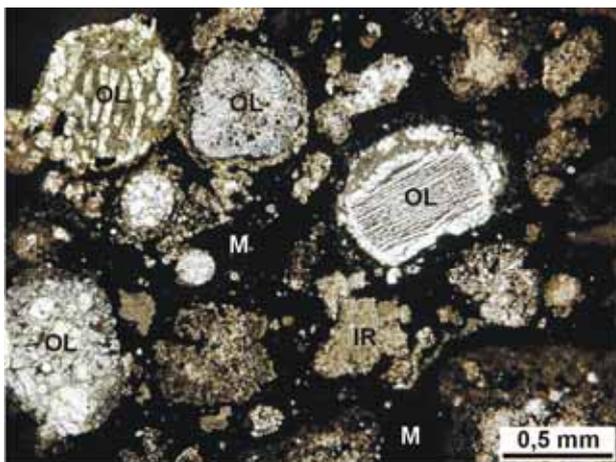
1 - en activité, 2 - abandonnée, 3 - extension réelle

Document 4b. Légende de la carte de Rochechouart 1/50 000^{ème} BRGM

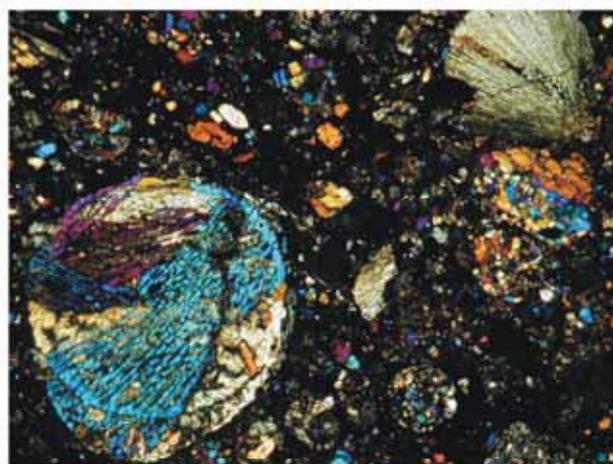
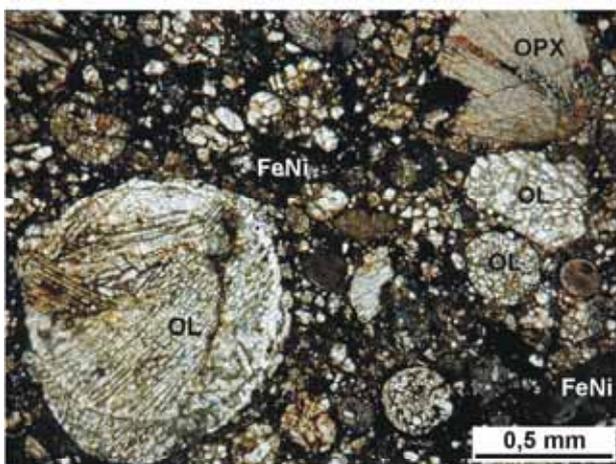
Rochechouart 1/50000



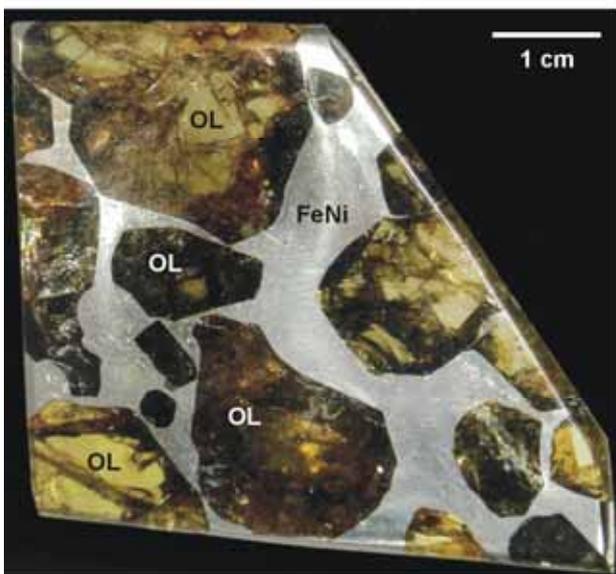
Document 6
à rendre avec la copie



Document 7a. Météorite de type 1, microphotographie en lumière polarisée non analysée à gauche et en lumière polarisée analysée à droite. OL : Olivine, IR : Inclusions réfractaires, M : Matrice d'argiles, de composés carbonés et de sulfures



Document 7b. Météorite de type 2, microphotographie en lumière polarisée non analysée à gauche et en lumière polarisée analysée à droite. OL : Olivine, OPX : Orthopyroxènes, FeNi : Alliage fer/nickel métallique et sulfures



Document 7c. Section polie d'une météorite de type 4
OL : Olivine, FeNi : Alliage fer/nickel métallique

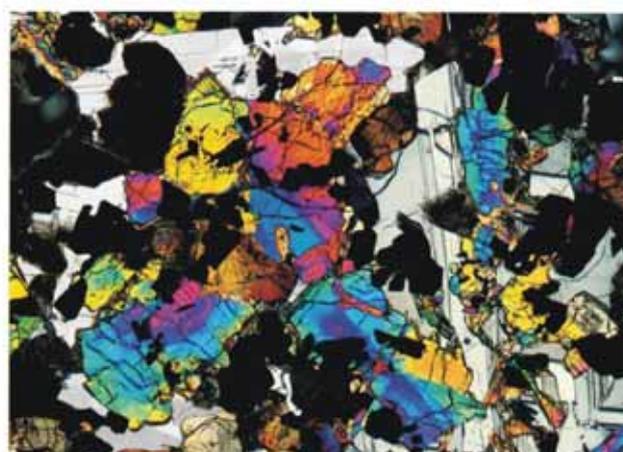
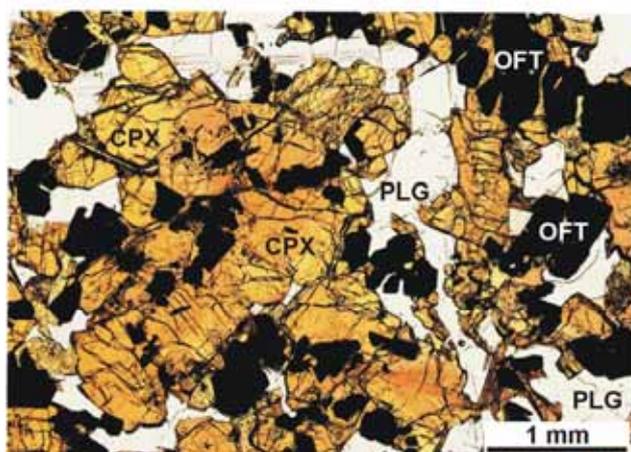
Document 7d. Météorite de type 5 entièrement constituée d'un alliage fer/nickel métallique

	Météorites de type 1	Météorites de type 2	Météorites de type 3	Météorites de type 4	Météorites de type 5
Minéraux	olivine orthopyroxène carbonates argiles composés organiques	olivine orthopyroxène fer/nickel métallique <20% sulfures	olivine pyroxène plagioclases sulfures oxydes	grains d'olivine dans alliage de fer/nickel métallique	alliage fer/nickel avec 5-10 % d'éléments sidérophiles
Structure	document 7a	document 7b	gabbroïque ou bréchique	document 7c	document 7d
Densité	2,2 à 2,9	3,5 à 4	2,6 à 3	4,3 à 7	7,8 à 8
Abondance des chutes %	21	65	8	1	5

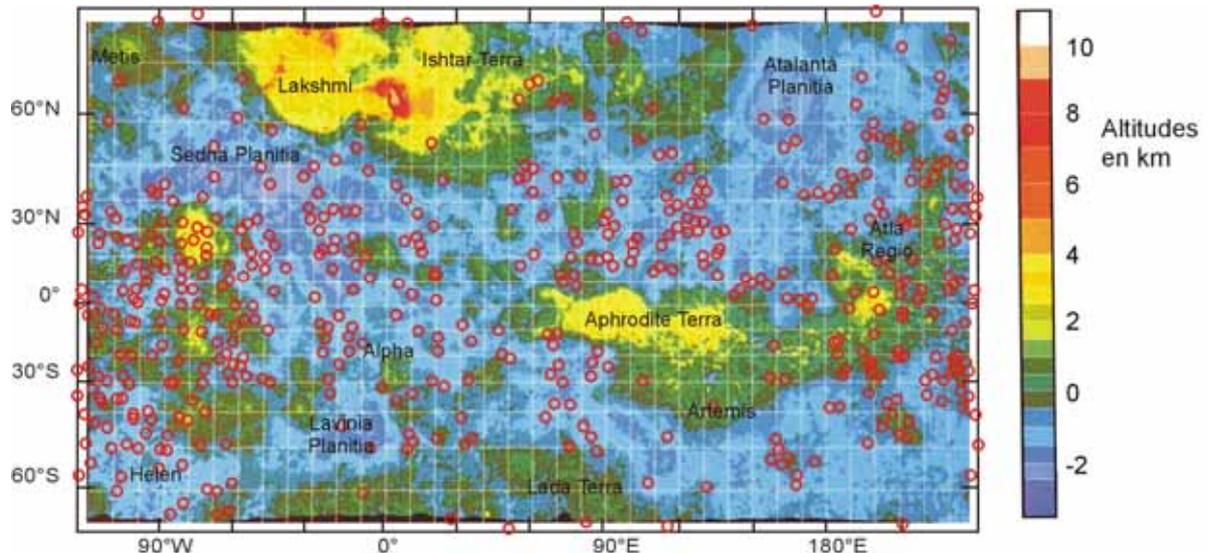
Document 8a. Composition des différents types de météorites

	météorite de type 1	noyau	manteau	croûte océanique	croûte continentale
O en %	45,0	4	44,0	44,0	45,0 %
Na	0,51		0,24	2,08	2,30
Mg	9,89		22,8	4,64	3,20
Al	0,86		2,17	8,47	8,41
Si	10,70	7	21,5	23,10	26,77
K	0,05		0,02	0,12	0,91
Ca	0,93		2,28	8,08	5,29
Fe	18,51	81	5,85	8,16	7,07
C en ppm	35000	2000	18	500	480 ppm
S	54000	19000	250	900	930
Cr	2660	9000	3000	440	185
Ni	11000	50000	2080	150	105
Rb	2,3		0,5	2,2	32
Sr	7,8		18,2	130	260
U	0,01		0,02	0,07	0,91
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,7045		0,702	0,702	0,720
Densité	2,5	8	4	3,1	2,8

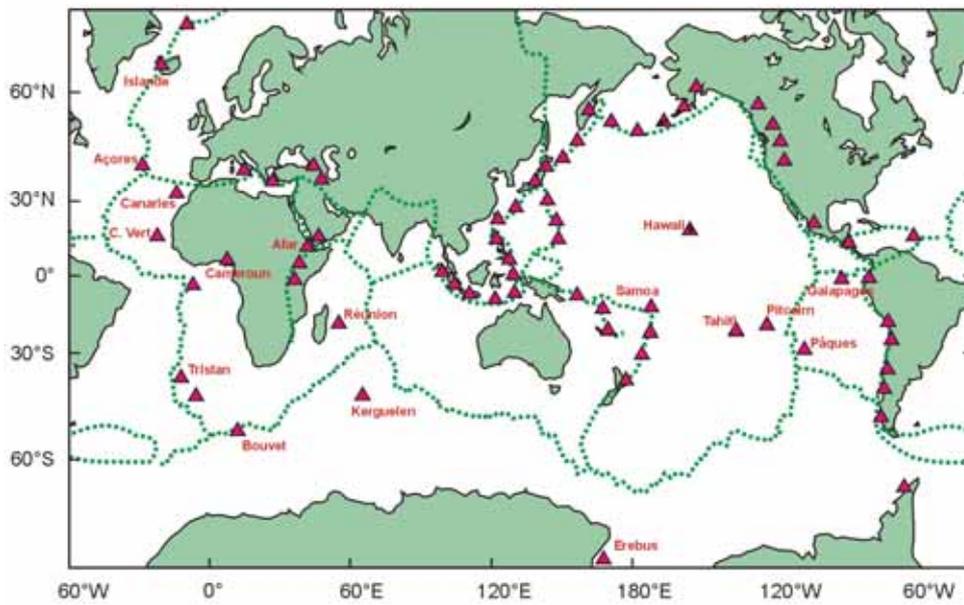
Document 8b. Composition chimique (en % en haut, en ppm en bas) des différentes enveloppes de la Terre comparées à la météorite de type 1 des documents 7a et 8a



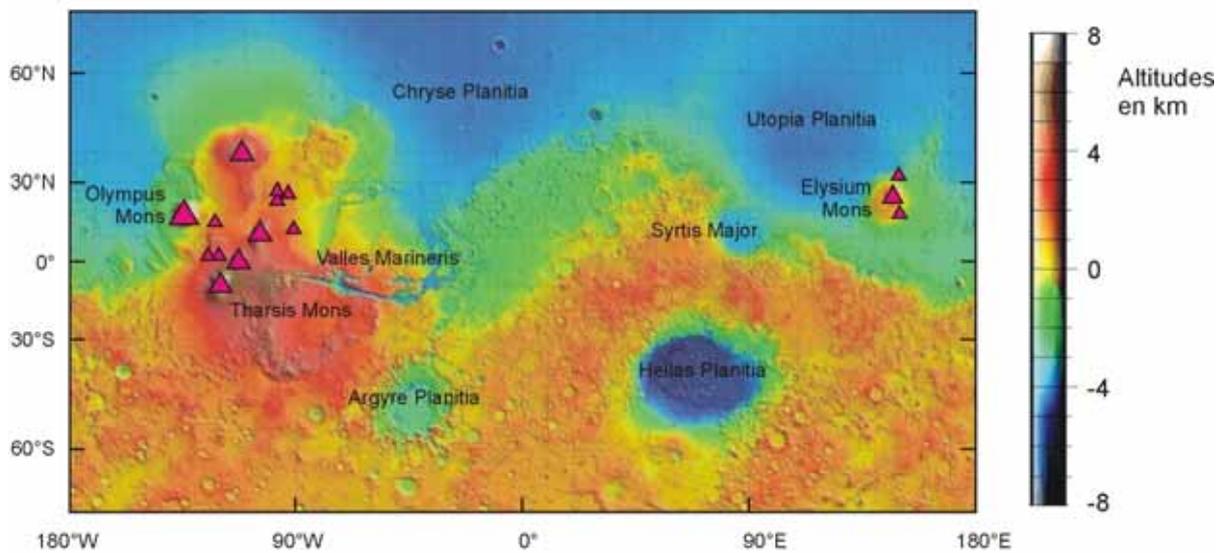
Document 9. Roche des "terres" lunaires, mission Apollo 17, vallée de Taurus-Littrow, microphotographie en lumière polarisée non analysée à gauche et en lumière polarisée analysée à droite
 CPX : Clinopyroxènes, OFT : Oxydes ferrotitanés, PLG : Plagioclases



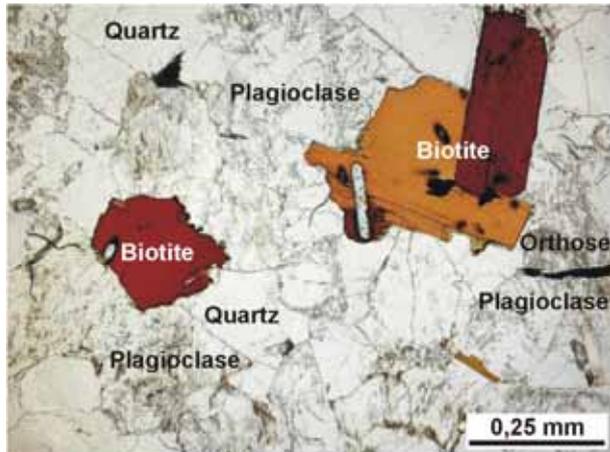
Document 10a. Distribution des appareils volcaniques sur Vénus ○



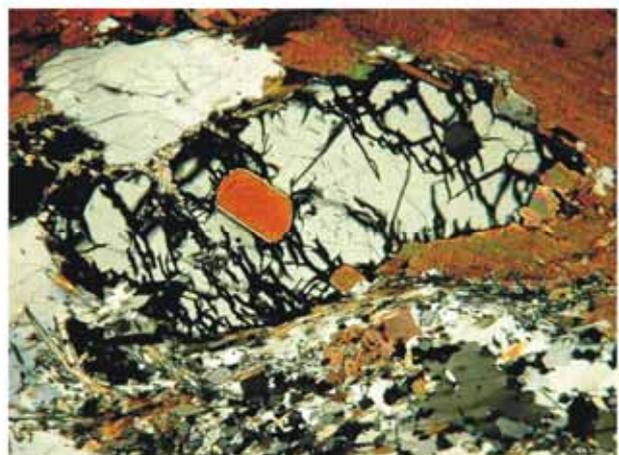
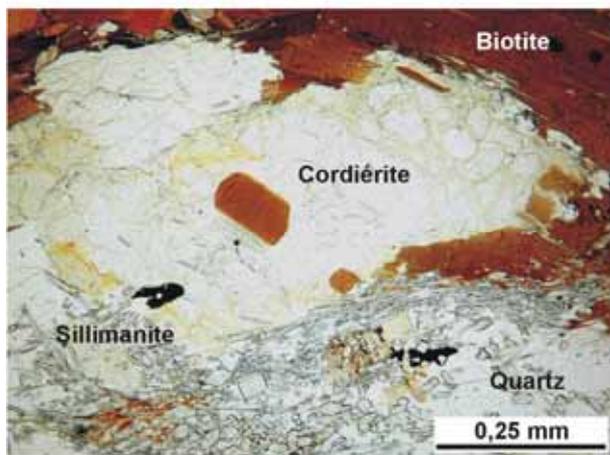
Document 10b. Distribution des appareils volcaniques actuels sur la Terre ▲



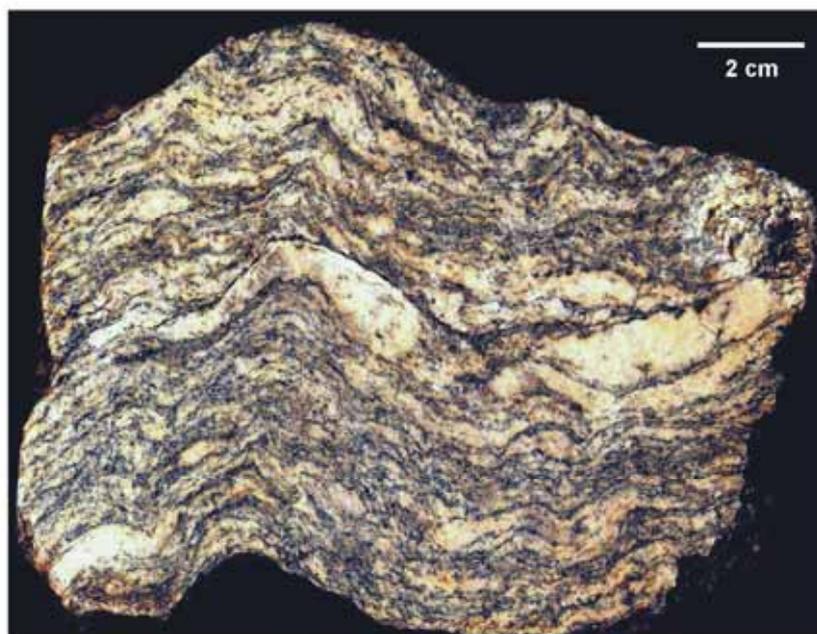
Document 10c. Distribution des appareils volcaniques sur Mars ▲



Document 11a. Microphotographie en lumière polarisée non analysée à gauche et en lumière polarisée analysée à droite. Provenance : Massif Armoricain

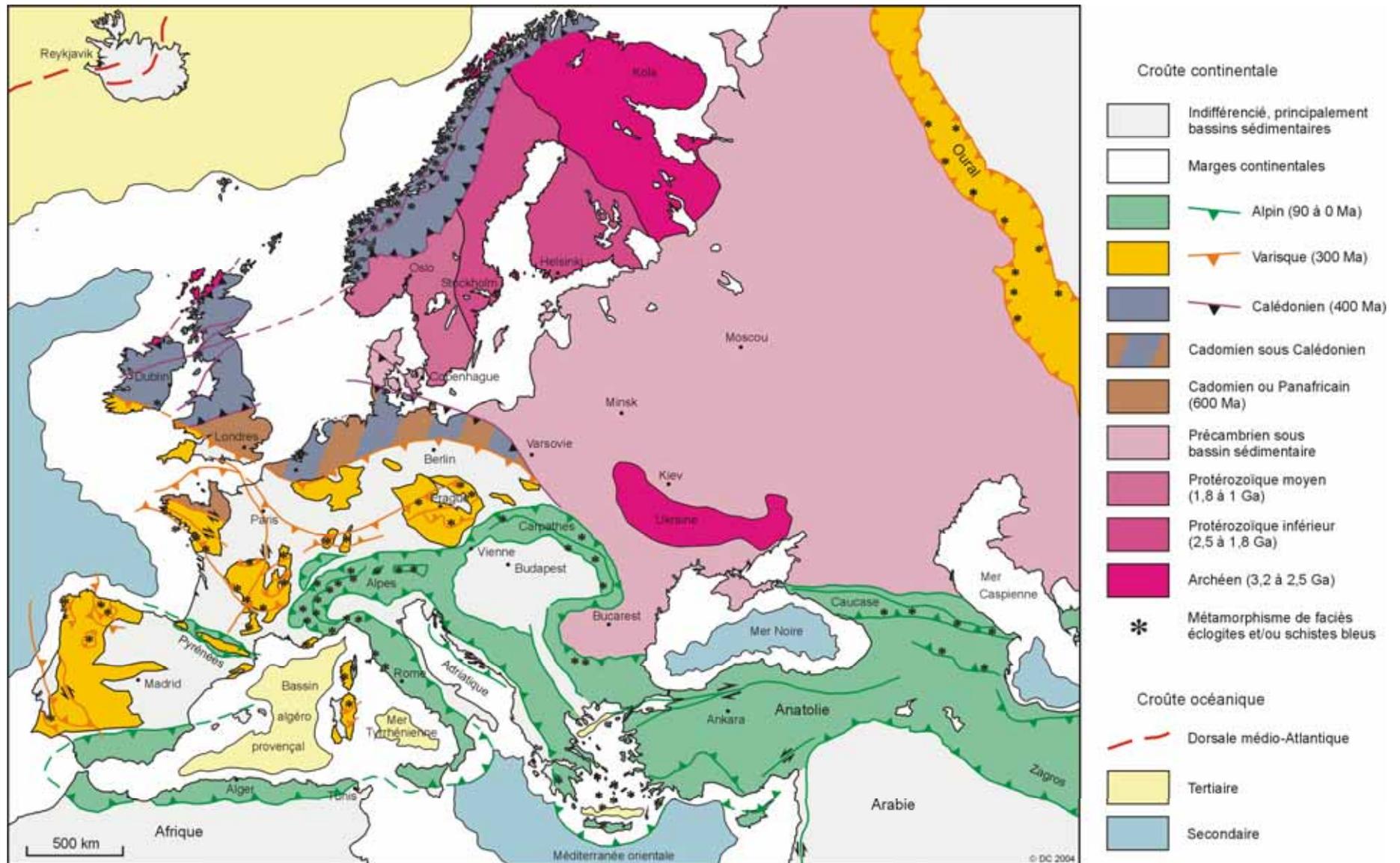


Document 11b. Microphotographie en lumière polarisée non analysée à gauche et en lumière polarisée analysée à droite. Provenance : Massif Central

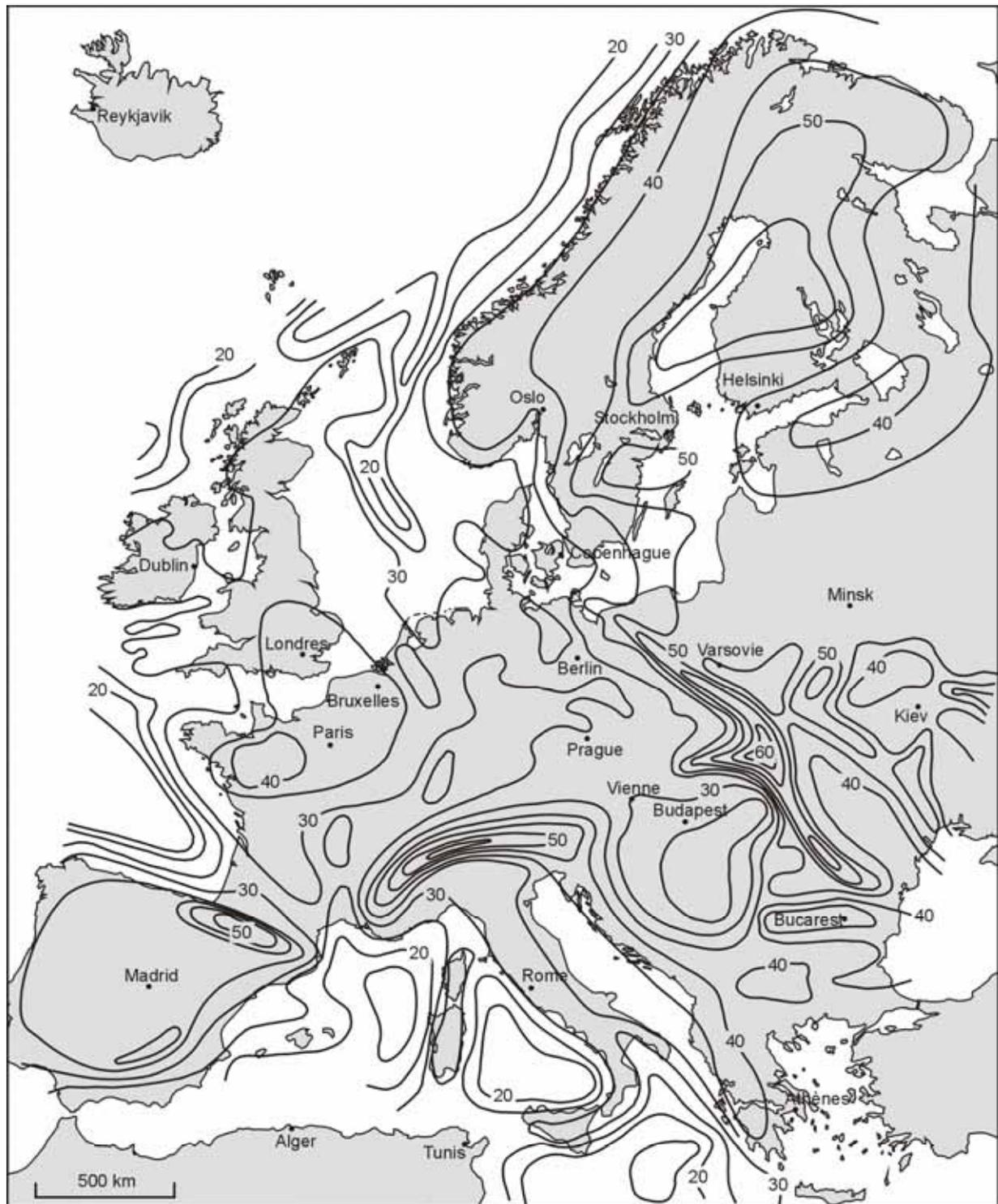


Document 11c. Macrophotographie. Provenance : Massif Central

Document 11. Des roches de la croûte continentale terrestre. Les principaux minéraux des microphotographies sont identifiés



Document 12. Carte structurale simplifiée de l'Europe



Document 13. Profondeur en km du Moho sous l'Europe

RAPPORT SUR L'ÉPREUVE ÉCRITE DE GÉOLOGIE

La différenciation des planètes telluriques

Le sujet proposé traite de la structure et de la dynamique de quelques objets telluriques du système solaire : Vénus, la Terre, la Lune, Mars et les météorites. Plusieurs aspects seront abordés : les atmosphères, les surfaces, les processus conduisant à la différenciation des enveloppes internes. Enfin la formation de la croûte continentale terrestre sera étudiée à partir de la carte structurale de l'Europe.

1. Les atmosphères

En utilisant les documents 1a et 1b, expliquez en quoi l'évolution physicochimique de l'atmosphère terrestre se différencie de celle des autres planètes telluriques Vénus et Mars. Quelles en sont les conséquences en termes de développement et d'évolution de la vie ?

Les attentes du jury

Il s'agissait de **montrer comment les quantités de dioxygène et de dioxyde de carbone ont évolué au cours de l'Archéen et du Protérozoïque. L'effet de serre actuel et ses conséquences sur l'existence de la vie terrestre devaient être discutés.** La réflexion pouvait s'articuler en quatre parties, comme ci-dessous.

A. Composition globale

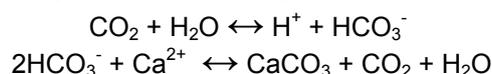
Les atmosphères actuelles de Mars et de Vénus ont la même composition chimique, 96% de CO₂ et 3% de N₂, seule la pression au sol diffère à cause de la gravité, plus de deux fois plus faible sur Mars. Ces atmosphères primitives proviennent du dégazage du manteau par l'intermédiaire du volcanisme.

L'atmosphère primitive de la Terre avait une composition proche de celle des atmosphères actuelles de Mars et de Vénus. Actuellement la Terre possède une atmosphère secondaire appauvrie en CO₂ et enrichie en O₂. Cette composition particulière apparaît autour de 2 Ga.

B. Le dioxyde de carbone

Le CO₂ s'est dissout dans l'eau liquide des océans (sous forme d'ion hydrogénocarbonate HCO₃⁻) et a précipité ensuite sous forme de carbonates (calcite ou aragonite CaCO₃, dolomite CaMg(CO₃)₂).

Les équations correspondantes étaient attendues :



La présence des premiers stromatolites à 3,5 Ga, des sédiments carbonatés vers 2 Ga, puis des premiers organismes à coquille vers 0,6 Ga atteste du piégeage progressif du CO₂ et donc de sa diminution dans l'atmosphère.

Actuellement, le dioxyde de carbone terrestre est stocké dans les carbonates, c'est-à-dire essentiellement les roches calcaires, les squelettes (Cnidaires et Bryozoaires coloniaux, Vertébrés), coquilles (Mollusques, Brachiopodes) et tests (Foraminifères et Coccolithophoridés) de la biomasse, ainsi que les charbons et les pétroles.

C. Le dioxygène

L'absence d'O₂ à l'Archéen est attestée :

- par la présence de dépôts d'uraninite UO₂ ; dans ce minéral insoluble, l'uranium présente un degré d'oxydation de 4 ; actuellement, en présence d'oxygène, l'uranium a un degré d'oxydation de 6, ce qui aboutit à la formation de l'ion uranyle UO₂²⁺ soluble ;

- par l'existence de dépôts abondants de minerais de fer rubanés (MFR), formés d'une alternance de lamines millimétriques d'hématite Fe₂O₃ et de quartzite. Avant 2 Ga, le fer mis en solution à l'état ferreux (Fe²⁺) est lessivé en grande quantité de la surface des continents et transporté par les eaux dans des bassins marins peu profonds. Il est alors oxydé – et précipité – à l'état ferrique (Fe³⁺) par l'oxygène produit par la biomasse photosynthétique.

A partir de 2,5 Ga, on observe des couches rouges continentales riches en hématite où le fer est à l'état ferrique (Fe³⁺) du fait de la richesse en dioxygène de l'atmosphère.

Le dioxygène O₂ est libéré par la photosynthèse des premières cyanobactéries apparues vers 3,5 Ga et qui forment un phytoplancton abondant à partir de 2 Ga.

L'équation correspondante était attendue :



D. Pression, température et effet de serre

La pression atmosphérique au sol dépend à la fois de la quantité et de la nature des gaz présents dans l'atmosphère, et de la gravité de la planète.

L'effet de serre contrôle les conditions de température de la basse atmosphère. Les gaz responsables, principalement H₂O et CO₂, absorbent les infrarouges émis par le sol lui-même chauffé par le rayonnement solaire. Le bilan global est nul. La température au sol est donc liée à l'opacité de l'atmosphère aux infrarouges, c'est-à-dire surtout à la pression partielle de CO₂.

L'effet de serre contrôle alors l'état physique de l'eau, dont dépend l'existence et le développement de la vie. Celui-ci est très différent sur Vénus, la Terre et Mars.

Dans l'atmosphère de Vénus, la pression partielle de CO₂ est très élevée (près de 90 bars). A l'effet de serre s'ajoute la proximité du Soleil, et la température très forte (457°C) est impropre à la vie. De plus l'eau a disparu par photodissociation.

Dans l'atmosphère terrestre actuelle où la pression partielle de CO₂ est faible, l'effet de serre amène la température au sol de -18 à +15°C. La vie qui nécessite une température régulière permettant l'état liquide de l'eau a ainsi pu se développer.

Dans l'atmosphère martienne, l'eau ne peut être que sous forme gazeuse ou solide à cause de la pression très faible (< 6 hPa qui est la pression du point triple de l'eau) et de la température très basse (-55°C). La vie y est également impossible, d'autant que les ultraviolets solaires ne sont pas absorbés par suite de l'absence d'ozone dans l'atmosphère.

Un **schéma de l'effet de serre** avec bilan d'énergie ainsi que le **diagramme de phases de l'eau** étaient attendus.

Des points ont été attribués lorsque les candidats ont su développer certains aspects des relations entre atmosphère et biosphère, par exemple la formation de trioxygène ou ozone O_3 dans la basse stratosphère vers 20 km d'altitude par photodissociation du dioxygène sous l'action des ultraviolets ($\lambda < 242 \text{ nm}$), ou bien le fonctionnement des cyanobactéries filamenteuses à l'origine des stromatolites.

Les prestations des candidats

Dans l'introduction, les candidats considèrent souvent que le Big Bang est à l'origine de la formation du Système Solaire, ce qui traduit une difficulté à situer les grands événements sur une échelle de temps et d'espace. Le rapprochement entre l'atmosphère primitive de la Terre et les atmosphères actuelles de Mars et de Vénus a en général été bien compris. Mais si la plupart des candidats savent que la photosynthèse est la source de l' O_2 terrestre, en revanche bien peu savent que les carbonates (calcaires et coquilles diverses) sont des puits de CO_2 . Certains ont même attribué l'apparition de la vie à la présence d'oxygène.

Le rôle des premières cyanobactéries édifiant les stromatolites est relativement bien connu, ainsi que la signification des minerais de fer rubanés, mais les uraninites sont totalement ignorées.

L'origine de l'ozone stratosphérique est parfois mentionnée.

L'effet de serre est rarement expliqué correctement.

La discussion sur la présence ou l'absence de vie sur les planètes telluriques est globalement correcte, même si le diagramme de phase de l'eau n'est qu'exceptionnellement évoqué.

2. Les surfaces

Les surfaces des objets telluriques du système solaire présentent une cratérisation contrastée. Vous commenterez le document 2 qui en fournit plusieurs exemples. Après avoir expliqué ce phénomène, vous en développerez des applications à l'étude des surfaces des corps telluriques (document 3).

Les attentes du jury

Les candidats devaient **connaître et savoir utiliser la densité de cratérisation comme outil de datation des surfaces planétaires.**

A. La cratérisation

Le document 2a montre des exemples de surfaces cratérisées sur la Lune. Il en existe deux types très contrastés :

- les "terres" à albédo élevé, très cratérisées, à cratères de grande taille (jusqu'à 50 km de diamètre sur le document 2c) et à morphologie d'autant plus émoussée et érodée qu'ils sont de grande taille. On remarque que la surface des grands cratères est également cratérisée par de plus petits
- les "mers" à albédo plus faible, moins cratérisées, à cratères de petite taille (4 km sur le document 2b), à la morphologie bien marquée.

Tous les objets du système solaire, planètes telluriques, satellites, astéroïdes présentent une telle cratérisation sur leur surface. C'est un phénomène morphologique très important dans le système solaire.

Cette cratérisation résulte du bombardement météoritique à l'origine de l'accrétion des planètes. Ce bombardement météoritique était très abondant pendant le premier milliard de l'existence du système solaire (queue d'accrétion). Il a ensuite diminué, aussi bien en fréquence de collisions qu'en taille des objets, au fur et à mesure que le système solaire était "nettoyé" des planétoïdes d'orbites chaotiques.

B. Applications

On utilise la densité de cratérisation comme chronomètre relatif pour dater les surfaces planétaires. On obtient la courbe du document 3 après étalonnage à partir des échantillons lunaires et terrestres, les seuls dont on connaisse l'âge absolu en radiochronométrie. Cette courbe montre que les surfaces les plus cratérisées sont les plus anciennes alors que les surfaces sans cratères sont très récentes, voire actuelles. Ceci peut être mis en relation avec l'âge de l'activité géologique.

Sur la Lune, les "terres" plus cratérisées sont les plus anciennes (4,5 Ga) et correspondent à une croûte primitive, les "mers" moins cratérisées sont plus récentes (3,5 Ga) et sont constituées de coulées basaltiques. La forme circulaire des "mers" résulte elle-même d'impacts de météorites géantes.

Ces deux types de surface se retrouvent sur Mars, et sont visibles sur le document 10. La plus ancienne (3,2 Ga), bien cratérisée, forme l'hémisphère sud, la plus récente (1 Ga), peu cratérisée constitue les plaines de l'hémisphère nord.

Les cratères d'impact sont très rares sur Terre à cause de l'activité géologique toujours actuelle (érosion, sédimentation, volcanisme, tectonique globale) qui en fait disparaître les traces.

Pour expliquer la rareté des cratères d'impact sur Vénus, on peut faire intervenir l'atmosphère très dense qui ralentit et fragmente les plus gros météorites, ou bien une activité géologique toujours actuelle, par exemple des coulées volcaniques qui recouvrent les cratères d'impact, ou encore une rhéologie particulière de la surface de la croûte liée à sa température élevée (457°C).

Les prestations des candidats

Les différences entre "terres" et "mers" lunaires sont à peu près connues, même si quelques candidats mettent de l'eau dans les mers lunaires.

L'origine de la cratérisation est bien connue, quelques rares candidats parlent encore de volcans lunaires. La cratérisation de plus en plus faible avec le temps est le plus souvent expliquée uniquement par une tectonique récente et les effets de l'érosion faisant disparaître les cratères. Peu de candidats font intervenir un bombardement météoritique moins dense avec le temps, à la suite d'un "nettoyage" du système solaire.

C. La carte géologique de Rochechouart 1/50000

Le document 4 est un extrait de la carte géologique au 1/50 000 de Rochechouart (Haute-Vienne).

En utilisant les documents 4 et 5, identifiez et commentez l'ensemble des marqueurs pétrographiques et géophysiques qui permettent de caractériser un des événements géologiques majeurs subis par la région.

Les attentes du jury

Il s'agissait ici de **commenter les différents marqueurs géologiques et géophysiques d'un impact météoritique dans le Massif Central.**

Une coupe permettait d'**établir la distinction entre le socle varisque et les impactites, c'est-à-dire entre un métamorphisme général et un métamorphisme de choc.**

La carte géologique de Rochechouart (document 2) est située dans l'ouest du Massif Central en Limousin sur des terrains gneissiques et granitiques mis en place lors de l'orogénèse varisque à la fin du Paléozoïque (380 à 300 Ma).

Le socle est formé d'un ensemble de paragneiss et de gneiss leptyniques à biotite, muscovite, sillimanite, grenat, staurotide, parfois disthène, c'est-à-dire les conditions du faciès amphibolite (environ 600°C et 6 kb). La foliation métamorphique est fortement plissée, et son pendage varie de 35 à 80°. Ces gneiss sont intrudés par des granites et des granodiorites conformes ou discordants par rapport à la foliation.

Recouvrant en discordance cet ensemble métamorphique, on observe trois types de brèches (définition : roches constituées d'éléments rocheux anguleux liés par une matrice ou un ciment) :

- des brèches monogéniques autochtones (surcharge en lignes obliques sur le fond de couleur de la carte), formées aux dépens des roches en place, étendues sur une dizaine de kilomètres,
- des brèches polygéniques allochtones (br, vbr), recouvrant les précédentes et qui sont des brèches de retombée (ou d'écoulement gravitaire) constituées d'éléments de lithologie variable,
- des brèches polygéniques allochtones à fort taux de fusion (fbr) à matrice vitreuse et vacuolaire abondante, à éléments rares, concentrées au centre de la structure bréchique, près de Babaudus.

Ces brèches sont des impactites, formées à la suite d'un impact de météorite ayant développé un métamorphisme de choc. D'autres arguments sont visibles sur les documents proposés :

- les cônes de percussion (ou shatter-cones, figurés en triangles sur la carte du document 2) sont caractéristiques du métamorphisme de choc ; ils se traduisent dans les roches par un débit naturel en surfaces coniques emboîtées, les cônes ayant une hauteur de quelques centimètres ; on les trouve surtout au centre de la structure ;
- le document 5a montre un cristal de quartz choqué présentant des pseudoclivages, correspondant à des plans de dislocations très rapprochés (de l'ordre de quelques microns) ; ces déformations planaires nécessitent une pression très élevée, entre 10 et 25 GPa ;
- l'existence de brèches à matrice fondue et vacuolaire révèle des conditions de pression et de température extrêmes aboutissant à la fusion et même à la vaporisation des roches (10000°C et plusieurs centaines de GPa) ;
- sur le document 5b une anomalie gravimétrique négative de – 9 mgal au maximum, circulaire, large de 15 km (donc plus étendue que les brèches réduites par l'érosion), révèle un défaut de masse dû à la densité plus faible des brèches qui remplissent le cratère.

La structure mise en évidence est un astroblème, trace d'une ancienne chute de météorite. Le centre de la structure se trouve à proximité de Valette. Le cratère lui-même, d'un diamètre d'une vingtaine de km, a disparu par érosion. La chute peut être datée post-Carbonifère d'après la carte. Son âge a pu être déterminé plus précisément,

par des méthodes radiochronologiques, de la fin du Trias (Norien, 214 ± 8 Ma). Quant au diamètre de la météorite, on peut l'estimer à 1 km environ.

Complétez votre argumentation en construisant et interprétant une coupe géologique dessinée à main levée sur le profil topographique du document 6 (à rendre avec la copie).

La coupe géologique (voir page suivante) montre les brèches polygéniques de retombée qui forment localement des reliefs par inversion sur lesquels sont installés des villages comme Chassenon ou Bore. Ces brèches recouvrent les brèches monogéniques qui résultent de l'écrasement des roches en place. Le centre du cratère, c'est-à-dire le point d'impact de la météorite révélé par les brèches à fort taux de fusion, peut être repéré vers Valette. Les formations gneissiques très plissées contiennent des passées de leptynites et sont recoupées par des intrusions de granites. Quelques filons de microgranites orientés nord-sud recoupent également l'ensemble. Les cônes de percussion se sont surtout développés dans ces roches à grain fin.

Des points ont été attribués aux candidats qui ont évoqué des marqueurs géochimiques d'impact tels que l'abondance d'éléments sidérophiles (Ni, Cr ou Ir) dans les impactites.

La chute de la météorite de Rochechouart pourrait être mise en relation avec les extinctions massives de taxons de la fin du Trias. Deux autres cratères de même âge ont d'ailleurs été mis en évidence au Canada, alors à proximité du Massif Central, ce qui pourrait évoquer une "pluie" de météorites.

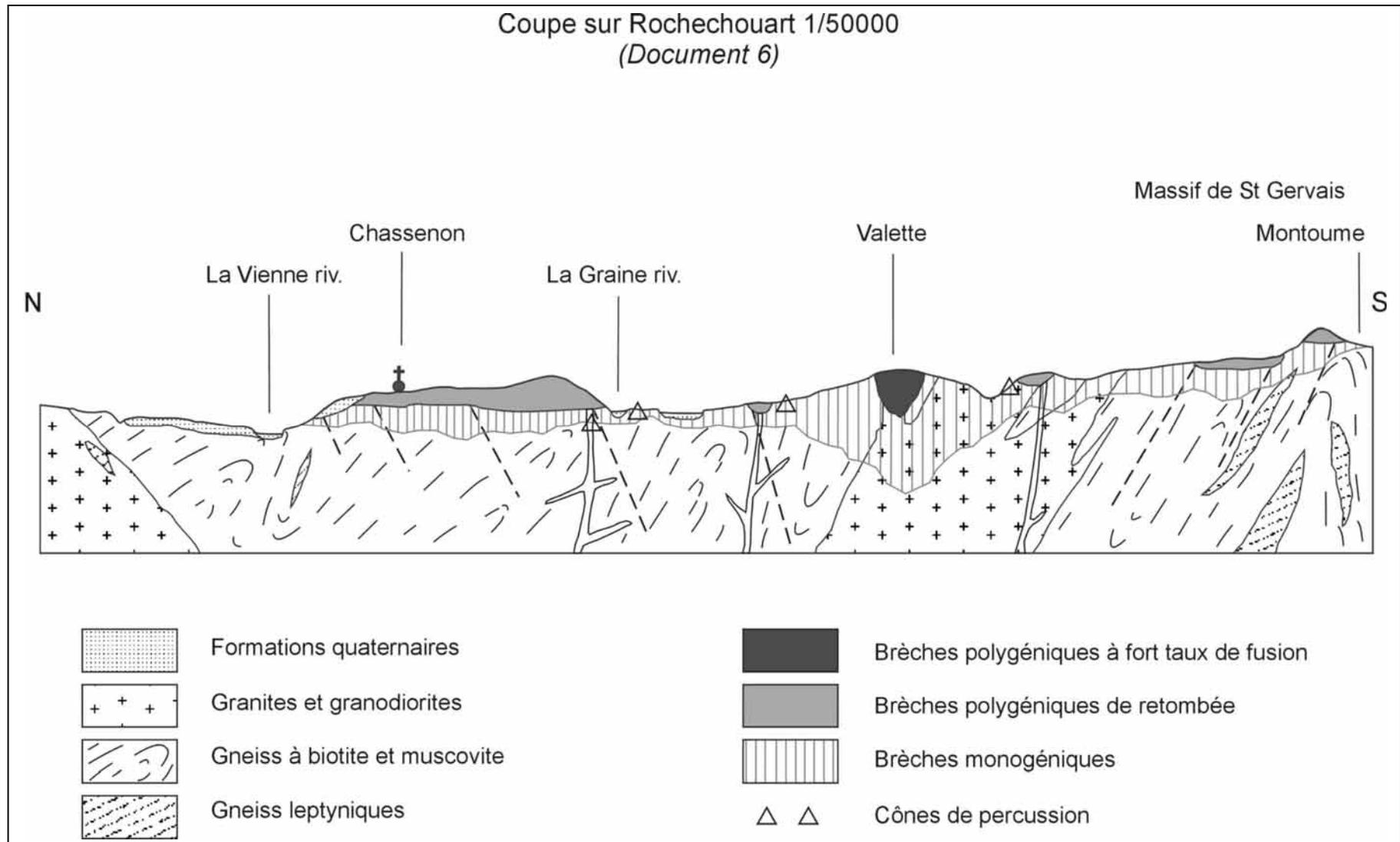
Les prestations des candidats

17% des candidats ignorent l'existence d'un astroblème à Rochechouart. D'ailleurs le mot astroblème lui-même figure rarement dans les copies. Les brèches et les quartz choqués sont souvent évoqués comme marqueur d'impact. Les anomalies gravimétriques (souvent confondues avec des anomalies magnétiques) sont très mal interprétées.

Plus grave, la presque totalité des candidats attribue à l'impact le métamorphisme varisque à sillimanite de moyenne pression et moyenne température ainsi que la fusion de la croûte à l'origine des granites. La pression nécessaire à la cristallisation de la sillimanite (5 kb) est sans commune mesure avec la pression développée par un impact météoritique, sur un temps très court (20 GPa).

La coupe à main levée a été irréalisable pour beaucoup de candidats. Elle révèle souvent une ignorance totale des relations entre granites et roches métamorphiques. Les candidats essayent de rendre compte de la succession des terrains par des anticlinaux et des synclinaux (en superposant des couches de gneiss, de granite et d'alluvions par exemple). Les brèches monogéniques n'ont été représentées que de manière exceptionnelle et leur signification a échappé à beaucoup de candidats.

L'abondance d'éléments sidérophiles (Ni, Cr, Ir..) est parfois évoquée comme marqueur d'impact. Des allusions à la météorite de la limite Crétacé-Tertiaire (Chicxulub) et aux extinctions qui ont suivi se trouvent dans quelques copies et ont été valorisées.



3. Les météorites et la différenciation interne

Des échantillons de météorites sont présentés sur les photos du document 7. Identifiez chacun d'eux à partir d'une description et d'une analyse rigoureuse. Le tableau du document 8a complète l'échantillonnage. Vous montrerez qu'il est possible d'établir une classification raisonnée de ces objets en utilisant leurs caractéristiques minéralogiques et physiques.

Les attentes du jury

Les candidats devaient **dominer la classification des météorites et pouvoir les utiliser comme modèles de la constitution des planètes telluriques.**

Le jury attendait un **dessin de l'accrétion des planétoïdes et de la différenciation des planètes**, ainsi qu'une **coupe actuelle de la Terre** réalisée à partir d'arguments géophysiques et montrant la différenciation chimique.

La classification des météorites est basée sur la proportion relative entre deux composants :

- le fer silicaté, c'est-à-dire oxydé en Fe^{2+} , présent dans des olivines ou des orthopyroxènes (hypersthène),
- et le fer métallique, c'est-à-dire à l'état natif.

Du pôle silicaté au pôle métallique, les météorites sont classées selon une richesse croissante en éléments lourds, soit en fait par densité croissante.

On définit alors :

- les météorites de "type 1" ; chondrites carbonées (document 7a) caractérisées par la présence de chondres à olivine ;

Ce sont de petites structures sphériques de 0,5 mm de diamètre résultant de la cristallisation de globules fondus. Le document en montre quatre de formes différentes. On observe aussi des inclusions réfractaires, dont les minéraux ne sont pas reconnaissables sur le document (ce sont des oxydes et silicates de Ca, Al et Ti). Ces inclusions à aspect duveteux renferment les premiers minéraux qui se sont condensés à haute température (1400°C) dans les chondrites à partir des gaz de la nébuleuse solaire. La matrice opaque est formée de minéraux cristallisés à basse température, riches en éléments légers et volatils (H, C, N, O, S), tels que argiles, sulfures, sulfates, carbonates ainsi que des composés carbonés dits "organiques" variés. Densité faible, de 2,2 à 2,9.

Des points ont été attribués aux candidats qui ont détaillé ces composés carbonés, fondamentaux dans une réflexion sur l'origine de la vie. On y trouve des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, des acides carboxyliques, des amines, des amides, et 74 acides aminés dont 55 n'ont pas d'équivalents terrestres. On peut penser que la vie terrestre a pu se développer à partir de ces molécules prébiotiques d'origine météoritique. Toutefois toutes ces molécules sont racémiques, ce qui n'est pas le cas des molécules organiques terrestres qui sont toutes des énantiomères L.

- les météorites de "type 2" ; chondrites ordinaires (document 7b), caractérisées par la présence de chondres à olivine (gros cristaux) ou hypersthène (cristaux aciculaires) pouvant atteindre 1 mm de diamètre ;

Sur le document, on observe aussi des phases opaques peu abondantes formées d'un alliage fer-nickel métallique (5 à 10 % Ni) et de sulfure de fer. Chimiquement et par rapport aux chondrites carbonées, les chondrites ordinaires sont plus pauvres en éléments légers et volatils. Densité moyenne, de 3,5 à 4.

L'ensemble des chondrites, carbonées et ordinaires, représente globalement les météorites les plus communes, avec 86 % des chutes observées.

- les météorites de "type 3" ou achondrites ;

Contrairement aux deux types précédents, ces météorites silicatées ne possèdent pas de chondres. Elles sont très proches des roches magmatiques terrestres par la structure grenue parfois cumulative, à grain plus ou moins fin, et la minéralogie, olivine, orthopyroxène et plagioclase calcique. Ces roches gabbroïques, comme leurs équivalents terrestres, sont formées par fusion partielle suivie d'une cristallisation fractionnée.

Densité faible, de 2,6 à 3. Chutes relativement rares, 8 %.

- les météorites de "type 4" ;

Sidérolites ou pallasites (document 7c) sont formées d'un mélange de silicates (cristaux d'olivine le plus souvent) et d'un alliage de fer-nickel métallique, en proportion égale. Densité assez forte de 4,3 à 7. Les sidérolites sont les plus rares des météorites avec seulement 1 % des chutes.

- les météorites de "type 5" ;

Les sidérites (document 7d) sont formées exclusivement d'un alliage de fer et nickel métallique, comprenant de 5 à 15 % de Ni. Quelques silicates ou sulfures peuvent être présents en très faible quantité.

Densité forte, de 8. Chutes relativement rares, 5 %.

En intégrant les données du document 8, montrez comment l'étude des météorites nous renseigne sur la différenciation interne des corps telluriques tels que la Terre ou la Lune (doc. 9).

Dans cette classification, les météorites se répartissent selon un degré de différenciation croissante, c'est-à-dire depuis les chondrites carbonées, les moins différenciées par rapport au Soleil, les plus riches en éléments légers, volatils, jusqu'aux sidérites, les plus différenciées, les plus riches en éléments lourds.

Les météorites sont des fragments d'astéroïdes plus ou moins différenciés. On peut donc les utiliser comme témoins de la différenciation des planètes en noyau, manteau, croûte. Cette différenciation des objets planétaires se fait selon des processus physico-chimiques simples, accumulation par gravité d'un noyau de fer nickel, puis différenciation d'un manteau péridotitique et d'une croûte gabbroïque par fusion et cristallisation fractionnée de la partie silicatée.

Les chondrites carbonées ont une composition chimique primitive, riche en éléments légers (3,5 % C), proche de celle de la nébuleuse présolaire à l'origine de tous les objets du système solaire. Elles se rapprochent de la composition du Soleil actuel aux gaz près, ou bien des comètes. Elles ont l'âge du système solaire, soit 4,56 Ga.

Les chondrites ordinaires, plus pauvres en éléments légers (et donc plus différenciées) que les chondrites carbonées, correspondent au manteau silicaté primitif de la Terre formé lui aussi essentiellement d'olivine. Le modèle chondritique est un modèle de manteau primitif utilisé en géochimie. Ages de 4,56 à 4,50 Ga.

Les achondrites gabbroïques correspondent aux croûtes primitives des planètes telluriques. Le document 9 montre un échantillon des "terres" lunaires, donc de la croûte primitive, c'est un gabbro à clinopyroxène et

plagioclase à structure grenue. Les structures brèchiques des achondrites sont des brèches d'impact dues aux nombreuses chutes de météorites sur la surface des objets telluriques. Ages de 4,55 à 4,40 Ga.

Les sidérolites avec leur composition moitié silicates et moitié fer peuvent correspondre à l'interface noyau-manteau ou couche D".

Les sidérites entièrement métalliques correspondent aux noyaux de fer nickel des planètes telluriques.

D'après le document 8b, on constate un fractionnement des éléments chimiques à partir de la chondrite carbonée au cours de la différenciation des planètes.

Le noyau ferreux concentre les éléments sidérophiles, Fe, Cr, Ni avec des quantités plus faibles d'éléments légers, O, Si, C, S.

Le manteau péridotitique concentre les éléments lithophiles, Mg, Al, Si, Ca

La croûte terrestre océanique gabbroïque qui se forme par fusion partielle du manteau, concentre les éléments lithophiles incompatibles ou hygromagmatophiles, Na, Al, Si, K, Ca, Rb, Sr, U.

On peut considérer que la croûte océanique terrestre est analogue dans sa formation et sa nature aux achondrites ou aux croûtes primitives des planètes.

Par contre la croûte continentale n'a aucun équivalent parmi les météorites : son mode de formation est propre à la Terre.

Les météorites représentent ainsi un échantillonnage des enveloppes actuelles ou passées des objets du système solaire. Elles nous permettent de suivre la différenciation de la matière solaire lors de la formation des objets telluriques du système solaire.

Les prestations des candidats

La classification des météorites avec ses termes principaux (chondrites, achondrites, sidérolites, sidérites) est rarement connue. La majorité des candidats a pourtant entendu parler des chondrites et des achondrites, mais sont incapables de reconnaître les chondrites sur les photos.

L'existence et la signification des chondrites carbonées, pourtant fondamentales, sont très rarement connues. Les molécules carbonées complexes, dont des acides aminés, que l'on y trouve sont inconnues des candidats. La relation entre les météorites et les astéroïdes corps parents n'est jamais mentionnée.

Les analogies entre les météorites et les enveloppes de la Terre sont plus ou moins bien expliquées. De nombreux candidats considèrent que la composition des météorites est la même que celle du manteau. Erreur grave et fondamentale, beaucoup de candidats pensent que la croûte continentale terrestre a un équivalent parmi les météorites, en général la chondrite carbonée sur le critère de la seule densité.

*Les compositions chimiques ne sont pratiquement pas utilisées pour cette comparaison, ce qui montre une **absence de connaissances en géochimie de base**. Bien peu de candidats ont regroupé les éléments chimiques en incompatibles, compatibles, sidérophiles... pour comprendre la différenciation de la Terre.*

4. Les dynamiques globales et l'originalité de la Terre

A. Le volcanisme

Les modelés des surfaces des corps telluriques résultent également de l'activité volcanique actuelle ou passée. En utilisant le document 10, vous comparerez la répartition des appareils volcaniques à la surface des planètes Vénus, Terre et Mars. Quelles conclusions peut-on en tirer quant à l'originalité de la dynamique interne de la Terre ?

Attentes du jury

On attendait **une réflexion sur la répartition des manifestations volcaniques en fonction de l'existence ou non de plaques lithosphériques et du régime thermique des enveloppes des planètes.**

Document 10b : La répartition linéaire des appareils volcaniques actuels sur Terre le long des limites de plaques en convergence (subductions) ou en divergence (dorsales) est caractéristique. La fusion partielle du manteau asthénosphérique est donc liée aux mouvements des limites de plaques. Seuls les volcans de points chauds ont une répartition aléatoire. L'ensemble révèle un système mantellique convectif surmonté par une couche limite conductrice, morcelée et de faible épaisseur : la lithosphère.

Document 10a : Sur Vénus la répartition des très nombreux volcans est uniforme et aléatoire sur toute la surface. Ils semblent plus rares ou absents sur les deux zones élevées, le plateau de *Ishtar Terra* au nord et celui de *Aphrodite Terra* sur l'équateur. Le volcanisme est lié ici à une activité globale et continue d'un manteau très chaud entièrement convectif, sans couche limite conductrice.

Document 10c : Sur Mars, on observe un très petit nombre de volcans (une quinzaine) concentrés en deux zones, le bombement *Tharsis*, zone élevée sur l'équateur, et la région *d'Elysium* sous les basses latitudes de l'hémisphère nord. A l'intérieur du manteau de faible volume (six fois plus petit que celui de la Terre), seules deux zones ont été suffisamment chaudes pour fondre et correspondent à deux mega-points chauds. En l'absence de tectonique des plaques, les volcans engendrés sont de très grande taille (exemple, le volcan Olympus Mons dépasse 25 km d'altitude).

Conclusion : Vénus, la Terre et Mars sont trois planètes qui présentent une activité volcanique actuelle ou passée contrastée, révélant un fonctionnement de la lithosphère et du manteau fondamentalement différent. Seule la Terre possède une tectonique des plaques et tout ce qui en découle : distribution linéaire des structures géologiques le long des limites de plaques, existence de dorsales, de subductions, de métamorphisme, de granite et d'une croûte continentale...

Les prestations des candidats

La comparaison des volcanismes des trois planètes est globalement satisfaisante mais rarement mise en relation avec le régime thermique de l'ensemble manteau et lithosphère.

B. Formation et évolution des continents, exemple de l'Europe

La planète Terre se distingue des autres planètes par l'existence d'une croûte continentale dont la formation remonte à l'Archéen. Les photographies du document 11 présentent des roches caractéristiques de cette croûte. Après les avoir identifiées, et en vous aidant du document 8, vous proposerez brièvement des processus généraux pouvant conduire à la formation de la croûte continentale terrestre.

Les attentes du jury

Concernant la nature de la croûte continentale, le jury attendait **une discussion sur les relations entre métamorphisme et anatexie**. Les candidats devaient présenter **un diagramme PT** montrant les limites des faciès métamorphiques, les polymorphes SiAl_2O_5 et le solidus du granite hydraté.

1. Pétrographie et géochimie de la croûte continentale

La planète Terre est caractérisée par l'existence d'une croûte continentale secondaire, dont la formation remonte à 4 Ga.

Le document 11 représente deux roches caractéristiques de cette croûte :

- un granite (document 11a), roche magmatique plutonique grenue non orientée, à quartz, feldspath alcalin, plagioclase, biotite.

- un gneiss (documents 11b et 11c), roche métamorphique schisteuse et litée à quartz, feldspaths, biotite, cordiérite, sillimanite. Ces deux derniers minéraux sont des géothermomètres et révèlent une température élevée, 600 à 700°C, et une pression moyenne, 4 à 6 kb, typiques du faciès amphibolite. Le document 11c montre un gneiss plissé dont le litage est dérangé par la fusion commençante ou anatexie des lits quartzofeldspathiques.

Chimiquement (document 8b), les roches de la croûte océanique sont caractérisées par un enrichissement en éléments incompatibles ou hygromagmatophiles (Na, Al, Si, K, Rb, Sr, U) de l'ordre de 2 à 9 fois par rapport au manteau.

Les roches de la croûte continentale montrent un enrichissement encore plus marqué en éléments incompatibles, de l'ordre de 4 à 60 fois par rapport au manteau. On y observe des valeurs élevées en ^{87}Sr radiogénique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0,705$) dues à la grande concentration en Rb de la croûte continentale. En effet le ^{87}Sr se forme à partir du ^{87}Rb par désintégration β^- .

Corrélativement, on note un appauvrissement en éléments compatibles (Mg, Cr, Ni) de l'ordre de 7 à 20 fois par rapport au manteau.

2. Formation de la croûte continentale

La différenciation de la croûte continentale s'est faite après l'accrétion et la différenciation primitive de la Terre, par extraction puis concentration d'éléments incompatibles du manteau. Pour cela, on peut envisager deux processus magmatiques successifs :

- la fusion partielle du manteau réalise une première concentration en éléments incompatibles en formant un magma basaltique ;

- la crystallisation fractionnée de ce magma entraîne une deuxième concentration en éléments incompatibles et forme des magmas granitiques caractéristiques de la croûte continentale.

A l'Archéen on peut envisager une fusion partielle hydratée de la croûte océanique sous fort gradient thermique formant des magmas granitiques pauvres en potassium, les TTG (tonalites-trondhjemites-granodiorites).

Lors des orogènes, la croûte continentale peut se recycler par anatexie, comme le gneiss du document 11c qui, en fondant partiellement, engendre des magmas granitiques. Un recyclage par érosion et sédimentation peut également être évoqué.

Les prestations des candidats

Granite et gneiss sont souvent reconnus, mais très peu de candidats précisent le type de métamorphisme et ont reconnu une anatexie dans l'échantillon du document 11c.

La définition de la croûte continentale terrestre sur le plan géochimique (enrichissement en éléments incompatibles) est rarement proposée, ce qui révèle, une fois de plus, l'incapacité des candidats à construire des raisonnements basés sur des données géochimiques.

En Europe, la plus ancienne croûte continentale (3,2 Ga) se trouve au nord de la Scandinavie (péninsule de Kola) ainsi que le montre la carte structurale du document 12. A l'aide de vos connaissances et en vous aidant du document 13, vous reconstituerez les grands processus géologiques qui ont abouti à l'édification de la croûte continentale de l'Europe actuelle.

Les attentes du jury

Les candidats devaient **montrer la croissance de la croûte continentale européenne par ajout de ceintures orogéniques successives au craton archéen du nord de la Scandinavie.**

Chaque continent possède un ou plusieurs cratons archéens.

Les continents se forment par accrétion de ceintures orogéniques successives autour des cratons archéens. Le résultat final d'un orogène est de raccourcir et d'épaissir la croûte continentale par sous-charriages successifs, en y intégrant les marges passives des anciens domaines océaniques. Le volume et la surface des boucliers ou cratons sont donc augmentés à chaque orogénèse.

3. L'Europe Précambrienne

L'Europe s'est édifiée à partir du craton est-européen auquel on donne le nom de Baltica.

Ce craton affleure au nord de la Scandinavie et forme les terrains métamorphiques archéens de la péninsule de Kola (orogène Karélien à 2,5 Ga). La croûte continentale y est très épaisse, de l'ordre de 55 km (document 13).

Puis trois ceintures orogéniques successives sont venues s'y ajouter du nord vers le sud :

- au Protérozoïque inférieur, à 1,8 Ga, en Suède septentrionale et Finlande,
- au Protérozoïque moyen, à 0,9 Ga, en Scandinavie méridionale,
- au Protérozoïque supérieur, l'orogène Cadomien ou Panafricain à 0,6 Ga, en Europe du nord, Angleterre et Normandie.

Le craton est-européen affleure également en Ukraine, où la croûte a une épaisseur d'environ 50 km. Le reste du craton est sous le bassin Paléozoïque de Moscou recouvert de plusieurs km d'épaisseur de sédiments (jusqu'à 20 km). La croûte y a une épaisseur de 45 km.

Un deuxième craton est visible en Europe, un fragment du craton nord-atlantique sur la marge NW de l'Ecosse. On peut le rattacher au craton nord-américain ou Laurentia.

4. L'Europe Phanérozoïque

Trois autres ceintures orogéniques se forment successivement du nord vers le sud :

- au Paléozoïque moyen (Dévonien), l'orogène Calédonien à 400 Ma, est formé par la collision entre la Laurentia et la Baltica pour aboutir à l'édification de la Laurussia. Cet orogène s'étend en Norvège, Ecosse et Irlande.

- au Paléozoïque supérieur (Carbonifère), l'orogène Varisque (ou Hercynien) à 350 Ma, se forme par la collision entre le Gondwana et la Laurussia. On l'observe actuellement dans toute l'Europe moyenne depuis l'Ibérie

et l'Irlande du sud jusqu'à la Bohême à l'est. Au Permien, l'Oural s'édifie par collision entre la Laurussia et la plaque asiatique. Il en résulte un supercontinent, la Pangée.

- depuis la fin du Crétacé, l'orogène Alpin au sens large se développe par collision entre l'Eurasie et l'Afrique. Il s'étend d'ouest en est depuis le Rif marocain, en passant par les Apennins, les Alpes, les Carpates, l'Anatolie, le Caucase, le Zagros. La croûte y est fortement épaissie par les subductions de croûte continentale : on note des valeurs de 60 km sous les Alpes et les Carpates, de 50 km sous les Pyrénées.

Ces trois orogènes sont des chaînes de collision à double déversement, avec des chevauchements et des charriages globalement vers le nord au nord, et vers le sud au sud. On observe très fréquemment un métamorphisme de faciès schistes bleus et éclogites, témoin de subductions antérieures aux collisions. A l'exception des Alpes franco-italiennes, le métamorphisme de faciès amphibolite, conséquence de la collision continentale, y est très répandu, et conduit à une anatexie crustale abondante et à la formation de nombreux granites.

Les prestations des candidats

Très peu de candidats sont allés jusqu'à cette dernière partie et ont su exploiter la carte structurale simplifiée de l'Europe ainsi que le document montrant la profondeur du Moho. Quelques uns ont toutefois su reconnaître le rôle des grandes orogènes du Paléozoïque et de l'orogène alpin dans l'édification de l'Europe.

Conclusion

Ce devoir a révélé une fois de plus la faible culture en Sciences de la Terre de bon nombre de candidats. Des thèmes pourtant largement diffusés par les médias (effet de serre, météorites martiennes, impacts météoritiques) semblent mal connus. Et la plupart n'ont pas le recul nécessaire pour situer les grands événements géologiques dans le temps et l'espace, confondant système solaire et galaxie, Big Bang et supernova, voire étoile et planète.

L'illustration est déficiente, avec des dessins peu nombreux, de mauvaise qualité, parfois absents.

Mais ce que le jury a le plus déploré, c'est le langage trop souvent utilisé par les candidats, français déplorable, syntaxe approximative avec des noms sans articles, des verbes non conjugués, et une orthographe catastrophique avec des mots souvent écrits en phonétique. Ces défauts sont très inquiétants de la part de futurs enseignants.