

CONCOURS G2E

GÉOLOGIE

Durée : 3 heures

Les calculatrices programmables et alphanumériques sont autorisées. Les téléphones portables et autres "smartphones" doivent être éteints au cours de l'épreuve et ne doivent en aucun cas être utilisés même à titre de montre.

L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est strictement interdit.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il en fait mention dans sa copie et poursuit sa composition. Dans ce cas, il indique clairement la raison des initiatives qu'il est amené à prendre.

Les candidats doivent respecter les notations de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la numérotation de la question posée.

Une grande attention sera apportée à la clarté de la rédaction et à la présentation des différents schémas.

Attention ! Les figures 5c et 6, ainsi que les tableaux 1 et 2 en annexe, sont à découper et à coller sur votre copie.

Les Argiles : de leurs origines aux intérêts économiques

Utilisées depuis toujours, en particulier dans les peintures rupestres, les briques ou les poteries, les tablettes cunéiformes et même l'alimentation, les argiles ont constitué l'un des premiers vecteurs d'expression et de transmission des savoirs. Souvent méconnues, elles sont volontiers considérées comme un matériau peu noble, à faible valeur ajoutée. Cependant, les argiles sont omniprésentes dans notre vie quotidienne. Ressources disponibles en grande quantité sur l'ensemble du globe, ces matériaux ont accompagné l'homme tout au long de son histoire. Aujourd'hui, les argiles sont utilisées dans la plupart des grands secteurs industriels (pharmacie, cosmétique, céramique, papeterie, peinture, matériaux de construction, polymères composites, stockage des déchets, industrie pétrolière, ...). Leurs origines, leurs propriétés physico-chimiques, ainsi que leur comportement mécanique font des argiles, un des matériaux du XXI^{ème} siècle.

1. ORIGINES DES ARGILES (3 POINTS).

1.1. Altération des silicates : quels sont les deux processus chimiques majeurs conduisant à l'altération des minéraux ? Comparez l'intensité et la nature de ces processus d'altération sous un climat tropical humide et sous un climat tempéré.

1.2. On considère un granite constitué de 30% de quartz, 30% de feldspath orthose, 30% de feldspath plagioclase et 10% de biotite. Complétez le tableau 1 (5 cases à remplir). A l'aide de la figure 1 et du tableau 1, que peut-on s'attendre à observer d'un point de vue minéralogique, si ce granite subit une hydrolyse ménagée sous un climat tempéré ? Donnez les réactions chimiques.

2. AGES DES ARGILES (4 POINTS).

Une campagne de recherche, d'une région favorable à un éventuel stockage de déchets radioactifs en profondeur, est entreprise dans le sud de la vallée du Rhône. A partir des échantillons issus d'un forage scientifique (Fs), une série de mesures pétrophysiques, géochimiques et mécaniques a été réalisée. Sur le plan pétrophysique, les analyses ont montré une masse volumique moyenne des roches sédimentaires quasi invariable de 2200 kg.m^{-3} , une porosité oscillant entre 12% et 25%, et des perméabilités variant entre 0,1 mD et 100 mD.

Une zone cible argileuse riche en smectites (argiles gonflantes) a été identifiée. Il s'agit de la formation lithostratigraphique appelée "Couche Silteuse de Marcoule" (CSM). Au niveau géochimique, afin de mieux connaître l'origine et déterminer l'âge de ces argiles, ainsi que les interactions possibles avec d'éventuels fluides, on mesure la composition isotopique $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ des smectites dans cette formation crétacée. L'analyse des échantillons issus du forage se fait par spectrométrie de masse en phase gazeuse.

La désintégration de l'élément père P (^{40}K), en élément fils F (^{40}Ar), suit la relation :

$$F_t = F_0 + P_t \cdot (e^{\lambda t} - 1).$$

La période de demi-vie liée à la constante de désintégration λ , est : $T = 1,2 \cdot 10^{10}$ années.

La quantité d' ^{40}Ar est négligeable au moment de la formation du système. Par ailleurs, étant donné les temps géologiques considérés, on s'intéresse uniquement à la désintégration du ^{40}K en ^{40}Ar . Les autres désintégrations ne sont pas prises en compte.

2.1. En assimilant la transformation de ^{40}K à une simple désintégration, exprimez le temps t à partir de la relation précédente.

2.2. Les dosages sur les smectites ont donné les résultats suivants :

$$^{40}\text{K} = 2,47 \cdot 10^{-5} \text{ mol.}, \text{ et } ^{40}\text{Ar} = 1,47 \cdot 10^{-7} \text{ mol.}$$

Calculez l'âge des argiles.

2.3. Une faille recoupe la formation CSM à la cote 550-600 m du forage. Dans le but de déterminer si cette faille constitue une barrière étanche, ou bien un drain à la circulation des fluides oxydants, des analyses isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ont été réalisées sur des calcites et des célestites (SrSO_4) présentes sur l'ensemble de la colonne stratigraphique (Fig. 2). Ces dernières ont été couplées à des mesures $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entreprises sur des pyrites (originelles et diagénétiques).

2.3.1. La méthode Pb-Pb ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) donne deux âges. Dans les pyrites authigènes (originelles), le ratio donne un âge de 97 Ma +/- 5Ma. Sur les pyrites diagénétiques, on obtient un âge de 34 Ma +/- 2Ma. Les âges proposés par la méthode Pb-Pb sont-ils compatibles avec le résultat obtenu par la méthode $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$? D'un point de vue géochimique, comment expliquez-vous ces deux âges ?

2.3.2. Dans le forage Fs, que montre la répartition verticale du ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Fig. 2) ? Comment expliquez-vous les valeurs au sein de la formation CSM ? Couplée à la méthode Pb-Pb, que pouvez-vous conclure sur (i) d'éventuelles paléo-circulations de fluides, (ii) leur localisation et, (iii) leur âge ?

3. DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES ARGILES A LEUR CAPACITE DE STOCKAGE (4 POINTS).

Dans le cadre du stockage de déchets radioactifs ultimes, on se propose à présent d'étudier le comportement mécanique de l'argile qui pourrait contenir ces déchets, ainsi que celui du calcaire urgonien (Fig. 2). On cherche à savoir si le matériau contenant les déchets résiste bien aux contraintes géologiques, et surtout s'il ne se fracture pas trop facilement afin d'assurer une capacité de confinement efficace. Des échantillons ont été récupérés lors d'une phase de carottage de la couche géologique cible située à 700 mètres de profondeur. Afin de réaliser des essais mécaniques simulant les contraintes géologiques, on utilise en laboratoire une cellule (ou presse) triaxiale (Fig. 3). Dans tous les essais réalisés, les effets de la température sont négligés.

Les trois contraintes σ_1 , σ_2 et σ_3 sont variables et sont contrôlées pendant l'essai par injection d'un fluide dans la cellule, de la manière suivante :

- une pression dite de confinement, P_c ($\sigma_2 = \sigma_3 = P_c$), est générée tout autour de l'échantillon. On peut ainsi simuler cette pression de confinement correspondant à la pression lithostatique ;
- on enfonce le piston afin d'augmenter progressivement la contrainte σ_1 , le long de l'axe vertical ($\sigma_1 > \sigma_2$, et $\sigma_2 = \sigma_3$) ;
- dans ce type d'essais mécaniques, on note la contrainte différentielle $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$. On mesure pour chaque $\Delta\sigma$, le taux de déformation engendré (ϵ , en % de l'échantillon rocheux, avec déformation finale - déformation initiale, divisée par la déformation finale).

3.1. Si l'on veut simuler les bonnes conditions lithostatiques du cadre géologique présenté ci-dessus, quelle pression de confinement (P_c) doit-on imposer dans la cellule triaxiale ?

3.2. On appelle résistance à la compression uniaxiale (R_c) d'une roche, la contrainte maximale qu'elle peut subir avant rupture, au cours d'un essai de compression uniaxiale, c'est-à-dire un essai en cellule sous presse triaxiale à pression de confinement très faible ($P_c = 0,1$ MPa).

Les résultats des essais mécaniques sur les argiles de la CSM et le calcaire urgonien sont donnés avec une pression de confinement (P_c) de 0,1 et de 15 MPa (Fig. 4).

A partir des courbes de la figure 4, que peut-on dire sur le comportement mécanique du calcaire : quel type de déformation le caractérise ?

Que peut-on conclure également sur le comportement mécanique de l'argile : quel type de déformation la caractérise ?

Donnez la valeur de la résistance à la compression uniaxiale des argiles de la CSM et du calcaire urgonien.

3.3. Lors du creusement d'une galerie souterraine ou d'un tunnel de section circulaire, on peut montrer, sous certaines hypothèses simplificatrices et en première approximation, qu'il y aura rupture en paroi (fracturation) si la pression lithostatique excède la moitié de la résistance à la compression uniaxiale.

Le calcaire urgonien est-il assez résistant à la rupture pour assurer une capacité efficace de confinement de déchets ? Justifiez votre réponse.

Avec un tel matériau calcaire, jusqu'à quelle profondeur peut-on réaliser un ouvrage souterrain de type galerie ou tunnel ?

3.4. Les argiles de la CSM sont-elles un bon matériau pour séquestrer en profondeur des déchets qui seront soumis à des contraintes géologiques ? Justifiez votre réponse.

4. DE L'IMPORTANCE ECONOMIQUE DES ARGILES (6 POINTS).

Si les argiles offrent des propriétés mécaniques singulières, elles peuvent également présenter un grand intérêt économique pétrolier, du fait de leur éventuelle teneur en matière organique. On se propose d'étudier ce potentiel, toujours dans la même région, au sud de la vallée du Rhône.

4.1. Vous avez à disposition, un extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000, centré sur le sud de la vallée du Rhône (Fig. 5a), accompagné de sa légende (Fig. 5b). Le forage scientifique (Fs) est indiqué sur la carte (Fig. 5a) par une étoile rouge.

Réalisez et légendez le schéma structural (Fig. 5c, à rendre) de la région, (i) en mettant bien en évidence les grandes unités géologiques reconnues (magmatiques et métamorphiques, sédimentaires paléozoïques, mésozoïques et cénozoïques), et (ii) en rattachant ces unités géologiques aux grands ensembles structuraux français. Quel est le type de rejet des failles F1, F2 et F3 (Fig. 5a) ? Encadrez leur âge relatif.

4.2. Une étude du potentiel pétrolier d'une zone géologique donnée, est classiquement complétée par une analyse de la subsidence. A partir des données lithologiques, biostratigraphiques et sédimentaires recueillies tout le long du forage, la courbe de subsidence tectonique et la courbe de

subsidence totale cumulée ont été calculées au cours des temps géologiques (Fig. 6). On remarque que le maximum d'enfouissement du bassin est atteint durant le Miocène (point M), avant une remontée actuelle associée à une surrection contemporaine.

4.2.1. Comment établit-on la courbe de subsidence totale ? Quelle différence existe-t-il avec la subsidence tectonique ?

4.2.2. Analysez les courbes et décomposez la figure 6 (à rendre) en différentes périodes : périodes tectoniques (extension, collision, etc.), périodes sédimentaires (forte production sédimentaire, érosion, hiatus, etc.). Un exemple vous est donné avec un épisode tectonique extensif durant le Permien.

4.2.3. Qu'observez-vous sur la courbe de subsidence au moment de l'épisode daté par géochimie isotopique à 34 Ma (question 2.3.1.) ? Identifiez-vous une structure géologique sur la carte (Fig. 5a) permettant d'expliquer cet événement géochimique ? Que s'est-il passé à cette époque en France, sur le plan géodynamique ?

4.2.4. Les argiles du Jurassique inférieur (formation des "Schistes Carton" du Lias) sont des roches mères riches en carbone organique, productrices potentielles d'hydrocarbures. Elles peuvent ainsi parfois contenir beaucoup de gaz, de manière non conventionnelle, appelé "gaz de schiste". Toutefois, pour qu'une telle roche puisse produire du gaz, il est nécessaire qu'elle soit suffisamment enfouie, afin que la matière organique évolue sur le plan réactionnel, et atteigne une maturation thermique grâce au flux de chaleur terrestre. Cette "cuisson" est l'élément indispensable à la génération d'hydrocarbures liquides et gazeux. On parle d'entrée dans la fenêtre à gaz, lorsque la matière organique, assez enfouie, est à maturité thermique pour produire du gaz. Les lois cinétiques simulant dans une roche, la transformation chimique des composés organiques en gaz, montrent que la matière organique est mature (et donc génère du gaz) au-dessus de 70 degrés. En dessous de cette température, la matière organique est immature et ne produit aucun hydrocarbure. Au-delà de 150 degrés, la roche risque d'être sur-mature ; les composés organiques (et donc les hydrocarbures) sont alors brûlés par le gradient géothermique élevé.

En prenant un gradient géothermique terrestre moyen, une température de surface de 25 degrés (climat chaud), et à l'aide de la courbe de subsidence totale (Fig. 6), estimez si les argiles de la formation des "Schistes Carton" arrivent à maturité pour générer du gaz. Pour se rendre compte de l'importance du contrôle climatique sur la maturité des hydrocarbures, recalculer le régime thermique avec une température de surface terrestre nulle (climat froid). Les "Schistes Carton" arrivent-ils à maturité pour générer du gaz ?

4.2.5. Les argiles du Permien (formation des "Black Shales", datée à 272 Ma) sont riches en carbone organique et peuvent donc être aussi potentiellement génératrices de gaz. En prenant le même gradient géothermique moyen, une température de surface terrestre moyenne de 15 degrés, déterminez le moment où les argiles arrivent dans la fenêtre à gaz. Ces argiles n'auraient-elles pas atteint un stade de sur-maturité ? Si oui, précisez quand ?

5. SYNTHÈSE (3 POINTS).

A partir de l'analyse de la carte géologique (Fig. 5a), couplée à votre analyse de la subsidence (Fig. 6), vous présenterez une reconstitution de l'ensemble de l'histoire géologique de la zone étudiée (tableau 2). On accordera une attention toute particulière à l'identification et à la signification des discordances.

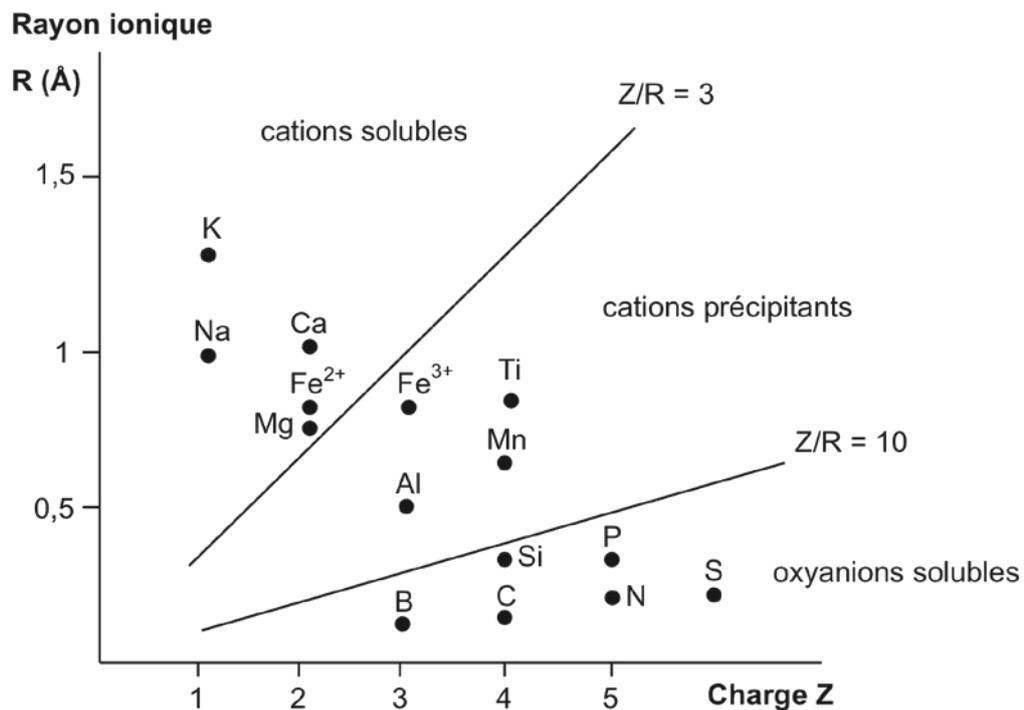


Figure 1. Diagramme de Goldschmidt : solubilité dans l'eau des cations en fonction de leur potentiel ionique, Z/R (d'après Renard *et al.*, 2015).

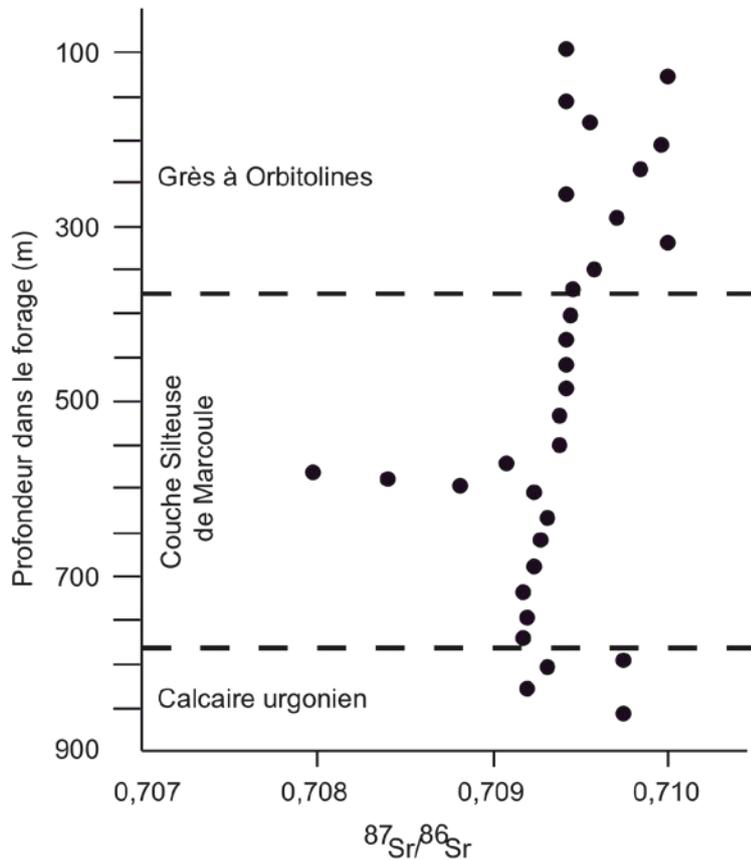


Figure 2. Variations isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de la profondeur dans le forage (d'après Leclerc *et al.*, 1997).

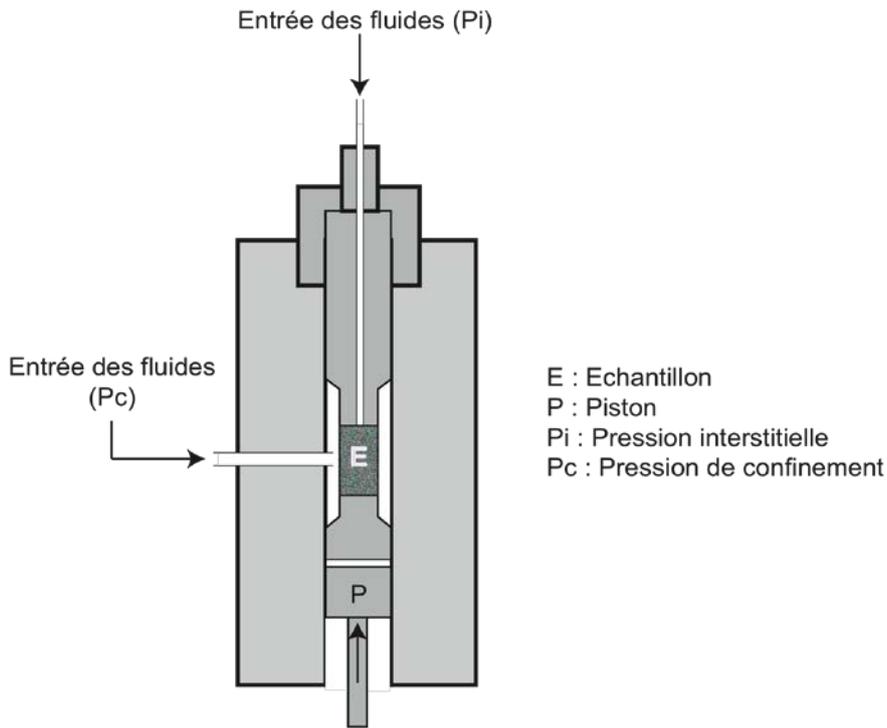


Figure 3. Cellule triaxiale (d'après Homand & Duffaut, 2000).

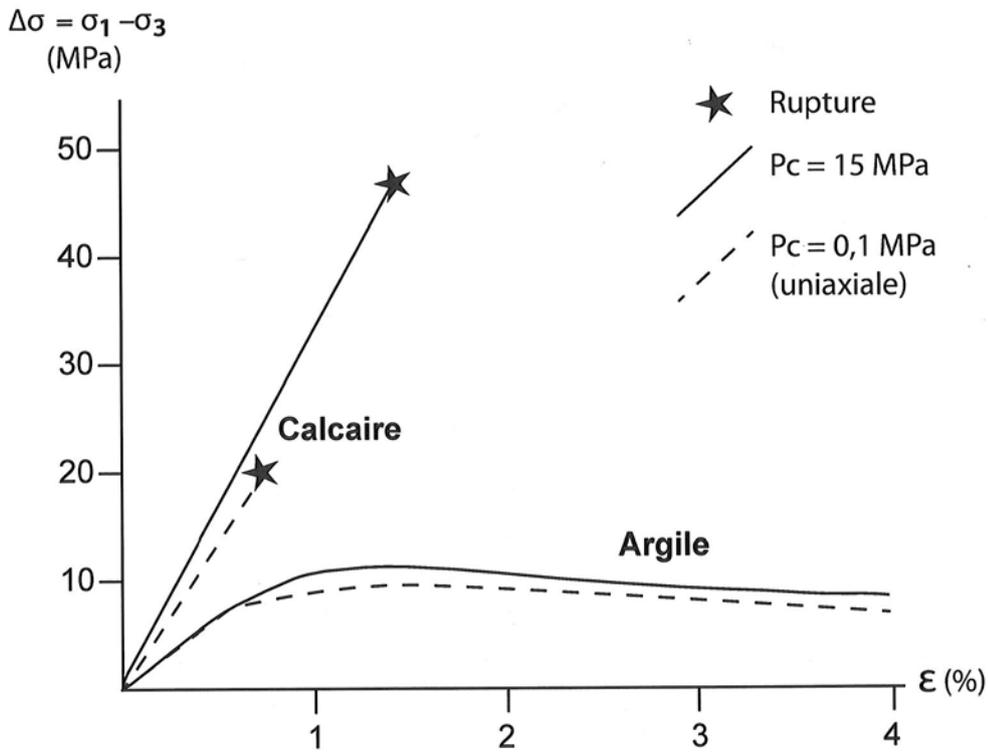
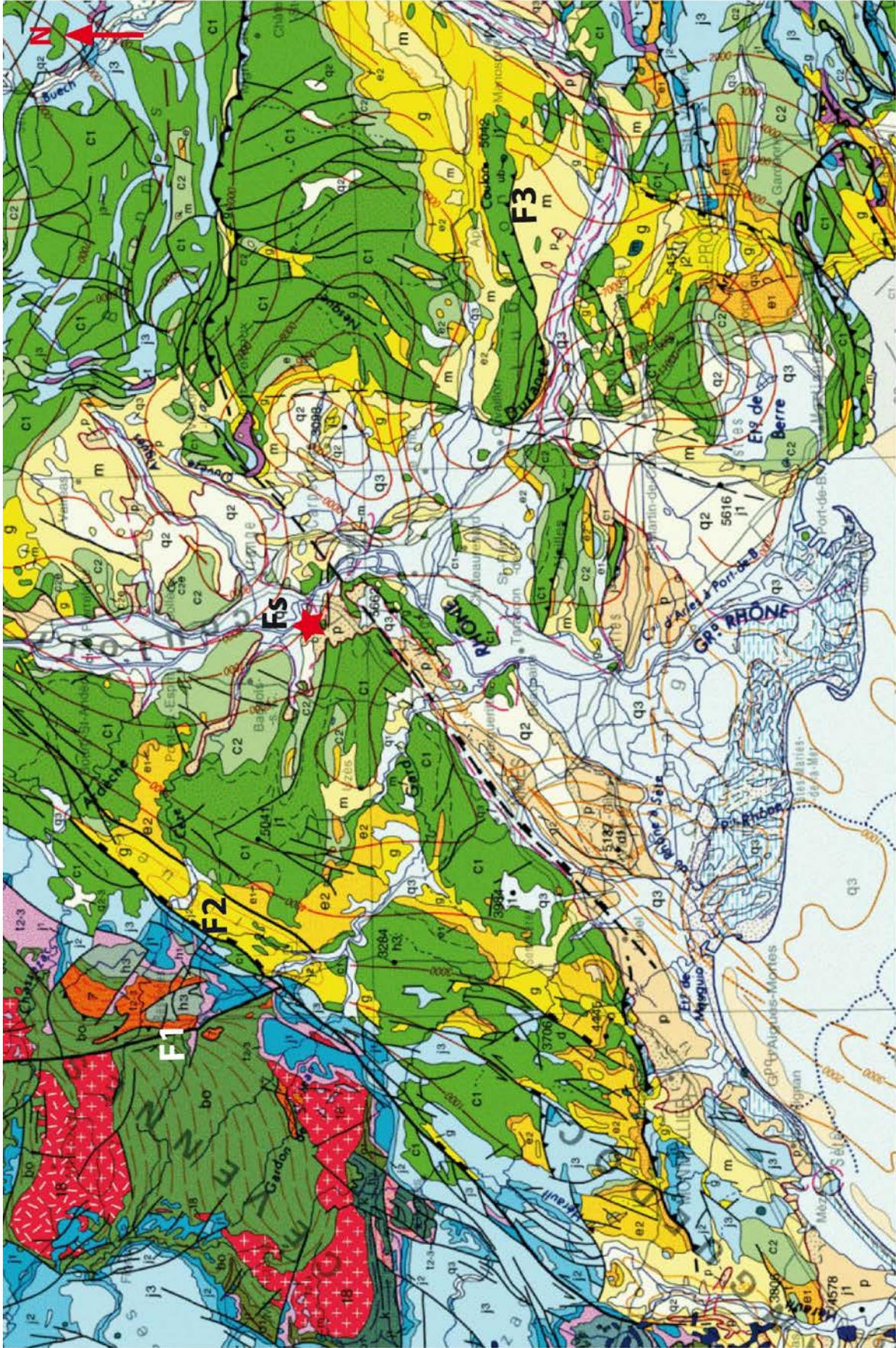


Figure 4. Essais triaxiaux sur les argiles de la CSM et le calcaire urgonien (d'après Bauer-Plaindoux *et al.*, 1997).



© BRGM, 2003

Figure 5a. Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000.

20 km

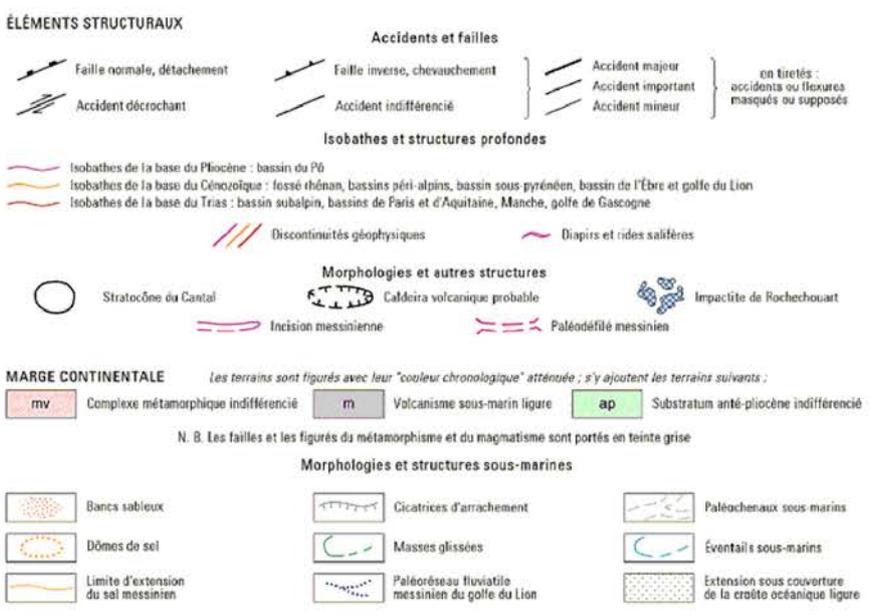
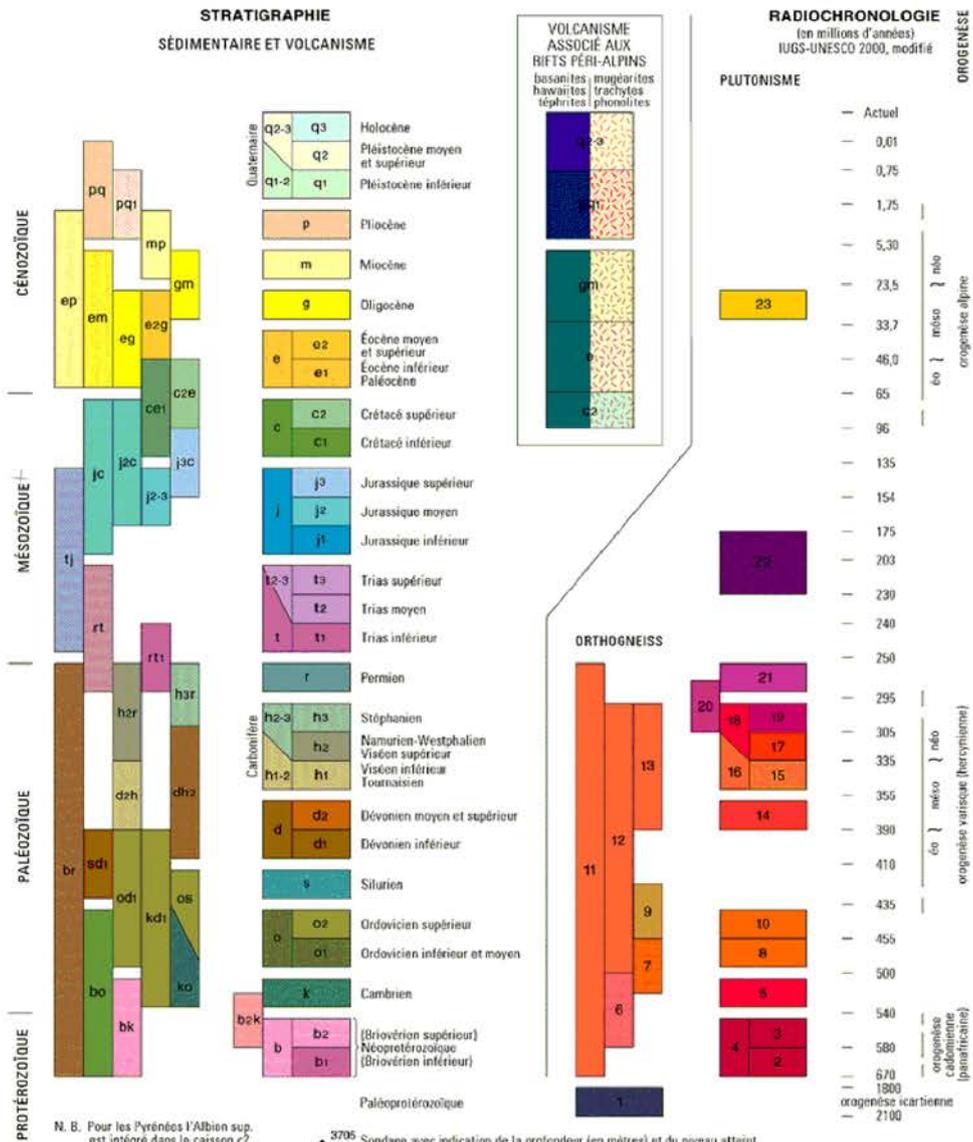


Figure 5b. Extrait de la légende de la carte géologique de France au 1/1 000 000 (BRGM).

**ANNEXES A DECOUPER ET A COLLER
IMPERATIVEMENT SUR VOTRE COPIE**

FIGURES 5c et 6, Tableaux 1 et 2.

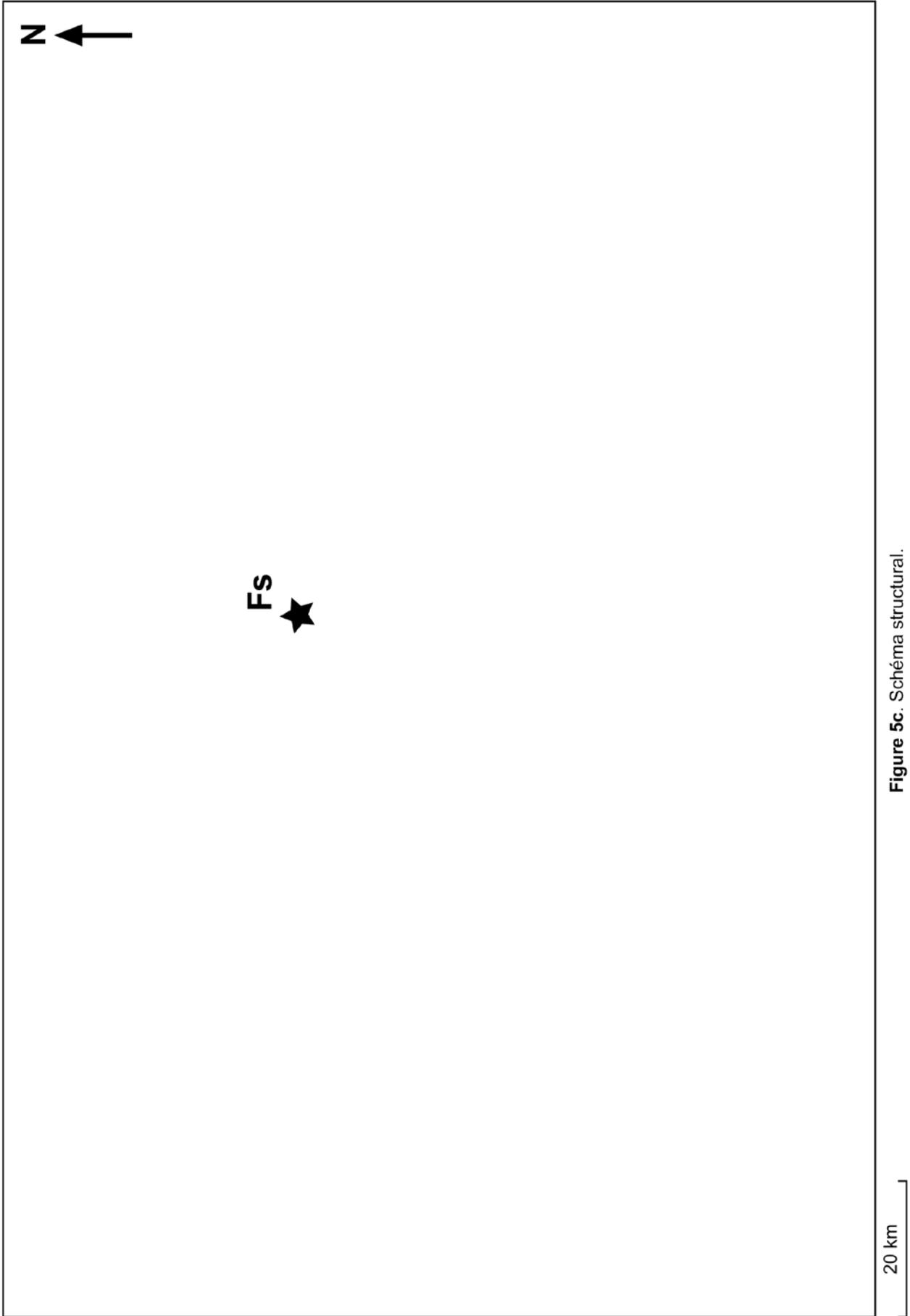


Figure 5c. Schéma structural.

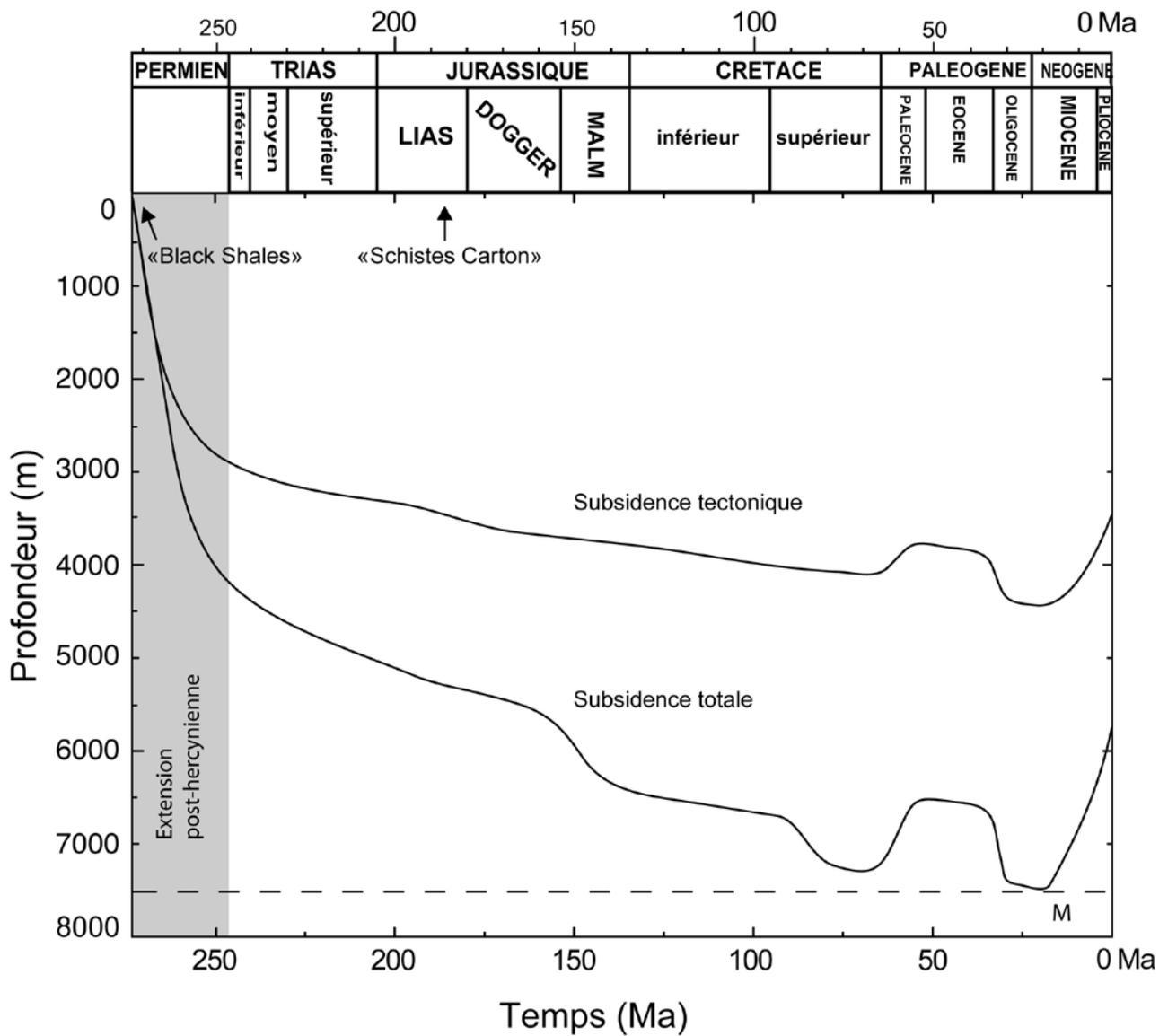


Figure 6. Courbes de subsidences totale et tectonique calculées au niveau du forage Fs en fonction du temps (en millions d'années).

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques des principaux minéraux.

Minéral	Composition chimique	Système cristallin	Densité
Halite			2.05
Calcite		Rhomboédrique	2.71
Olivine	$(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4$	Orthorhombique	3.28
Feldspath plagioclase Ca	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Triclinique	2.76
Pyroxène	$(\text{Mg},\text{Fe},\text{Ca})_2(\text{SiO}_3)_2$	Monoclinique	3.48
Amphibole	$\text{Na}_2(\text{Fe}^{2+},\text{Mg}^{2+})_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{OH}_2$	Monoclinique	3.33
Feldspath plagioclase Na	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Triclinique	2.62
Biotite	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH},\text{F})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$	Monoclinique	3.05
Feldspath Orthose		Monoclinique	2.55
Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$	Monoclinique	2.8
Quartz		Rhomboédrique	2.65
Illite	$\text{K}_{0.5}\text{Al}_2(\text{Si}_{3.5}\text{Al}_{0.5})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Monoclinique (structure T-O-T)	2.79
Kaolinite	$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	Triclinique (structure T-O)	2.65

Tableau 2. Calendrier des événements géologiques.

STRATIGRAPHIE		PROCESSUS MAGMATIQUES ET METAMORPHIQUES	PROCESSUS SEDIMENTAIRES	PROCESSUS TECTONIQUES
CENOZOÏQUE	Q u a t e r n a i r e			
	T e r t i a i r e			
MESOZOÏQUE				
PALEOZOÏQUE				
PROTEROZOÏQUE				