



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun –Tiaret
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de Terre et de l'Univers

Domaine : Sciences de Terre et de l'Univers
Filière : Géologie
Spécialité : 2^{ème} Année Licence Géologie Appliquée

Polycopié de cours

« Stratigraphie »

Présenté par : Mme. ZERKAOUI Laidia

Année Universitaire : 2023-2024

TABLE DES MATIERES

Préface.....	1
Chapitre I Le temps en géologie.....	2
1. Le Temps en Géologie	2
1.1 Les datations relatives	2
1.1.1 Ordre chronologique et géométrique.....	3
1.1.2 Les principes de la stratigraphie :.....	3
1.1.3 Taxinomie.....	19
1.1.4 Evolution	20
1.1.5 Biostratigraphie	21
1.1.6 L'efficacité des taxons	22
1.1.7 Fossiles stratigraphiques	23
1.1.8 La biostratigraphie et l'efficacité des taxons.....	24
1.1.9 Zonations Biostratigraphiques :	26
1.1.10 Corrélations stratigraphiques.....	27
1.2 Les datations absolues	33
1.2.1. Radiochronologie	33
1.2.2 Géochronologie géochimique	35
Chapitre II Les unités stratigraphiques	40
2.1 Les grandes périodes géologiques	40
2.1.1 Le Précambrien	40
2.1.2 Le Paléozoïque	42
2.1.3 Le Mésozoïque	44
2.1.4 Le Cénozoïque.....	45
2.1.5 Le Quaternaire.....	47
2.2 L'échelle des temps géologiques.....	50
2.2.1 Les Eons	50
2.2.2 Les Eres	51
2.2.3 Les périodes.....	51
2.2.4 Les Epoques	52
2.2.5 Les Etages	52
2.3 Les unités stratigraphiques	55
2.3.1 Stratotypes.....	55

2.3.2 Lithostratigraphie	56
2.3.3 Biostratigraphie	57
2.3.4 Chronostratigraphie	57
2.3.5 Relation entre litho-, bio- et chrono stratigraphie	58
Chapitre III. Rythmostratigraphie ou analyse séquentielle	69
3.1 Analyse séquentielle.....	69
3.1.1 La séquence	69
3.1.2 La suite séquentielle	69
3.1.3 Différents types de séquences	69
3.1.4 Rythmes.....	70
3.1.5 Cycles et cyclothemes	70
3.1.6 Corrélations et analyse séquentielle	71
3.2 Eustatisme et cycles eustatiques.....	71
Chapitre IV Subsidence, transgression et régressions	75
4.1. Isostasie	75
4.1.1 Érosion et isostasie	75
4.2 Subsidence.....	76
4.3 Transgressions et régressions	77
Chapitre V. Paléogéographie	79
5.1 Principaux types de faciès	79
5.2 Variations de faciès	80
a. Exceptions au principe de continuité.....	80
b. Exceptions au principe d'actualisme	80
c. Successions de faciès.....	80
5.3 Isopaques et Isobathes	81
5.4 Facteurs Physiques et Chimiques des Paléoenvironnements	83
5.4.1 Analyse Isotopique de l'Oxygène : Paléotempératures et Paléosalinité	83
5.4.2 Interprétation des courbes isotopiques	84
5.5 Analyse isotopique du carbone : Paléoprofondeur.....	85
5.6 Paléoécologie	86
5.6.1 Fossiles et conditions de fossilisation	86
5.6.2 Exemples	86
Chapitre VI. Evolution paléogéographique et géodynamique	89
6.1. Les hypothèses de la terre telle qu'on la voyait au XIXème Siècle	89

6.2 Théorie d'Alfred Wegener	90
6.3 Arguments en faveur d'une dérive des continents	90
a. Concordance des structures géologiques	90
b. Les fossiles communs d'un continent à l'autre	91
c. Distribution géographique des paléoclimats	91
d. Concordance du tracé des côtes	91
6.4 Rejet de la théorie de Wegener dans les années 1920	94
6.5 Observations	94
6.6 Intérêt de la magnétostratigraphie	94
Exercices proposés:	97
Références bibliographiques	111

Liste des figures

Figure I.1 Principe de Superposition.....	4
Figure I.2. De Terrasses étagées.....	4
Figure I.3. Des déformations tectonique	5
Figure I.4. Principe de continuité	5
Figure I.5. Principe l'Identité paléontologique	6
Figure I.6. Les caractéristiques des fossiles stratigraphiques et les caractéristiques fossiles de faciès.....	7
Figure I.7. Principe d'Identité paléontologique	7
Figure I.8 Echelle géologique vertical	8
Figure I.9 Principe d'Actualisme.....	10
Figure I.10 Principe de l'horizontalité	10
Figure I.11 Principe de Recoupement	11
Figure I.12.Pli et faille.....	11
Figure I.13.Erosion et discordance.....	12
Figure I.14. Intrusion magmatique	12
Figure I.15. Filon.....	12
Figure I.16. Principe d'inclusion.....	14
Figure I.17. Classement des taxons et leurs relations	20
Figure I.18 Reconstitution d'un archéoptéryx, exposée au muséum d'Histoire Naturelle de Genève.....	21
Figure I.19 Faciès paléontologique	21
Figure I.20. L'importance Biostratigraphique.....	22
Figure I.21. Echelle globale de référence.....	23
Figure I.22. Corrélation biostratigraphique.....	23
Figure I.23. Types de biozones	25
Figure I.24 Subdivision d'un étage ou d'une période géologique	27
Figure I.25 Corrélations stratigraphiques.....	28
Figure I.26 La datation absolue.....	34
Figure II.1 Variations du $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ au cours des temps géologiques.....	40
Figure II.2 La Pangée et l'évolution des continents.....	46
Figure II.3 Exemples de critères de polarité.....	50
Figure II.4 Charte représentatif de la chronologie à l'échelle globale	54
Figure II.5 Le stratotype, illustration	56

Figure III.1. Ordre de succession des termes lithologiques d'une séquence polygénique granoclssée.	69
Figure III.2 Evolution du type et de la position des sédiments pendant une transgression (limestone : calcaire, shale : argile, sandstone : grés).	72
Figure III.3 variations globales du niveau des océans depuis 600 Ma (par rapport un niveau actuel)	72
Figure IV.1 Isostasie et subsidence tectonique	76
Figure IV.2 Evaluation des sédiments en fonction de l'avancée et de recul de la ligne de rivage.	77
Figure V.1 Exemple d'une carte isobathe, dont la profondeur de la discordance hercynienne au Sahara (d'après Perrodon, 1983)	82
Figure V.2. Carte paléogéographique avec répartition des différents faciès et environnements de dépôts.....	82
Figure V.3. Orientation des fossiles et paléo-courant	87
Figure VI.1. Contraction et Terre ridée, une hypothèse de la fin de XIX ^{ème} siècle	90
Figure VI.2. Les arguments de Wegener en faveur d'une mobilité des continents	93
Figure VI.3. Anomalies magnétiques d'un secteur de la dorsale Atlantique au Sud-ouest de l'Islande.....	95
Figure VI.4. Le profil magnétique magique.....	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 La répartition géochronologique et géographique des fossiles	9
Tableau I.2 Récapitulatif du classement chronologique des événements présenté par le document I.10.....	32
Tableau II.1 :L'échelle stratigraphique des temps géologique (simplifiée).....	53
Tableau II.2 : Correspondances entre les principales unités stratigraphiques.....	59

Préface

La stratigraphie étudier l'agencement dans l'espace et dans le temps des couches géologiques (ou strates). Elle comprend également plusieurs sciences telles que la géochimie, la paléontologie, la pétrographie, l'astronomie qui sont réunis et exploités à travers différentes méthodes : biostratigraphie, chimiostratigraphie, lithostratigraphie, , cyclostratigraphie.

La notion d'étage géologique y est essentielle : il s'agit d'une unité chronostratigraphique définie à partir d'une coupe de référence (stratotype), caractérisée l'ensemble de critères paléontologiques, lithologiques ou structuraux de valeur universelle (d'après Pomerol & al, 2005).

Elle a pour objet d'apprendre l'ensemble des étages géologiques, depuis la formation de la Terre jusqu'à la période actuelle, sont regroupés dans une « échelle des temps géologiques » ou « charte chronostratigraphique », simplifiée, avec une représentation de l'évolution des vertébrés jusqu'à l'apparition de l'homme au Quaternaire :

Ce Cours est destiné aux étudiants de deuxième année licence filière Géologie. Parmi les objectifs pédagogiques du cours est de permettre à l'étudiant d'acquérir des concepts de base y/compris a censé de pouvoir donner un ordre chronologique des différents événements géologiques à l'échelle des bassins sédimentaires, autres. Il sera donc capable de les ordonner dans un cadre chrono-stratigraphique et paléogéographique.

Au cours de chaque chapitre, des exercices et des exemples sur les principes de stratigraphie, coupe type, la corrélation de coupes, log lithostratigraphique à différentes échelles, qui sont proposés avec des réponses permettant de tester les connaissances et de savoir faire des étudiants et de se préparer aux examens.

Chapitre I .Le temps en géologie

La stratigraphie est la science de la description qui étudier la succession des couches sédimentaire de terrain constituant l'écorce terrestre (les strates).

La stratigraphie a pour objet de donner une explication de l'organisation et de l'agencement des divers éléments de l'écorce terrestre Dont sont principe est de faire les propriétés des roches sédimentaires et propriété de stratification.

La stratigraphie a plusieurs rôles importants représenté dans : faire abstraction des transformations ultérieures, remonter à travers le temps pour retrouver l'état initial et les événements qu'il a enregistré et replacer ce « état initial » dans un cadre spatio-temporel.

La stratigraphie a pour but de la reconstitution de l'évolution des dépôts sédimentaires au cours de temps, temporel (temps): Datation des strates et couches par différentes méthodes (paléontologie,...), spatial (géographique): Paléogéographie au sens large et datation relative : ordonner dans le temps, les uns par rapport aux autres, les événements et les structures géologiques.

La stratigraphie fait les dispositions des roches sédimentaires en strates ou en couches superposés.

Une couche géologique d'une épaisseur pouvant varier de quelques centimètres à plusieurs mètres. Se distingue par sa couleur, sa nature minérale et sa texture. Elle constitue la plus petite unité des ensembles sédimentaires.

Elle présente deux limites jointes de stratification :

- La limite inférieure : **Mur** de la couche.
- La limite supérieure : le **Toi** de la couche.

1. Le Temps en Géologie

Il existe deux types de datations en géologie, les datations dites relatives et autre dites absolues.

1.1. Les datations relatives

La stratigraphie est une discipline des sciences de la Terre (Géosciences) qui étudie la succession des différentes couches géologiques ou strates dans un cadre spatio-temporel (espace-temps).

La datation relative ne permet pas de donner un âge absolu à une roche ou un fossile. Autrement dite c'est la chronologie relative (à différencier de la datation absolue), est

un ensemble de méthodes permettent d'organiser de manière chronologie des événements géologiques des uns par rapport aux autres, sans fournir des dates précises.

1.1.1. Ordre chronologique et géométrique

Pour raconter l'histoire de la Terre et des planètes, il faut disposer de repères temporels pour, situer dans le temps, les évènements, des objets et des observations géologiques les uns par rapport aux autres.

On peut observer des successions de roches (couches, strates) de natures différentes mises les unes sur les autres, parfois déformées ou cassées et parfois, une faille (ou plus) peut recouper ces ensembles de formations géologiques.

Un des problèmes fondamentaux de la géologie est d'établir à partir des relations géométriques observées entre ces roches, des relations temporelles, c'est à dire de construire une chronologie donc cette roche s'est déposée avant/après cette autre, la faille est postérieure/antérieure aux formations recoupées etc.....

Le but aussi est de faire la comparaison chronologique de deux ou plusieurs séries géologiques édifiées en des endroits différents (parfois lointain) et comment établir des corrélations entre elles ?

1.1.2. Les principes de la stratigraphie :

Le passage d'une succession géométrique à une succession temporelle repose sur quelques principes élémentaires mais très importants, appelés " **Principes de Stratigraphie**" car énoncés à partir de l'étude des roches sédimentaires. C'est la base de la stratigraphie reposant sur plusieurs principes géologiques qu'on peut les citer comme sites :

- Principe de Superposition
- Principe de Continuité
- Principe de l'Identité paléontologique
- Principe de l'Actualisme
- Principe de l'Horizontalité
- Principe de Recoupement
- Principe d'Inclusion

a) Principe de Superposition : En l'absence de bouleversement tectonique dans la nature, les couches se déposent les unes sur les autres, la première déposée est la plus ancienne et la dernière déposée est la plus récente « une couche est plus récente que celle qu'elle recouvre et plus ancienne que celle qui la recouvre » voir Figure I.1.

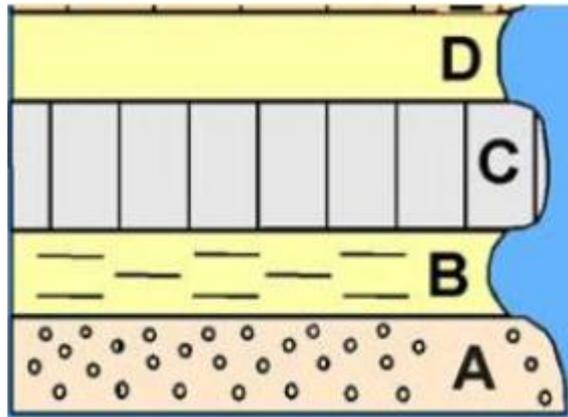


Figure I.1 Principe de Superposition(<https://www.google.com>)

Ordre chronologique de dépôt de strates représentées sur la colonne stratigraphique.

- La strate **A** est plus ancienne ;
- La strate **D** est plus récente
- La strate **B** est plus récente que la strate **A**
- La strate **C** est plus récente que la strate **B**

Ordre de dépôt des strates de la plus ancienne à la plus récente : **A→B→C→D**

Les limites du principe de superposition :

✓ **Les terrasses étagées :**

Pus on descend vers la profondeur du lit d'un fleuve, plus on trouve des terrasses plus récentes, les plus ancienne se trouvent en bordure voir Figure I.2.

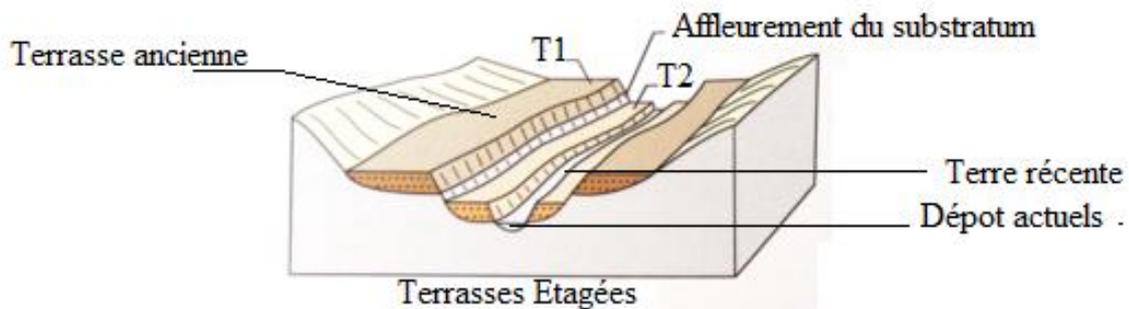


Figure I.2. De Terrasses étagées (<https://www.google.com>)

✓ **Les déformations tectonique (plis couches)**

Les strates y sont déformées et plissées et avec accroissement des forces tectoniques, il ya renversement total de l'ordre normal de la série voir Figure I.3.

pli couché

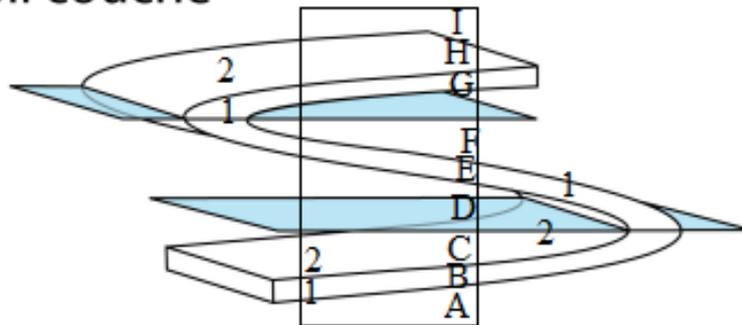


Figure I.3. Des déformations tectonique (plis couches) (<https://www.google.com>)

b) Principe de Continuité :

Tout strate limitée par un même toit et même mur a le même âge sur toute son étendue géologique, quelque soit la variation latérale de facies (du au changement de la nature du milieu de dépôt) voir Figure I.4.

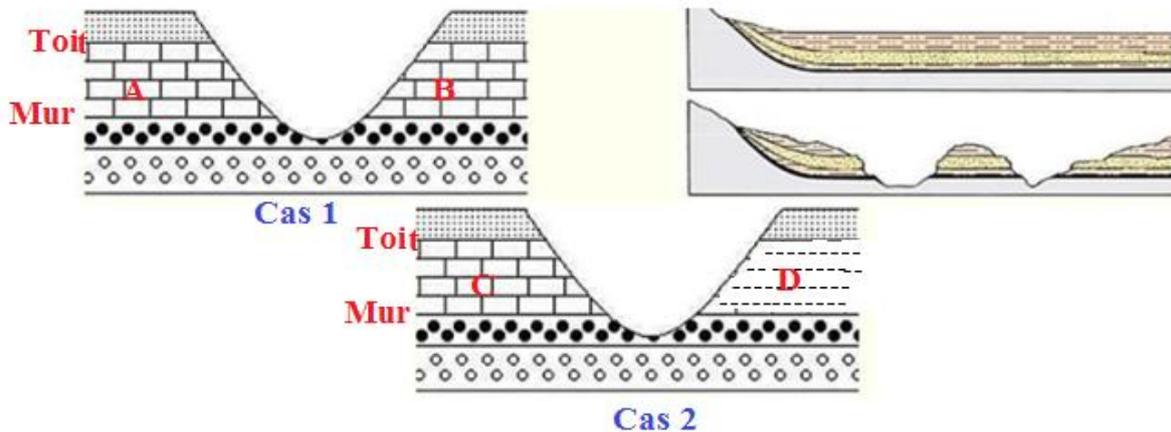


Figure I.4. Principe de continuité (<https://www.google.com>)

Le facies est un terme latin signifiant « aspect » ensemble des caractères lithologique (composition minérale, couleur) et paléontologiques (fossiles) d'une roche. Autrement dit, le faciès apporte des informations sur les conditions et l'environnement de dépôt

* L'épaisseur n'est pas forcément proportionnelle à la durée qu'elle représente

Cas 1 : les strates A et B ont le même âge.

✓ Même étendue

- ✓ Même nature lithologique
- ✓ Même mure et même toit

Cas 2 : les strates C et D ont le même âge.

- ✓ Ne sont pas sur la même étendue
- ✓ N'ont pas la même nature lithologique
- ✓ Même mur et même toit

c) Principe de l'Identité paléontologique : deux couches ayant les mêmes fossiles sont considérées de même âge voir Figure I.5;

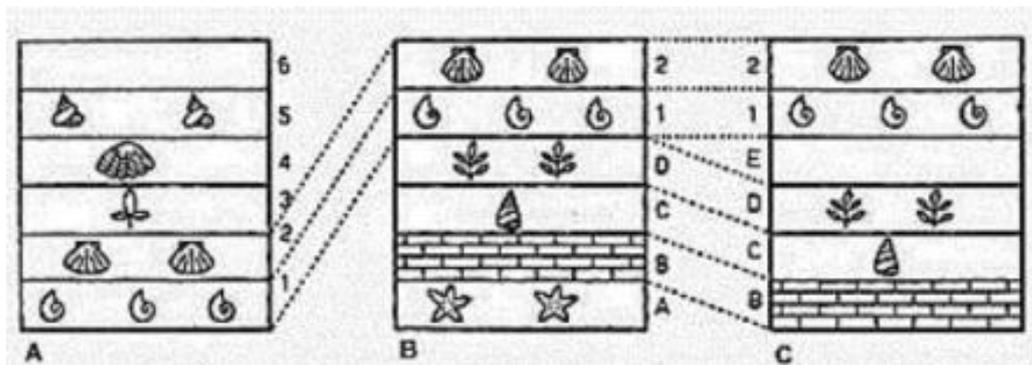


Figure I.5. Principe l'Identité paléontologique (<https://www.google.com>)

Concernant un fossile est le reste ou trace d'un animal ou d'un végétal (coquille, carapace, os, dent, graine, feuille...), enfoui et conservé dans une roche sédimentaire. Leur étude constitue la paléontologie.

Type de fossiles et leurs intérêts

- ✓ **Fossiles stratigraphiques :** indices sur l'âge des formations géologiques.
- ✓ **Fossiles de faciès :** indications sur conditions des milieux de sédimentation (climat, profondeur, salinité) voir la Figure I.6.

Fossiles Stratigraphiques	Fossiles de faciès
<p>Ce sont des fossiles qui ont :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Une période de vie courte. ➤ Grande répartition géographique. 	<p>Ce sont des fossiles qui ont :</p> <ul style="list-style-type: none"> ☐ Une période de vie longue. ☐ Répartition géographique limitée.
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ammonite</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Trilobite</p> </div> </div>	

Figure I.6. Les caractéristiques des fossiles stratigraphiques et les caractéristiques fossiles de faciès (<https://www.google.com>)

Un fossile stratigraphique est un fossile caractéristique d'une époque géologique délimitée dans le temps. Il permet de dater aisément la ou les couches dans lesquelles il se trouve.

Les fossiles dites qu'est d'un bon fossile stratigraphique sont caractérisés par :

- ✚ Une grande extension géographique (ce qui permet d'établir des corrections à plusieurs endroits éloignés du globe) ;
- ✚ Une courte durée à l'échelle des temps géologiques (étendue verticale limitée).
- ✚ Une forte abondance ;
- ✚ Une évolution rapide.

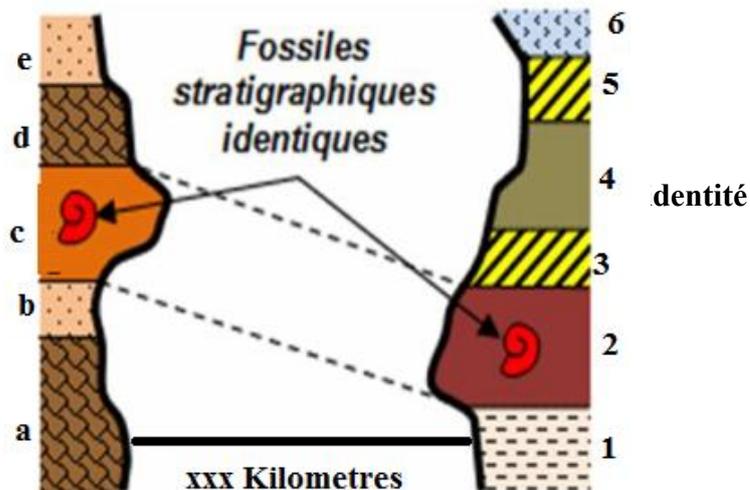


Figure I.7. Principe d'Identité paléontologique (<https://www.google.com>)

Selon la Figure I.7 les deux strates **c** et **2** ont même âge (Ammonite), même si les deux colonnes sont très éloignées (plusieurs kilomètres) et malgré qu'il y a une différence entre les caractères lithologiques des deux couche **c** et **2**.

Les espèces animales et végétales se suivent et ne se ressemblent pas : en conséquence, leurs fossiles sont de précieux indicateurs du temps inscrit dans les sédiments. Les ammonites (du genre Placentiras) ont disparu il y a 65 millions d'années. Fréquents dans les dépôts sédimentaires, ces mollusques qui ont connu plusieurs stades évolutifs sont utilisés par les paléontologues pour dater les strates géologiques (Christiane D., 2002) voir Figure I.8.

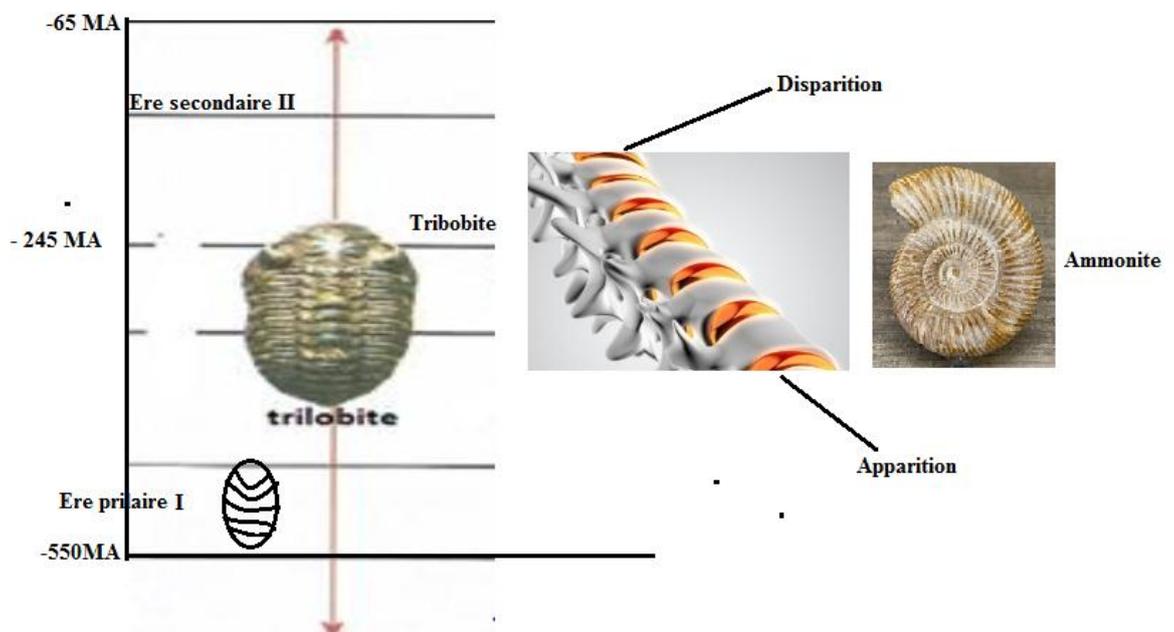


Figure I.8 Echelle géologique vertical (<https://www.google.com>)

Exercice intégré

Le tableau suivant représente la répartition géochronologique et géographique de quelques fossiles retrouvés dans les gisements phosphatés d'Oulad Abdoune.

Comparer la répartition géochronologique et géographique des fossiles F_1 et F_2 ?

Tableau I.1 La répartition géochronologique et géographique des fossiles

Fossiles	Répartition géochronologique						Répartition géographique			
	Crétacé supérieur (Ere II)			Paléogène (Ere III)			R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
	Turonien	Santonien	Maastrichtien	Montien	Thanétien	Lutétien				
F ₁ : <i>Notidanus microdon</i>		+	+	+	+		+			
F ₂ : <i>Odontaspis Substriata</i>				+	+		+	+	+	
F ₃ : <i>Squalus crenatidens</i>					+		+	+	+	+
F ₄ : <i>Rhombodus binkhorsti</i>			+				+	+		

Comparons la répartition géologique et géographique des fossiles F₁ et F₃

F₁ : Répartition géochronologique importante → longue durée à l'échelle géologique
→ large étendue verticale.

Répartition géographique faible → petite extension géographique.

F₃ : Répartition géochronologique faible → courte durée à l'échelle géologique
→ étendue verticale limitée.

Répartition géographique importante → grande extension géographique.

Donc F₃ un très bon fossile stratigraphique

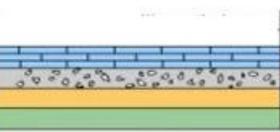
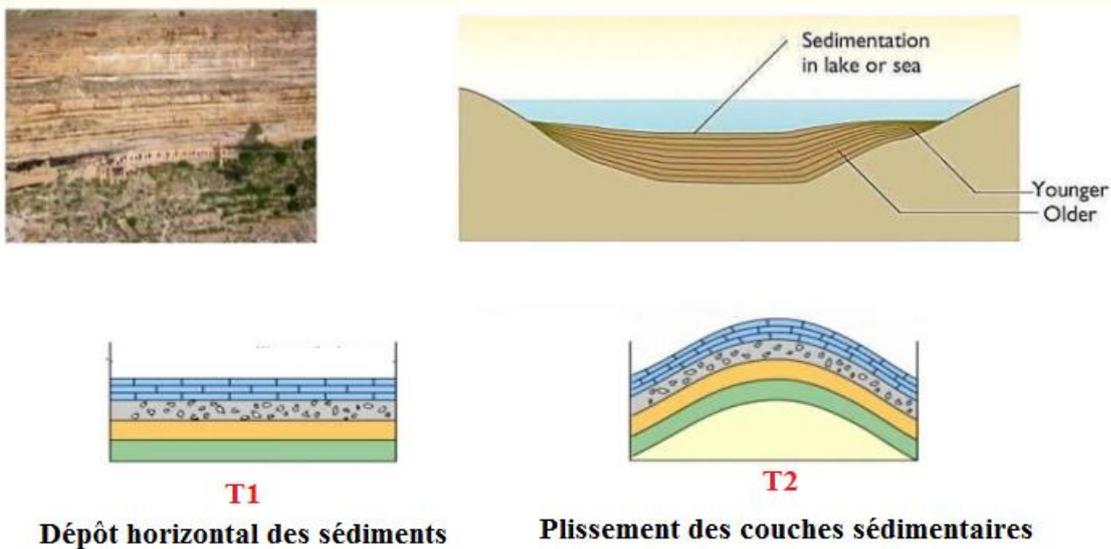
d) Principe d'Actualisme : les structures géologiques passées ont été formées par des phénomènes (tectoniques, magmatiques, sédimentaires ou autres) agissant comme à notre époque.

Par ailleurs, pour reconnaître un organisme fossile, il faut souvent rechercher son équivalent dans la nature actuelle voir la Figure I.9.



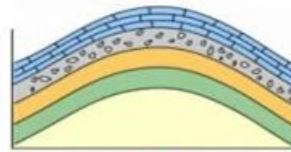
Figure I.9 Principe d'Actualisme (<https://www.google.com>)

e) **Principe d'Horizontalité** : les couches sédimentaires se déposent horizontalement (parallèlement à la surface de la terre); une séquence sédimentaire qui n'est pas en position horizontale a subi des déformations postérieures à son dépôt voir Figure I.10.



T1

Dépôt horizontal des sédiments



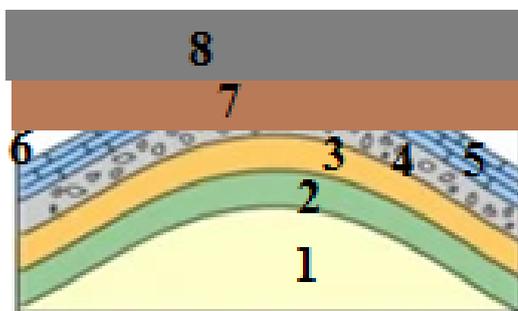
T2

Plissement des couches sédimentaires

Figure I.10 Principe de l'horizontalité (<https://www.google.com>)

Exercice intégré :

Etablir une chronologie relative des événements géologiques qui effectués les strates schématisées ci-dessous.



Document I.1 Coupe géologique

- Dépôt des strates horizontales 1, 2, 3, 4,5, et 6
- forces tectonique compressives causant un pli concave au niveau des couches sédimentaire.
- Arrêt de dépôt et érosion des sédiments superficiels.
- dépôt des strates 7 et 8 (discordance avec l'ensemble sédimentaire).

f) Principe de Recoupement :

Tout événement (intrusion magmatique, filon, granitique, faille, pli, érosion, discordance) provoquent au niveau des roches, il est postérieur a la dernière strate affectée extérieur a la première strate non affectée donc les couches sédimentaires sont plus anciennes que les failles (ou autres, phénomènes, corps) qui les recoupe voir la Figure I.11.

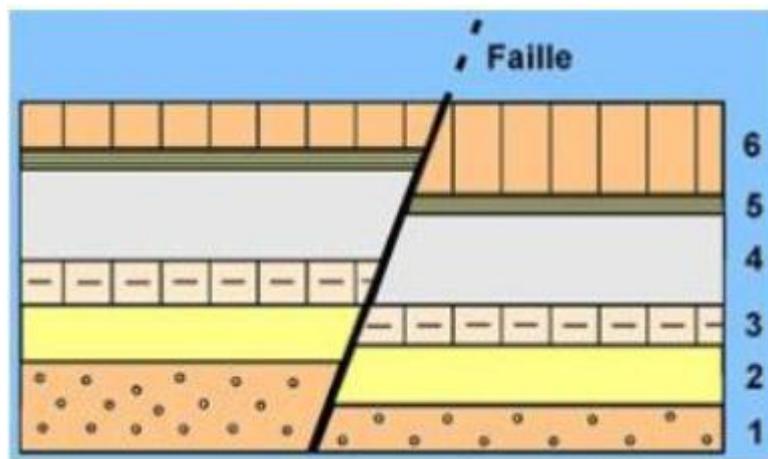


Figure I.11 Principe de Recoupement (<https://www.google.com>)

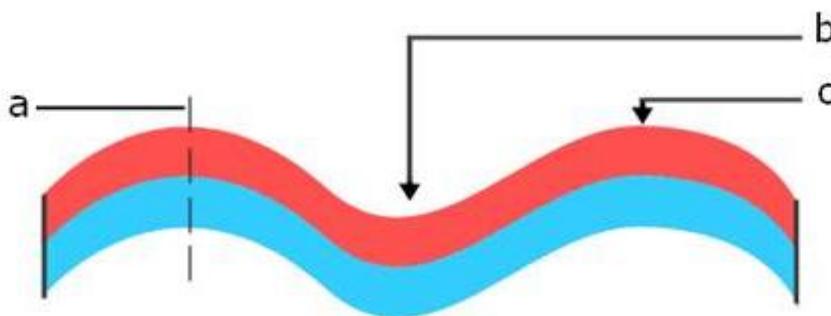


Figure I.12.Pli et faille (<https://www.google.com>)

Déformations tectoniques dues à des forces compressives et extensives voir la Figure I.12.

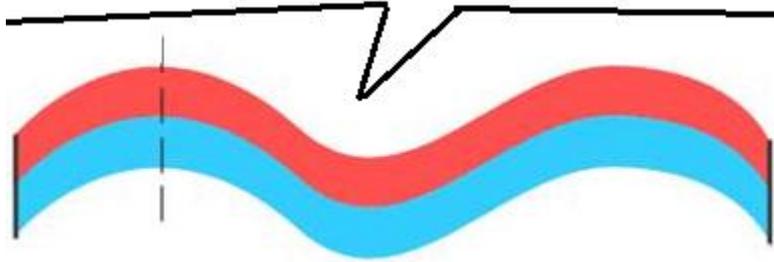


Figure I.13. Erosion et discordance

Selon les conditions du milieu qui provoquent l'érosion des roches anciennes et le dépôt de nouvelles strates voir la Figure I.13.



Figure I.14. Intrusion magmatique

Les roches magmatiques mises en place à l'état fluide dans des formations géologiques pré existants (l'encaissant) voir la Figure I.14.

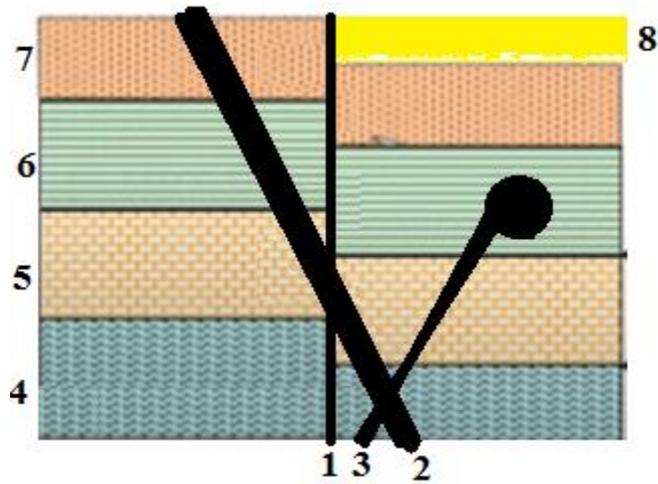


Figure I.15. Filon

Lame de roche magmatique ou sédimentaire recoupant d'anciennes roches (Encaissant) correspondant au remplissage d'une fracture ou une fissure voir la Figure I.15.

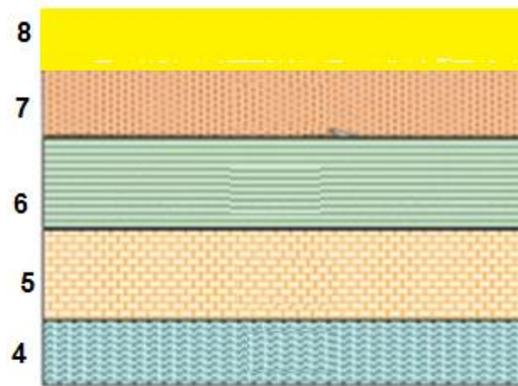
Exercice intègre :

Etablir une chronologie relative des événements géologique qui ont effectués les strates schématisée ci-dessous :

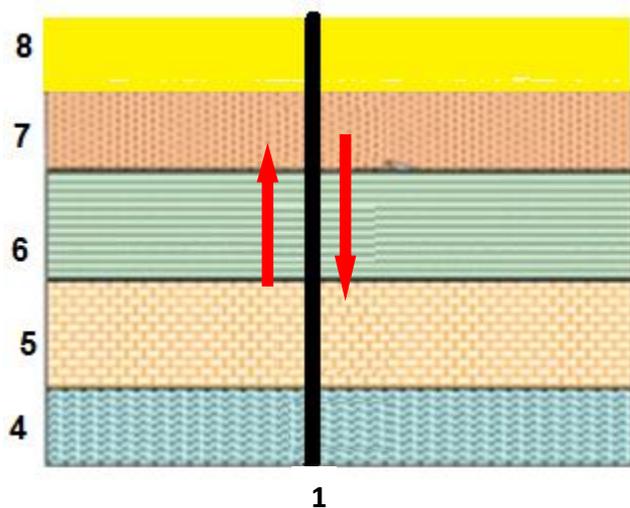


Document I.2 La chronologie relative des événements géologique

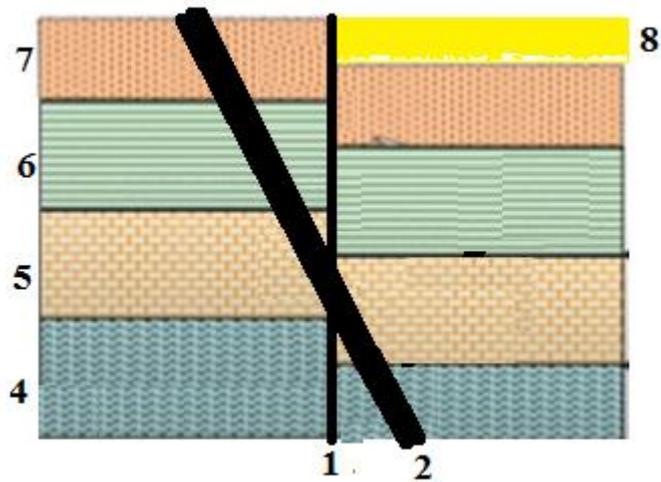
1. Dépôt de la couche 4
2. Dépôt de la couche 5
3. Dépôt de la couche 6
4. Dépôt de la couche 5
5. Dépôt de la couche 7
6. Dépôt de la couche 8



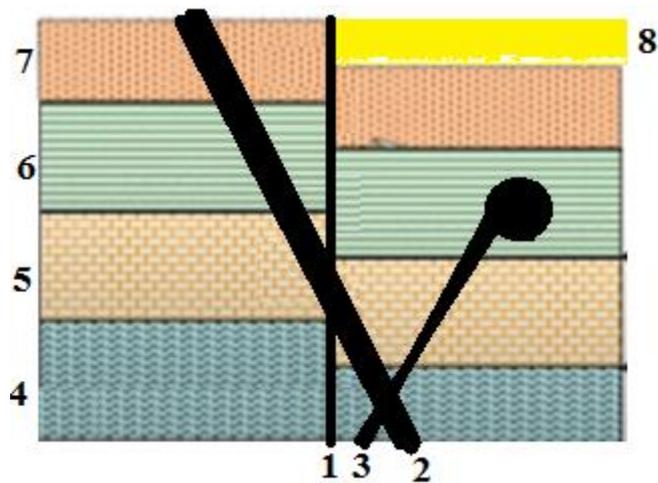
7. Mouvement tectonique Cassure des couches sédimentaires apparition de Faille 1 et Déplacement de couches cassées



8. Intrusion Filon 2



9. Ensuite Intrusion magmatique 3



g) Principe d'inclusion :

Tout objet géologique inclus dans autres formation est plus ancien que celle-ci. Les morceaux de roche inclus dans une autre couche sont plus anciens que leur contenant voir Figure I.16.

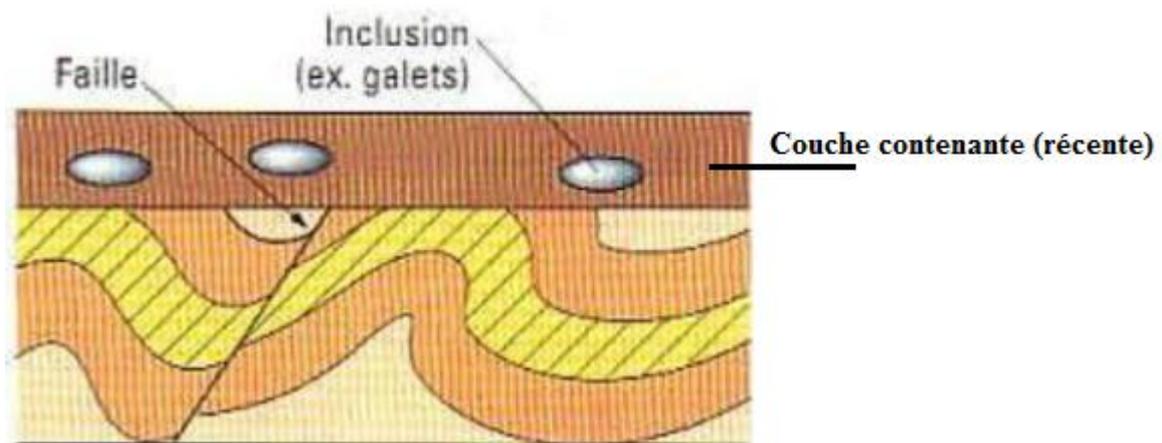
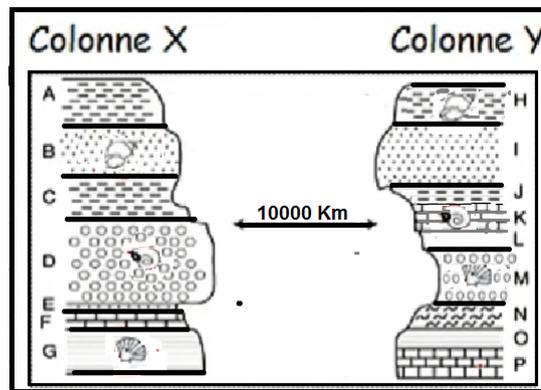


Figure I.16. Principe d'inclusion

Exercice intégré :

Donner la datation relative des strates formant les deux colonnes stratigraphie X et Y, déduire la plus ancienne et la plus récente de toutes dans le document I.3 ci dessous.



Document I.3 La chronologie des événements géologique

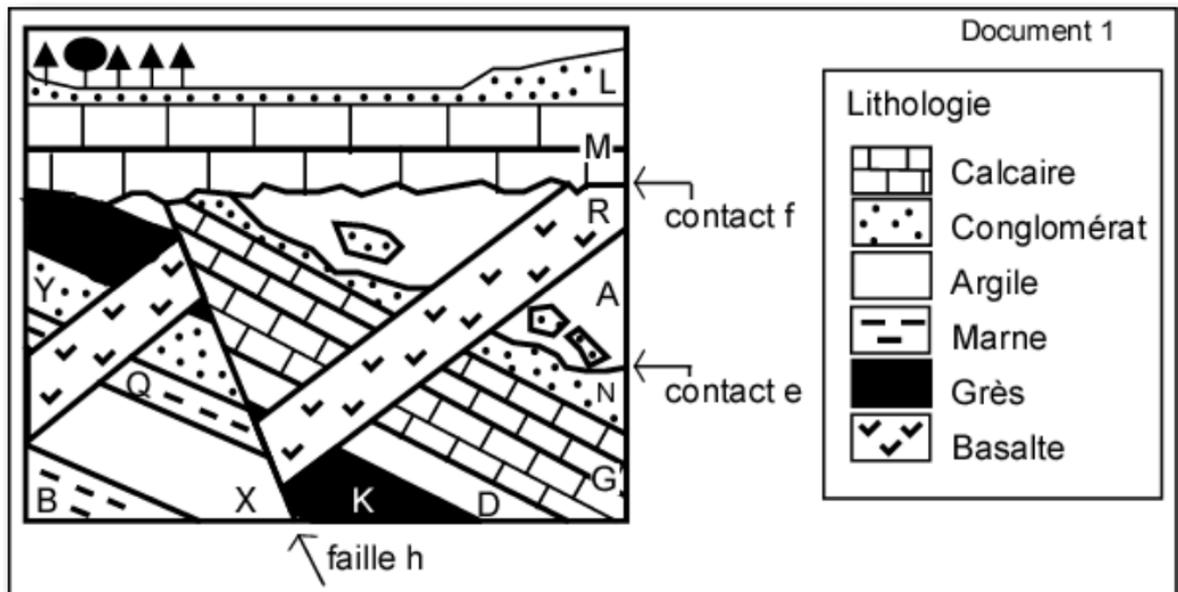
La réponse :

- Dans la colonne X la couche la plus ancienne est la couche G et la plus récente est la couche A.
- Dans la colonne Y la couche la plus ancienne est la couche P et la plus récente est la couche H.
- Selon le principe d'identité paléontologique, les couches B et H ont le même âge, ainsi que les couches D et K et les couches G et M.
- La couche A est plus récente que la couche H
- La couche P est plus ancienne que la couche G
- La couche la plus ancienne P
- La couche la plus récente A

Exercice intégré :

Retrouver d'après le document I.4 ci-dessous :

- l'ordre chronologique des événements
- La nature des contacts « e et f »
- Le type de faille de « h »



Document I.4 La chronologie des événements géologique

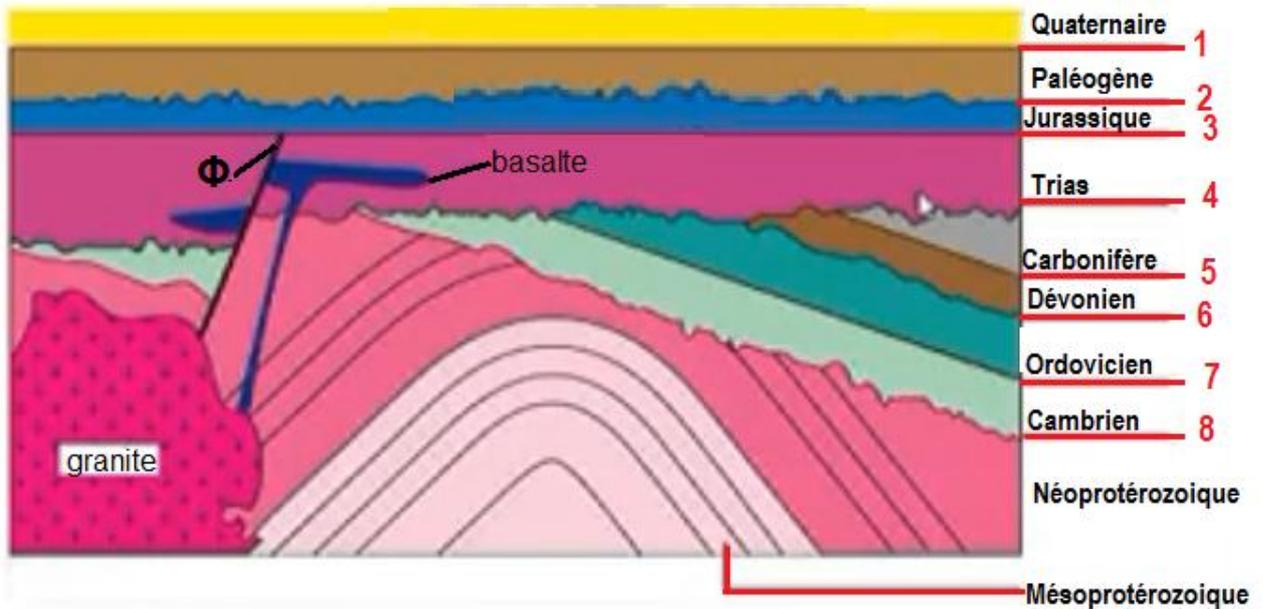
Solution :

- Dépôts des couches B, X, Q, Y, K, D, G, N, érosion, dépôt de A mise en place de filon R, basculement, jeu de faille h, érosion, dépôts de M puis de L.
- La nature des contacts e et f : lacune par érosion f, discordance angulaire
- le type de faille de « h » : faille normale.

Exercice Intègre :

Vous avez le document I.5 ci-dessous :

1. Quelle est la nature des contactes 1,2,3,4,5,6,7,8 ?
2. Quelle sont les périodes de l'échelle des temps géologiques manquantes dans cette coupe géologique ?
3. Quelle est l'âge relatif de la faille Φ ?
4. Quelle est l'âge relatif du granite par rapport à la fille et le basalte ?



Document I.5 Coupe d'échelle des temps géologiques

Solution :

1-La nature des contacts

- 1- Concordance
- 2- Surface de ravinement ou d'érosion
- 3- Concordance
- 4- Discordance angulaire
- 5- Concordance
- 6- Surface de ravinement ou d'érosion
- 7- Concordance
- 8- Discordance angulaire

2- les périodes de l'échelle des temps géologiques manquantes dans cette coupe :

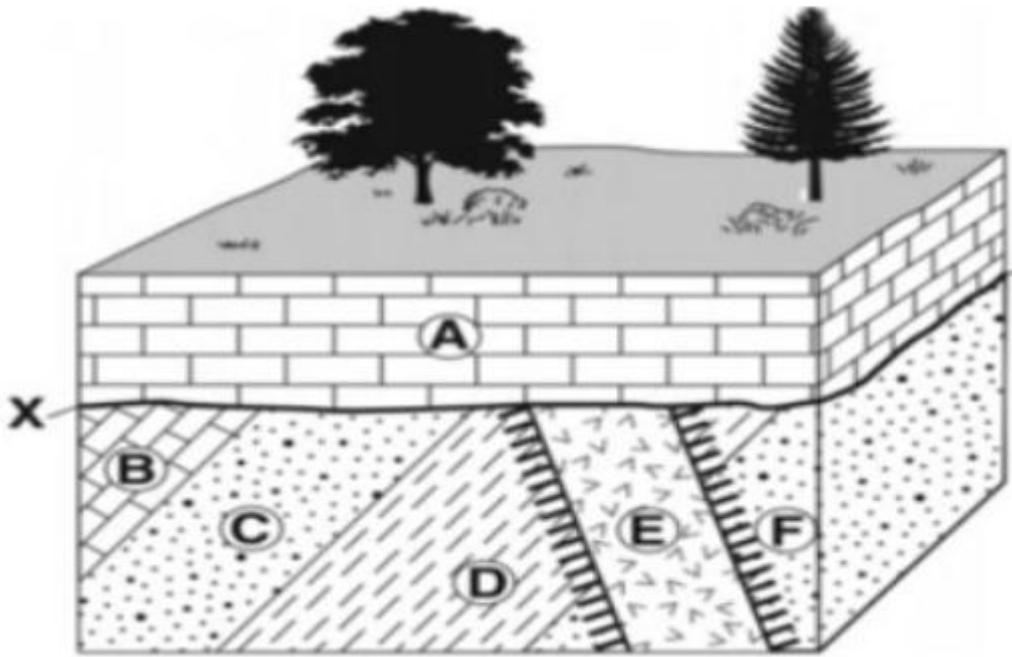
Silurien-Permien-Crétacé-Néogène

3- l'âge relatif de la faille Φ entre le Trias et jurassique

4- l'âge relatif du granite par rapport à la faille et le basalte : mise en place du granite-basalte-Faille.

Exercice Intègre :

Le document I.6 ci-après présente schémas simplifié d'une coupe géologique dans une région sédimentaire.



Document I.6 Coupe géologique dans une région sédimentaire.

- 1- Classez les évènements géologiques figurés dans le document du plus ancien vers le plus récent en précisant le principe stratigraphique adopté dans ce classement.
- 2- Déterminez le type du contact géologique représenté par X.
- 3- Déterminez l'âge relatif de E et le principe utilisé.

Solution :

- 1- Classement des évènements géologiques figurés dans le document du plus ancien vers le plus récent en précisant le principe stratigraphique adopté dans ce classement.

- ✚ Dépôt des strates FDC et B selon le principe de superposition
- ✚ Déformation tectonique (PLISSEMENT)
- ✚ Monté du pluton granitique E selon le principe de recoupement
- ✚ Erosion
- ✚ Dépôt de la couche A

- 2- Détermination du type du contact géologique représenté par X.

- ✚ Discordance angulaire

- 3- Détermination de l'âge relatif de E avec la citation du principe utilisé.

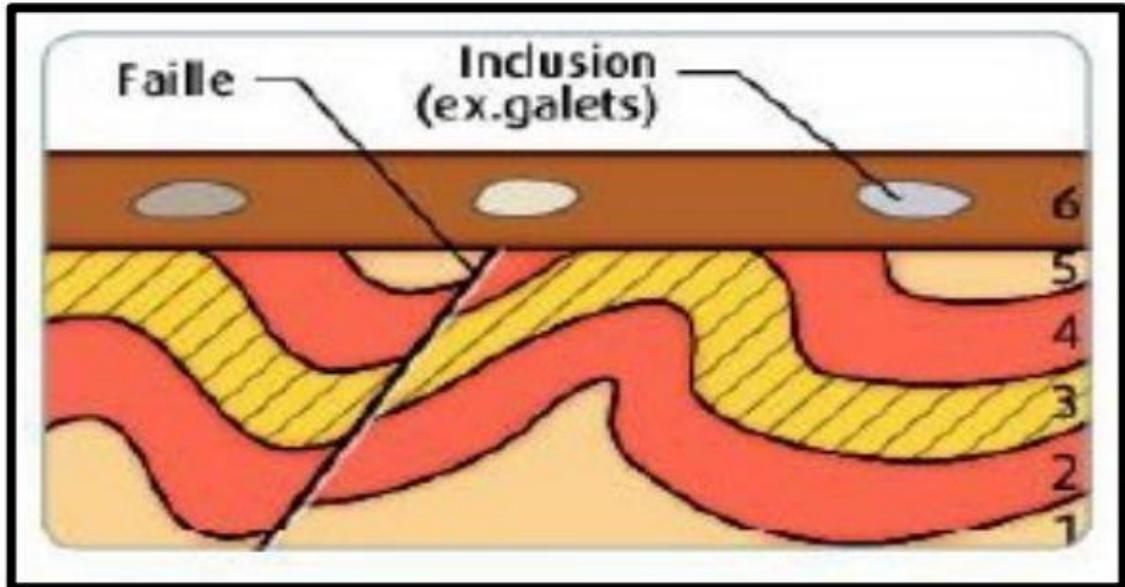
- ✚ Selon le principe de recoupement le pluton E est plus récent que les couches FDC, et B et plus ancien que la couche.

Exercice intègre

D'après le document I.7 ci-dessous,

- ✚ Qu'elle est l'épisode de plissement ?

- + Donner l'ordre chronologique des événements ?
- + Expliquer les principes et la chronologie dans le document?



Document I.7 Coupe géologique dans une région sédimentaire.

Solution :

D'après le schéma ci-dessous, l'épisode de plissement est :

- + Antérieur à la faille et à la strate 6
 - a. Postérieur à la faille et à la strate 6
 - b. Postérieur à la faille mais antérieur à la strate 6
 - c. Antérieur à la faille mais postérieur à la strate 6.
- + Le principe de superposition stipule que :
 - ✓ Une couche est en général plus jeune que celle qui est située en-dessous
 - a. un événement géologique est plus récent que celui qu'il recoupe
 - b. des sédiments qui contiennent les mêmes fossiles ont le même âge
 - c. des éléments inclus dans une structure sont plus anciens que cette structure

1.1.3 Taxinomie

Le mot taxinomie provient du grec (taxis)= classement « ordre » et de (nomos) qui signifie loi ou règle. Le terme fut créé en 1813, sous l'orthographe de taxonomie, par le botaniste suisse Augustin Pyrame de Candolle.

C'est une science, qui a pour objet de décrire les organismes vivants (aussi les fossiles) et de les regrouper en entités appelées taxons afin de les identifier puis les nommer et

enfin les classer et de les reconnaître via des clés de détermination dichotomiques. Elle complète la systématique qui est la science qui organise le classement des taxons et leurs relations voir Figure I.17.

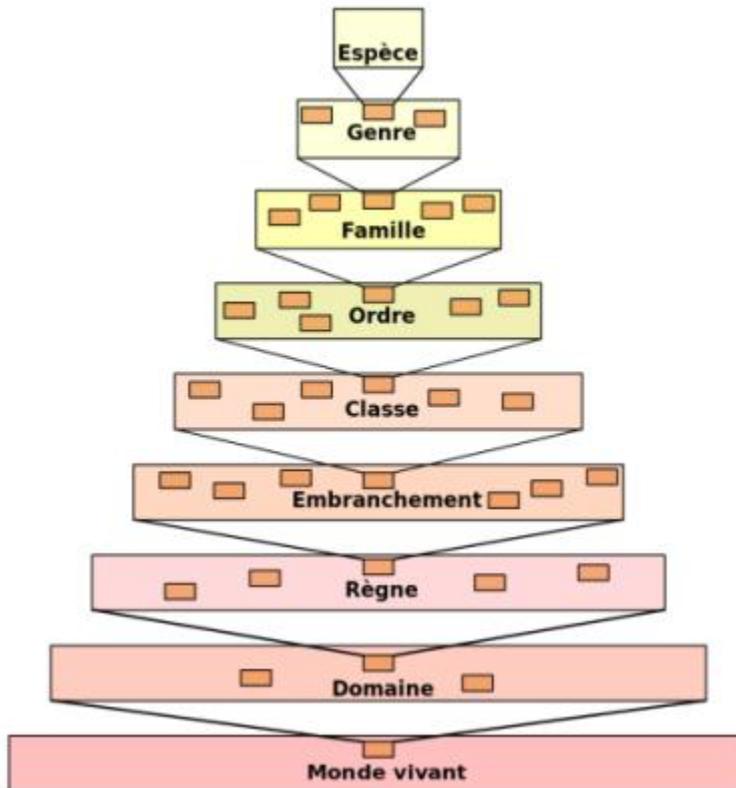


Figure I.17. Classement des taxons et leurs relations (<https://www.google.com>)

1.1.4. Evolution

L'évolution c'est la modification au cours du temps, des groupes d'individus vivants définis, selon leurs différences, comme des espèces. Cette modification est expliquée par la théorie synthétique de l'évolution.

Aussi l'évolution c'est la différence morphologique et génétique que l'on observe d'une génération à l'autre entre ascendants et descendants, qui ne sont jamais identiques sauf en cas de clonage. Ce sont aussi les changements dans l'effectif, l'aire de répartition et les comportements de la population observée, sa division en groupes de plus en plus différents (spéciation) ou bien le rapprochement de groupes et leur fusion (hybridation, métissage) voir Figure I.18.

Exemple; histoire évolutive des oiseaux

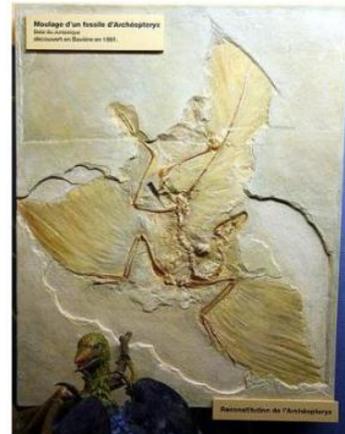
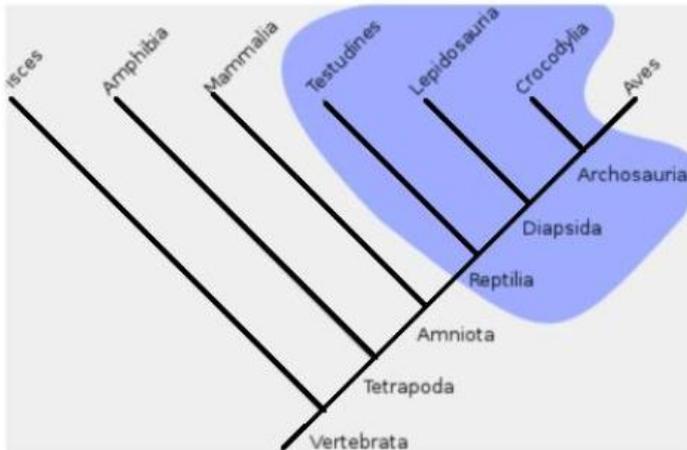


Figure I.18 Reconstitution d'un archéoptéryx, exposée au muséum d'Histoire Naturelle de Genève (<https://www.google.com>)

1.1.5. Biostratigraphie

Les strates sont définies par leur contenu paléontologique (**faciès paléontologique**). La division de base de la biostratigraphie est le **biozone**. Elle est fondée sur la distribution verticale (dans les strates) et horizontale (dans l'espace, sur un territoire donné) des espèces ou des genres (de façon générale, des taxons). Les qualités requises pour qu'un taxon fossile soit un bon marqueur biostratigraphique sont :

- Il doit être indépendant de l'environnement (le plus possible) voir Figure I.19.

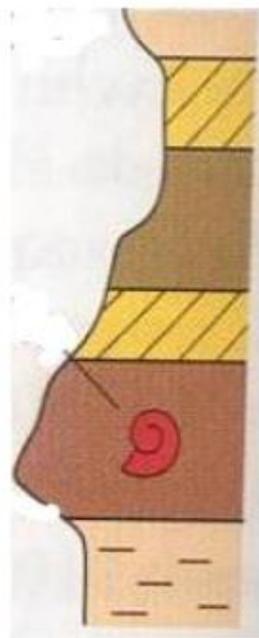


Figure I.19 Faciès paléontologique (<https://www.google.com>)

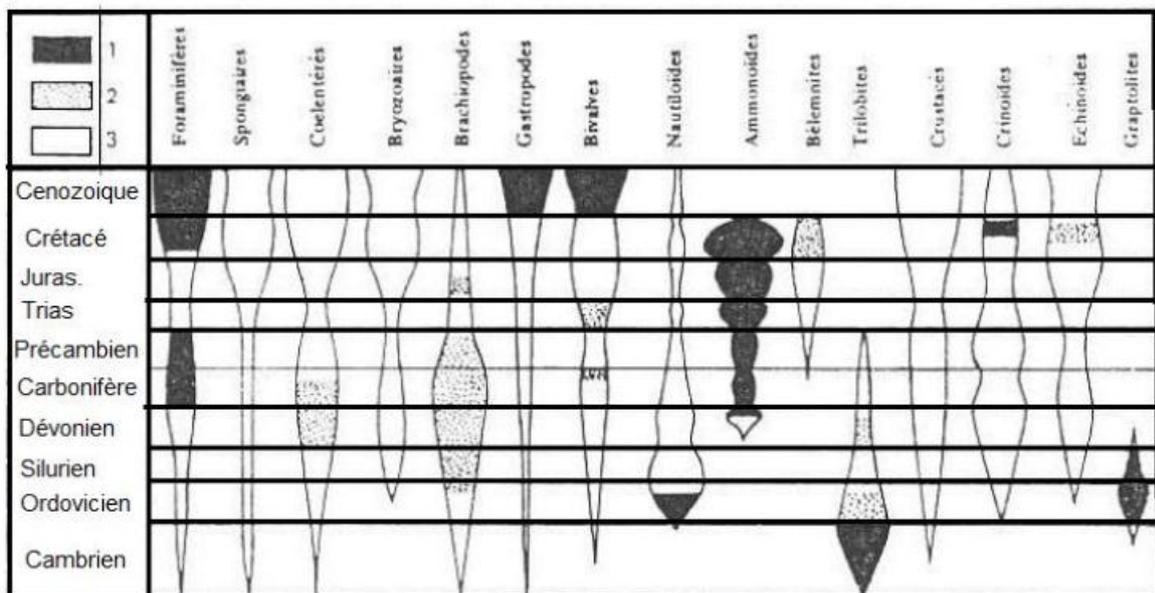
- Il doit avoir la durée d'existence la plus courte possible car on recherche l'échelle des temps qui possède la meilleure résolution possible.

- Il doit avoir la répartition géographique la plus large possible car on recherche une échelle des temps valable à l'échelle mondiale
- Il doit être abondant
- Il doit se préserver facilement
- Il doit être facilement identifiable

NB : Biozone : unité de base pour la biostratigraphie, fondé sur les apparitions ou les disparitions d'espèces, parfois sur leur abondance particulière.

1.1.6. L'efficacité des taxons

Les taxons peuvent servir pour la stratigraphie sur une longue distance. Pour se faire, le taxon doit avoir certaines « qualités » (voir Figure I.20) :



Importance biostratigraphique relative des principaux groupes d'invertébrés 1; Importance pour corrélations à grande distance: 2; Intérêt pour corrélations régionales 3, Intérêt restreint ou nul pour la biozonation et les corrélations (d'après R. 1980)

Figure I.20. L'importance Biostratigraphique

- Il doit évoluer rapidement (dans le temps),
- Avoir une large répartition géographique,
- Être facilement récoltable et reconnaissable.

Les trois caractéristiques doivent être présentes en même temps.

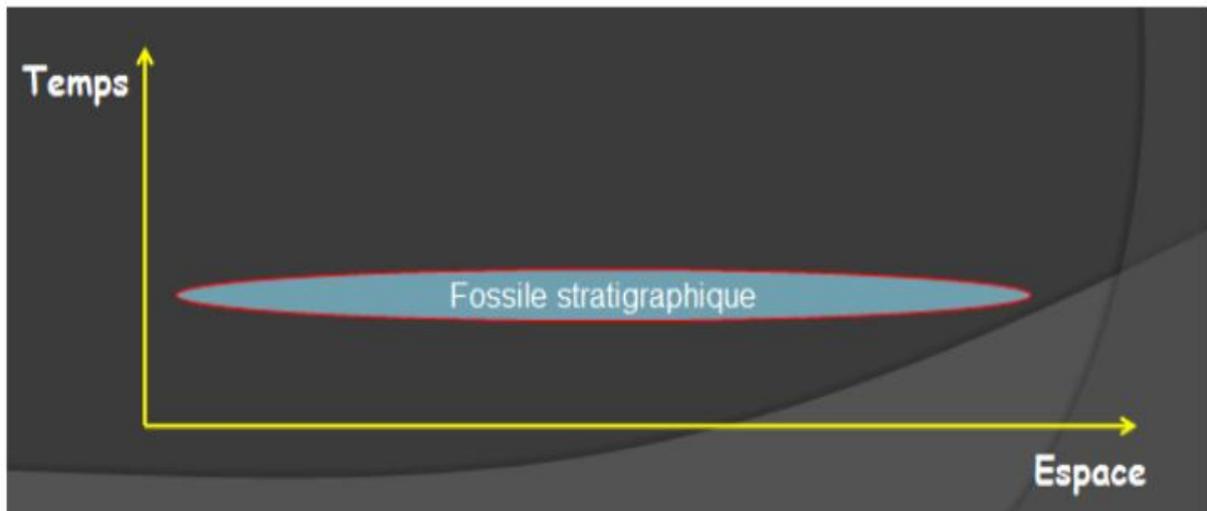


Figure I.21. Echelle globale de référence (<https://www.google.com>)

On va ainsi pouvoir réaliser une échelle globale de référence. Certains groupes, à échelle restreinte permettront de réaliser des corrélations régionales voir Figure I.21.

1.1.7. Fossiles stratigraphiques

Toute couche contenant les mêmes fossiles est considérée de même âge en tout point du globe. Dans ce cas ces fossiles sont dites stratigraphiques

Un fossile stratigraphique caractéristique d'une époque géologique bien définie, limitée dans le temps, permet de dater la roche dans laquelle il se trouve. Pour être un fossile stratigraphique, il faut :

- Avoir une grande extension géographique (permettant les corrélations),
- Avoir existé pendant une courte durée à l'échelle des temps géologiques,
- Avoir été abondante (condition nécessaire pour qu'on retrouve à l'état fossile. Ex : Les ammonites permettent de dater des roches du Jurassique et du Crétacé.

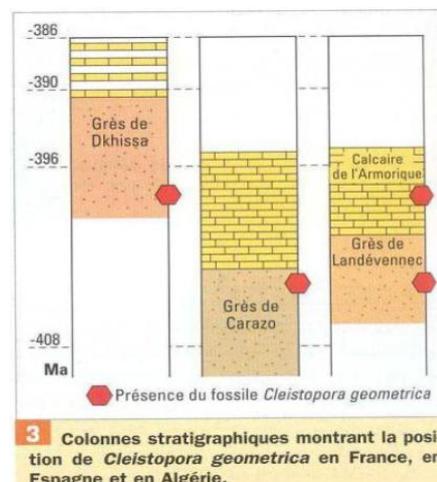


Figure I.22. Corrélation biostratigraphique (<https://www.google.com>)

L'exemple le plus courant sur la corrélation biostratigraphique entre la France, l'Espagne et l'Algérie (coupe de Béni Abbès, PK 30, Bechar), à partir d'un organisme marin colonial : groupe des coraux du Paléozoïque voir Figure I.22.

1.1.8. La biostratigraphie et l'efficacité des taxons

- Les taxons utilisés doivent être des marqueurs globaux (respecter les trois qualités décrites précédemment) → ils servent ainsi à l'échelle globale pour faire des corrélations,
- Ils peuvent être des marqueurs régionaux et permettre une corrélation régionale ce qui permet de décrire une « province faunistique »,
- Ils peuvent être des marqueurs chronologiques peu importants et leur utilisation se fera pour des études et descriptions d'environnements. Une couche est définie par son contenu faunistique et/ou floristique.

En général on se base sur plusieurs taxons pour l'étude chronologique. Comme l'évolution est continue et irréversible, on obtient des échelles coupées en unités biostratigraphiques (biozone: ensemble de couches caractérisées par l'existence d'un ou plusieurs taxon fossiles). Les limites des couches sont données par l'apparition et/ou la disparition de taxon(s). Le passage d'une espèce à une autre peut se faire soit progressivement par anagenèse soit brutalement par cladogenèse.

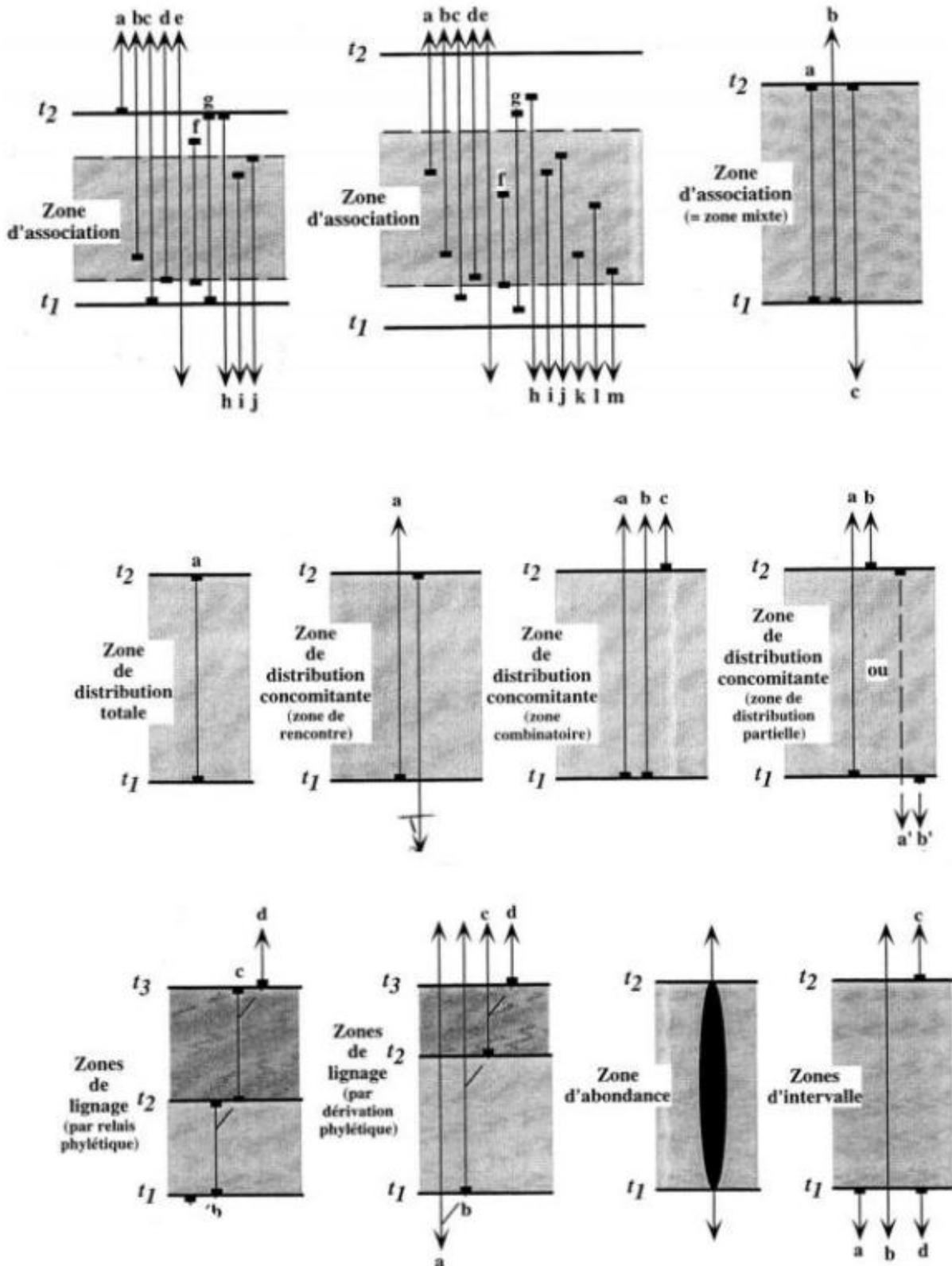


Figure I.23. Types de biozones (<https://www.google.com>)

On peut observer sur ces schémas plusieurs types de biozones (voir Figure I.23). Les ensembles sont définis par la coexistence d'au moins trois taxons.

La **zone d'association** ; elle est caractérisé par la coexistence d'au moins trois taxons pris en totalité et qui caractérisent la couche adjacente sans que soit considéré les distributions verticales de ces taxons. Et dans ce dernier on peut aussi citez la **zone mixte**.

La **zone de distribution** ; correspond à la durée de vie du taxon. On parle de **distribution concomitante** quand il y a coexistence de deux ou trois taxons.

Zone concomitante (**zone de rencontre, zone combinatoire, zone de distribution partielle**).

Un **biozone de lignage** ; est un ensemble de couches déterminé par un segment d'une lignée évolutive (changement de zone par changement de caractère). On parlera de **zone d'abondance** quand il y a épanouissement d'un taxon. Une **zone d'intervalle** est un intervalle bien marqué, entre deux zones.

Même dans la zone de lignage on a (zone de lignage par relais phylétique, et zone de lignage par dérivation phylétique).

Un enregistrement paléontologique est rare et partiel. On a de grandes différences entre les organismes vivants et ceux à l'état fossile.

Un enregistrement sédimentaire biologique est discontinu dans l'espace et le temps. Il existe toujours une liaison plus ou moins forte entre les sédiments et les fossiles.

→Ceci est source de nombreuses erreurs.

Donc on va devoir utiliser les échelles radiochronologique et paléomagnétique.

1.1.9. Zonations Biostratigraphiques :

C'est la subdivision d'un étage ou d'une période géologique en plusieurs sous unités en fonction de la répartition verticale (stratigraphique) d'un taxon, généralement, il s'agit d'une espèce dateur (marqueur de temps, bon fossile stratigraphique). Cette zonation sert pour une datation fine des couches ou des régions géologiques voir Figure I.24.

ALBIEN supérieur	IZ	<i>Mortoniceras perinflatum</i>		<i>Mortoniceras</i> à quatre tubercules par côte
	IZ	<i>Mortoniceras fallax</i>		<i>Mortoniceras</i> à trois tubercules par côte avec un tubercule latéral proéminent
	IZ	<i>Mortoniceras inflatum</i>		<i>Mortoniceras</i> à trois tubercules par côte avec un tubercule latéral atténué
	IZ	<i>Mortoniceras pricei</i>		<i>Mortoniceras</i> à deux tubercules par côte
	IZ	<i>Dipoloceras cristatum</i>		section sub-circulaire

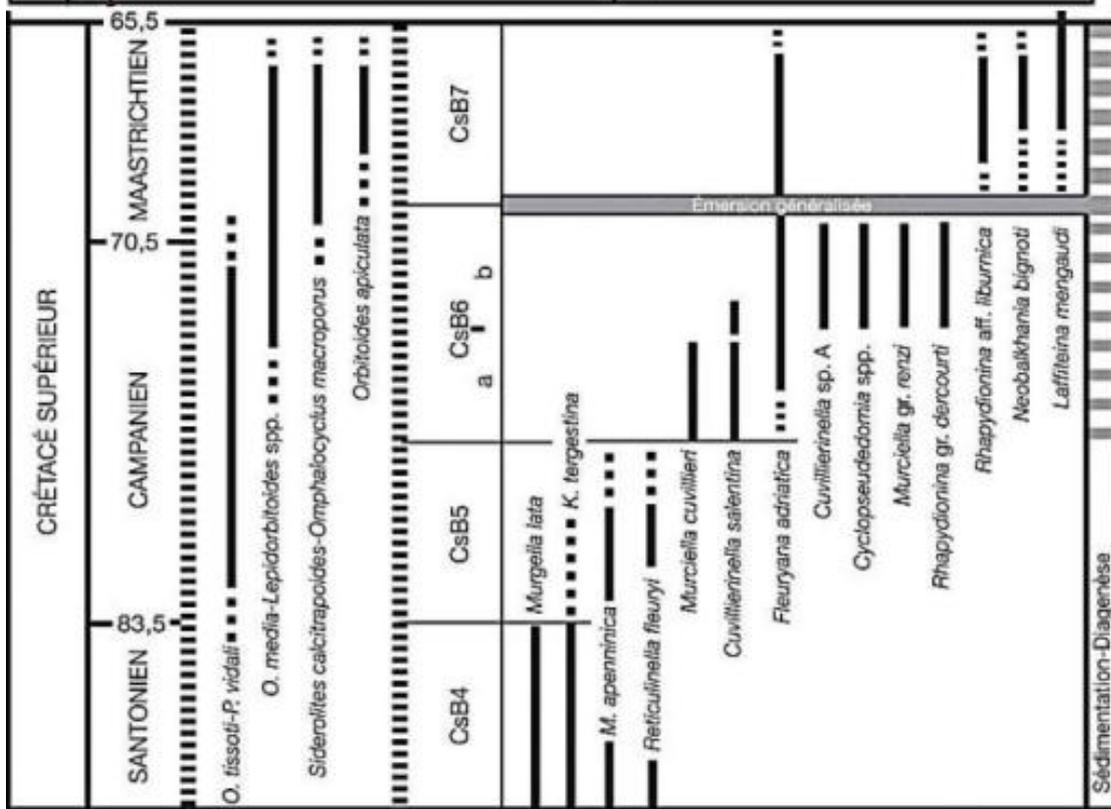


Figure I.24 Subdivision d'un étage ou d'une période géologique

(<https://www.google.com>)

1.1.10. Corrélations stratigraphiques.

La stratigraphie relative et la stratigraphie absolue permettent d'établir des corrélations entre divers objets géologiques.

Pour faire des corrélations bio-stratigraphique on base beaucoup sur le principe d'identité paléontologique.

a- Principe d'identité paléontologique

Les fossiles disparaîtraient n'ayant connu, à l'échelle des temps géologique qu'une brève durée d'existence, ne peuvent se rencontrer que dans quelques strates seulement. Ces fossiles peuvent constituer alors localement des marqueurs du temps.

Deux couches ayant le même contenu fossilifère sont considérées comme ayant le même âge. Ce principe se base sur l'existence de fossiles stratigraphiques. Il permet de corréler des séries sédimentaires de régions éloignées [William Smith (Angleterre), ~1799].

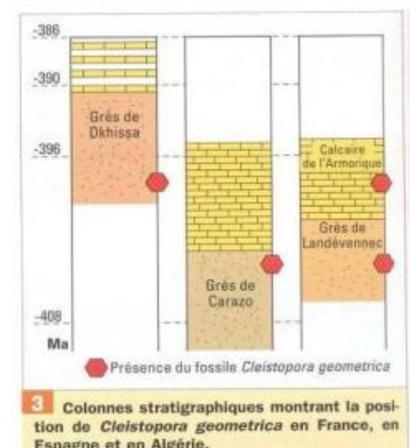
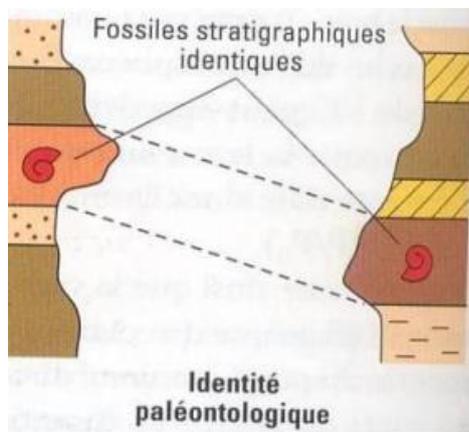


Figure I.25 Corrélations stratigraphiques (<https://www.google.com>)

Exercice Intègre

On cherche à retrouver la chronologie des événements géologiques ayant eu lieu dans le sud du Massif central selon le document I.8.

A. Utiliser les principes de la datation relative pour dater relativement:

1* La strate A1 par rapport à la strate A2.

2* La série sédimentaire B par rapport à la série A.

3* Les événements tectoniques suivants par rapport aux séries sédimentaires :

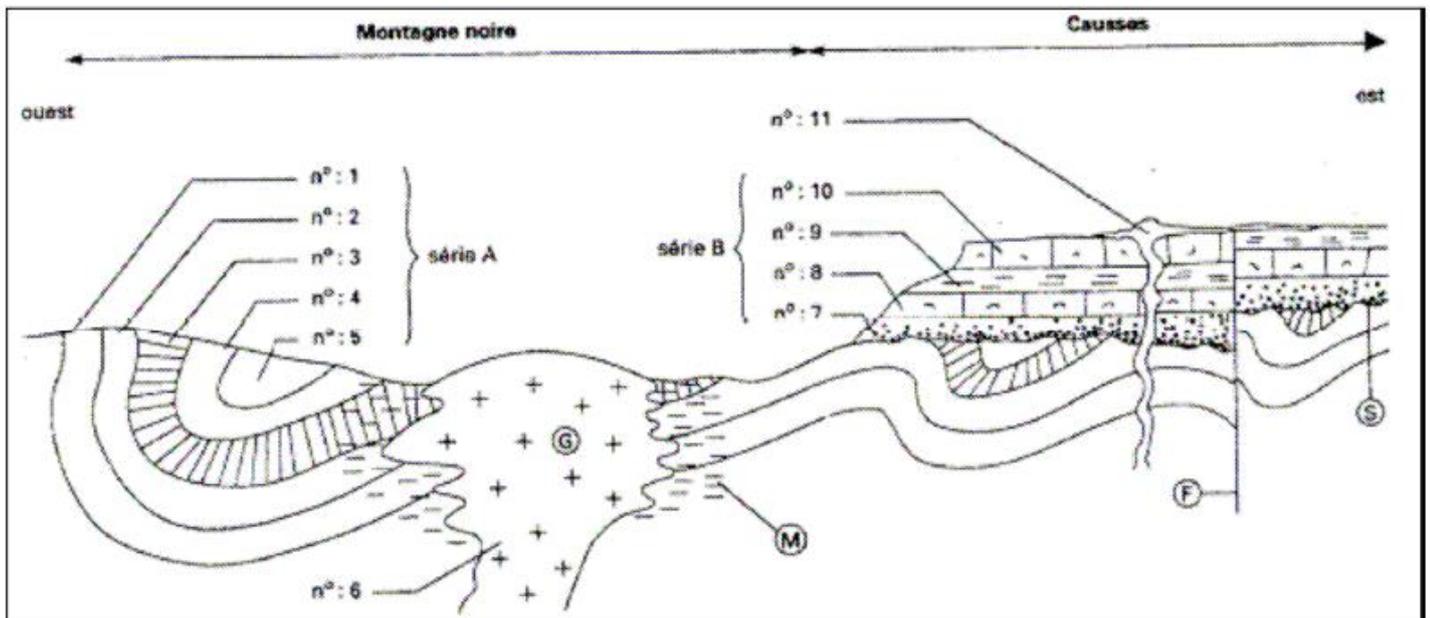
3a. Le granite intrusif G.

3b. Les plissements.

3c. La faille F.

3d . Le volcan V.

B) Récapituler par ordre chronologique, tous les événements géologiques à l'origine de cette région



Document I.8 Coupe géologique

Solution

Chronologie relative des séries A et B

On remarque que la série A est située sous la série B. Donc selon le principe de superposition (les strates les plus anciennes sont les plus profondes) : la série A est antérieure à la série B.

Chronologie relative dans la série A

1. Dépôt de 5 strates sédimentaires selon le principe de superposition : la plus ancienne est la plus enfouie (de n°1 au n°5).
2. Ces strates étant plissées, on en déduit qu'une phase de compression post-sédimentation au milieu.
3. La série A étant métamorphisée autour d'un pluton granitique, on en déduit que ce pluton est post-sédimentaire. Ce pluton n'étant pas plissé, il est post-compression.
4. Le pluton granitique étant mis à l'affleurement, on en déduit qu'une phase d'émersion et d'érosion (surface S) a eu lieu après les 3 évènements précédents.

Chronologie relative dans la série B

1. Les strates horizontales de la série B reposent en discordance sur les strates plissées de la série A.
2. Ces 4 strates sédimentaires se sont déposées selon le principe de superposition, d'où la numérotation sur le document.

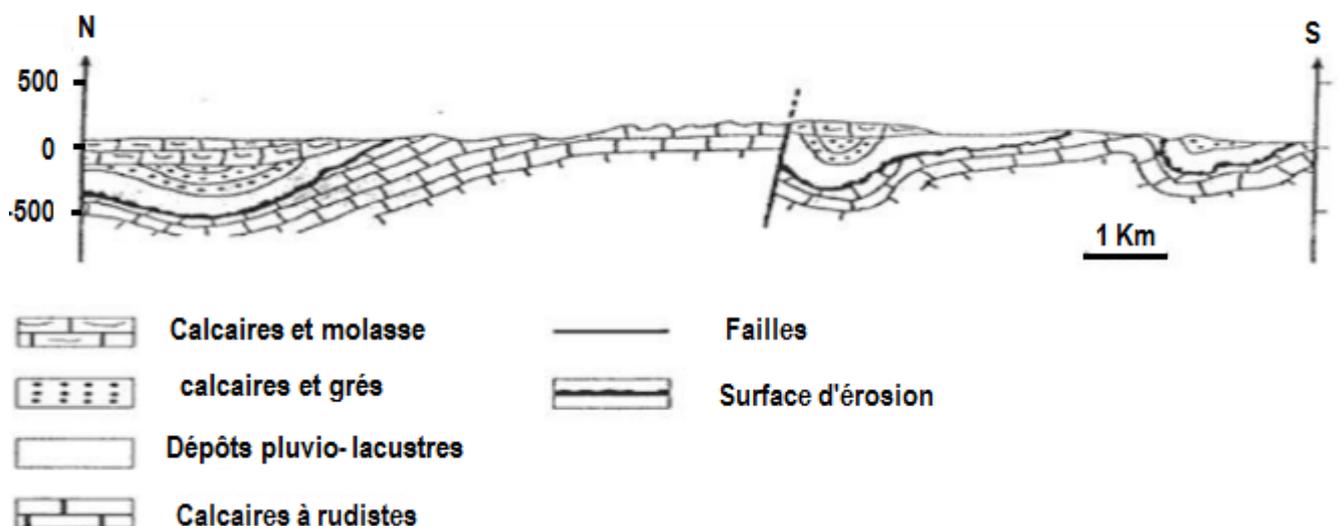
3. Une faille F (Phase tectonique cassante) affecte toutes les strates sédimentaires des séries A et B : d'après le principe de recoupement (toute structure en recoupant une autre lui est postérieure), on en déduit donc que F est post sédimentaire (A et B).
4. A l'Est de la faille, la dernière strate sédimentaire de la série B manque ; on en déduit qu'il y a eu érosion.
5. Une coulée volcanique de lave repose en discordance sur la série B et n'est pas affectée par la faille ; on en déduit que cette phase magmatique volcanique est post-sédimentaire (série B) et post-tectonique (faille).

Bilan : Chronologie relative du Sud du Massif central

1. Dépôt de 5 strates sédimentaires de la série A.
2. Phase de compression : plissement.
3. Pluton granitique.
4. Métamorphisme de contact (formation des cornéennes et des schistes tachetés).
5. Emersion et érosion (surface S).
6. Dépôt des 4 strates horizontales de la série B en discordance sur les strates plissées de la série A.
7. Phase tectonique cassante : faille F.
8. Erosion à l'Est de la faille (Disparition de la strate n°10).
9. Phase magmatique : coulée volcanique en discordance sur la série B.

Exercice Intègre :

Etudier la chronologie de chaque événement spécifiquement du document I.9.



Document I.9 Coupe géologique

Solution :

Les quatre événements à prendre en compte : la faille, la phase de plissement, la surface d'érosion, le dépôt de calcaires et grès.

Chaque événement est étudié spécifiquement :

La faille : On constate que la faille recoupe les quatre terrains présents dans la région considérée, c'est-à-dire les calcaires à rudistes, les dépôts fluvio-lacustres, les calcaires et grès et les calcaires et molasse. On peut donc dire qu'elle est postérieure à ces terrains.

La phase de plissement : Seuls les trois terrains les plus profonds, calcaires à rudistes, dépôts fluvio-lacustres et calcaires et grès sont plissés. On peut donc affirmer que la phase de plissement s'est déroulée postérieurement à la formation des trois terrains. Les calcaires et molasse recouvrent les terrains plissés. On peut dire que le plissement est antérieur à ces dépôts.

La surface d'érosion : La surface d'érosion limite les calcaires à rudistes, on peut donc penser que cette surface s'est mise en place postérieurement au dépôt de calcaires à rudistes. Cette surface est recouverte de dépôts fluviaux et de calcaires et grès, elle est antérieure à ces dépôts.

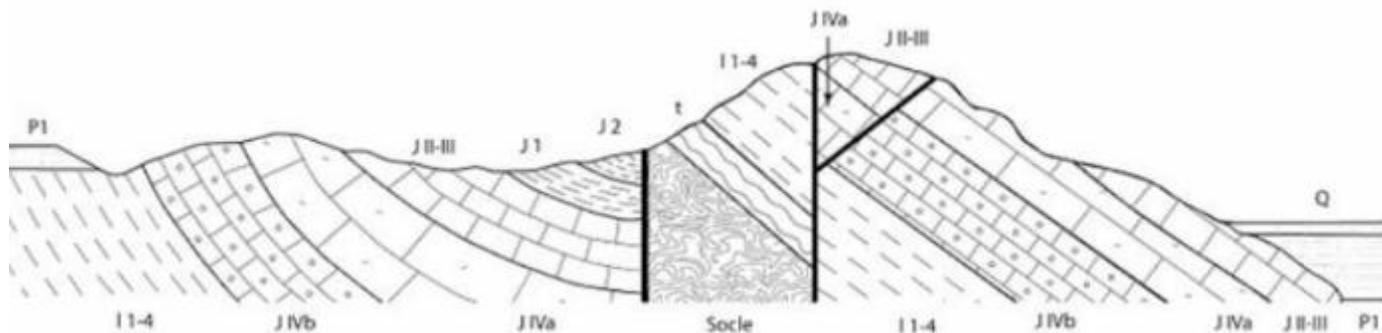
Le dépôt de calcaires et grès : Les calcaires et grès sont les derniers terrains plissés et recouvrent les dépôts fluviaux, ils sont postérieurs. Ils sont antérieurs aux calcaires et molasse qui les recouvrent.

En conclusion que cette région est constituée de terrains sédimentaires empilés les uns sur les autres. Les calcaires à rudistes se sont déposés les premiers puis ont été érodés donnant naissance à la surface d'érosion. Sur celle-ci les formations fluvio-lacustres suivies des calcaires et grès se sont déposées, elles sont donc postérieures. Les trois terrains ont subi une phase de plissement avant d'être recouverts par les calcaires et molasse. Une faille a alors fracturé tous les terrains mis en place.

Chronologiquement on a ainsi formation de la surface d'érosion, dépôt de calcaires et de grès, phase de plissement et faille.

Exercice Intègre :

Document I.10 ci après représente la coupe géologique dans le Beaujolais. Classer l'ordre chronologique des événements.



d'après G. Demarcq, Guides géologiques régionaux Lyonnais/ Vallée du Rhône

Document I.10 Coupe géologique dans le Beaujolais

Solution :

Utilisez les informations du document pour classer dans un ordre chronologique les événements suivants : mise en place du **socle**, phase de plissement, sédimentations de **J2**, **JIVb** et **Q**.

Intro : A l'aide de cette coupe géologique et des principes de datation relative, nous allons classer chronologiquement :

La mise en place du socle, la phase de **plissement** et les sédimentations des couches **J2**, **JIVb** et **Q**.

Tableau I.2 Récapitulatif du classement chronologique des événements présenté par le document I.10

Saisie des données	Déduction
JIVb et J2 sont plissés Q n'est pas plissé	Application du principe de recoupement : - La phase de plissement a eu lieu après la sédimentation de JIVb et J2 - Q s'est déposé après la phase de plissement
Q est au dessus de JIVb JIVb est en dessous de J2 Socle en dessous de I 1-4 et I 1-4 en dessous de JIVb	Application du principe de superposition - Q plus récent que JIVb - JIVb s'est déposé avant J2 - Le socle est plus ancien que JIVb
Synthèse : On a donc la chronologie suivante :	

- Mise en place du socle
- Sédimentation de **JIVb**
- Sédimentation de **J₂**
- Phase de plissement
- Sédimentation de **Q** (en discordance sur un ensemble plissé et faillé)

1.2. Les datations absolues

La datation absolue peut être réalisée en étudiant certains isotopes instables présents dans les minéraux.

La chronologie absolue de mesurer des objets géologiques (roche, minéral) grâce à des techniques qui s'appuient sur la désintégration radioactive d'isotopes de certains éléments chimiques.

Si la datation relative permet de situer les événements les uns par rapport aux autres, la chronologie absolue place les phénomènes géologiques sur une échelle de temps graduée en milliers ou en millions d'années.

1.2.1. Radiochronologie

La radiochronologie (ou datation radiométrique), est une méthode de la géochronologie permettant d'associer **un âge absolu** à un **événement géologique** par le biais de l'étude d'isotopes radioactifs enfermés dans l'échantillon étudié.

Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle, avec la découverte de la radioactivité, qu'il devient possible d'assigner des dates précises aux strates rocheuses et donc aux fossiles qui s'y trouvent.

Diverses méthodes de datation, utilisant différents couples de radioéléments ($^{14}\text{C}/^{14}\text{N}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$...), peuvent être appliquées et permettent de dater de nombreux événements géologiques (cristallisation d'un magma, métamorphisme...).

a. Définition

Alors la radiochronologie est l'ensemble des méthodes de datation des minéraux ou des roches fondées sur l'étude de leurs éléments radioactifs et de leurs produits de désintégration. Les âges obtenus sont appelés âges radiométriques (ou âges absolus).

b. Les principaux géo chronomètres

Certains minéraux contiennent des éléments radioactifs au moment de leur cristallisation. Le principe général utilisé en radiochronologie repose sur les caractéristiques de la désintégration d'un élément radioactif père (P) en un élément

radiogénique fils (F) : plus le temps écoulé depuis la cristallisation est important, plus la quantité d'éléments fils n'est importante.

La masse d'un élément radioactif décroît de façon exponentielle en fonction du temps, et chaque élément est caractérisé par sa période ou demi-vie, désignée comme le temps au bout duquel la moitié de l'élément père est désintégré.

Ils sont choisis en fonction de l'ancienneté et de la nature du matériel géologique à dater.

Exemples des isotopes les plus utilisés

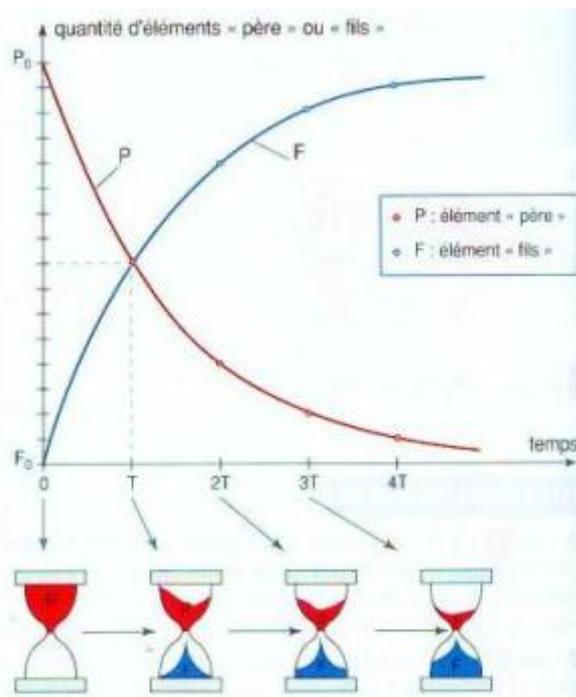


Figure I.26 La datation absolue

Datation absolue par Géochronologie : Décroissance au cours du temps par désintégration de la quantité de l'isotope radioactif (père) et croissance de la quantité de l'isotope radiogénique (fils) voir la Figure I.25.

* Le Carbone 14

Tous les organismes vivants, (plantes et animaux), contiennent du carbone. Il en existe 3 isotopes : ¹²C, ¹³C et ¹⁴C. A côté du ¹²C, non radioactif et très répandu, le ¹⁴C est présent dans tout organisme vivant en quantité infime mais constante.

La concentration du ¹⁴C reste constante dans l'organisme vivant car il est réintroduit par des échanges avec le milieu extérieur. A la mort de l'organisme, l'apport extérieur disparaît et la quantité de ¹⁴C diminue à vitesse constante.

Après 5730 ans, seule la moitié du ¹⁴C initial est encore présente.

La quantité résiduelle de ^{14}C dans un organisme mort, mesurée par la radioactivité qu'il émet, est donc une fonction du temps écoulé depuis sa mort.

*** La méthode « Potassium -argon » :**

Les roches magmatiques contiennent un isotope du potassium (^{40}K), qui se désintègre en Calcium (^{40}Ca) et en un gaz : Argon (^{40}Ar).

La demi-vie du ^{40}K étant de **1,25.10⁹** an, la datation sera basée sur la proportion, dans la roche, du potassium et de l'argon.

*** La méthode rubidium strontium (Rb-Sr) :**

Utilisée pour la mesure des âges les plus anciens. Période (T: demi-vie) de ^{87}Rb : 50 milliards d'années.

1.2.2. Géochronologie géochimique

La géochronologie désigne l'ensemble des méthodes qui permettent de donner un âge aux roches ou aux minéraux. Elle peut être absolue ou relative. La géochimie applique les outils et concepts de la chimie à l'étude de la terre (en surface comme en profondeur) et des sédiments.

Les méthodes géochimiques peuvent être utilisées de différentes manières en stratigraphie, par exemple pour faire des corrélations entre différentes couches (certains éléments chimiques sont alors utilisés comme marqueurs), pour étudier les paléo environnement ou pour faire des datations, absolues comme relatives (par exemple préciser les paléo températures).

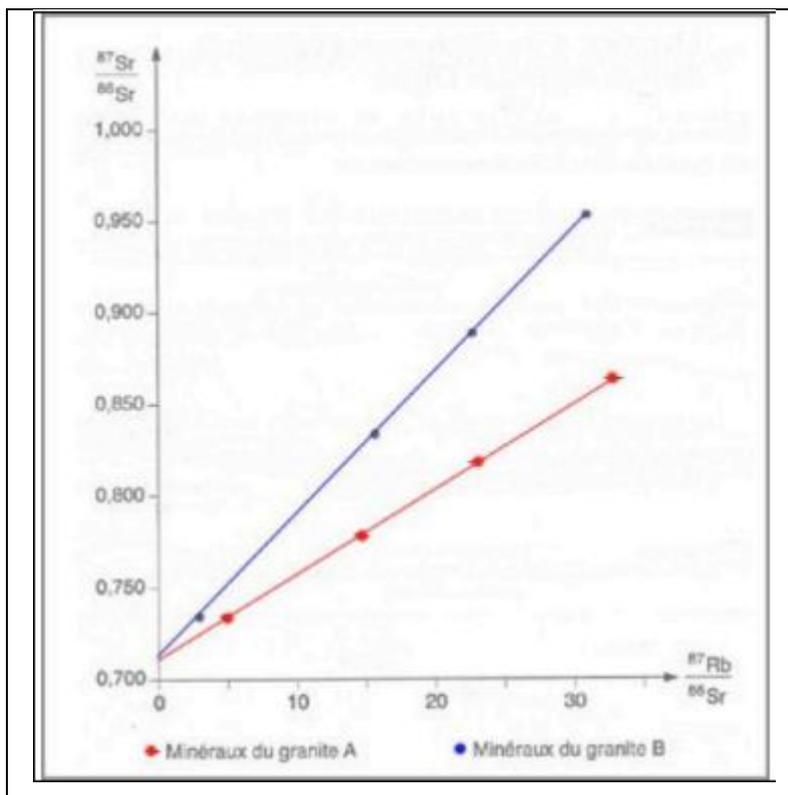
En géochimie, on étudie différents types d'élément : les éléments majeurs (les plus abondants: entre 95 et 99% de la roche/ du sédiment), les éléments mineurs (quelques %), et les éléments traces (présents en quantités infimes).

On peut également étudier les différents isotopes d'un même élément, qu'ils soient stables (exemple : étude du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) ou radioactifs. L'étude géochimique des isotopes radioactifs est la base de la radiochronologie.

Exercice Intègre

Datation absolue par la méthode rubidium / strontium: exercice type 2a : l'âge de 2 granites.

On a prélevé des échantillons de granites dans deux massifs A et B situés dans une région afin de déterminer leurs âges. Pour chaque échantillon, on a établi les rapports $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ et $\text{Rb}^{87}/\text{Sr}^{86}$. Extraire du document les informations permettant de dire si les deux massifs se sont mis ou non en place à la même époque.



Document I.11 La datation de deux granites par la méthode rubidium / strontium

Solution

Ce qu'il faut savoir et comprendre avant de répondre:

Les légendes du graphique indiquent qu'il s'agit d'une datation de 2 granites par la méthode Rubidium – Strontium.

Au départ, les points représentatifs des rapports $\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$ et $\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$ des divers minéraux sont situés sur une droite horizontale recoupant l'axe des ordonnées à la valeur $\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$ initiale. Au fur et à mesure que le temps passe, les points restent alignés sur une droite dont la pente augmente avec le temps.

Il existe plusieurs méthodes de datation absolue des roches basées sur la désintégration d'éléments radioactifs. Les légendes en abscisses et en ordonnées du graphe proposé

indiquent que ces granites ont été datés par la méthode Rubidium – Strontium bien adaptée aux roches magmatiques dont la formation remonte à des centaines de millions d'années.

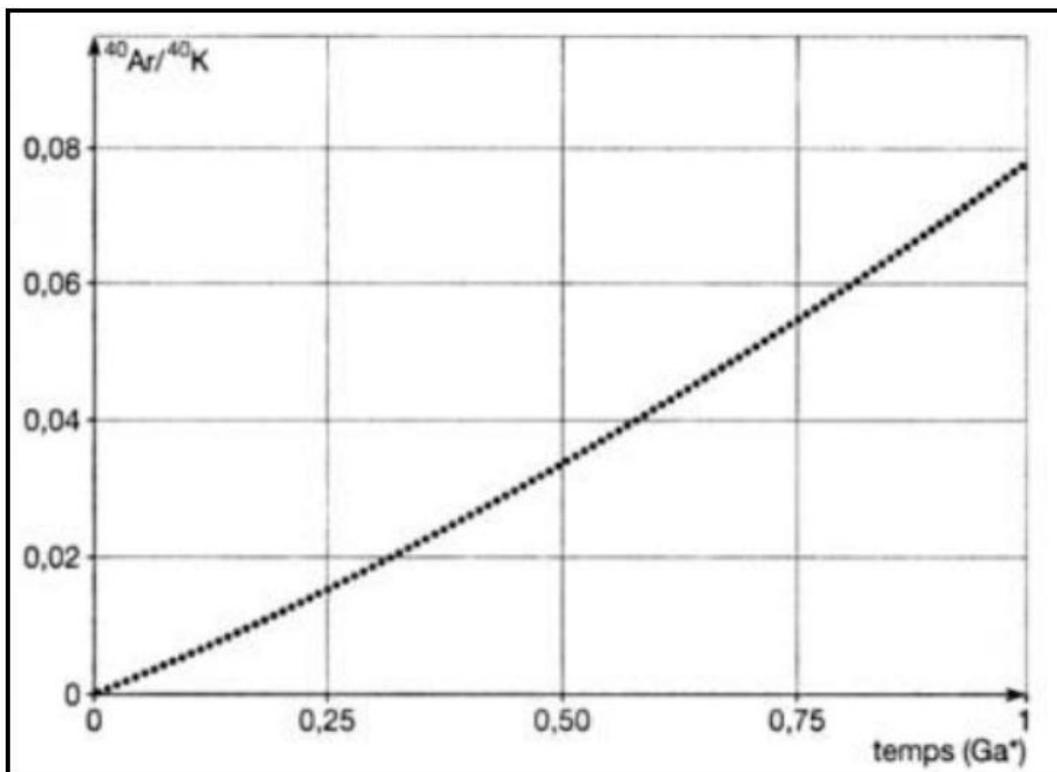
Les points représentatifs de la roche A se répartissent sur une droite de pente a. Si le granite B s'était formé en même temps que le granite A, les points représentatifs des minéraux de ce granite B se trouveraient sur une droite de même pente. Ce n'est pas le cas.

En conséquence les granites A et B ne se sont pas formés à la même époque et la pente b relative aux rapports isotopiques du granite B étant plus forte que la pente a, le granite B est plus âgé que le granite A.

En prolongeant les 2 droites, on constate qu'elles coupent l'axe des ordonnées pratiquement au même point. Cela signifie que les rapports initiaux $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ était le même pour les minéraux des granites A et B. Cela est un argument en faveur de l'idée que les magmas à l'origine des granites A et B avaient la même composition.

Exercice Intègre de la Datation par le couple K/Ar

A partir du document I.12, expliquez le principe de la méthode de datation par le K-Ar, puis déterminez l'âge d'un minéral dont le rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ est de 0.05



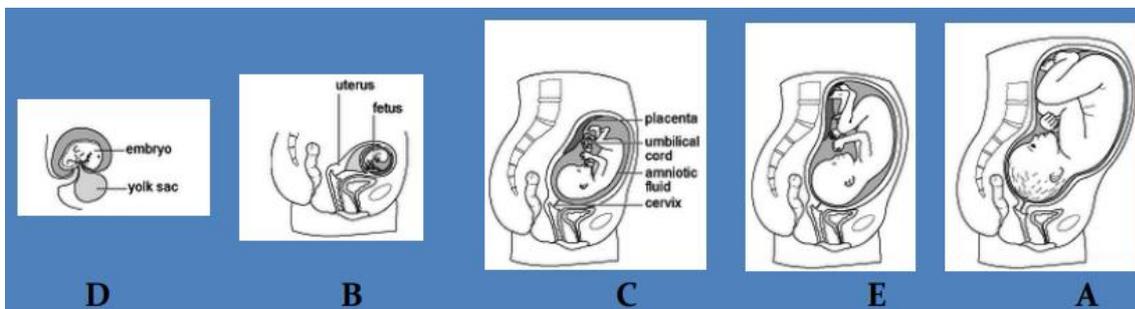
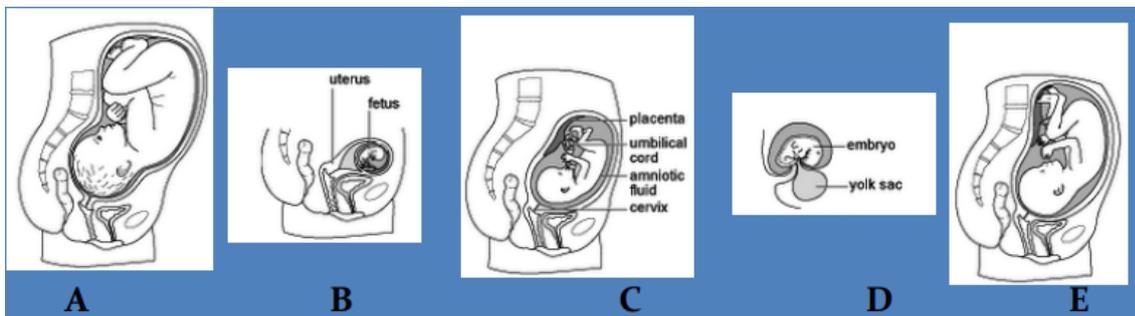
Document I.12 Variation théorique du rapport isotopique $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K}$ en fonction du temps, dans un système clos

Solution :

La méthode K-Ar est basée sur la désintégration du ^{40}K en ^{40}Ar . ^{40}Ar est un gaz rare et très volatile. Au moment de la cristallisation du minéral (= fermeture du système), ^{40}Ar s'échappe du système et son taux y est considéré comme nul. Ainsi, au cours du temps, la quantité de ^{40}K diminue et celle de ^{40}Ar , d'abord nulle, augmente. Il suffit de mesurer le rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$, en tenant compte de la constante de radioactivité pour connaître l'âge de l'échantillon. Ce rapport égal à 0 à la fermeture du système, augmente avec le temps. Ainsi, dans ce cas précis, le minéral a un rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ égal à 0.05. D'après le graphe: l'âge est d'environ 0.6 Ga (600 millions d'années).

Exercice intègre

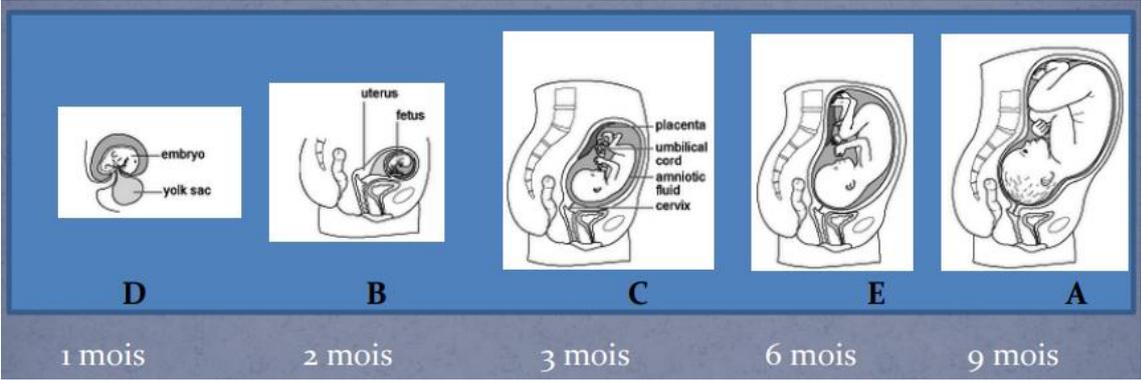
Remettre les événements ci-dessous dans l'ordre d'après le document I.13 des étapes de la formation fœtale chez l'homme?



Document I.13 Étapes de la formation fœtale chez l'homme

Solution :

Chronologie absolue : dater les événements selon les étapes de la formation fœtale chez l'homme du premier mois jusqu'au neuvième mois.



Chapitre II Les unités stratigraphiques

Une période géologique est une subdivision d'une ère géologique sur l'échelle des temps géologiques.

C'est une unité de temps de troisième ordre, basée sur les résultats de la géochronologie (obtenus par les méthodes de datation absolue).

Sa durée moyenne est de 50 millions d'années pour l'éon Phanérozoïque et d'environ 200 millions d'années pour l'éon Protérozoïque.

La Commission internationale de stratigraphie établit, dans le cadre de l'Union internationale des sciences géologiques (I.U.G.S.), les différents intervalles de l'Échelle des temps géologiques. En 2004, l'I.U.G.S. a ajouté l'Édiacarien à l'ère Néoprotérozoïque 2 (le dernier ajout d'une période géologique remontait à près de 130 ans).

L'échelle stratigraphique est une division du temps qui est reposée sur l'étude des couches sédimentaires, les strates. Représente comme étant un 'calendrier' de la Terre, utilisée en état actuelle par tous les scientifiques au niveau mondial avec une différence locale. Elle est régulièrement corrigée ou complétée en fonction des résultats obtenus à nouveaux par les chercheurs au niveau mondial.

L'échelle comprend différentes unités, a durée variable, les plus petites sont les étages et les plus grandes sont les éons, en suite les ères. Les limites entre les unités ont généralement été définies, pour les temps géologiques les plus récents, est basé sur l'étude des fossiles. Les plus grandes d'entre elles (les éons, les ères) répondent à des bouleversements biologiques majeurs (les crises biologiques) ou avec des changements paléogéographiques notables (orogénèses).

2.1. Les grandes périodes géologiques

2.1.1. Le Précambrien (- 4,6 GA à - 542 MA)

Le Précambrien fait référence aux trois éons qui ont précédé l'Eon Phanérozoïque. C'est la **plus longue période** de l'échelle des temps géologiques, allant de la formation de la Terre, environ 4,6 Ga avant, et l'apparition d'une abondance faune d'animaux à coquille dure, qui fait référence à 542 Ma l'entrée dans l'ère paléozoïque. Sa première période est le Cambrien.

L'ère précambrienne représente **88% de l'histoire de la Terre**. C'est aussi la **période géologique la moins connue** car c'est la plus ancienne.

a. Environnement au Précambrien

Le système solaire s'est formé il y a 4 567 Ma. La proto-Terre pourrait s'être formée par **accrétion** de matériaux restants dans une nébuleuse primordiale, il y a environ **4 560 millions d'années**.

La **croûte terrestre stable semble avoir été en place vers 4400 Ma**, comme en témoignent les cristaux de zircon trouvés en Australie occidentale (datés à environ 4404 Ma \pm 81) (Berger J.P. et Javelle C., 2014).

b. L'Atmosphère

L'**atmosphère primordiale** est due au dégazage de la Terre. Une **importante activité volcanique** y contribue. Les gaz volcaniques sont constitués à plus de 80% de vapeur d'eau puis de dioxyde de carbone (CO_2), d'hydrogène sulfuré (H_2S) ou de dioxyde de soufre (SO_2))... Après refroidissement, une grande partie de cette eau va se condenser pour former les océans. L'atmosphère résultante, riche en azote, dioxyde de carbone, eau dioxyde de soufre et éventuellement chlorure d'hydrogène, ammoniac et méthane, serait hostile à la vie actuelle. C'est une atmosphère **réductrice**.

La **production de dioxygène atmosphérique a commencé avec le début de la photosynthèse** chez les cyanobactéries, à partir de -3,5 Ga. A -2,2 Ga, l'augmentation de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ($\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique) dans les carbonates s'explique par la fossilisation de plus de matière organique, Significativement dans les stromatolithes, des structures en dioxygène. C'est ce qu'on appelle l'atmosphère oxydante.

Comme il est remarquable dans la synthèse des variations de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ au cours des temps géologiques (voir la Figure II.01).

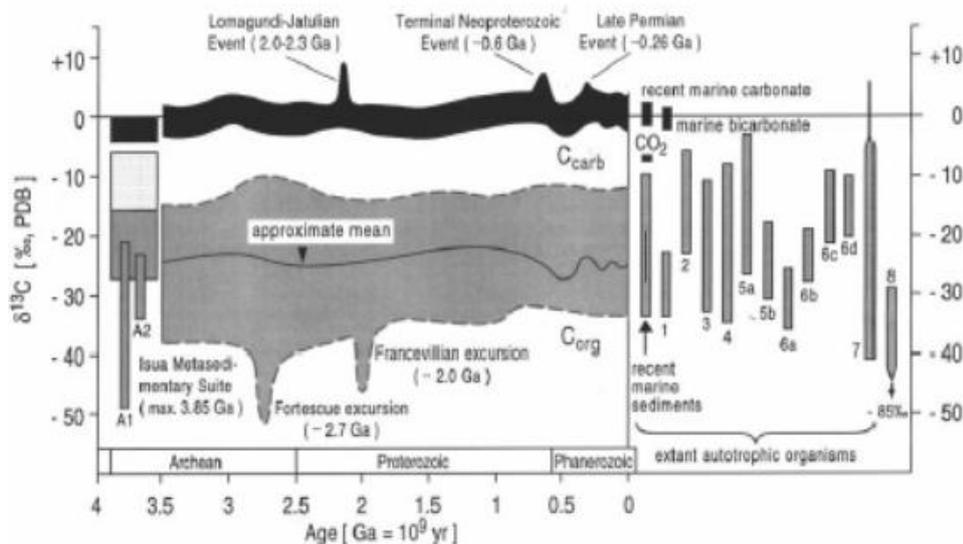


Figure II.01 Variations du $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ au cours des temps géologiques

c. Le climat

Au début de la cible Archéenne, l'activité solaire réduite était compensée par une atmosphère très chargée en gaz à effet de serre. **La température était élevée.** L'analyse isotopique du silicium montre que la température de l'océan était de 70°C il y a 3,5 Ga, puis est descendue à 20°C il y a 800 millions d'années (Berger J.P. et Javelle C., 2014).

Quatre périodes de glaciation ont été détectées entre -1 Ga et -542 Ma.

d. La tectonique des plaques

On sait peu de choses sur la tectonique des plaques Précambriennes. En général, la plupart des masses terrestres formaient un seul **supercontinent, Rodinia**, avant 1 Ga. Il se **sépare en plusieurs morceaux vers - 600 Ma.**

e. Les Orogenèses

Au cours du Précambrien, de nombreuses chaînes de montagnes ont été créées, et aujourd'hui elles ont complètement disparu. La fin de la période Précambrienne (il y a environ 600 millions d'années) a été marquée par les monts **Cadomiens** (en Europe) et toute l'Afrique (**panafricaine.**).

f. Vie au Précambrien

On ne sait pas avec certitude quand la vie est apparue sur Terre, mais le carbone des roches de 3,8 Ga pourrait être d'origine organique. De plus, des bactéries de plus de 3,460 Ga relativement bien conservées ont été trouvées dans la partie ouest de l'Australie ; Dans la même zone, des fossiles ont été trouvés qui pourraient être 100 millions années supplémentaires. Il existe donc de **bonnes indications de vie bactérienne dès l'Archéenne.**

L'évolution vers -2 Ga des eucaryotes, organismes aérobies comme les algues unicellulaires, sera cruciale pour l'oxygénation de l'atmosphère terrestre.

Le premier organisme multicellulaire est une algue rouge datée à -1,2 Ga (mais la vie multicellulaire pourrait être encore plus ancienne).

2.1.2. Le Paléozoïque (- 542 Ma a – 245 Ma)

(du grec 'palaios'= ancien, et 'zôon'= être vivant)

Cette ère géologique, comme on l'appelait auparavant **primaire**, se compose de **six périodes** (Cambrien, Ordovicien, Silurien, Dévonien, Carbonifère et Permien). Le Paléozoïque est une **ère cruciale pour l'évolution de la vie, avec notamment la conquête des continents** par les organismes.

Le début du Paléozoïque classique correspond à **l'apparition de nombreux organismes coquilliers** ("explosion cambrienne"), et se termine par une **extinction massive** (au Permien).

a. Paléogéographie

Le Paléozoïque se caractérise par la **formation de deux grandes chaînes de montagnes**, d'abord la chaîne **calédonienne**, dont les racines se trouvent en Scandinavie et au Groenland, puis la chaîne **hercynienne**, qui forme toute l'Europe.

Le Paléozoïque supérieur correspond à la chaîne hercynienne, responsable d'une grande partie de la structure de l'Europe et de l'Amérique du Nord. La chaîne calédonienne est arasée. Sur les continents désertiques, **d'épaisses séries détritiques s'accumulent**. Des lagunes se forment sur les continents. Un manteau végétatif se développe, qui fournira **d'abondantes forêts houillères** (formation de gisements de charbon au Carbonifère).

A la fin du Paléozoïque, toutes les terres continentales étaient soudées en une **seule masse, la Pangée**. Les traces actuelles du Paléozoïque supérieur sont importantes et frappantes : ce sont, par exemple, les **noyaux des massifs alpins**, qui ont été récemment repris dans de nouveaux mouvements tectoniques. Partout, les terrains Mésozoïques se rattachent à ce qui est devenu le soubassement, plissé et plat, métamorphique et granuleux. C'est pourquoi la **discordance hercynienne forme la grande ligne de partage entre l'ère Paléozoïque et l'ère Mésozoïque**.

b . Climat

Plusieurs glaciations se produiront au cours du Paléozoïque : au début du Cambrien, à l'Ordovicien (particulièrement sensible au Sahara), au Permien (dans tout le continent Gondwana, Afrique du Sud, Inde, Australie, etc.).

c . Vie au Paléozoïque

Au début du Paléozoïque, environ 2 Ga se sont écoulés depuis le début de la vie. **Des organismes hautement réglemés existent**.

L'ère paléozoïque est la première ère des âges fossiles (le phanérozoïque).

Les espèces vivantes se diversifient :

- Toutes sortes d'invertébrés vivent dans les mers (mollusques, trilobites, coraux, éponges).
- Les vertébrés apparaissent dans les océans (formes primitives au Cambrien, puis d'abord poissons au Silurien) et colonisent ensuite les continents dès le Dévonien (avec les amphibiens). Les reptiles apparaissent au Carbonifère.

- La végétation se développe en milieu continental : végétation complexe d'abord au Silurien, puis forêts d'abord au Dévonien. **La fin de l'ère, marquée par un climat chaud et humide**, favorise le développement de **forêts luxuriantes**, notamment de fougères arborescentes.

d. Les extinctions massives

Plusieurs extinctions massives d'espèces végétales et animales ont eu lieu au cours du Paléozoïque :

- **A la fin de l'Ordovicien**, il y a 425 Ma, 85 % des espèces ont disparu,
- **A la fin du Dévonien**, il y a 360 Ma, de 50% à 70 % des espèces ont disparu,
- **A la fin du Permien**, dernière période du Paléozoïque, il y a 245 millions d'années,

S'est **produite la plus importante des cinq extinctions de masse** qui ont marqué l'histoire de la vie sur Terre : on estime que plus de 90% des espèces marines et 70 % des espèces terrestres ont alors disparu. Ses causes sont encore mal comprises (activité volcanique, changement du niveau de la mer, changement climatique, etc.).

2.1.3. Le Mésozoïque (- 245 Ma à – 65 Ma)

(du grec 'mesos' = moyen, et 'zôon' = être vivant)

Le Mésozoïque, qui a duré **185 millions d'années**, est une ère géologique intermédiaire entre le Paléozoïque et le Cénozoïque, que l'on appelait auparavant l'ère secondaire.

Divisé en trois périodes géologiques principales (Trias, Jurassique et Crétacé)

Le Mésozoïque voit **l'éclatement des masses continentales en ouvrant de nouveaux océans** (océan Atlantique, Océan Indien) <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers>.

De nouvelles espèces vivantes apparaissent et certaines atteignent leur apogée, comme les **ammonites** ou les **reptiles géants** (dinosaures). Celles-ci disparaîtront à la fin du Mésozoïque, comme 60% des autres espèces vivant sur Terre.

a. Paléogéographie

Du point de vue de la paléogéographie, la période mésozoïque est caractérisée par la **fragmentation de la Pangée**, qui est l'une des caractéristiques du continent géant des périodes permo-triasiques, à la suite de collisions et de formations qui se sont succédées au cours de la Haute Époque paléozoïque. Cette masse continentale unique est restée stable pendant environ 40 millions d'années, ce qui est une période calme d'un point de vue tectonique. Au début du Mésozoïque, la Pangée s'est scindée en deux masses continentales, la **Laurasie** au nord et le **Gondwana** au sud (l'Afrique fait donc partie de ce massif).

D'un point de vue orogénique, le Mésozoïque a constitué une période de calme. La partie supérieure du Permien (la dernière étape du Paléozoïque) marque la fin de l'orogénèse hercynienne en Europe. Les reliefs qui occupaient alors la partie centrale de la Pangée aux basses des altitudes peuvent être (surtout au Trias) à l'érosion, et ont même été dépassés par la mer.

Le Mésozoïque est divisé en trois périodes :

- le Trias (-252 à -201 Ma) ;
- le Jurassique (-201 à -145 Ma) ;
- le Crétacé (-145 à -66 Ma).

Le Mésozoïque est **la période de naissance, pour l'ouverture des océans actuels** (de -180 millions à -135 millions d'années, soit l'ouverture des océans Atlantique et Indien) voir Figure II.2.

b. Climat

Dans l'hémisphère Nord, **le climat était autrefois très chaud** (en moyenne 5 à 10 °C de plus qu'aujourd'hui). Ils se sont refroidis lentement au Crétacé supérieur.

c. Vie au Mésozoïque

Le Mésozoïque est marqué par :

- L'absence de certains groupes Paléozoïque connus (ex : graptolithes, trilobites),
- La diminution progressive d'autres groupes (par exemple : les brachiopodes, les ptéridospermées chez les plantes),
- **L'évolution remarquable des ammonites et des reptiles géants** puis leur disparition à la fin de l'ère Mésozoïque,
- L'émergence de formes d'une grande importance à l'heure actuelle, telles que les oiseaux, les mammifères et les plantes angiospermes.

Le monde continental est colonisé depuis le Paléozoïques.

La fin de l'ère Mésozoïque (c'est-à-dire la fin du Crétacé), il y a 65 Ma, est marquée par une **extinction massive**.

2.1.4. Le Cénozoïque (de -65 Ma à l'actuel)

(du grec 'kainos' = nouveau, et 'zôon' = être vivant)

Dernière ère géologique, le Cénozoïque a commencé il y a 65,5 Ma et succède à l'ère Mésozoïque. Le Cénozoïque comprend les périodes **Paléogène** (ou nummulitique) et **Néogène**, qui composent le **Tertiaire**, et une dernière période, le **Quaternaire**.

Elle représentant à peine le **dixième des temps fossilifères**, c'est l'ère géologique **la plus courte**.

Le Cénozoïque est particulièrement marqué par la **formation des chaînes alpines**. La fermeture de l'océan Mésogée et la collision de l'Inde, séparée de l'Afrique avec l'Eurasie, expliquent l'éruption des Alpes et de l'Himalaya. Les sédiments intensément accumulés sont plissés, transformés, et ces hautes montagnes alimentent des sédiments détritiques extrêmement abondants. Une crise climatique majeure (l'époque glaciaire) se place dans sa partie supérieure.

Après l'extinction de nombreuses espèces à la fin de l'ère Mésozoïque, la vie s'est caractérisée par **l'évolution et la diversification des mammifères, des oiseaux et des poissons**. Les plantes **angiospermes** sont devenues dominantes. Animaux et végétaux préfigurent la faune et les flores actuelles.

a. Paléogéographie

Les océans s'ouvrent de plus en plus. Les continents se déplaceront vers leur position actuelle et les océans acquerront une configuration qui nous est familière (par exemple, l'Atlantique Nord). Une séparation complète se produit entre l'Australie et l'Antarctique. La collision de bloc Asie-Inde a provoqué la formation de **l'Himalaya**.

Au Cénozoïque, la redistribution des masses hercyniennes s'est poursuivie et **les structures alpines** actuellement visibles **se sont créées** (Atlas, Cordillères Bétiques, Alpes, Apennin, Carpates, Balkans, Hellénides, chaînes de l'Asie Mineure, Iran, Birmanie, Indonésie, chaînes insulaires pacifiques, Pyrénées, Caucase, Himalaya).

b. Climat

Le climat, au début du Cénozoïque et dans les régions européennes, semble avoir été beaucoup **plus chaud et plus humide qu'aujourd'hui**. Peu à peu, cet aspect subtropical a diminué et les températures ont chuté de manière significative.

c. Vie au Cénozoïque

Faune et flore ressemblent de plus en plus à la faune et flore contemporaines. **Toutes les classes du règne végétal et du règne animal actuels sont représentées**.

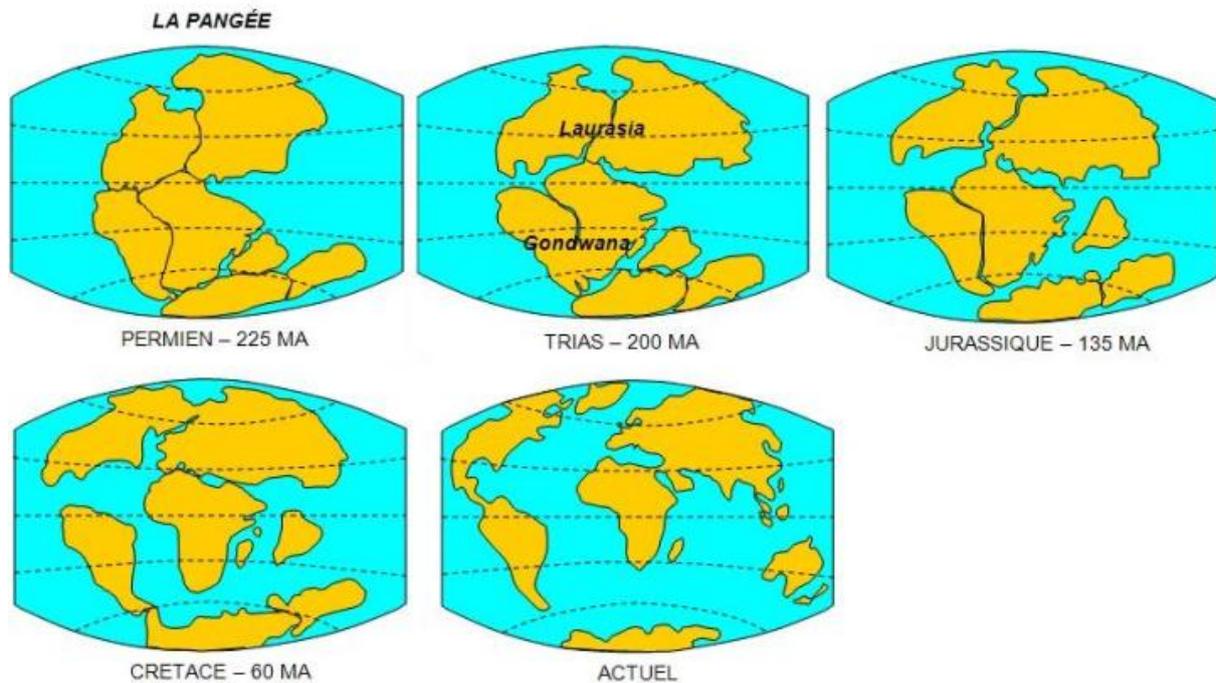


Figure II.2 La Pangée et l'évolution des continents

(www.svt-biologie.premiere.bacdefrancais.ne)

2.1.5. Le Quaternaire

Division supérieure de l'ère Cénozoïque qui comprend également le système Tertiaire, le **Quaternaire a commencé il y a 2,6 Ma, avec l'apparition** de l'homme, et se poursuit aujourd'hui.

Au début de l'ère Quaternaire, la position des continents était proche de la situation actuelle. **Plusieurs périodes glaciaires**, séparées par des périodes de réchauffement, ont formé les reliefs et sont en grande partie responsables du paysage actuel. Ainsi, toute l'Europe du Nord et l'Amérique du Nord étaient recouvertes d'une **calotte glaciaire** qui les aplatissait et laissait, lors de la fonte, de multiples lacs.

Les mouvements relatifs des plaques continuent, notamment dans la Mer Rouge et dans le golfe d'Aden, où on assiste à l'ouverture d'un nouvel océan qui éloignera progressivement l'Afrique du Moyen-Orient.

Il existe deux périodes (= séries) au cours du Quaternaire : la première correspond au cycle glaciaire, le **Pléistocène**, et la seconde correspond au cycle post-glaciaire actuel, **l'Holocène**.

a. Climat du Quaternaire : les Glaciations

Quatre glaciations alpines sont distinguées : **Günz, Mindel, Riss et Würm**, auxquelles, avant Günz, se sont ajoutées deux autres phases glaciaires Biber et Donau.

Pendant la période de glaciation, **les déserts de l'hémisphère nord ont reculé et se sont étendus vers le sud. Le climat de l'Afrique du Nord était moins chaud et plus humide** que le climat actuel.

La fonte rapide des glaciers en Europe a commencé il y a environ 10 000 ans : c'est le début de la **transgression flandrienne**, qui a modifié le tracé des littoraux. Les rives, qui se situent fort probablement entre 120 et 70 m du niveau actuel lors du maximum de glace, se rapprochent du niveau actuel.

b. Méthodes d'étude Typiques du quaternaire

- La **dendrochronologie** (du grec 'dendron=arbre, 'chronos'= le temps et 'logo' = l'étude) :

En calculant et en analysant les anneaux de croissance des arbres, la dendrochronologie a reconstitué des séquences climatiques sur près de 5 000 ans.

- La **téphrochronologie** (du grec 'tephra= cendres), c'est-à-dire procédé de datation par l'analyse stratigraphique des cendres volcaniques réparties sur le globe par les vents.
- Datation au **carbone 14** : Les mesures de radioactivité ont ouvert la voie à une chronologie absolue plus longue, ce qui a obligé à choisir une date de référence (1950) et à utiliser un système de datation négatif basé sur cette date, désignée par l'abréviation BP (' Before Present'). La dose de carbone 14, qui est un isotope radioactif du carbone présent dans la matière organique, indique la période de désintégration du carbone depuis la mort de l'organisme. Mais la réduction rapide au carbone 14 limite le champ d'information à 50 000 ans (au-delà, une autre méthode de datation peut être utilisée, comme la méthode potassium/argon).
- **Les analyses isotopiques de l'oxygène** : Les mesures isotopiques offrent de grandes possibilités par rapport à l'étude des paléotempératures. L'oxygène, qui a généralement un poids moléculaire de 16, a un autre isotope, ^{18}O . Des mesures du rapport $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ont permis de déterminer l'évolution de la paléo-température des eaux marines en déterminant le pourcentage de l'isotope ^{18}O dans les carbonates déposés par les coquillages.
- **Le paléomagnétisme** : En se refroidissant, les particules magnétiques de la roche s'alignent en permanence dans la direction de la polarité d'aimantation. Cependant, le champ magnétique change et même s'inverse au cours du temps géologique. Les mesures paléomagnétisme du Quaternaire indiquent une

succession de périodes dites « normales », qui se caractérisent par la direction vers le nord, et de périodes dites « inverse », qui se caractérisent par la direction vers le sud. En combinant ces observations avec la datation K/Ar, nous avons pu identifier quatre époques : **Gilbert** (inverse), **Gauss** (normale : de 3,4 à 2,5 Ma), **Matuyama** (inverse : de 2,5 à 0,7 Ma) et **Brunhes** (normale : correspond à la période actuelle). Les époques comportent des épisodes à polarité inverse.

On appelle critères de polarité ou **figures géotropes** tous les **critères qui permettent au géologue de déterminer l'orientation de la couche sédimentaire**, c'est-à-dire si cette couche est inversée ou à l'envers, sinon on dit en position **normale** ou **inversée**.

Ce sont des indices simples qu'il faut savoir rechercher sur le terrain, tels que :

- **Les fossiles en position de vie** : il s'agit des organismes persistants tels que les polypiers, les rudistes, les végétaux...
- **Les traces d'organismes** (ichnofossiles) : empreintes de pas, terriers, traces de bioturbation,
- **Les figures sédimentaires** : elles sont très nombreuses

⇒ au sommet des bancs : figures de **dessiccation** ('mud cracks'), **rides de courant** ('ripple marks'), **traces d'érosion**,

⇒ à la base des bancs : **figures de courant**, **figures de charge** (load structure', produites suite à l'enfoncement par gravité de la couche supérieure dans la couche inférieure,

⇒ à l'intérieur des bancs : **granoclassement**, **stratifications obliques** ('cross stratification'),

Convolutions.

La datation des strates, notamment par les fossiles, permet également de connaître leurs polarités, mais il faut tenir compte d'éventuels problèmes de tectonique ou de paraphrase paléontologique voir la Figure II.3.

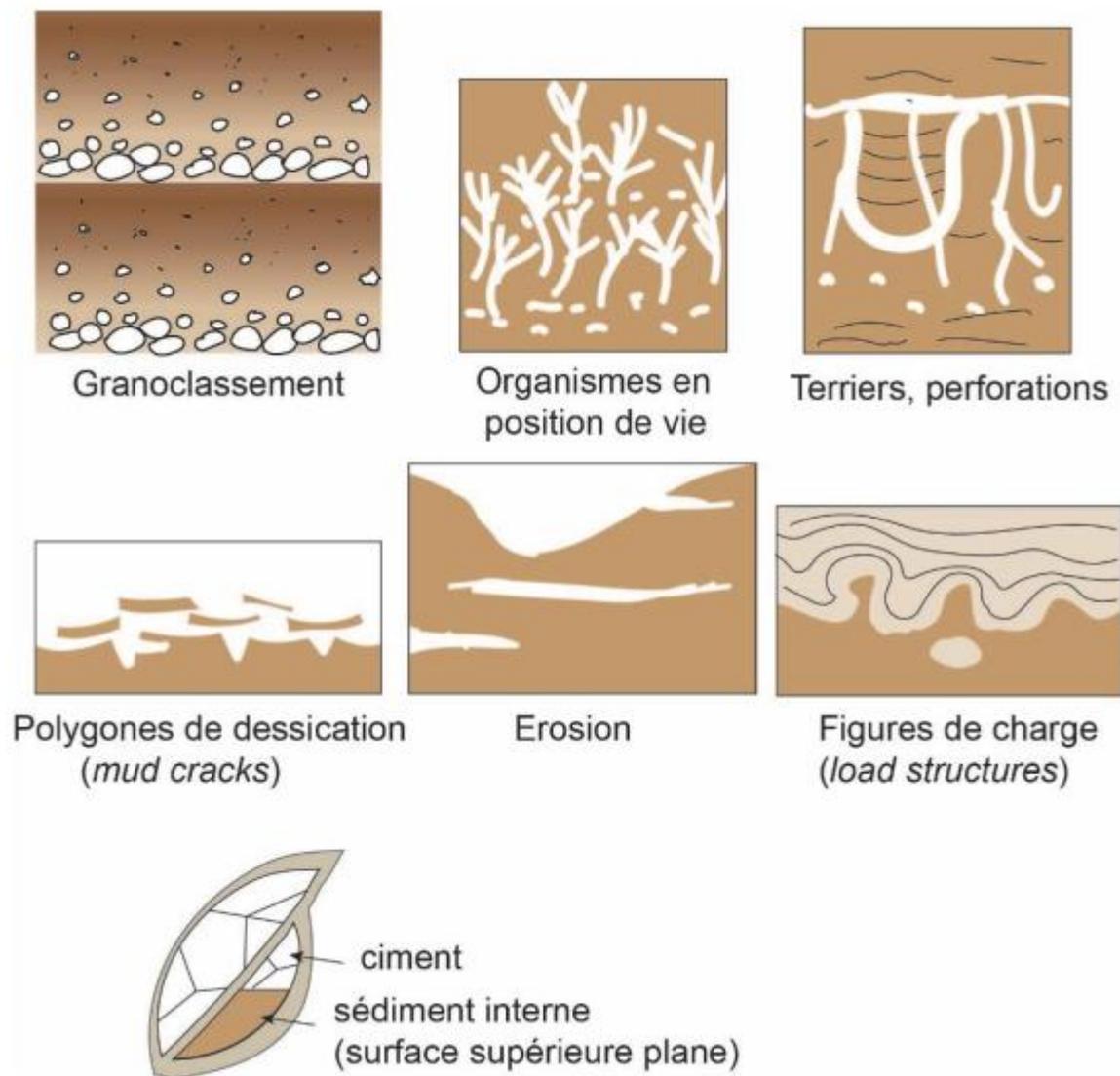


Figure II.3 Exemples de critères de polarité (modifié d'après le cours de F Boulvain, Université de Liège, disponible sur internet).

2.2 L'échelle des temps géologiques

La biostratigraphie et les méthodes de géochronologie permettent de reconstituer l'histoire géologique d'une région donnée. Les recouvrements généralisés à l'échelle du globe ont permis de créer un calendrier de référence appelé échelle stratigraphique internationale des temps géologiques qui comprend des subdivisions suivantes voir Tableau II.1 ci après.

2.2.1. Les Eons

L'éon représente la plus grande période géologique (plusieurs centaines de millions d'années). Il est caractérisé par quatre sous périodes:

-Hadéen (-4600 Ma à 3800 Ma) : Il n'y a plus de roches de cet âge en raison de l'érosion et de la subduction.

- **Archéen** (-3800 Ma à -2500 Ma) : Les roches les plus anciennes de la Terre, ces roches contiennent des traces d'organismes microscopiques (bactéries).

- **protérozoïque** (-2500 Ma à -570 Ma) : Ces roches contiennent des traces de micro-organismes multicellulaires. Les couches de roches archéennes et protérozoïques sont moins connues que les roches plus récentes, car ces roches anciennes ont été déformées, métamorphosées et érodées.

- **phanérozoïque** (-570 Ma à aujourd'hui) : c'est l'éon le plus récent. Les roches du phanérozoïque contiennent beaucoup de traces de vie.

L'Hadéen, l'Archéen et le protérozoïque sont regroupés en **précambrien**.

2.2.2 Les Eres (Erathemes)

Les éons sont divisés en ères dont les limites sont caractérisées par de grandes perturbations biologiques (extinctions majeures ou crises biologiques) ou paléobiologiques (orogénèse)...

Une ère géologique reprend l'intervalle de temps défini sur la base des organismes présents dans ces roches. Il n'y a pas d'ère archéenne ou protérozoïque, alors que l'éon Phanérozoïque est subdivisée en trois ères :

- **Paléozoïque** (représente la vie ancienne de 570 Ma à 245 Ma) ⇒ ancien nom =ère « Primaire »
- **Mésozoïque** (représente la vie intermédiaire de 245 Ma à 65 Ma) ⇒ ancien nom =ère « Secondaire »
- **Cénozoïque** (représente la vie récente de 65 Ma à aujourd'hui) ⇒ ancien nom =ère « Tertiaire »

2.2.3. Les périodes (=Systèmes)

Elles regroupent des étages sur des références lithologiques (Carbonifère, Crétacé), paléontologiques (Nummulitique= Paléogène) ou autres. Les périodes du Phanérozoïque sont les suivantes :

- 6 au Paléozoïque : Cambrien, Ordovicien, Silurien, Dévonien, Carbonifère, Permien,
- 3 au Mésozoïque : Trias, Jurassique, Crétacé,
- 2 au Cénozoïque : Paléogène, Néogène, en plus du Quaternaire qui est la période géologique actuelle (le Quaternaire est parfois considéré comme une Ere)

Il faudrait plusieurs décennies pour établir ces périodes sur la base d'une étude biostratigraphique de nombreux affleurements, localisés notamment en Europe. **Les**

noms des périodes reflètent la géographie de l'endroit où elles ont été découvertes ou les caractéristiques de leurs couches.

Ex : Le jurassique ⇒ Terme dérivé d'une chaîne de montagnes européenne, le Jura.

Le crétacé ⇒ Le terme dérive du nom de la roche caractéristique de période, la craie (= "creta" en latin.

2.2.4. Les Epoques (= Séries)

Les périodes sont divisées en époques en fonction de l'association de strates fossiles particulières. Leur durée moyenne est d'environ 15 millions (hors Quaternaire).

Leurs limites poursuivent les mêmes règles que pour les périodes

Désignation : adjectif inf, moyen, sup. (Crétacé in., sup) ou encore « -cène » (Eocène, Oligocène.....)

2.2.5. Les Etages (= Âges)

Les étages successifs sont **identifiés par un toponyme qui évoque le stratotype** (la formation géologique signalée à travers le monde qui a caractérisé cette période).

Plusieurs étages composent une époque. Le nom d'étage est souvent dérivé du nom d'un lieu géographique ou historique, actuel ou ancien, auquel le suffixe - "ien" est ajouté.

Par exemple : Oxfordien (de la ville d'Oxford en Angleterre),

Lutécien (du nom romain de la ville de Paris, Lutèce)...voir Figure II.4.

Tableau II.1 :L'échelle stratigraphique des temps géologique (simplifiée)

<i>Eons</i>	<i>Eres</i>	<i>Périodes ou époques</i>	<i>Âge du début de l'unité</i>	<i>Durée en Ma</i>	
Phanérozoïque	Quaternaire ^a		1,9	2	
	Cénozoïque (= 'Tertiaire')	Pliocène		5,3	3,5
		Miocène		23	18
		Oligocène		35	12
		Eocène		54	19
		Paléocène		65	11
	Mésozoïque (= 'Secondaire')	Crétacé		135	70
		Jurassique		195	60
		Trias		245	40
	Paléozoïque (= 'Primaire')	Permien		290	55
		Carbonifère		340	50
		Dévonien		400	40
		Silurien		440	40
		Ordovicien		500	60
Cambrien			570	70	
Précambrien	Protérozoïque	/	/	2,5 Ga	1900
	Archéen			3,8 Ga	1300
	Hadéen			4,6 Ga	800

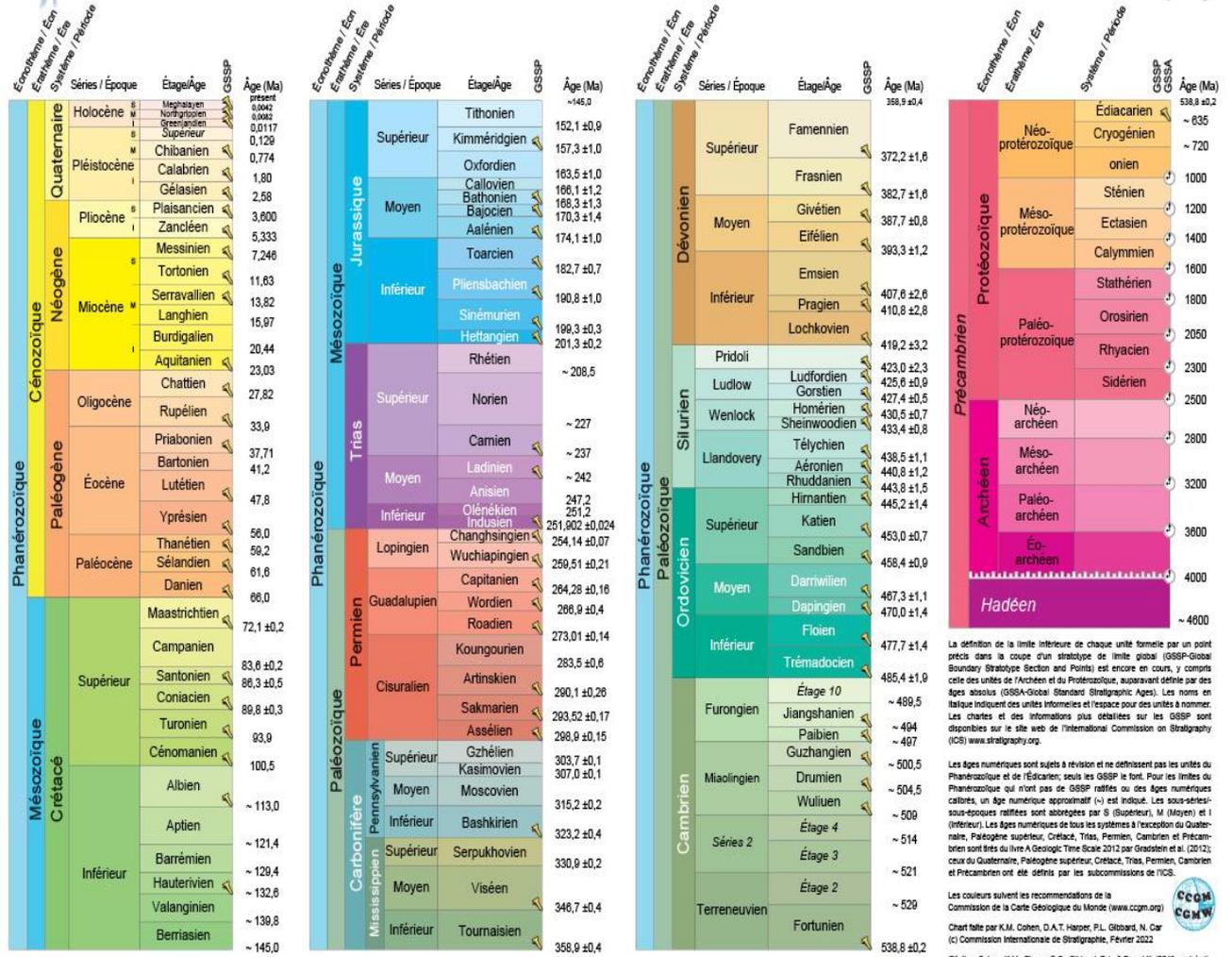


CHARTRE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE

www.stratigraphy.org

Commission Internationale de Stratigraphie

v 2022/02



La définition de la limite inférieure de chaque unité formelle par un point précis dans le coupe d'un stratotype de limite globale (GSSP-Global Boundary Stratotype Section and Point) est encore en cours, y compris celle des unités de l'Archaéen et du Protérozoïque, auparavant définies par des âges absolus (GSSA-Global Standard Stratigraphic Ages). Les noms en italique indiquent des unités informelles et l'espace pour des unités à nommer. Les chartes et des informations plus détaillées sur les GSSP sont disponibles sur le site web de l'International Commission on Stratigraphy (ICS) www.stratigraphy.org.

Les âges numériques sont sujets à révision et ne définissent pas les unités du Phanérozoïque et de l'Édiacarien; seuls les GSSP le font. Pour les limites du Phanérozoïque qui n'ont pas de GSSP ratifiés ou des âges numériques catégorisés, un âge numérique approximatif (*) est indiqué. Les sous-séries-sous-époues ratifiées sont abrégées par S (Supérieur), M (Moyen) et I (Inférieur). Les âges numériques de tous les systèmes à l'exception du Quaternaire, Paléogène supérieur, Crétacé, Trias, Permien, Cambrien et Précambrien sont tirés du livre A Geologic Time Scale 2012 par Gradstein et al. (2012); ceux du Quaternaire, Paléogène supérieur, Crétacé, Trias, Permien, Cambrien et Précambrien ont été définis par les sous-commissions de l'ICS.

Les couleurs suivent les recommandations de la Commission de la Carte Géologique du Monde (www.cgmw.org)

Charte faite par K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard, N. Car
 (c) Commission Internationale de Stratigraphie, Février 2022

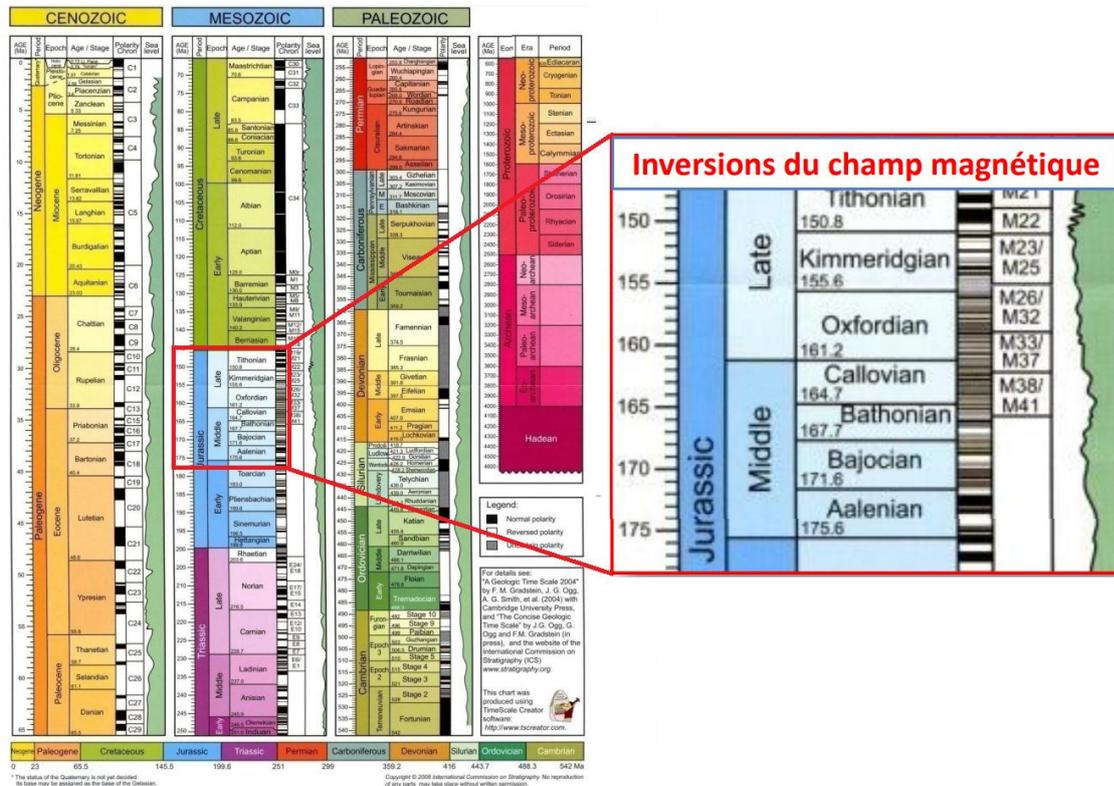
Citation: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.X. (2013); updated
 The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36:199-204.

URL: <http://www.stratigraphy.org/ICChart/ChronostratChart2022-02/French.pdf>

Figure II. 4 Charte représentatif de la chronologie à l'échelle globale (Cohen K.M., Harper D.A.T., Gibbard P.L., Car N., 2022)

Exercice intégré

Que représentent les bandes noires et blanches corrélées aux noms d'étages sur le document II.1 concernant les temps géologique ?



Document II. 1 De la chronologie à l'échelle des temps géologique

Réponse :

Axe du champ géomagnétique → aligné avec l'axe de rotation de la Terre. Phase d'inversion de polarité durant les temps géologiques → les pôles N et S, échangent leur position.

2.3. Les unités stratigraphiques

2.3.1. Stratotypes

Le stratotype représente une **coupe-type, qui agit comme une norme (= référence), permettant de composer et de définir le contenu et les limites de toute unité stratigraphique**. Cette coupe est enregistrée dans une localité déterminée ou **localité – type**.

Ainsi, stratotype incarnait un intervalle de temps précis. Tout stratotype doit être **précisément localisée géographiquement** et définie géologiquement par son contenu lithologique, minéral et faunistique, ainsi que ses limites. S'il s'agit d'un stratotype de

valeur internationale, il doit être situé dans un pays où il n'y a aucune restriction de mouvement, ni pour les locaux ni pour les étrangers voir Figure II.5.

Dans la mesure du possible, le stratotype doit être choisi parmi une succession de **roches marines à faune riche et variée**, afin de faciliter leurs corrélations. Il peut être défini exceptionnellement dans un sondage.

Un nom d'un étage géologique est souvent formé à partir de la racine de l'emplacement d'un lieu géographique où le stratotype a été explorée et définie, auquel le suffixe –ien a été ajouté :

Exemple : Oxford (UK) ⇒ Oxfordien.

Historiquement, de nombreux stratotypes ont été identifiés en Europe (par exemple, il y avait initialement 46 **stratotypes** en France), mais en fonction de l'évolution de la recherche, certains **stratotypes** ont été modifiés (il existe encore 19 stratotypes valables en France en 2010, le tout se déroulant au XIX^{ème} siècle).

Par Exemple : le stratotype actuellement de la limite Crétacé/Paléogène (qui ressemble à la fin du Mésozoïque) a été défini en Tunisie, dans la localité d'El Kef.

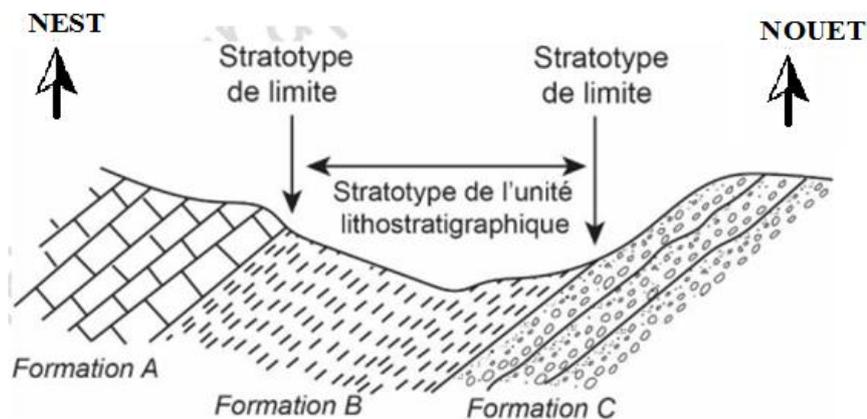


Figure II. 5 Le stratotype, illustration

2.3.1.1. Étapes de l'analyse stratigraphique

Lors de l'étude stratigraphique, plusieurs étapes ont été suivies, à savoir la description de la lithologie stratigraphique (la nature des roches et des sédiments), puis des fossiles qui s'y trouvent, afin d'établir une corrélation. Ensuite, nous nous efforçons si possible de réaliser une datation.

2.3.2. Lithostratigraphie

Lithostratigraphie = discipline stratigraphique basée uniquement sur les différences de nature entre les strates, quelle que soit leur teneur en fossiles : type

de roche, minéraux présents, teneur générale en fossiles (les fossiles sont considérés comme des constituants des roches).

Exemple : marnes à huîtres.

2.3.2.1. Les unités lithostratigraphiques

Il existe quatre **unités lithostratigraphiques** :

La **couche** est la plus petite unité lithostratigraphique

La **formation** est l'unité stratigraphique de base, elle peut être divisée en **membres** :

- Elle est cartographique : on peut la montrer sur les cartes géologiques (échelle 1/25 000 ou 10/100 000)
- Son épaisseur est variable, de l'ordre du mètre au km
- Les critères lithologiques qui permettent de le reconnaître sont variables suivant les régions et les âges.

Par Exemple : dans la zone de Tébessa, la formation 'Fahdene' correspond aux étages Albien et cénomanien (Chabane K., 2015). La formation 'Aleg' ressemble au Turonien et comprend notamment le Membre 'Annaba' (Bedir M. ,1995).

Un ensemble de plusieurs formations est appelé un **groupe**.

2.3.3. Biostratigraphie

Biostratigraphie = un système de stratigraphie utilisant des fossiles trouvés dans des couches géologiques. On ne s'intéresse donc qu'aux roches sédimentaires ou aux roches faiblement métamorphisées.

2.3.3.1. Les unités biostratigraphiques

L'unité de base de la Biostratigraphie est le **biozone**, parfois appelées simplement **zone**. La caractérisation d'un biozone est repose d'abord sur les apparitions (en anglais FO='first occurrence') ou les disparitions d'espèces (en anglais LO='last occurrence', parfois sur son abondance particulière (acmé).

Pour identifier correctement un biozone, plusieurs précautions doivent être prises : identification correctes des fossiles, impact environnemental, réarrangement, densification, etc.

La caractérisation des biomes sera utilisée pour fixer des limites et établir des **datations** (relatives) et des **corrélations**.

2.3.4. Chronostratigraphie

Chronostratigraphie = discipline stratigraphique dont le but est d'étudier l'âge des strates rocheuses, dans le but d'établir des **échelles chronologiques relatives** dont les découpages correspondent à des ensembles de strates.

2.3.4.1. Les unités chronographiques

Les unités chronostratigraphiques sont des **unités de référence qui servent de base aux corrélations** : l'échelle chronostratigraphique établit une hiérarchie entre ces unités.

Une **unité** correspond à un **ensemble de strates, déposées pour une durée déterminée**.

La **chronozone** est la plus petite division, elle correspond généralement à la durée d'un biozone.

L'**étage** est l'unité employée la plus couramment :

- Un étage ne désigne pas une formation particulière (lithologie) mais le temps pendant lequel cette formation s'est déposée.
- Epaisseur des étages : de quelques mètres à plusieurs milliers de mètres.
- Durée : 2 à 10 Ma
- Nom des étages : il est en général dérivé d'un terme géographique, avec une terminaison en '-ien' (le plus souvent, le nom est dérivé de celui du stratotype d'origine).

Par Exemples : Turonien (de Touraine, région française), Oxforien (de la ville d'Oxford en Angleterre)

La **série** (et l'époque) : durée moyenne de 15 Ma sauf pour le Quaternaire (0.01 à 2 Ma)

Par Exemples : Crétacé supérieur, Eocène.

Le **système** (et les périodes) : durée moyenne de 25 à 70 Ma, sauf pour le Quaternaire.

Par Exemples : Cambrien, Trias, Crétacé.

Les ératèmes (et les ères) : Paléozoïque, Mésozoïque et Cénozoïque.

Les éonothèmes (et les éons) : Précambrien et Phanérozoïque.

2.3.5. Relation entre litho-, bio- et chrono stratigraphie

Litho-, bio- et chrono stratigraphie se sont des approches qui souvent utilisées ensemble dans les études stratigraphiques pour obtenir une image complète de l'histoire géologique d'une région donnée. Par exemple, la lithostratigraphie peut aider à identifier les variations dans les types de roches sur une période donnée, la biostratigraphie peut fournir des âges relatifs en utilisant les fossiles, et la chronostratigraphie peut placer ces événements dans un cadre temporel global voir Tableau II.2.

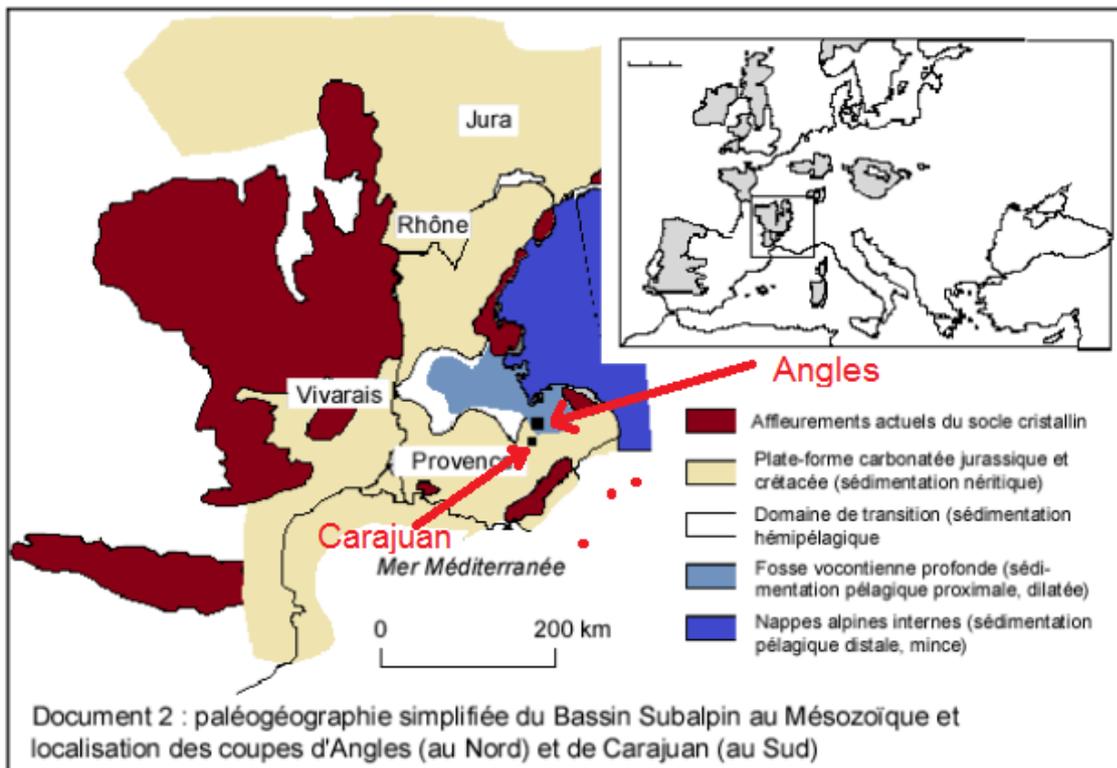
Tableau II.2 : Correspondances entre les principales unités stratigraphiques (en italique : termes les plus utilisés) (Chebah F., 2021).

Relation entre Litho-, Bio- et Chronostratigraphie			
Unités lithostratigraphiques	Unités biostratigraphiques	Unités chronostratigraphiques	Unités géostratigraphiques
Groupe		Eonothème	Eon
Formation		Erathème	Ere
Membre		Système	Période
Couche		Série	Epoque
	Biozone	Etage	Âge
		Chronozone	Chron

Des exercices Intégrés

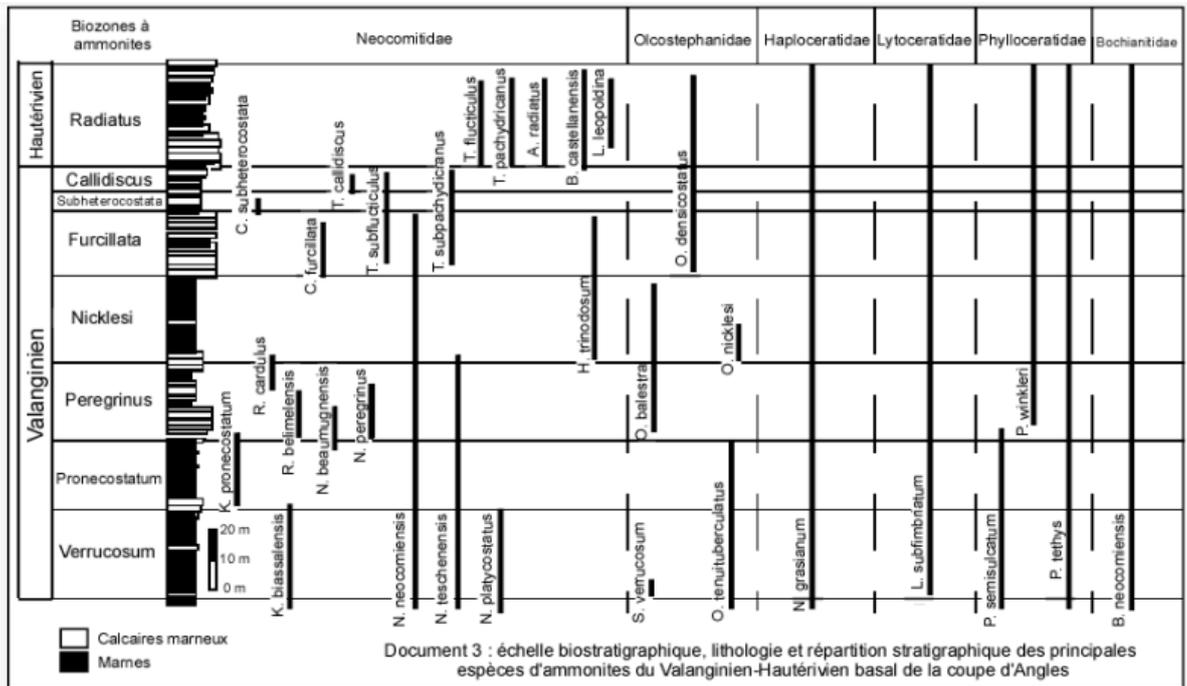
Question 01 :

Commentez la répartition verticale des espèces sur la coupe d'Angles (document II.3).
 Que peut-on en conclure quant à l'évolution de ces différentes familles d'ammonites ?
 Et quelles sont les familles d'ammonites utilisées dans la construction de l'échelle biostratigraphique du Valanginien-Hautérvien basal et pourquoi (document II.3) ?



Document II.2 Paléogéographie simplifiée du Bassin Subalpin au Mésozoïque et localisation des Coupes d'Angles (au Nord) et de Carajuan (au Sud)

Coupe d'Angles



Document II.3 Echelle biostratigraphique, lithologique et répartition stratigraphique des principales espèces d'ammonites du Valanginien-Hauterivien basal de la coupe d'Angles

Réponse 01:

La répartition verticale des espèces non homogène pour les familles Neocomitidae et Olcostephanidae (+ gd nb d'espèces), ce qui veut dire qu'elles ont un fort taux d'évolution (durée de vie de ces espèces limitée), elles constituent un matériel de choix pour l'établissement d'une zonation précise Voir Document II.3 ci après.



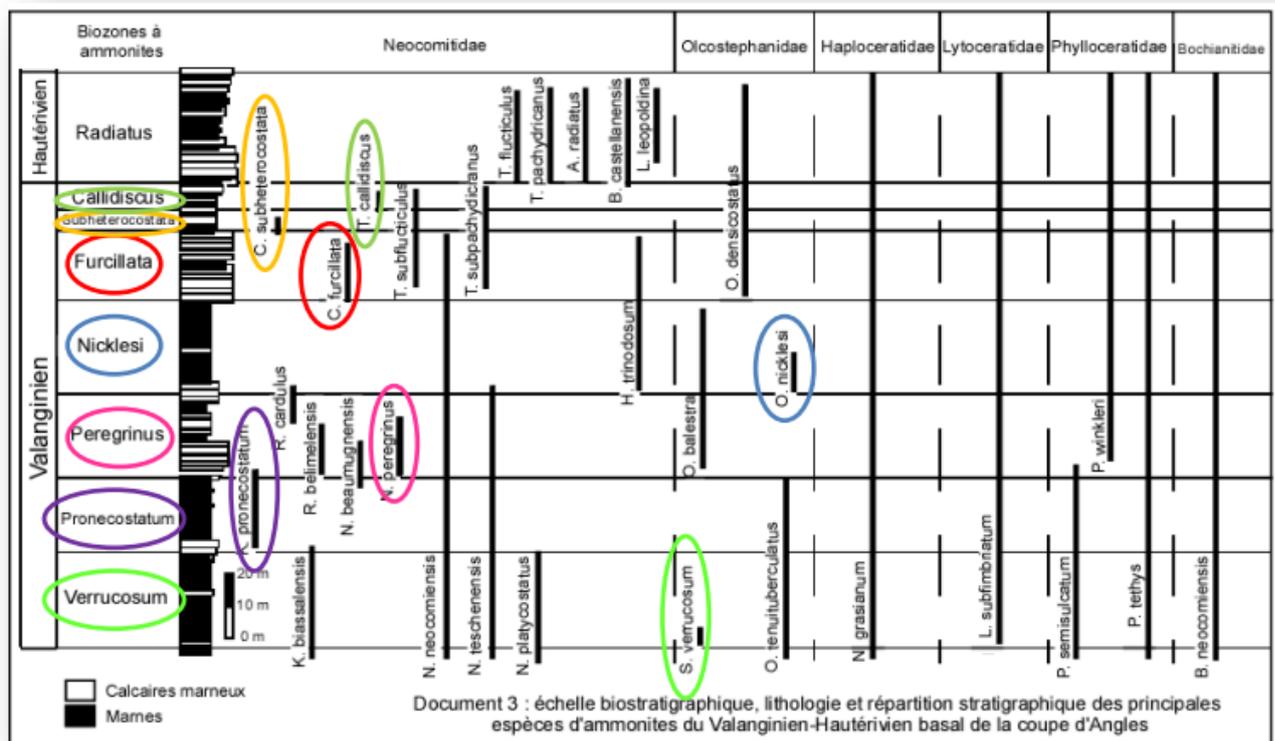
Document II.3 Echelle biostratigraphique, lithologique et et répartition stratigraphique des principales espèces d'ammonites du Valanginien-Hauterivien basal de la coupe d'Angles

Question 02 :

Comparez le découpage biostratigraphique et la succession des espèces-indices (= taxons marqueurs de biozones) qui sont utilisées dans la construction de cette échelle (document 3). Comment les unités biostratigraphiques sont-elles définies ?

Réponse 02 :

Toutes les unités biostratigraphiques sont définies ici à leur base par l'apparition de l'espèce-indice (= taxon marqueur), elles se terminent par l'apparition de l'espèce indice d'unité suivante (zones d'intervalle). L'espèce-indice sert à nommer l'unité biostratigraphique (zone ou unité) à Verrucosum ou zone (ou unité) à Saynoceras verrucosum voir le document II.3 coloré ci après.



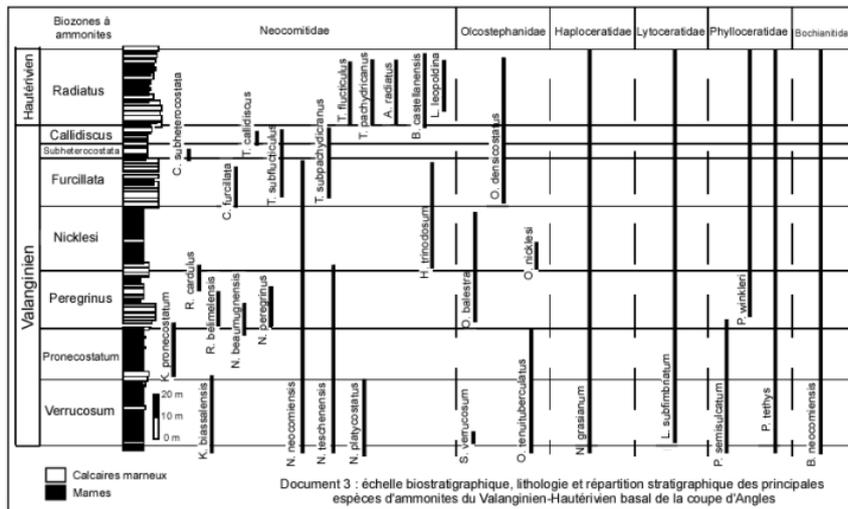
Document II.3 Echelle biostratigraphique, lithologique et répartition stratigraphique des principales espèces d'ammonites du Valanginien-Hauterivien basal de la coupe d'Angles

Question 03 :

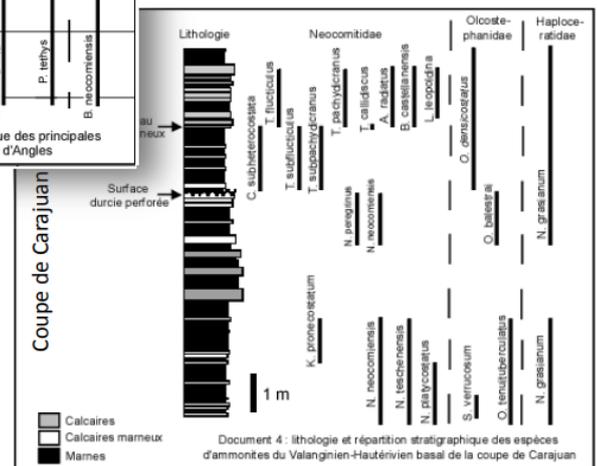
Comparez le contenu faunique des coupes d'Angles (document II.3) et de Carajuan (document 4). Que remarquez-vous ? Proposez une explication.

Question 04 :

Comparez la succession verticale des espèces de ces deux coupes et retrouvez sur la coupe de Carajuan l'échelle biostratigraphique établie à Angles (documents II.3 et II.4). Que remarquez-vous ?



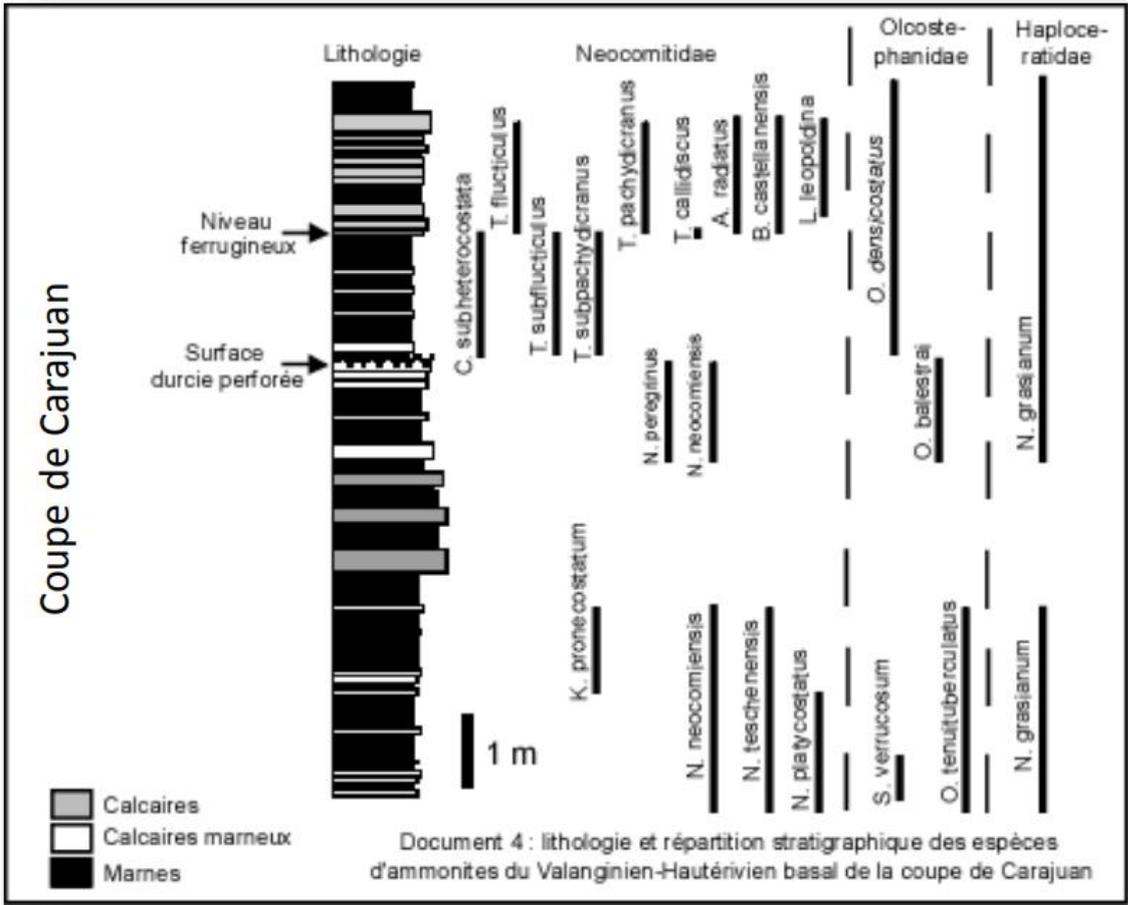
Document II.3 Echelle biostratigraphique, lithologique et répartition stratigraphique des principales espèces d'ammonites du Valanginien-Hauterivien basal de la coupe d'Angles



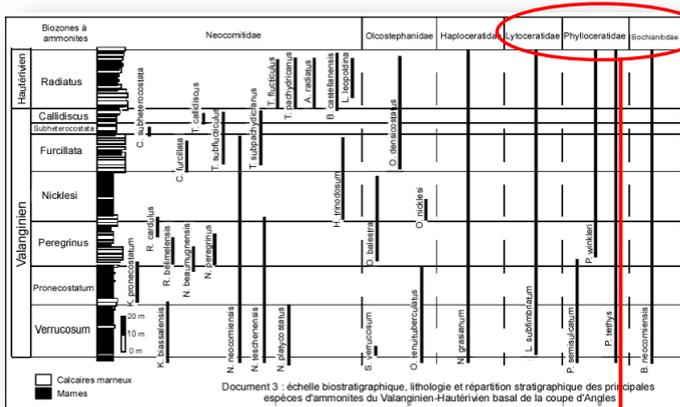
Document II.4 Lithologique et répartition stratigraphique des espèces d'ammonites du Valanginien-Hauterivien basal de la coupe de Carajuan

Réponse 03

Certaines espèces ne sont pas représentées à Carajuan (Bochianitidae, Phylloceratidae et Lytoceratidae). Des préférences écologiques peuvent expliquer cette absence. Elles ont été récoltées uniquement dans le domaine du bassin vocontien (Angles), plus profond que celui de plate -forme carbonatée (Carajuan) voir le document II.4 ci-dessous.

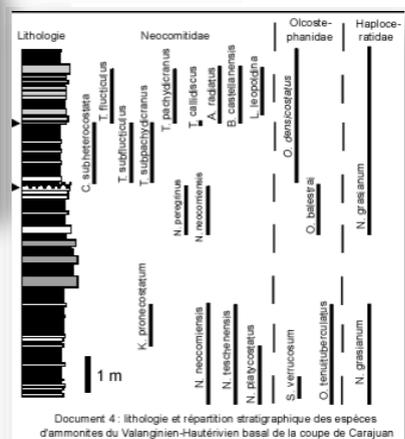


Document II.4 Lithologique et répartition stratigraphique des espèces d'ammonites du Valanginien-Hautérien basal de la coupe de Carajuan



Coupe d'Angles

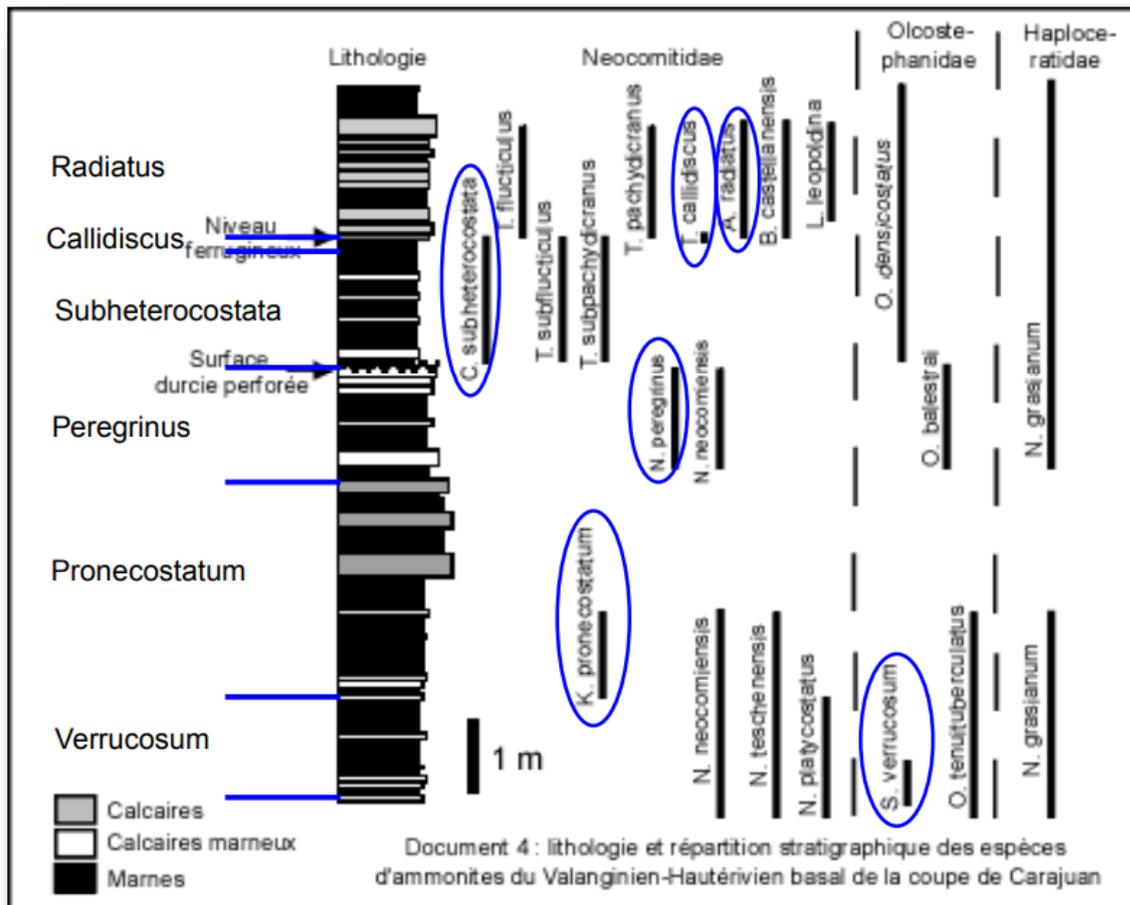
Préférences écologiques différentes (milieux plus profonds ou distaux)



Coupe de Carajuan

Réponse 04

La succession verticale des espèces est différente à Carajuan. En traçant les limites des horizons par rapport à la répartition stratigraphique des espèces -indices, on constate que l'échelle biostratigraphique n'est pas conforme à la zonation standard du Valanginien -Hauterivien basal établie à Angles. Il manque ici la zone à Nicklesi et la zone à Furcillata voir le document II.4 coloré ci-dessous.



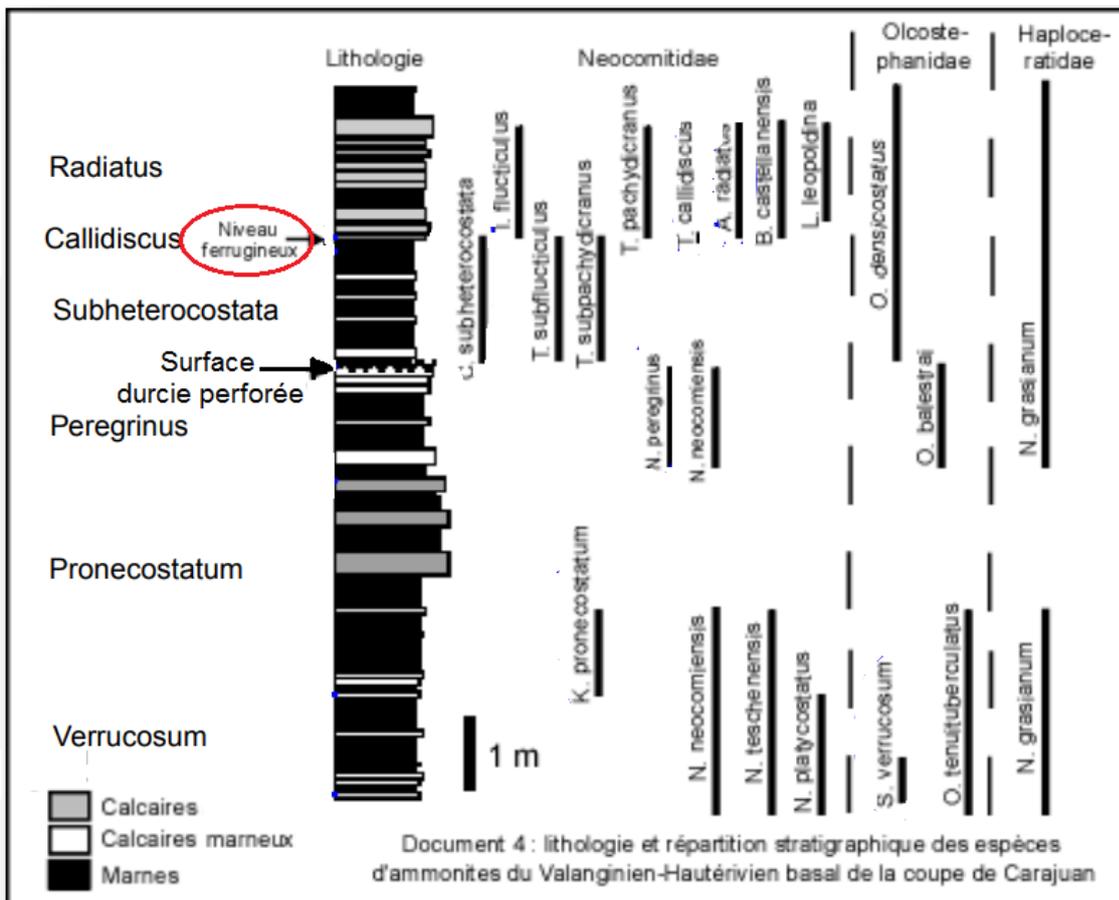
Document II.4 Lithologique et répartition stratigraphique des espèces d'ammonites du Valanginien-Hauterivien basal de la coupe de Carajuan

Question 05 :

Quelle est la signification de la surface durcie perforée et du niveau ferrugineux ? Que pouvez-vous en conclure à propos du rythme de la sédimentation sur la plate-forme provençale ? (document II.4).

Réponse 05

L'absence des zones à Nicklesi et à Furcillata permet de mettre en évidence une lacune sédimentaire relativement importante sur la coupe de Carajuan. La surface durcie et perforée fait penser à une émergence, dans un intervalle de temps équivalent à ces 2 zones à ammonites voir le document II.4 coloré ci dessous.

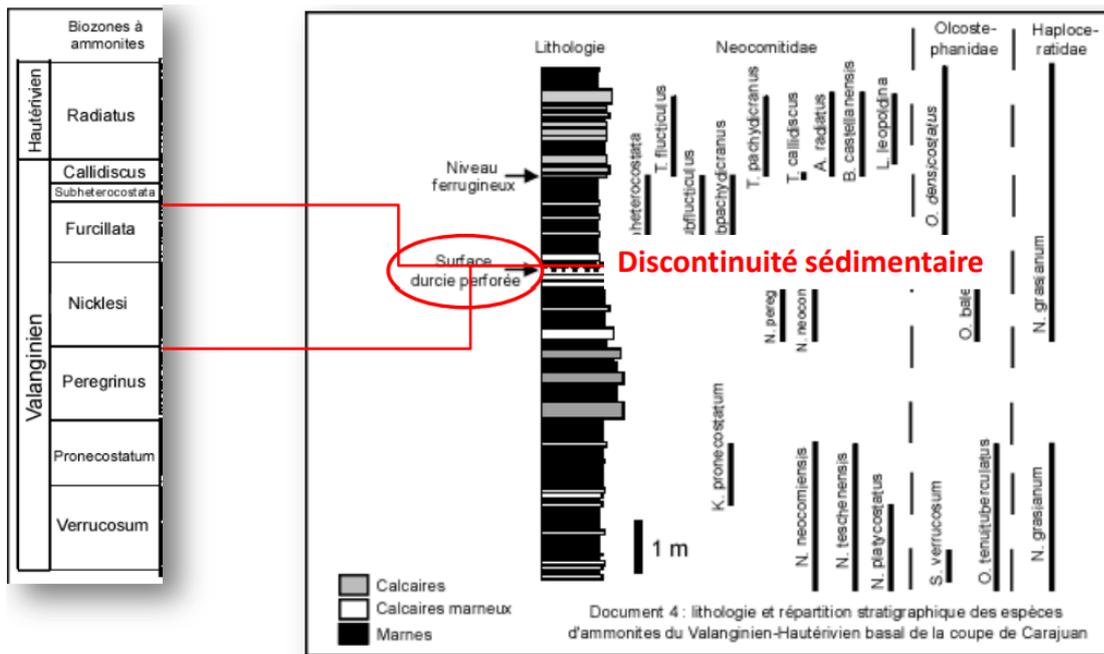


Document II.4 Lithologie et répartition stratigraphique des espèces d'ammonites du Valanginien-Hauterivien basal de la coupe de Carajuan

Question 06

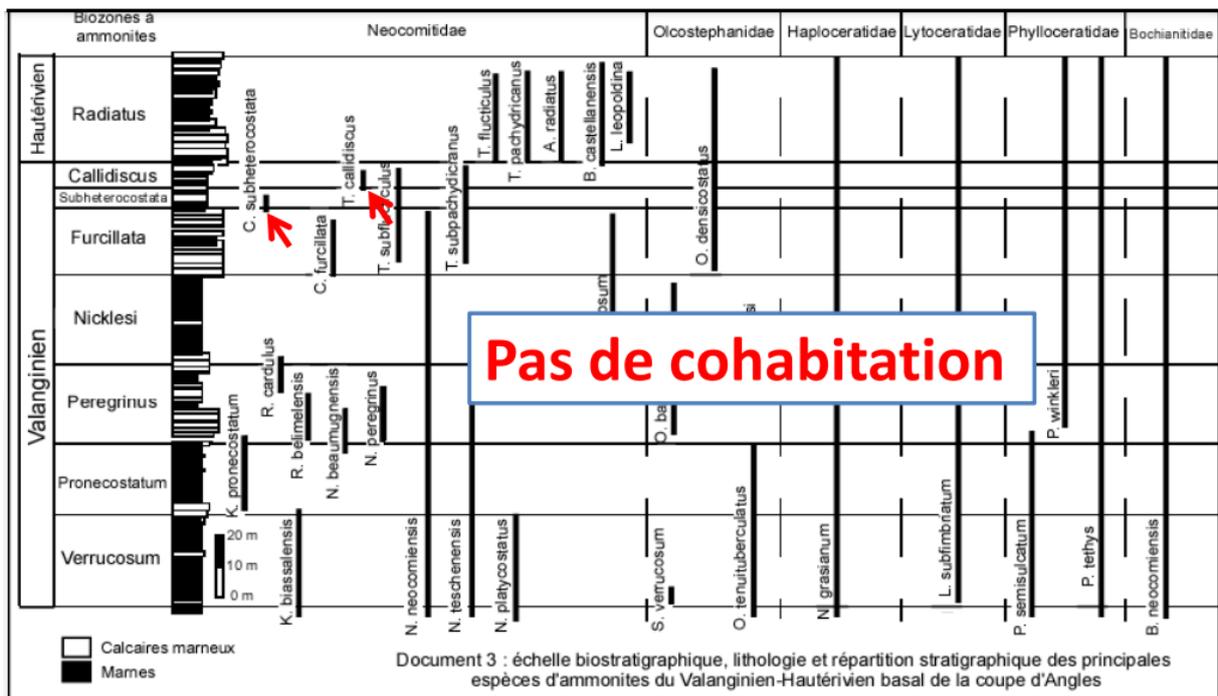
L'absence des zones à Nicklesi et à Furcillata permet de mettre en évidence une lacune sédimentaire relativement importante sur la coupe de Carajuan.

La **surface durcie et perforée** fait penser à une émergence, dans un intervalle de temps équivalent à ces 2 zones à ammonites.



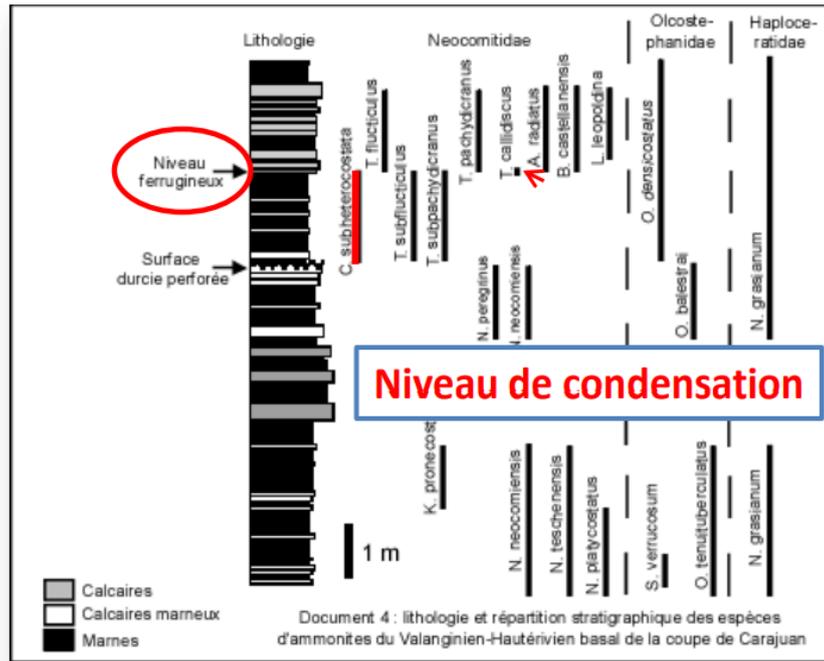
Réponse 06

Dans la coupe d'Angles, les zones à *Callidiscus* et à *Subheterocostata* constituent la limite Valanginien-Hauterivien. Elles ne coexistent pas.

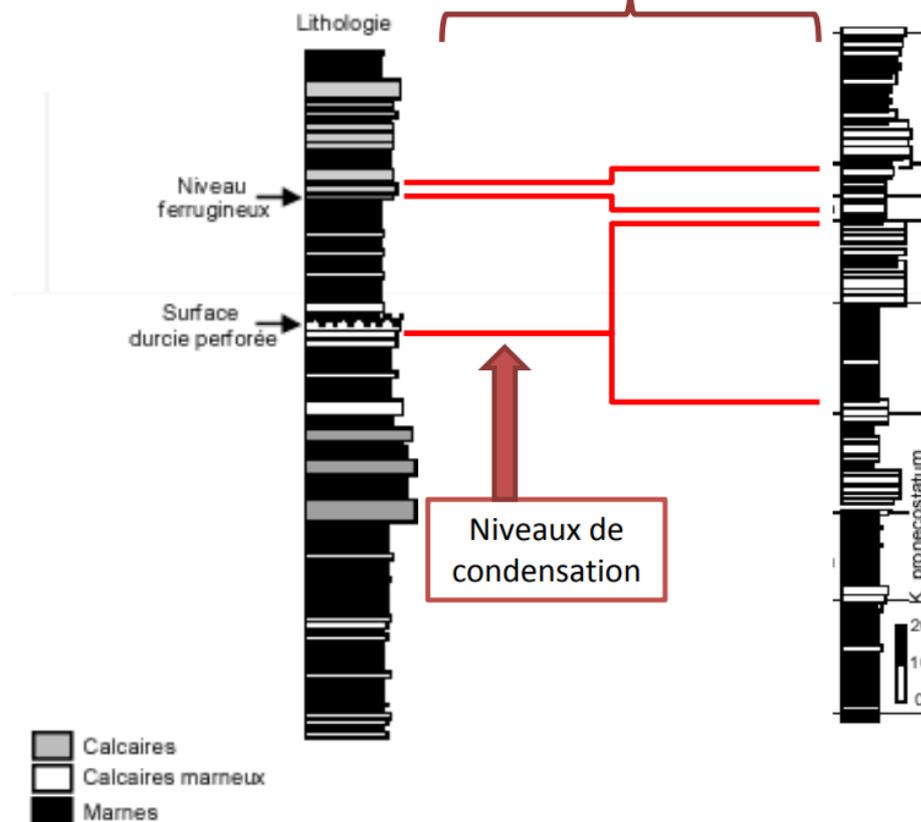


Dans la coupe de Carajuan, ces deux zones coexistent par le biais d'un niveau peut être interprété comme un niveau condensé. Ferrugineux sur une très faible épaisseur (~10cm), les dépôts se sont accumulés pendant une longue durée qui correspond à une partie du toit de la zone à *Callidiscus* et une partie de la base de la zone à *Subheterocostata*.

Biozones à ammonites	
Hautérvienien	Radiatus
	Callidiscus
	Subheterocostata
Valanginien	Furcillata
	Nicklesi
	Peregrinus
	Pronecostatum
	Verrucosum



Épaisseur d'accumulation différente pour un même Intervalle de temps => taux de sédimentation différent



Le rythme de sédimentation est donc très variable sur la plate-forme provençale. L'enregistrement est perturbé et incomplet, soit par des lacunes sédimentaires, soit par des niveaux condensés.

Chapitre III. Rythmostratigraphie ou analyse séquentielle

Après avoir déterminé les caractéristiques d'une strate par les géologues (sédimentologiques, paléontologiques...), par la suite ils cherchent à retrouver ailleurs, pour établir des corrélations avec d'autre région.

Le problème est qu'il peut être **difficile de trouver les propriétés d'une couche particulière sur une grande distance**, alors qu'il est souvent **plus facile de repérer une série de couches** successives suivant le même ordre (mêmes séquences), même si leur épaisseur et leur faciès sont différentes.

Ainsi **Le stratigraphe analyse un ou plusieurs cycles sédimentaires** et pas seulement les propriétés de la couche de selle. Ensuite, il effectue ce que l'on appelle rythmostratigraphie ou l'analyse séquentielle.

3.1. Analyse séquentielle

3.1.1. La séquence

La séquence est une succession ordonnée de plusieurs faciès, l'échelle de la séquence dépend de l'échelle du faciès pris en considération s (Mitchum et Vail, 1977).

Chaque séquence peut être considéré comme un faciès élémentaires dans la séquence d'ordre supérieur. Les séquences sont séparées par des discontinuités.

3.1.2. La suite séquentielle

C'est une répétition de faciès, une récurrence du même faciès ou d'un faciès homologue, c'est-à-dire déposé à la même cote sur le profil hypsométrique de la surface de sédimentation (cas des faciès latéraux).

3.1.3. Différents types de séquences

Il y a deux types de séquences : la séquence positive et séquence négative voir Figure III.1 ci Dessous.

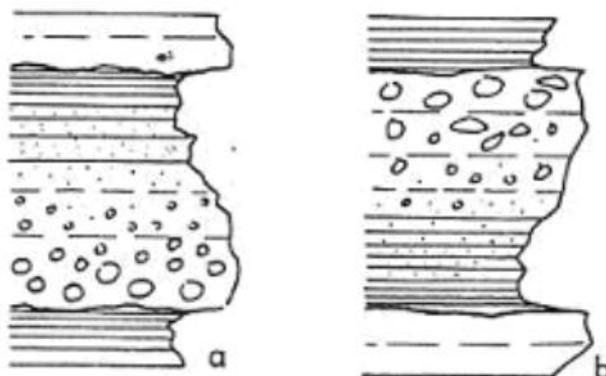


Figure III.1. Ordre de succession des termes lithologiques d'une séquence polygénique granoclivée.

a. Séquence positive (Granoclassement normal) : sédimentation détritique à la base, sédimentation chimique au sommet. On passe des plus gros grains aux petits grains.

b. Séquence négative (granoclassement inverse) : on passe des plus petits grains aux gros grains. Sur ces figures, on observe une suite de couches concordantes de faciès concordants. Les différentes couches sont reliées les unes aux autres et ont des significations environnementales.

Le grano-classement indique que les dépôts se sont faits dans un milieu où l'énergie varie progressivement. Ces suites lithologiques forment une séquence de faciès. Ce n'est pas une superposition quelconque de termes lithologiques mais un ensemble vertical qui montre l'évolution progressive d'un environnement au cours du temps.

Généralement, les séquences sont délimitées par une discontinuité qui traduit un changement environnemental brutal. Elles sont observables grâce aux surfaces d'érosion ou par des surfaces de non dépôts.

3.1.4. Rythmes

On remarque parfois une série de séquences regroupées en ensembles séparés par une limite plus nette. Ces séquences successives forment un énorme **rythme** ou **mégaséquence**.

Les rythmes sont caractérisés par une **séquence grossière et puissante à la base surmontée par des séquences plus fines et moins épaisses vers le haut**.

Ces rythmes sédimentaires reflètent souvent des rythmes climatiques, c'est-à-dire des changements climatiques rythmiques (ex : alternance des saisons) modifiés de la sédimentation (ex : varves).

Outre les saisons, il existe d'autres types de changements climatiques cycliques, dus à la variation régulière de certains paramètres tropicaux : ce sont les **cycles de Molankovitch** (avec une période proche de 20, 40 ou 100 ka) (Benjamin Levrard, 2005).

Les **variations du niveau de la mer** sont l'une des principales raisons de l'évolution temporelle du contenu et des limites des corps sédimentaires.

3.1.5. Cycles et cyclothèmes

Lorsqu'une séquence positive est suivie d'une séquence négative {a b c b a}, cette double séquence forme un **cycle élémentaire ou cyclothème**.

3.1.6. Corrélations et analyse séquentielle

Lors de l'analyse séquentielle, la succession des rythmes sédimentaires est étudiée à partir des cols étudiés au niveau des affleurements, des carottes de sondage **ou encore à partir de** diagraphies de sondage.

Une méthode plus récente permet de visualiser les **phénomènes sédimentaires à l'échelle d'un bassin, grâce aux techniques de sismique réflexion** (corrélées aux levés de terrain et aux forages), on parle alors de stratigraphie séquentielle ou stratigraphie sismique.

La stratigraphie séquentielle étudie comment, au fil du temps, les dépôts de sédiments fossiles se sont formés et leur ordre par rapport aux changements du niveau de la mer. Elle permet aux géologues de reconstituer l'histoire du remplissage des bassins sédimentaires, d'étudier les causes qui agissent sur la sédimentation, ou encore de prédire l'agencement des roches ayant pu piéger le pétrole. C'est une **science moderne qui a révolutionné la géologie sédimentaire en une trentaine d'années**.

La stratification est basée sur la sismique réflexion qui étudie la réflexion des ondes sismiques aux interfaces entre plusieurs couches géologiques. Les réflexions sismiques se produisent lorsqu'une onde sismique rencontre une discontinuité sédimentaire (limite de couche ou décalage).

Les ondes sismiques sont générées selon deux types de procédés :

- Par des camions vibreurs ou des charges de dynamite a terre,
- Par des canons à air comprimé à partir de bateau, qui réalisent ensuite les enregistrements grâce à des hydrophones en mer.

Ensuite, les données sismiques subissent un traitement informatique complexe. Ceux-ci visent à réduire le bruit de fond, à augmenter la résolution et à compenser de nombreux effets physiques pour obtenir une fidélité d'image maximale.

3.3. Eustatisme et cycles eustatiques

Les changements du niveau de la mer sont appelés **changements eustatiques** (eustatisme). Ils comprennent des phases de montée du niveau de la mer (les **transgressions**) et des phases de baisse du niveau de la mer (les **régressions**).

On qualifie **d'oscillation eustatique toute hausse ou baisse apparente (par rapport au niveau continental) du niveau de la mer lorsqu'elle a la même amplitude dans toutes les régions du globe**. L'étude d'eustatisme indique l'existence de données paléo-environnementales. Elles proviennent notamment de la pétrographie, de la

paléontologie, de la stratigraphie et de l'étude de la composition isotopique de la roche sédimentaire impliquées.

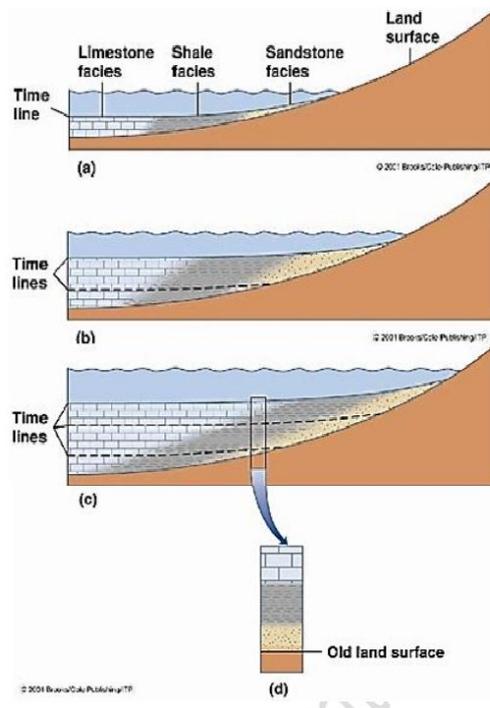


Figure III.2 Evolution du type et de la position des sédiments pendant une transgression (limestone : calcaire, shale : argile, sandstone : grés)

<https://www.google.com/url>.

Au cours de l'histoire de la terre, certaines périodes ont ainsi été caractérisées par une élévation généralisée du niveau de la mer (périodes de transgression), comme par exemple au cours du Carbonifère inférieur ou encore au Crétacé supérieur (voir Figure III.2), période pendant laquelle le niveau marin était jusqu'à 200 m plus haut que le niveau actuel. On parle alors de **cycles eustatiques**.

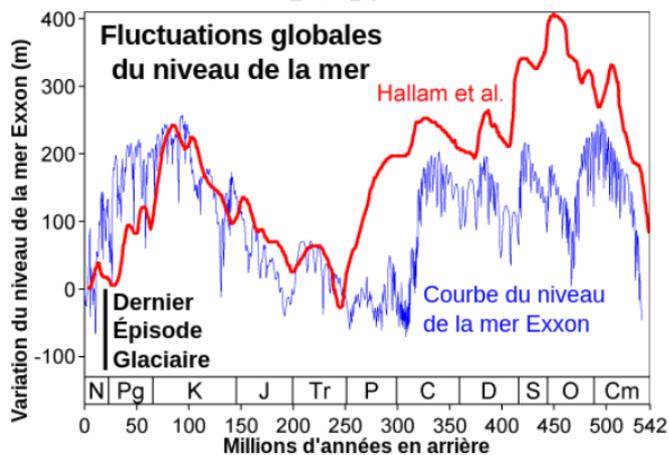


Figure III.3 variations globales du niveau des océans depuis 600 Ma (par rapport un niveau actuel) (Emmanuel, 2007) <http://hydro.geosc.psu.edu>

Cette Figure III.3 compare la reconstitution du niveau de la mer proposée par Hallam et al. (1983) et Exxon (courbe élaborée à partir de plusieurs publications en 1987-88). Ces études reposent sur des techniques très différentes. La courbe d'Hallam n'est pas sensible aux fluctuations rapides du niveau de la mer, contrairement à la courbe d'Exxon. Les deux courbes sont ajustées sur l'échelle des temps géologiques.

A l'échelle de ce chiffre, la fonte de toutes les calottes glaciaires entraînerait une élévation du niveau de la mer d'environ 80 mètres. Les changements les plus importants sont dus aux modifications de la structure des bassins sédimentaires.

Plusieurs causes peuvent expliquer les variations du niveau marin :

- **La dilatation thermique des océans :**

Echelle de temps : **court terme**/ amplitude : **quelques mètres**.

La dilatation thermique correspond à l'**augmentation de volume due à l'augmentation de température** (identique au principe d'un thermomètre). Divers calculs montrent que ce phénomène serait responsable d'une élévation du niveau de la mer de 15,5 cm depuis 1850 (par rapport à une augmentation de température d'environ 0,6°C). Au Crétacé, la contribution de ce phénomène était de **2,6 mètres** D'après *Océan et Cryosphère – OCE*, 2023.

- **La formation et la destruction des calottes polaires :**

Echelle de temps : **moyen terme** (de 10 000 à 100 000 ans à/ amplitude maximale : **75 à 80 mètres**).

La quantité d'eau sur Terre est constante et les calottes glaciaires constituent un volume d'eau piégé dans les continents. Leur fonte peut contribuer à une transgression. Actuellement, l'Antarctique (pôle sud) représente 90% des réserves mondiales de glace. Cela ne suffit donc pas à expliquer la transgression crétacée.

- **La variation du volume des bassins océaniques (en fonction de l'activité des dorsales) :**

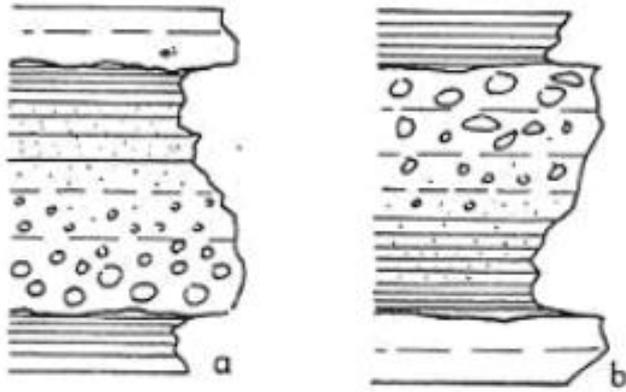
Echelle de temps : long terme (dizaine de millions d'années) / amplitude maximale : plusieurs centaines de mètres.

Les dorsales ayant une vitesse d'expansion élevée provoquent un bombement du fond océanique.

Au Crétacé, l'accélération de l'ouverture de l'océan Atlantique est associée à une transgression de grande ampleur. A la fin du Crétacé, l'activité des dorsales reprend et contribue à une régression.

Exercice Intègre

Nous avons une séquence sédimentaire qu'est déposée pendant une transgression mentionné par la figure (a et b) ci après.



Document III.1 De la séquence sédimentaire déposée pendant une transgression

- Quelle séquence sédimentaire s'est déposée pendant une transgression (a ou b)?
Justifiez votre réponse

- Expliquez ce qu'est une transgression ?

Solution :

- La séquence.

- Les grains grossiers à la base et les grains fins au sommet.

C'est la montée de la mer/succession des termes lithologiques liés à une transgression.

Chapitre IV. Subsidence, transgression et régressions

Dans un bassin sédimentaire, la place disponible pour la sédimentation, ou **espace d'accommodation**, est contrôlée par plusieurs facteurs, dont la **subsidence**, le **taux d'apport sédimentaires et l'eustatisme**. Nous décomposerons rapidement l'impact de chacun de ces facteurs :

4.1. Isostasie

Le terme « isostasie » (du grec 'isos', égal, et 'stasis', arrêt)

Il reflète **l'état d'équilibre des roches de la croûte terrestre par rapport au manteau sous-jacent**. Ce phénomène indique qu'au-delà d'une certaine profondeur, appelée **niveau de compensation**, la masse rocheuse crustale superficielle est la même partout quelle que soit la hauteur des reliefs. Sous le niveau de compensation, il n'y a pas de différences significatives d'intensité.

L'isostasie se définit donc comme le **phénomène suivant lequel la croûte terrestre monte ou descend en fonction des surcharges ou décharges qu'elle subit**. Ce modèle postule en effet, qu'un excès de masse en surface tel que les montagnes est compensé par un déficit de masse en profondeur. Il explique l'équilibre de la lithosphère rigide sur l'asthénosphère ductile. La compensation isostatique contrecarre l'érosion (les deux phénomènes s'équilibrent).

Ces déformations s'ajoutent aux déformations tectoniques régionales ou locales (subsidence ou soulèvement, compression ou déchirement) directement induites par la tectonique des plaques et souvent faibles amplitude, voire négligeable aux échelles des temps humains.

Ces **déformations isostatiques sont essentiellement liées aux avancées et recul des calottes glaciaires**. On parle alors de **glacio-isostasie**. Le phénomène d'isostasie a été mis en évidence, pour la première fois, il y a plus de 250 ans par l'astronome français Pierre Bouguer.

4.1.1 Érosion et isostasie

A l'échelle continentale, l'érosion par ruissellement des eaux, des glaces et du vent tend à aplanir les reliefs vers le profil sous-jacent qui est le niveau de la mer (Figure IV.1.a). Selon le principe d'isostasie, **l'ablation d'un morceau de matière à la surface d'un continent provoque le rééquilibrage des masses** ; Il y a remontée de toute la lithosphère continentale (Figure IV.1.b).

De cette façon, la croûte continentale s'amincit progressivement. On tend vers les plaines continentales et vers l'épaisseur de la croûte continentale correspondant à l'épaisseur de la croûte océanique, selon les densités pour les deux croûtes (Figure IV.1.c).

D'autre part, la **surcharge provoquée par l'apport de sédiments sur la lithosphère océanique crée un enfoncement** appelée subsidence.

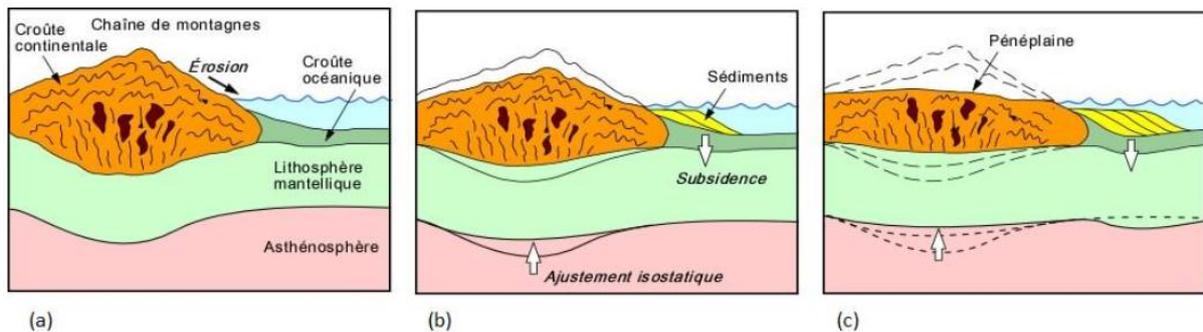


Figure IV.1 Isostasie et subsidence tectonique

4.2. Subsidence

La **subsidence** est définie comme : **l'enfoncement progressif, régulier ou saccadé, sur une période assez longue, du fond d'un bassin sédimentaire**, marin ou non.

C'est un phénomène qui **permet l'accumulation de fortes** épaisseurs de sédiments qui se déposent cependant sous une faible profondeur d'eau.

La subsidence peut être **tectonique** (ex : amincissement crustal à l'origine du bassin sédimentaire), ou **thermique** (ex : à la suite d'une orogénèse, la montagne se rétracte et s'effondre en refroidissant (relaxation thermique))

Un amincissement de la lithosphère provoque une **rupture de l'équilibre isostatique**, qui traduit par la suite à un affaissement du fond de bassin sédimentaire (affaissement tectonique).

Ce phénomène produit dans deux conditions diverses :

- Dans des **zones de divergence** avec formation de fossés (rift, grabens)
- Dans des **zones de convergence** dans les bassins avant-chaine (ex : dans les Alpes)

Les bassins sédimentaires ainsi formes sont caractérisés par :

- **Une forte épaisseur de sédiments**
- La **persistance de faciès de faible profondeur** dans toute la série stratigraphique,
- La présence de **marqueurs tectoniques de la distension** (failles normales).

4.3. Transgressions et régressions

L'eustatisme (variation globale du niveau des océans) se traduit par des cycles de transgression et de régression.

Une **transgression** est définie comme : **une avancée de la mer au-delà de ses limites antérieures.**

Une transgression peut être due soit à **une montée du niveau de la mer** (cf eustatisme), soit à un **enfoncement d'ensemble du continent**, les deux phénomènes peuvent également se combiner.

Exemple : dans une succession sédimentaire, une transgression peut se caractériser par des dépôts continentaux recouverts par des dépôts marins.

Une **régression** est définie comme : **un retrait de la mer en deçà de ses limites antérieures.**

Une régression peut être due à trois phénomènes, qui peuvent se combiner :

- Une baisse de niveau marin,
- Un **soulèvement général du continent**,
- Ou un **apport important de sédiments.**

Exemple : dans une succession sédimentaire, une régression peut se manifester par la présence de dépôts marins recouverts par des dépôts continentaux.

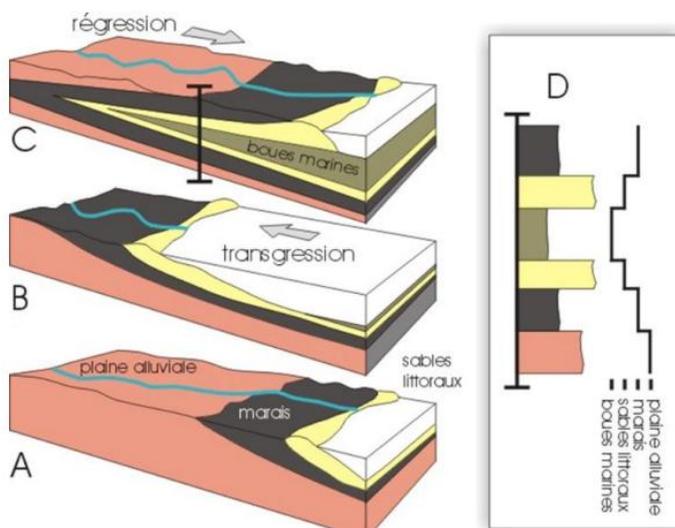


Figure IV.2 Evaluation des sédiments en fonction de l'avancée et de recul de la ligne de rivage.

La Figure IV.2 est présentée les étapes d'évaluation des sédiments en fonction de l'avancement et de recul ligne de rivage. Chaque étape est signifié à :

A : situation de départ.

B : recul de la ligne de rivage suite à une transgression marine.

C : avancée de la ligne de rivage suite à une régression marine.

D : ce que l'on observe lors du levé d'une coupe, longtemps après le dépôt : colonne et courbe lithologiques.

Noter que l'allure de la courbe lithologique montre bien l'évolution des milieux et le cycle transgression-régression.

Chapitre V. Paléogéographie

La paléogéographie est une discipline de la géologie, de la géographie et de la paléontologie visant à **reconstruire la géographie passée (théorique)** à la surface du globe. En effet, au cours des âges géologiques, **l'agencement des masses (ou plaques) continentales et océaniques s'est modifié**, provoquant des perturbations paléotectoniques majeures qu'il est possible de retracer, notamment en suivant le déplacement des littoraux dans le temps.

5.1. Principaux types de faciès

Le **faciès** comme est on un **ensemble des caractéristiques lithologiques et paléontologiques d'une roche** (sédimentaire).

On peut distinguer différents types de faciès :

- **Microfaciès** (étude à la loupe ou au microscope optique),
- **Nannofaciès** (étude au microscope électronique),
- **Biofaciès** (roches formées à partir des restes d'organismes vivants)
- **Lithofaciès** (étude des composants minéraux dans un rocher).

Les faces sont généralement **identifiées par les traits rocheux les plus importants qui les caractérisent** (ex : faciès calcaire, faciès Nummulitique), parfois par un terme géographique (ex : faciès germanique, faciès alpin) ou génétique (ex : faciès nérite, pélagique...).

L'analyse des faciès dépend de différentes méthodes,

- Sédimentologiques,
- Géochimiques,
- Paléontologiques.

Dans le cas des méthodes paléontologiques, on recherche des "**fossiles de faciès**", typiques de conditions écologiques particulières.

Ainsi, **une analyse correcte des faciès permet de reconstituer l'écologie des dépôts rocheux**, qui peuvent être continentaux (plaines éoliennes, lacustres, glaciaires, fluviaux...) ou marins (faciès, récifal, néritique, benthique, pélagique...).

Les faciès peuvent être de différents types :

- détritiques,
- terrigènes (apports du continent à la mer),
- chimiques,
- organiques, etc.

5.2. Variations de faciès

Pour identifier et interpréter les différences entre les faciès, le stratigraphe peut appliquer les **principes de continuité et d'actualisme**. Ces principes s'appliquent toujours, mais il y a **quelques exceptions**.

a/ exceptions au principe de continuité

- Cas du **diachronisme** : les mêmes faciès peuvent migrer horizontalement dans le temps en fonction de facteurs climatiques ou eustatiques ; On dit que les faciès sont **diachrone**.

Un exemple de **diachronisme** : lors de la transgression, le conglomérat primaire d'une série transgressive devient de plus en plus jeune dans le sens de la transgression.

- Cas du **passage de faciès** : Dans le même temps, des couches de faciès **différents** peuvent se déposer dans deux régions d'un même bassin. On dit qu'il y a un passage dans les faciès et la contemporanéité doit être prouvée en observant des indices autres que les faciès.

b/ exceptions au principe d'actualisme

Selon ce principe, **les faciès anciens se sont formés dans les mêmes conditions que les faciès actuelles**. Ainsi, pour reconstituer l'environnement des premiers, il suffit de noter ceux des faciès actuels qui leur ressemblent. Cependant, cette comparaison est difficile. En fait, **la même lithologie apparente peut être produite par des environnements différents**. Seule une analyse détaillée peut suggérer la parité.

De plus, les espèces fossiles ne sont pas les mêmes que les espèces actuelles, et il existe de nombreux **exemples d'organismes dont l'écologie changé** au fil du temps. Ainsi, certaines espèces ont changé de milieu de vie au cours du temps (ex : les **crinoïdes** actuels vivent dans des milieux calmes et profonds, alors qu'à certaines époques on les retrouvait dans des aires marines nérites) et donc **l'interprétation de leur présence doit être différente selon l'âge des strates**.

c/ successions de faciès

La succession des faciès est soumise à la logique de continuité du dépôt. Ensuite **chaque couche est interprétée par rapport à celles qui l'entourent**. La stratigraphie décrit ainsi des **séquences** verticales de faciès reproduisant en partie les variations contemporaines des faciès latérales. Par exemple, lors d'une transgression marine sur un bassin à fond incliné, de la succession verticale (dans le temps) des faciès destinations de plus en plus profondes reproduiront les variations latérales liées à la profondeur à un

instant donné. Le géologue utilise ces couches 3D pour développer une **stratigraphie de séquentielle** qui comprend des faits mais aussi des explications :

Elle considère la couche comme un corps sédimentaire en trois dimensions, membre de la succession logique proposée dans un modèle théorique. Le développement des couches sismiques, qui localisent des réflecteurs sismiques associés aux limites entre les corps sédimentaires, a permis des observations indirectes qui ont grandement facilité l'analyse de ces corps sédimentaires.

Ainsi, les faciès peuvent être comparés dans l'espace ou dans le temps

5.3. Isopaques et Isobathes

Comme une carte d'isobathes (de "iso" = égal et "bathus" = profondeur) **tous les points sont à la même profondeur**, sous terre ou sous l'eau (ce qui est comparable à une courbe de niveau en topographie).

Dans l'océanographie et les cartes marines, les isobathes représentent un relief du fond marin. En hydrographie, les isobathes désignent le relief d'une masse d'eau ou d'une nappe phréatique.

En géologie, les isobathes dessinent la surface d'une couche souterraine.

Une carte isopaque (de 'iso' = égal et 'pakhus' = épais) **indique tous les points de même épaisseur**.

Connaître la profondeur à laquelle se situe aujourd'hui les formations anciennes, ainsi que leur épaisseur, permet de reconstituer, par exemple, l'emplacement des rivages ou la direction des transgressions et des régressions.

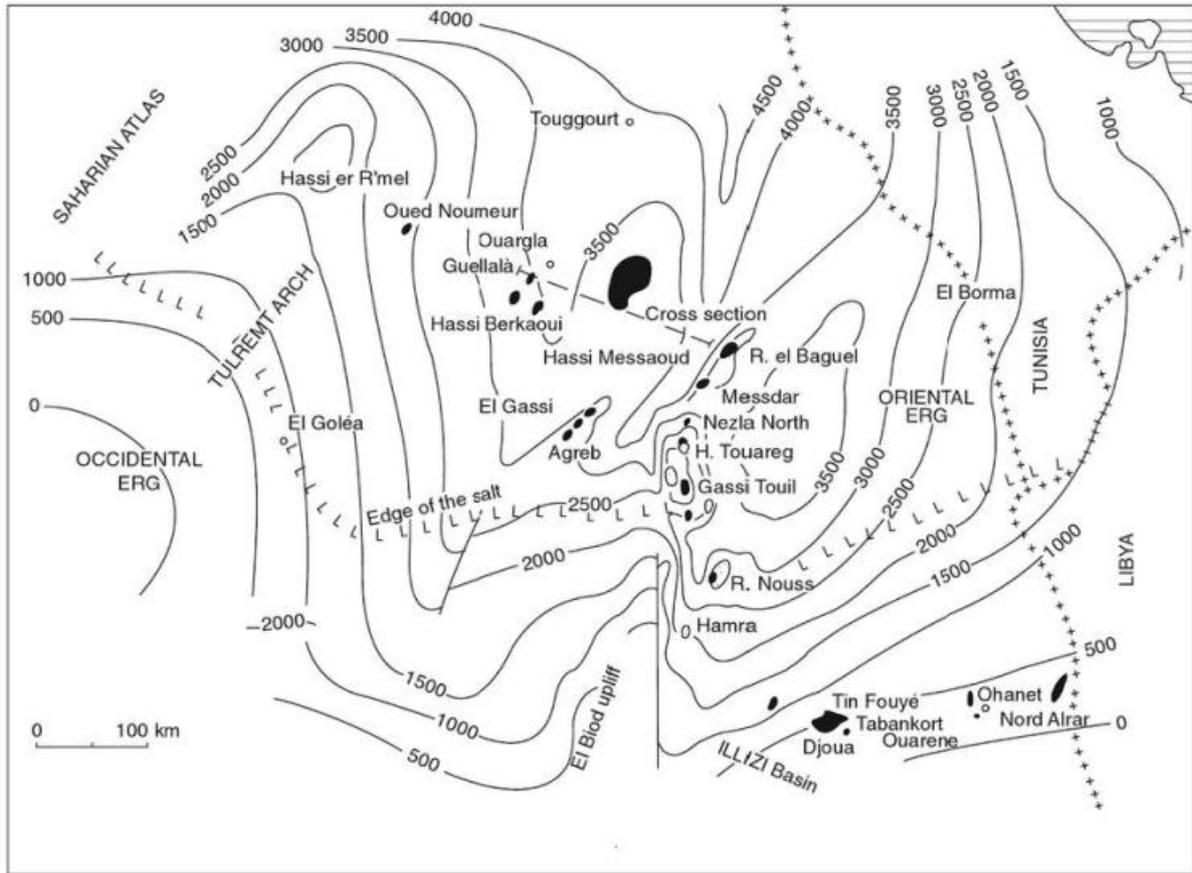


Figure V.1 Exemple d'une carte isobathe, dont la profondeur de la discordance hercynienne au Sahara (d'après Perrodon, 1983)

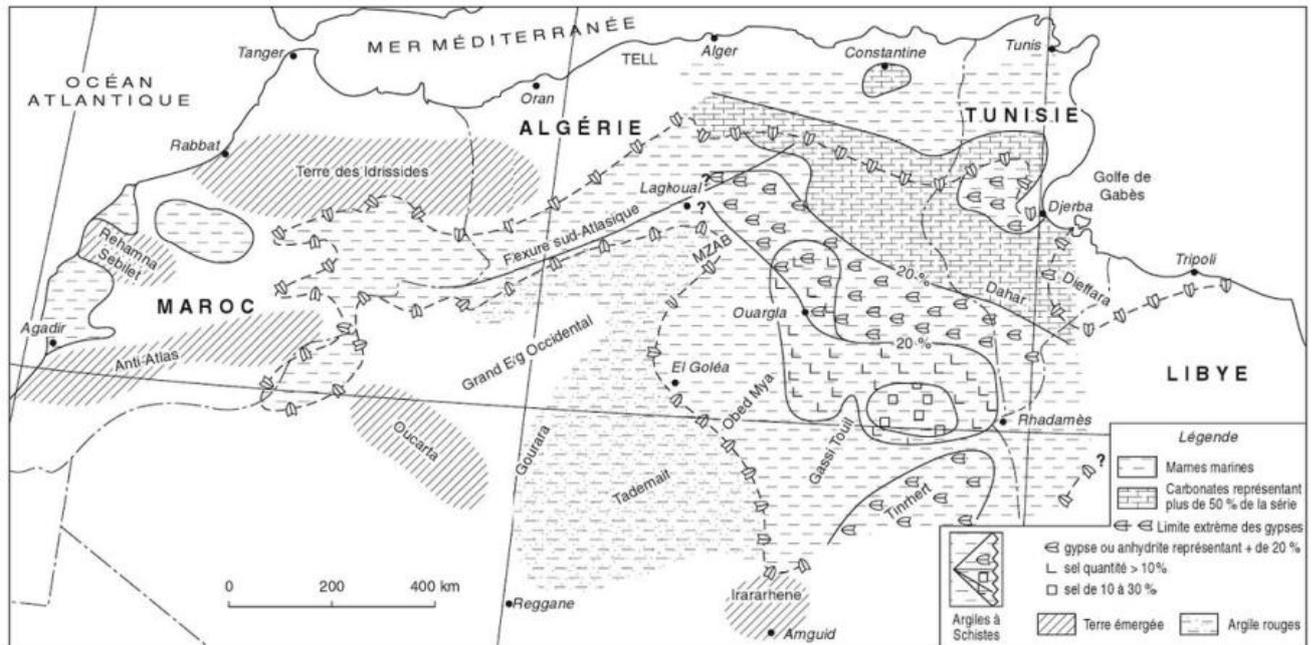


Figure V.2. Carte paléogéographique avec répartition des différents faciès et environnements de dépôts (Exemple du Cénomanién de la plate-forme saharienne) (d'après Busson, 1972)

5.4. Facteurs Physiques et Chimiques des Paléoenvironnements

On cherche par exemple à identifier des différences **de température, de salinité ou encore de profondeur. Pour ce faire**, la méthode est la **stratification isotopique**.

Les mesures reposent sur l'étude des variations d'abondance **entre un isotope 'lourd' et un isotope 'léger'** du même élément, par exemple les rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. A la différence des mesures géochronologiques, il s'agit ici **d'isotopes stables** et non radioactifs.

Les mesures seront basées sur l'examen des différences d'abondance entre les isotopes "lourds" et "légers" d'un même élément, par exemple des rapports de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Contrairement aux mesures géologiques, ce sont **des isotopes stables** et non radioactifs.

Les **mesures sont précises** et nécessitent un **matériel sophistiqué** et coûteux, mais le principe est relativement simple. Ces différences étant très faibles, elles sont **exprimées par ‰** rapport à une valeur standard. Par exemple, pour l'oxygène :

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}} \times 1000$$

Ainsi la valeur de δ (= « delta ») représente l'écart relatif par rapport à la norme standard.

Les différences de composition isotopique sont dues au **phénomène de fractionnement isotopique lié à des processus physiques** (ex : changements d'état : eau \Rightarrow glace) ou chimiques. Ce fractionnement est lié aux propriétés physiques et chimiques des isotopes.

Ainsi, **les isotopes légers vont se concentrer préférentiellement dans la phase la moins dense** (gaz < liquide < solide).

5.4.1. Analyse Isotopique de l'Oxygène : Paléotempératures et Paléosalinité

La distribution des isotopes stables de l'oxygène dans les organismes fossiles est un indicateur paléoclimatique privilégié.

L'atome d'oxygène (O) a trois isotopes stables : ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O où 16, 17 et 18 représentent les nombres de masse. L'isotope **le plus abondant est le ^{16}O** (environ 99,8 %), suivi d'un petit pourcentage de ^{18}O (environ 1 atome sur 500) et d'un pourcentage encore plus faible de ^{17}O . L'utilisation la plus courante des isotopes de l'oxygène est basée sur la mesure du **rapport entre les quantités de ^{18}O et ^{16}O dans la glace** des carottes de glace ou les **carbonates** des forages sédimentaires.

Le principe de la méthode repose sur la **sélection isotopique par évaporation de l'eau: la valeur de l'eau, plus légère, est riche en isotope léger de l'oxygène (^{16}O)** par rapport à l'eau restante (enrichie en isotopes lourds). Dans les eaux océaniques, ce rapport est d'environ 1/500. Si la température de l'eau augmente, H_2^{16}O s'évapore plus vite que H_2^{18}O , donc le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (dans l'océan) augmente. Étant donné que les êtres vivants utilisent l'oxygène pour construire leur squelette, ce pourcentage élevé se retrouve également dans les carbonates.

Par exemple, des changements saisonniers de température (rapport plus élevés en été) ont été enregistrés dans les zones de croissance des rostrés de Belemnite.

Ainsi, on peut ensuite calibrer ce rapport en fonction des températures, définissant ainsi les paléotempératures (la norme s'appelle PDB).

Les isotopes stables de l'oxygène jouent le rôle d'un "thermomètre géologique" tandis que les isotopes radioactifs sont un "chronomètre géologique".

5.4.2 Interprétation des courbes isotopiques

a. La salinité

L'eau douce est plus pauvre en ^{18}O que l'eau de mer, car elle provient de cette dernière, par évaporation et précipitation. On peut ainsi déterminer si certaines formations ont **une origine marine ou continentale et évaluer la paléo-salinité.**

Par exemple, si les formations évaporées sont dues au lessivage d'un continent, le pourcentage de ^{18}O est faible, alors que s'il correspond à l'évaporation des lacs marins, le pourcentage de ^{18}O est élevé.

b. La température

L'interprétation des courbes isotopiques n'est pas toujours simple car le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des carbonates dépend de la température à laquelle l'animal a fabriqué sa coquille, et **du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'eau** dans laquelle il vit. Des recherches en laboratoire et en milieu naturel ont permis de mettre au point une formule empirique permettant de relier la température théorique à la valeur du rapport.

On sait que l'eau **océanique chaude, qui s'évapore plus que l'eau plus froide, est plus riche à ^{18}O** , ce qui permet d'évaluer les paléotempératures.

Actuellement, la composition isotopique moyenne est d'environ -0,3‰ par rapport à la norme (à l'exception de quelques écarts selon les latitudes et les types d'océans). Dans les océans fossiles, deux facteurs majeurs sont responsables de la variance isotopique, « **l'effet glaciaire** » et la modification du bilan évapotranspiration, ou « **effet évaporation** ».

c. L'effet glaciaire :

Durant la période glaciaire, on observe l'appauvrissement en ^{16}O de l'eau de mer, tandis que la glace qui s'accumule sur le continent (calottes polaires), au contraire, s'enrichit en isotopes légers. Ainsi, pendant une période glaciaire, l'océan a un rapport de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, alors que dans une période interglaciaire (et donc plus chaude), il est faible (car la fonte des glaces déverse de l'eau dans l'océan et elle est relativement pauvre à ^{18}O).

Ainsi, l'étude des variations isotopiques des glaces (provenant des calottes glaciaires) ou des carbonates marins permet de **retracer l'histoire du monde glaciaire** (notamment au cours du Quaternaire \Rightarrow identifiant les phases isotopiques) et **d'estimer les paléotempératures océaniques**.

d. Autres types d'analyses possibles

En plus de mesurer les changements du rapport isotopique de l'oxygène dans la glace de mer et les carbonates, d'autres méthodes d'analyse existent; Par exemple :

- **L'étude des coquilles de mollusques** : permet de reconstituer les conditions climatiques
- **L'étude des carbonates lacustres** peut donner des indices sur le fonctionnement du lac (apports glaciaires ? ...)
- **L'étude des milieux évaporitiques** : les carbonates cristallisés dans des solutions évaporitiques sont très riche en ^{18}O (car les isotopes légers s'évaporent plus facilement).

5.5. Analyse isotopique du carbone : Paléoprofondeur

Le carbone a **deux isotopes stables**, ^{14}C (98,89 %) et ^{13}C (1,11 %) ; Plus un isotope radioactif, le ^{14}C (utilisé dans la datation).

La composition isotopique du carbone inorganique dissous dans l'océan **varie géographiquement** (on parle de variation horizontale) et **selon un profil vertical**.

La **variation verticale reflète l'interaction de la photosynthèse en surface et de l'oxydation de la matière organique** en profondeur. Le carbone organique produit par la photosynthèse est appauvri en isotope lourd, et donc le carbone inorganique de surface est enrichi en isotope lourd. La matière organique coule et s'oxyde plus profondément dans la colonne d'eau, ce qui entraîne un carbone plus léger.

Le **signal du $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates est un outil couramment utilisé en paléocéanographique** et en stratigraphie. En particulier, elle peut être utilisée comme

indicateur indirect de paléoprofondeur (l'évolution est comparable à la courbe eustatique de Vail et al. (1977)).

De plus, les événements indiqués par les changements du $\delta^{13}\text{C}$ sont généralement de **bons marqueurs stratigraphiques**.

L'évaporation, la dilution par l'eau douce et la précipitation des carbonates sont des facteurs directement ou indirectement **responsables de l'appauvrissement en ^{13}C** .

Les isotopes stables du carbone sont interprétés comme des indices reflétant une augmentation de la productivité primaire marine.

5.6. Paléoécologie

La paléoécologie vise à **reconstituer les conditions d'existence et modes de vie des organismes**, à partir des données paléontologiques et lithologiques. C'est une science de l'environnement, essentielle pour les interprétations paléogéographiques.

Il y a deux approches possibles :

- **Une approche géologique** : C'est l'étude du contexte sédimentaire des fossiles afin de faire des interprétations du milieu de dépôt.
- **Une approche biologique** : étudie toutes les données sur la faune et la flore, et les compare aux milieux actuels (principe de l'actualisme) dans le but de reconstituer les paléoenvironnements. Nous analysons, par exemple, l'ordre et l'état des fossiles, ou la diversité spécifique des fossiles.

5.6.1 Fossiles et conditions de fossilisation

Les processus de fossilisation sont étudiés au cours de paléontologie.

Cependant, il faut souligner que dans le cas des études paléoécologiques, il faut savoir si les fossiles découverts sont **autochtones** (lieu de vie et lieu de fossilisation identiques) ou s'ils sont **allochtones** (auquel cas les fossiles ont été déplacés). Il faut donc savoir si on est dans une **paléocénose** ou d'une **thanatocénose**.

Seule l'étude des paléobiocénoses peut fournir des informations utiles sur les paléomilieus. Par exemple, la découverte de traces fossiles (les ichnofossiles), comme des traces de déplacements ou d'habitats est une preuve manifeste d'une paléobiocénose, car les traces d'activité ne peuvent pas être transportées, ou redéposées dans une autre strate.

5.6.2 Exemples

Lorsque l'on cherche à réaliser l'étude paléoécologie, et après identification de la paléobiocénose, divers informations peuvent être obtenues, notamment :

- **Selon le type de fossile**, on obtient des informations sur le milieu sédimentaire (continental, lacustre, marin de surface ou profond, etc.)

Exemple :

- Les coraux coloniaux : typique des eaux chaudes et peu profondes (milieux récifaux),
 - Les stromatolithes : typiques des zones littorales.
- **Selon l'orientation des fossiles**, la direction et l'intensité du courant peuvent être déterminées (cas de coquilles allongée/ des os longs/ des débris végétaux) voir Figure V.3.



Figure V.3. Orientation des fossiles et paléo-courant

- **selon du tri granulométrique** et / ou par densité de tri, on obtient également des informations sur l'énergie du milieu de dépôt, et indirectement sur la profondeur.

En conclusion les précautions à prendre avant toute analyse paléoécologique sont nombreuses, et plusieurs problèmes tels que les **remaniements** (conduisant à un mélange de faunes d'âge/ de milieux différent), les **lacunes** de dépôt, les niveaux **condensés** (l'épaisseur de l'enregistrement si faible qu'elle conduit à modifier l'abondance relative des espèces et donc leurs caractéristiques) ainsi que les **difficultés liées à l'échantillonnage**.

Que **toute étude paléoécologique doit s'appuyer sur de multiples données**, qu'elles soient paléontologiques, stratigraphiques ou sédimentaires (type de sédiments, granulométrie et nombre de sédimentations).

En effet, la paléoécologie renseigne sur la paléogéographie « locale » tandis que la paléobiogéographie, qui étudie la distribution et la migration des animaux, renseigne sur la paléogéographie régionale, voire globale.

Chapitre VI. Evolution paléogéographique et géodynamique

La surface de la Terre est divisée en **plaques** qui se déplacent horizontalement. Cela provoque le déplacement de la surface de la Terre au fil du temps. Il existe **3 types de mouvements relatifs**, **convergence** (zones de subduction), **divergence** (dorsales médio-océaniques) et glissement « **coulissage** » (transformation de failles). La vitesse de déplacement des plaques peut varier de 1 à 20 cm/an.

Cette vision mondial est relativement récente et remonte aux années 1960. Avant, les scientifiques avaient une **vision fixe du monde**.

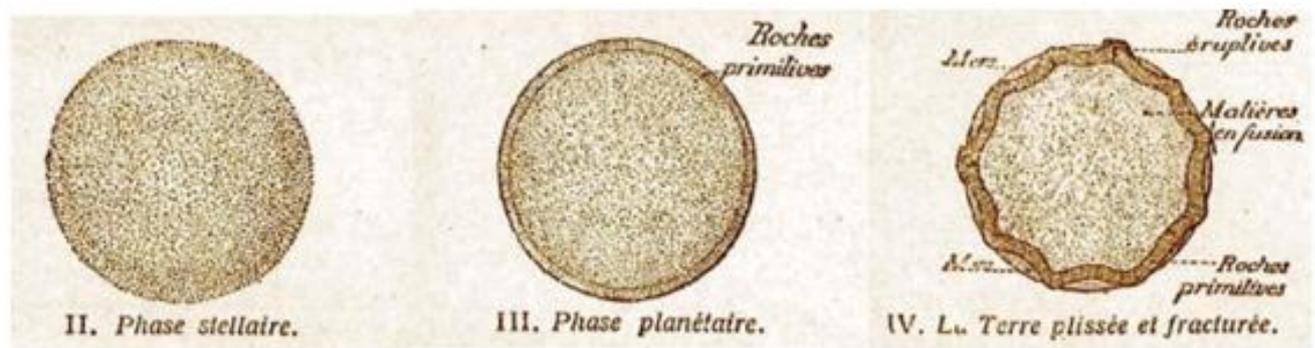
Dans les paragraphes suivants, nous verrons les différentes hypothèses avancées par les chercheurs, et nous expliquerons comment de nouvelles hypothèses ont émergé, en insistant sur le rôle joué par les différentes méthodes de stratification.

6.1. Les hypothèses de la terre telle qu'on la voyait au XIX^{ème} Siècle :

Au XIX^{ème} siècle, les scientifiques de l'époque admettaient deux grandes :

- **On croyait que l'intérieur de la Terre fondait** et se refroidissait lentement. Ainsi ce refroidissement peut conduire à une diminution de volume. Or, la surface terrestre est fixe car sa température, qui dépend de la distance au soleil, est constante. Ainsi, le sol aura un **aspect "ridé"**, comme celui des fruits secs (par exemple, raisins secs, prunes ⇒ voir figure suivante). Ainsi, la surface de la Terre sera principalement affectée par les **mouvements verticaux**. Les bassins océaniques sont des zones de subduction qui séparent les continents des zones qui restent à émerger..
- **On croyait également que les continents avaient une position permanente** dans le temps et seuls les mouvements verticaux étaient pris en compte.

Si la première idée a été abandonnée dans les dernières années du XIXe siècle avec la découverte de la radioactivité (phénomène qui génère de la chaleur), il n'en est pas de même de la seconde.



**Figure VI.1. Contraction et Terre ridée, une hypothèse de la fin de XIX^{ème} siècle
(BOULET V., 1925)**

Le refroidissement de la Terre aurait entraîné une diminution de son volume, et, par conséquent, une diminution de sa surface. Cela aurait donc pu être mis sous pression, ce qui aurait pu être à l'origine à la fois des chaînes de montagnes et des vastes dépressions qui ont formé les océans selon : livre de géologie de classe de 4^{ème}, V. BOULET, 1925, modifié. Durant le début du XX^{ème} Siècle, l'idée de mobilité horizontale des continents (1912) a été adoptée

6.2. Théorie d'Alfred Wegener

Alfred Wegener (1880-1930) est un astronome et climatologue allemand.

Il n'est pas le premier à émettre l'hypothèse d'un déplacement horizontal des continents, **mais il est le premier à recueillir des observations pour élaborer une théorie de la dérive des continents**. Il présente son idée en 1912 et la développe jusqu'en 1929 à travers les éditions successives de *La Genèse des continents et des océans* (titre original : "die Entstehung der Kontinente und Ozeane").

Wegener est considéré comme le premier à étayer son hypothèse par un grand nombre de "preuves" provenant de diverses sources pour en faire une théorie scientifique cohérente. Il adopte une approche généraliste, qui le conduira à puiser des arguments dans de multiples disciplines, très éloignées des siennes. Cette approche est remarquable et constitue l'un des aspects les plus novateurs de sa démarche.

6.3. Arguments en faveur d'une dérive des continents

Ils sont nombreux :

a. Concordance des structures géologiques

Les chaînes européennes (chaînes calédonienne, hercynienne et alpine) s'étendent jusqu'au continent américain. Idem entre l'Afrique et l'Amérique du Sud pour les boucliers anciens. Selon le modèle explicatif réformiste, l'affaissement qui a conduit à la

formation de l'océan Atlantique a sectionné les structures montagneuses des continents qui le bordaient à angle droit.

L'agrégation des masses continentales explique la continuité des structures géologiques entre les continents, désormais séparés par l'océan Atlantique.

Les trois chaînes de montagnes, les Appalaches (est de l'Amérique du Nord), la Mauritanie (nord-est de l'Afrique) et la Calédonie (îles britanniques, Scandinavie), séparées aujourd'hui par l'océan Atlantique, ne forment qu'une seule chaîne qui se poursuit si l'on met les continents ensemble dans la méthode de Wegener. Ces trois chaînes ont des structures géologiques identiques et se sont formées en même temps il y a entre 470 et 350 millions d'années.

b. Les fossiles communs d'un continent à l'autre

Les régions maintenant séparées par les océans avaient **une faune fossiles communs il y a 240 millions d'années**. Si cette espèce avait pu traverser les océans, on l'aurait trouvée partout dans le monde. Selon le modèle explicatif réformiste, les continents existants étaient autrefois reliés par des ponts continentaux qui permettaient le libre passage des organismes. Leur effondrement a conduit à l'isolement génétique qui a provoqué la divergence des espèces que nous connaissons aujourd'hui.

Le regroupement des masses continentales permet d'expliquer l'aire de répartition de certains fossiles sans s'appuyer sur les ponts continentaux.

c. Distribution géographique des paléoclimats

Il y a 250 millions d'années, tous les continents de l'hémisphère sud (et une partie de l'Inde), très éloignés les uns des autres, **étaient recouverts de glace**, alors qu'aucun des continents qui se trouvent aujourd'hui dans l'hémisphère nord (à l'exception de l'Inde) ne l'était. Il est peu probable qu'il y ait glaciation sur les continents situés dans la zone équatoriale (Afrique du Sud, Inde). De plus, il est anormal que la glace coule vers l'intérieur du continent.

L'agrégation des masses continentales permet d'expliquer ces dépôts glaciaires. Il permet également d'expliquer la répartition des effets des paléoclimats (paléoclimats).

d. Concordance du tracé des côtes

Comme d'autres, Wegener a constaté que **les caractéristiques des continents sont complémentaires** (comme les pièces d'un puzzle). Il en déduit qu'elles proviennent de la fragmentation d'un seul continent, la **Pangée**, qu'il place au Carbonifère (-270 Ma).

Un emboîtement correct n'est possible qu'à une profondeur de 900 mètres (en 1912, Wegener ne s'est installé que sur des zones visibles).

Ces observations ont conduit Alfred Wegener à proposer l'hypothèse que le supercontinent, la Pangée, pourrait se fragmenter, conduisant à la dérive des continents résultant de cette fragmentation. Dans ce modèle, les continents portent une couche de nature différente (plus dense) qui forme aussi le fond de l'océan et qui dérive sur eux (ex. icebergs flottant sur l'eau qui les submerge).

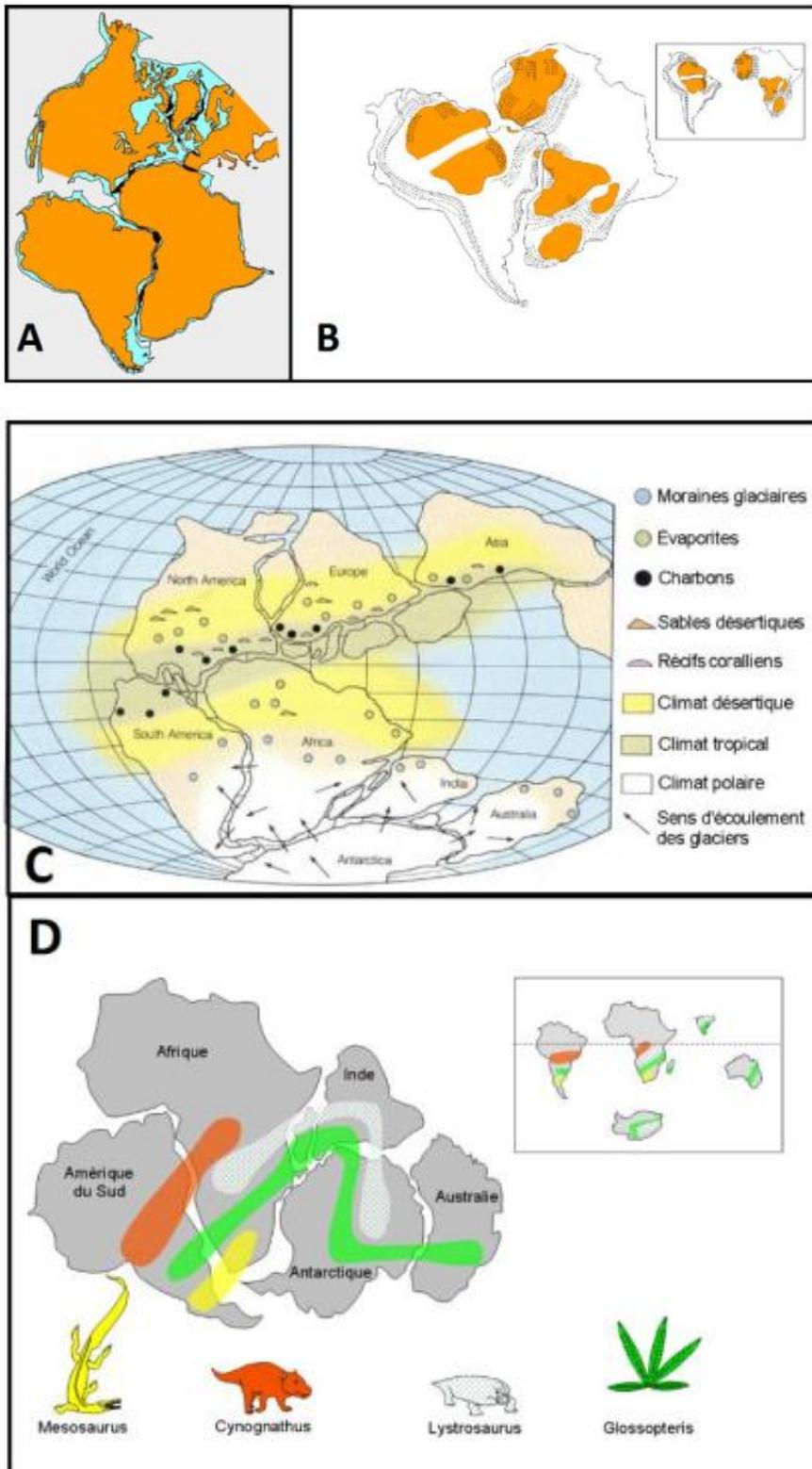


Figure VI.2. Les arguments de Wegener en faveur d'une mobilité des continents

- A. Concordance du tracé des cotes (www2.ggl.ulaval.ca),
- B. Concordance des structures géologiques (svt.ac-dijon.fr),
- C. Concordance des paléoclimats (www.ages.ulg.ac.be),
- D. Concordance paléontologique (distribution de certains fossiles) (svt.ac-dijon.fr).

6.4. Rejet de la théorie de Wegener dans les années 1920

Les arguments de Wegener sont soutenus par de nombreux spécialistes, d'autant plus que les forces de dérive qu'il propose s'avèrent insuffisantes pour expliquer le déplacement d'une croûte solide sur un manteau solide en soi. Ainsi, l'idée de navigation horizontale a été initialement rejetée par la communauté scientifique.

Années 1960 Nouvelles données permettant de valider l'hypothèse d'une mobilité horizontale des continents.

6.5. Observations

Au cours des années 1950 et 1960, le développement de **l'océanographie** (échosondeurs, écoute sismique, détection magnétique, mesure des flux thermique) a permis de découvrir la topographie des fonds marins.

Ainsi notons-nous:

- Une **dorsale** longue d'environ 65 000 km et large de 500 à 1 500 km, culminant à 2,5 km de profondeur et dominant des plaines abyssales d'environ 5 km de profondeur,
- Deux types de bordure continentale (marge continentale) : fosses (principalement bordant l'océan Pacifique) ou **plateaux continentaux** qui s'enfoncent en pente douce jusqu'à la plaine abyssale.

Le flux de chaleur rayonnant de la Terre (**flux géothermique**) est supérieur à la moyenne sur les dorsales. Ceci est associé à des **mouvements convectifs dans le manteau** montant au niveau des dorsales et descendant au niveau des fosses (où un excès de gravité est observé).

L'ensemble des observations océanographiques a permis de formuler l'hypothèse **d'expansion du fond océanique** selon laquelle **les océans se forment en permanence au niveau des dorsales**, et divergent symétriquement sur leurs flancs avant de disparaître dans les fosses océaniques.

La mise en évidence des **plages des anomalies magnétiques** symétriques normales et inverses par rapport à l'axe des dorsales océaniques, associées au phénomène d'inversion des pôles magnétiques, a permis de valider l'hypothèse d'expansion des fonds océaniques et de calculer la vitesse d'expansion des océans (ou le taux d'expansion des océans).

6.6. Intérêt de la magnétostratigraphie

Dans les années 1950, les magnétomètres embarqués sur les navires permettaient de mesurer l'intensité du champ magnétique de la croûte océanique. On observe alors une

alternance de déformations positives et négatives en « peau de zèbre » de part et d'autre de la dorsale. En effet, l'aimantation de la roche induit localement un champ magnétique, très faible mais mesurable, qui s'ajoute (anomalie normale) ou se soustrait (anomalie inverse) au champ géomagnétique existant.

Vine, Matthews et Molely ont émis l'hypothèse que le fond océanique se forme en permanence au niveau des dorsales, dérive symétriquement de part et d'autre de ces dorsales et disparaît au niveau des fosses océaniques. Il s'agit de l'expansion du fond océanique déjà proposée par Hess H. en 1960 (son article ne paraît cependant qu'en 1962). Il reste cependant à vérifier que les roches sont plus anciennes au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la dorsale.

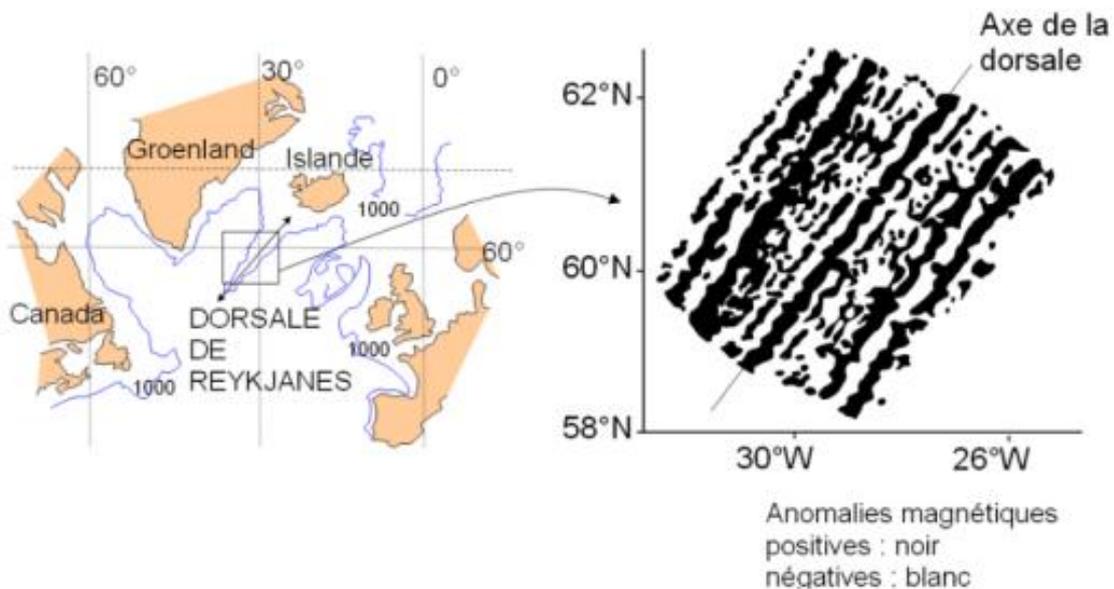


Figure VI.3. Anomalies magnétiques d'un secteur de la dorsale Atlantique au Sud-ouest de l'Islande (Vine, Matthews et Molely, 1963)

Un profil magnétique a été enregistré sur 1 000 km de part et d'autre de la dorsale du Pacifique (Figure VI.3.A). Si l'on réfléchit le profil par rapport à son point central, qui correspond à l'axe de la crête (Figure VI.3.B), alors la symétrie des profils (A et B) est parfaite.

Selon l'hypothèse de Vine et Matthews en 1963, **la lave éjectée au niveau de la dorsale acquiert en refroidissant le magnétisme environnant en son temps**, alternant positif et négatif. Pittman a alors tracé le profil théorique (Figure VI.3.C) selon l'échelle des inversions magnétiques, et a constaté que celui-ci correspondait parfaitement aux

profils mesurés (A et B). De plus, de part et d'autre de la dorsale, la succession de bandes d'anomalies est proportionnelle à la durée des deux inversions. **Pour la première fois, l'expansion océanique a été vérifiée par des données de terrain.**

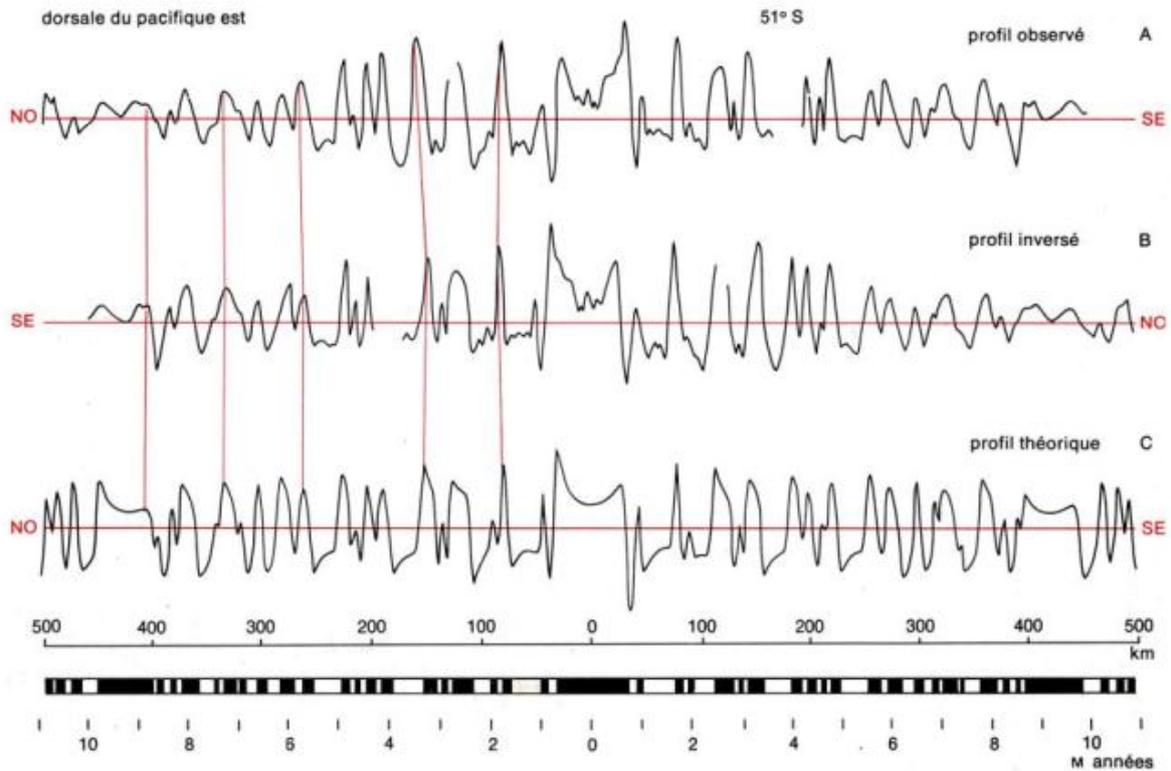


Figure VI.4. Le profil magnétique magique (Walter Pittman, 1965)

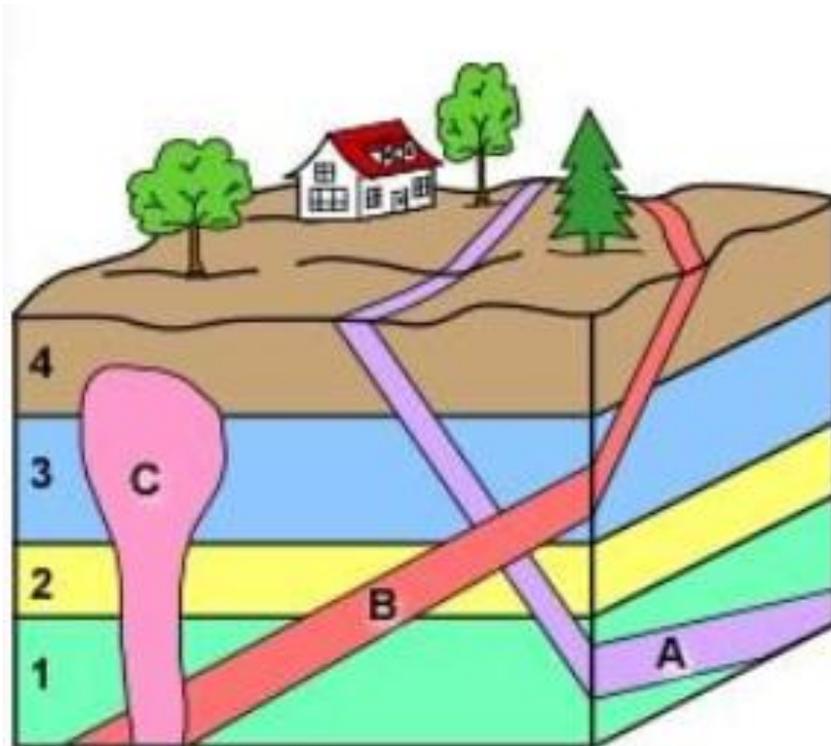
Exercices proposés:

Exercice 1:

Le document ci-contre présente schémas simplifié d'une coupe géologique dans une région sédimentaire.

Retrouver...

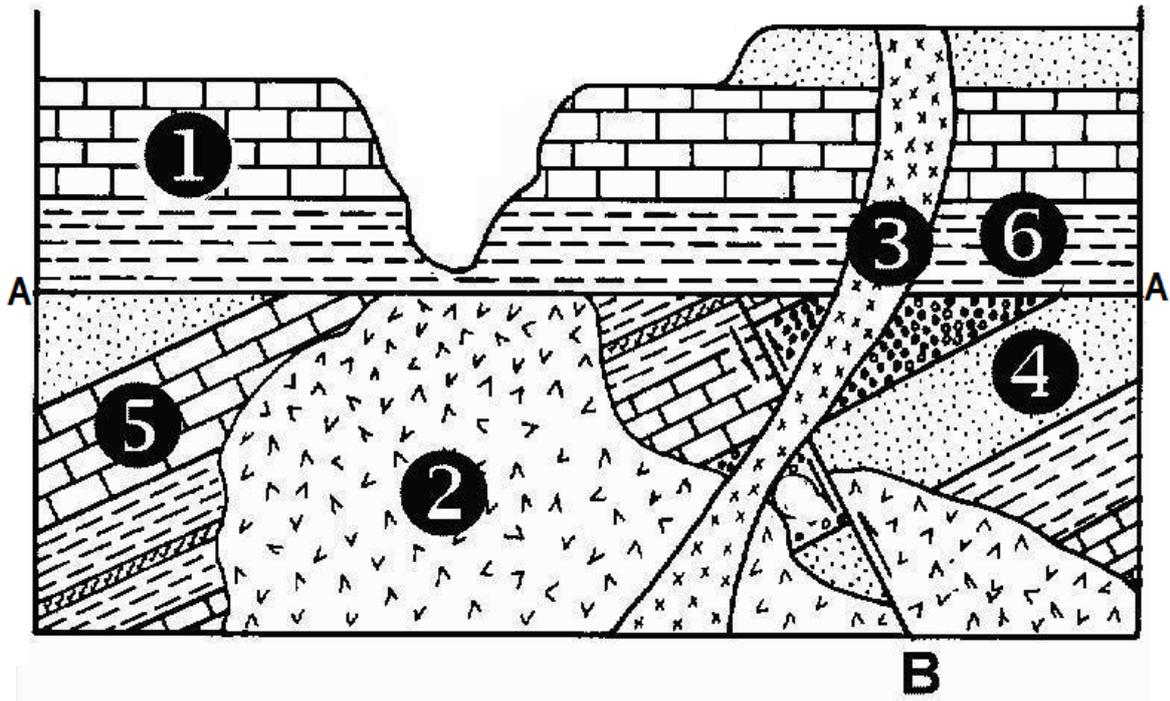
- l'ordre chronologique des événements
- La nature des contacts ?



Document VI.1 D'un schéma simplifié d'une coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 2:

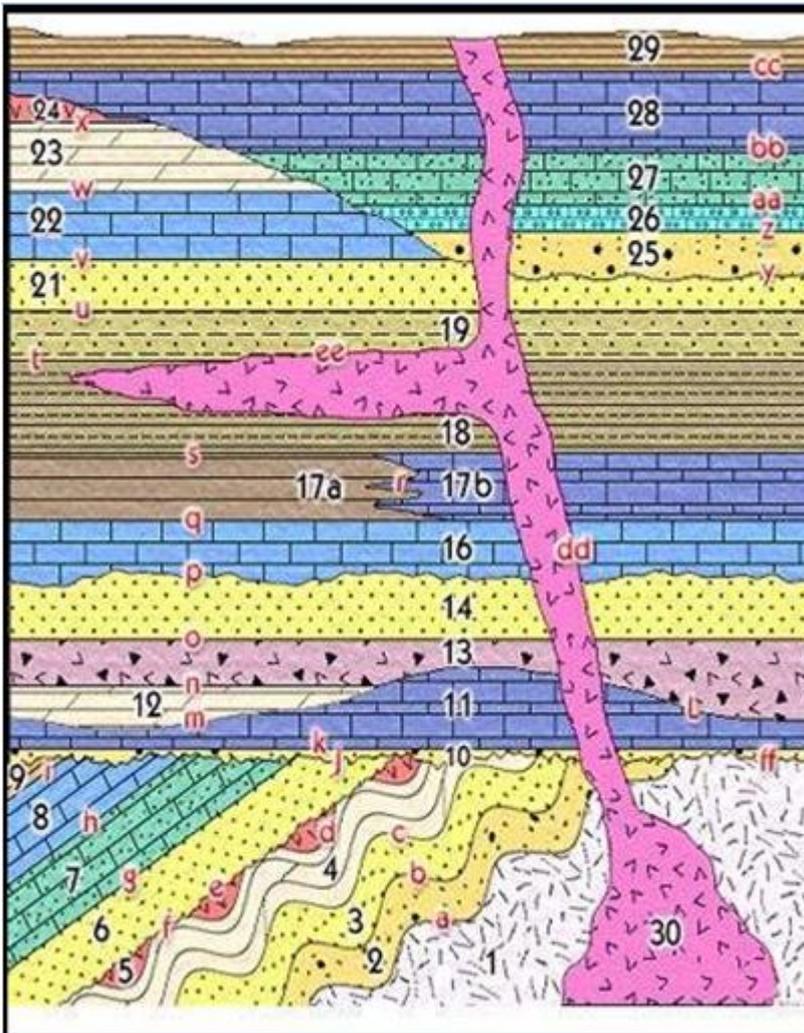
- Établir la chronologie relative des événements géologiques



Document VI.2 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 3:

- Établir la chronologie relative des événements géologiques



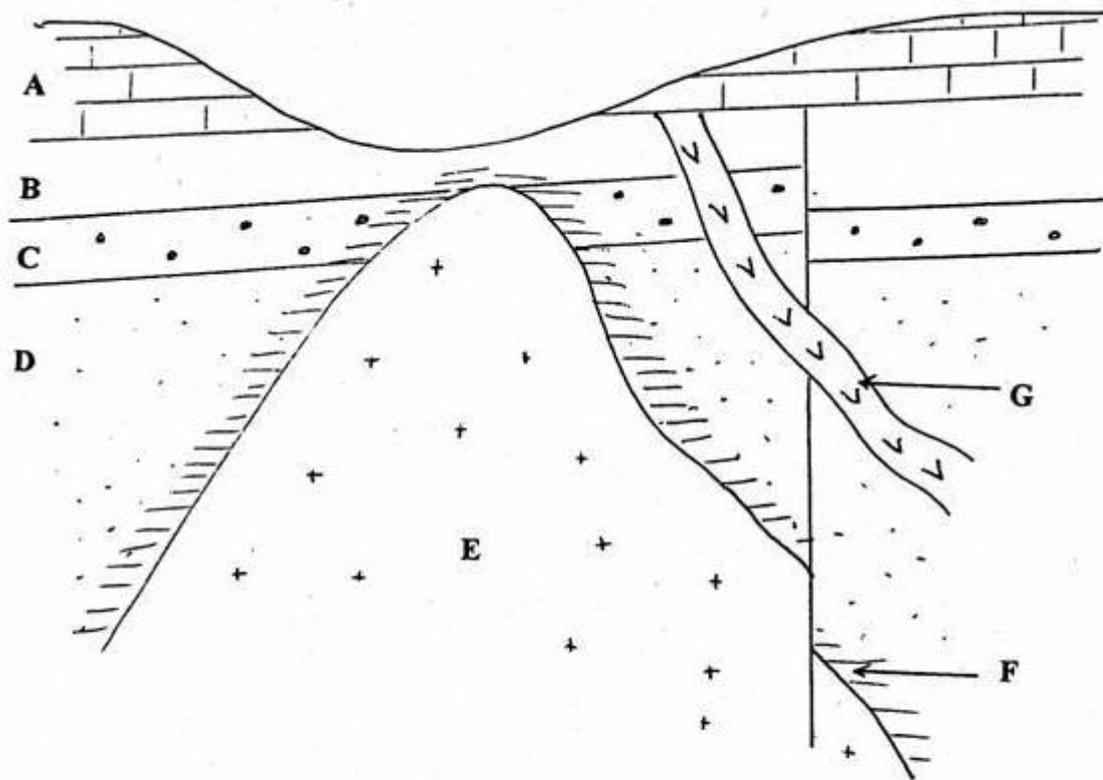
Document VI.3 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 4:

Le document ci-contre présente schémas simplifié d'une coupe géologique dans une région différentes structure lithologique.

Retrouver...

- l'ordre chronologique des événements avec des explications qui convient ?

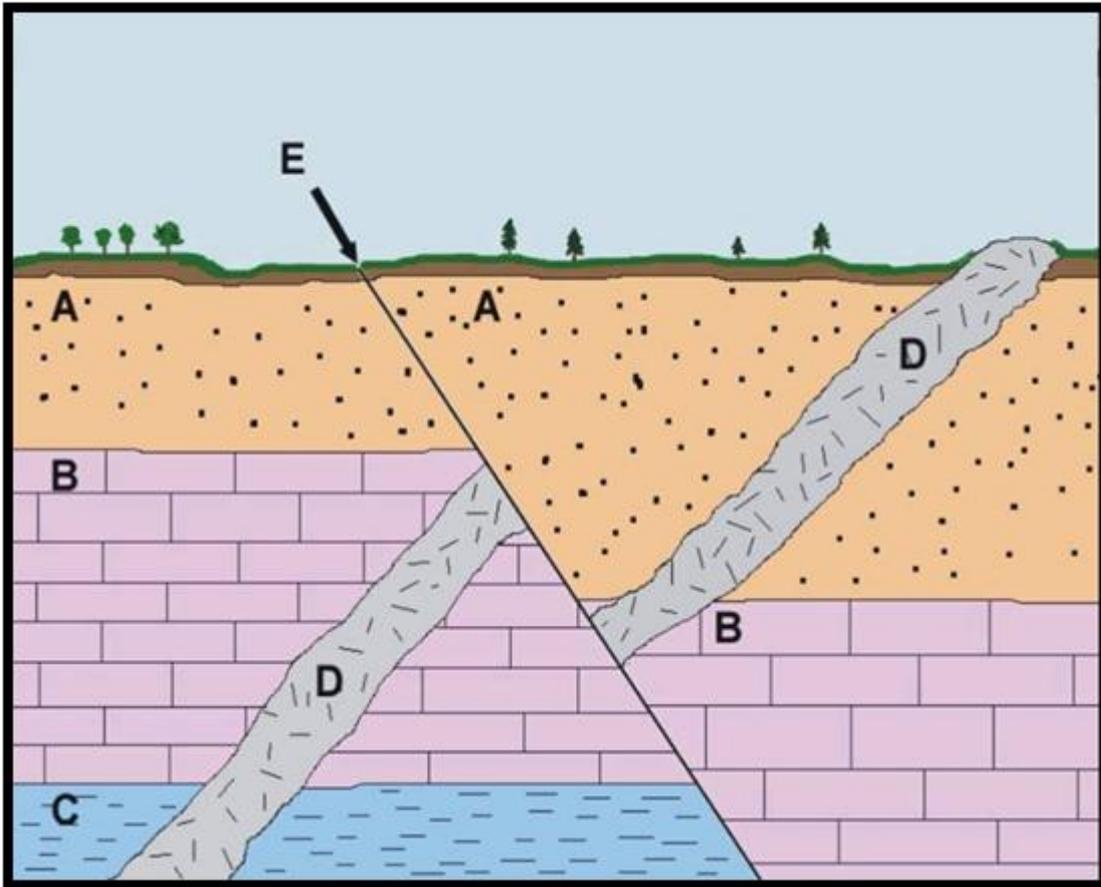


A, B, C, D, sont des roches sédimentaires.
 E est un pluton granitique.
 F est une zone de roches métamorphiques.
 G est un filon d'origine magmatique.

Document VI .4 Coupe géologique dans des roches sédimentaire

Exercice 4:

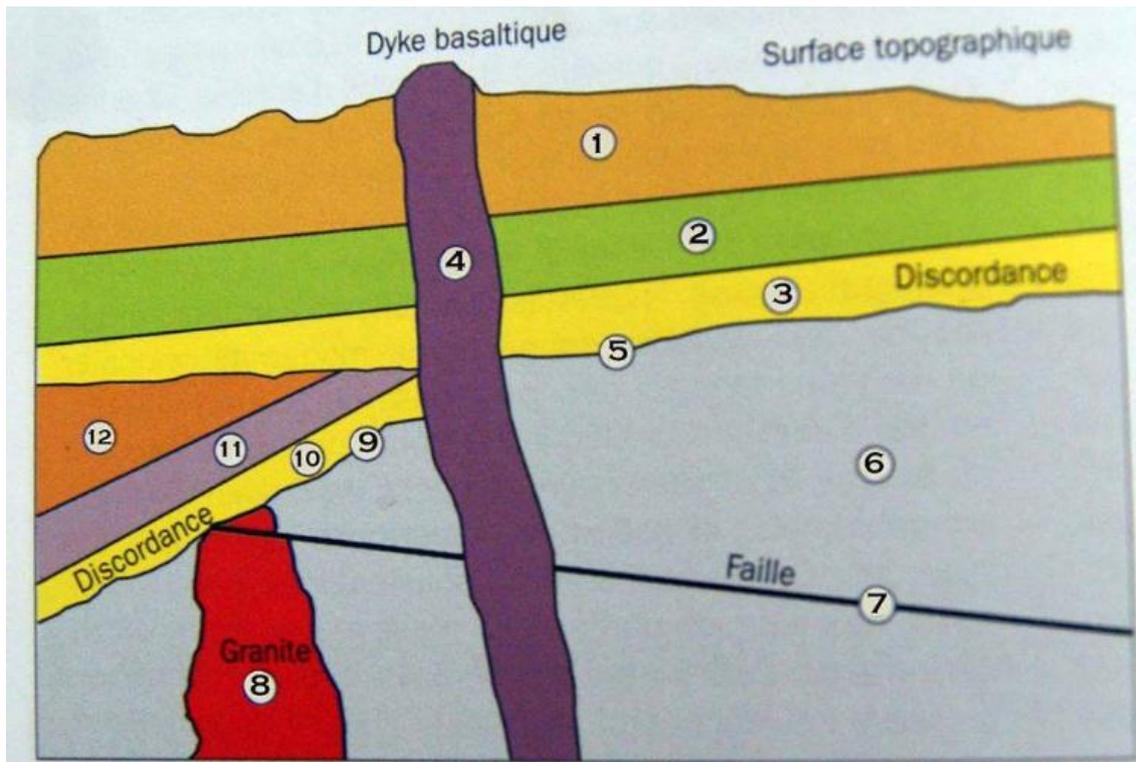
- Établir la chronologie relative des événements géologiques
 1. Donner l'ordre chronologie des événements géologiques montrés dans la figure ci-dessus, avec explication ?
 2. Donner le principe de stratigraphie appliqué pour chaque événement ?



Document VI.5 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 5:

Donner l'ordre chronologique des événements géologiques montrés dans la figure ci-dessous, avec explication.



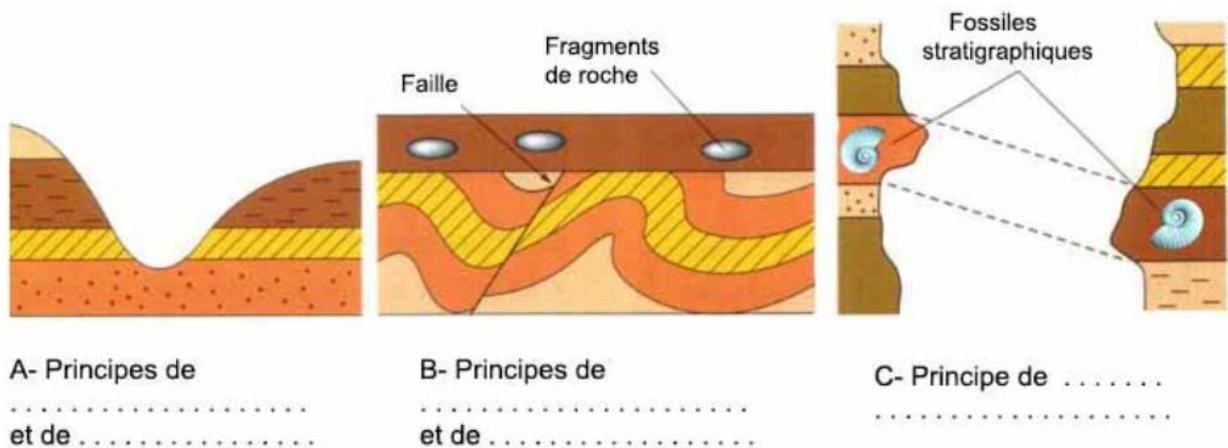
Document VI.6 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 6:

1 - Quels principes sont illustrés dans chaque de ces figures ?

2 - Expliquez ce qu'est un fossile stratigraphique et donnez quelques exemples

Dans la figure B, des fragments de roches sont présents à l'intérieur d'une couche sédimentaire. Comment pouvez-vous l'expliquer ?



A- Principes de
et de

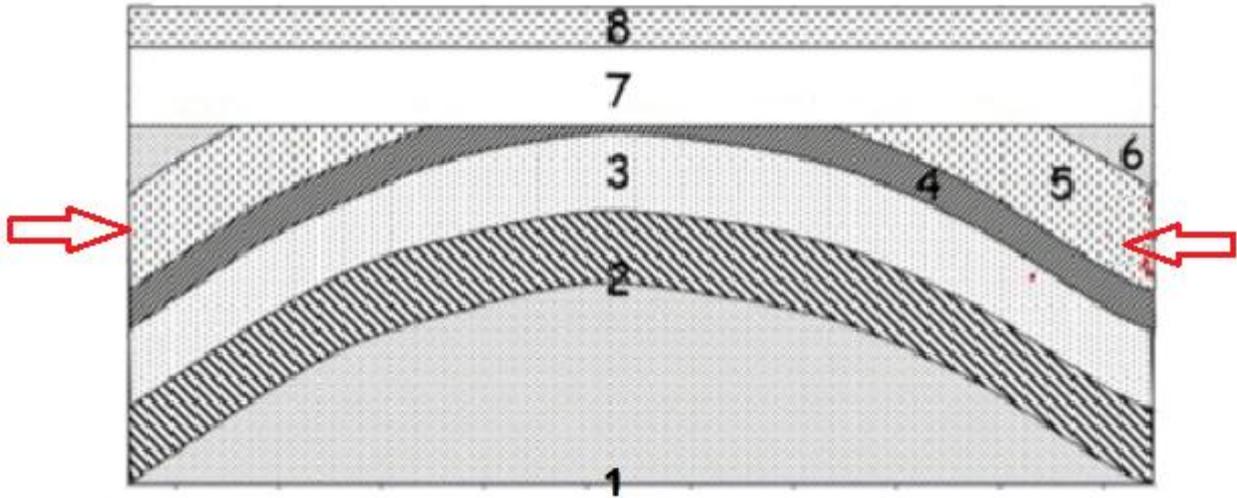
B- Principes de
et de

C- Principe de

Document VI.6 Coupe géologique dans des bassins sédimentaires

Exercice 7

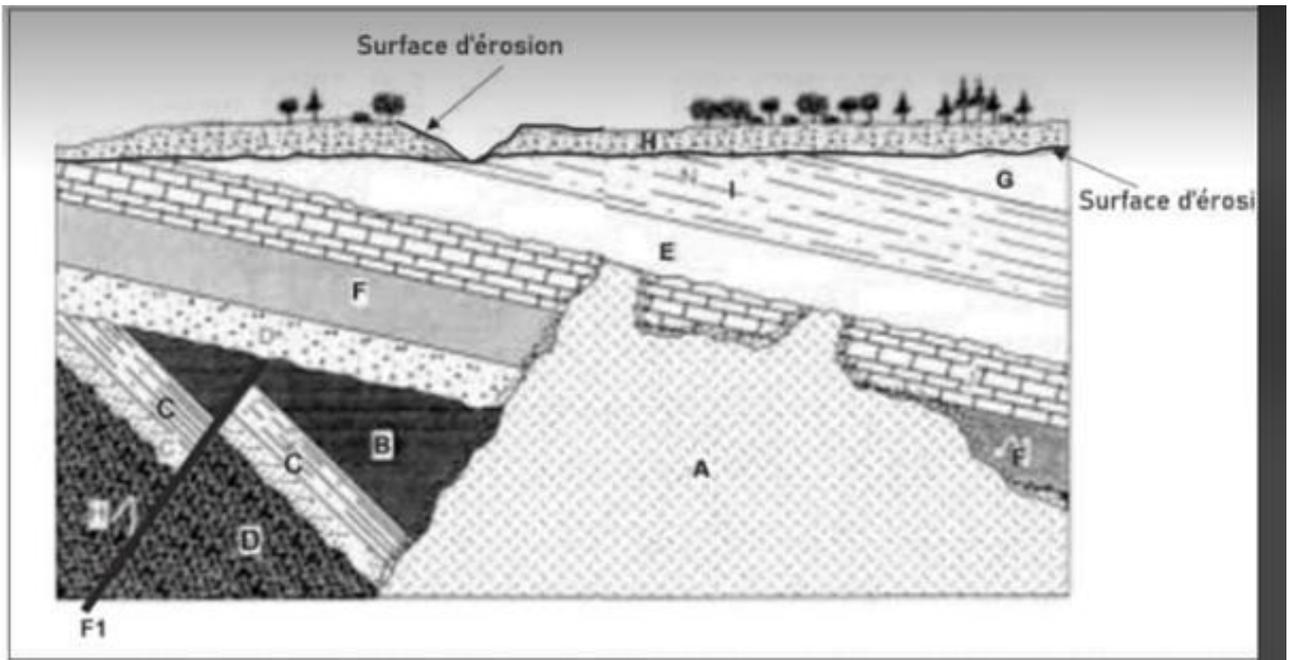
Etablir une chronologie relative des événements géologiques qui ont affectés les strates schématisées ci-dessous :



Document VI.7 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 8

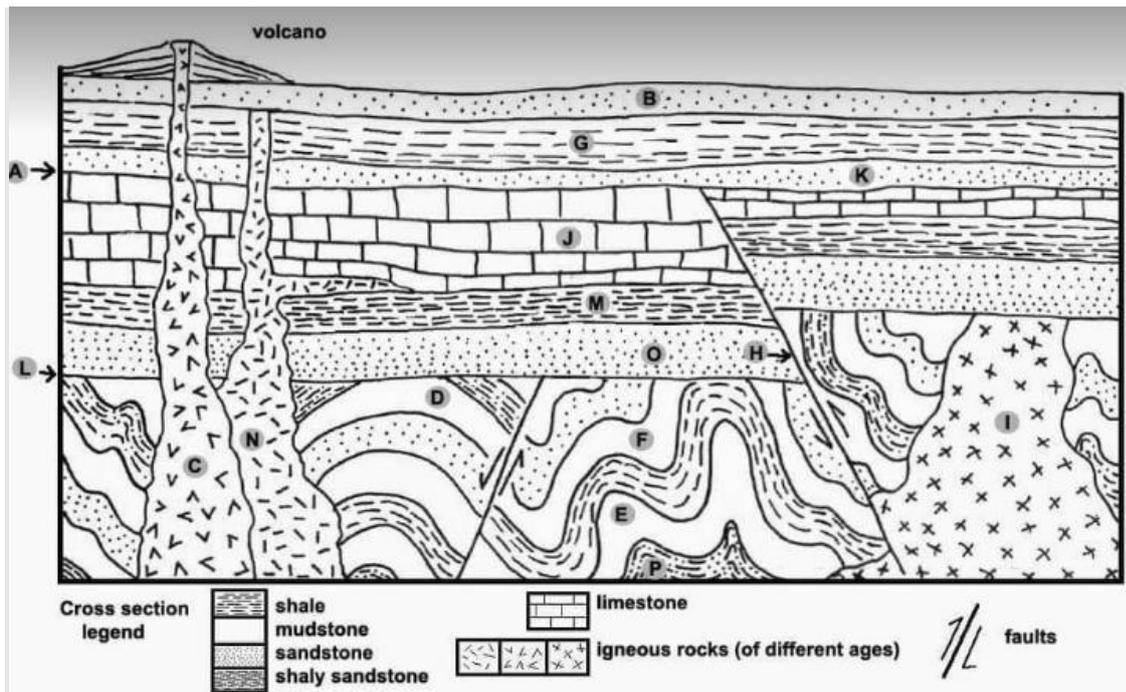
1. Donner l'ordre chronologique des événements géologiques montrés dans la figure ci-dessus, avec explication ?
2. Donner le principe de stratigraphie appliqué pour chaque événement ?



Document VI.8 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 9

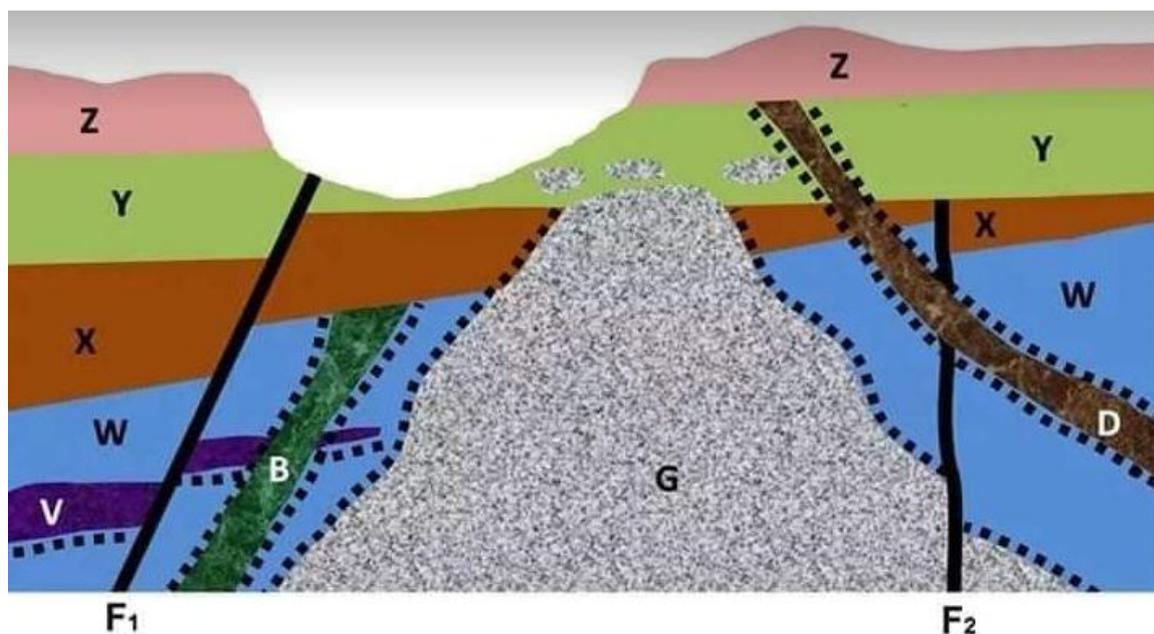
1. Quel est l'ordre de succession de ces événements ?
2. Donner le principe de stratigraphie appliqué pour chaque événement ?



Document VI.9 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 10

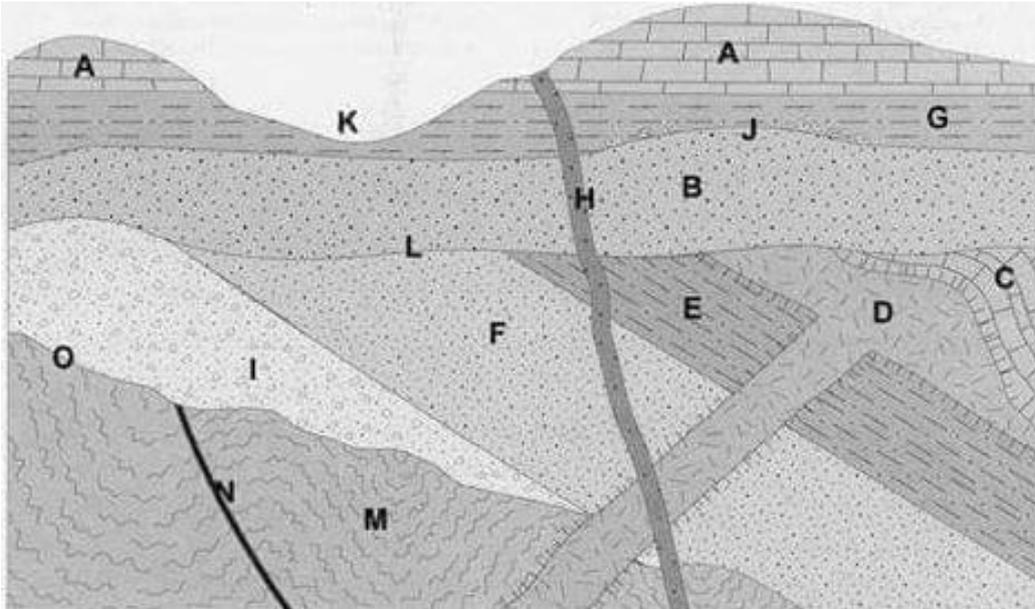
1. Etablir une chronologie relative des événements géologiques qui ont affectés les strates schématisées ci-dessous ?
2. Donner le principe de stratigraphie appliqué pour chaque événement ?



Document VI.10 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 11

1. Donner l'ordre chronologique des événements géologiques montrés dans la figure ci-dessus, avec explication ?
2. Donner le principe de stratigraphie appliqué pour chaque événement ?



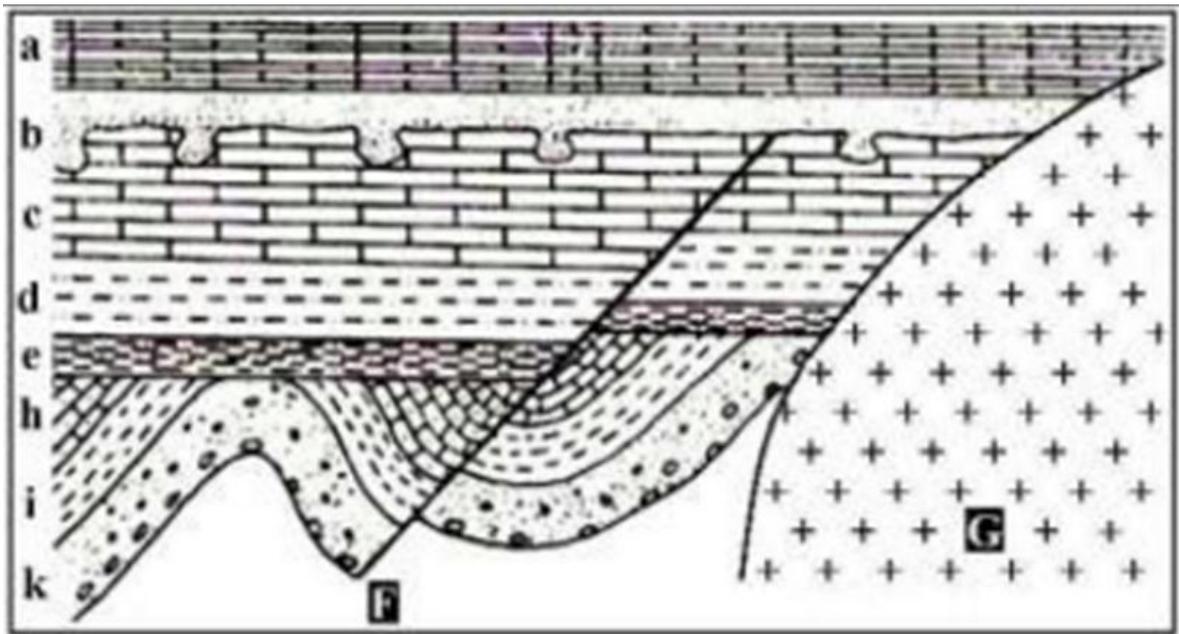
Document VI.11 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 12

Le schéma ci-dessous représente une coupe géologique réalisée dans une région qui a connu certain nombre d'événements géologiques.

- 1- Déterminez l'âge relatif du plissement, de la faille F et du granite G par rapport aux couches sédimentaires.
- 2- Justifiez la réponse en utilisant le principe suivant : tout événement qui provoque un changement dans la géométrie des roches est postérieur à la dernière strate qu'il affecté Et antérieur à la première strate non affectée.
- 3- Quelle est la formation la plus ancienne : K ou j?
- 4- Quel est le principe de la stratigraphie qui vous a permis de répondre à cette question?
- 5- Quel est le principe de la stratigraphie qui nous permet de connaître la relation dans le temps (le plus ancien et le plus jeune) entre la formation C et F ?
- 6- Quel est le principe de la stratigraphie qui nous permet de connaître la relation dans le temps (du plus ancien au plus jeune) des formations K, i et h?

- 7- Quel est le type de la faille F ? .
- 8- Trouvez l'âge relatif de la couche G en Justifiant votre réponse
- 9- Montrez avec des flèches toutes les discordances ou lacunes présentes sur la figure. (Numérotez ces flèches ; donnez un numéro à chaque flèche)
- 10- Donnez les noms de ces discordances ou lacunes en utilisant les numéros de la question
- 11- Indiquez dans l'ordre (du plus ancien au plus récent) les formations et structures précédentes (formations et structures : K,i,j,a,b ;c ;G,F ,h,d,e).



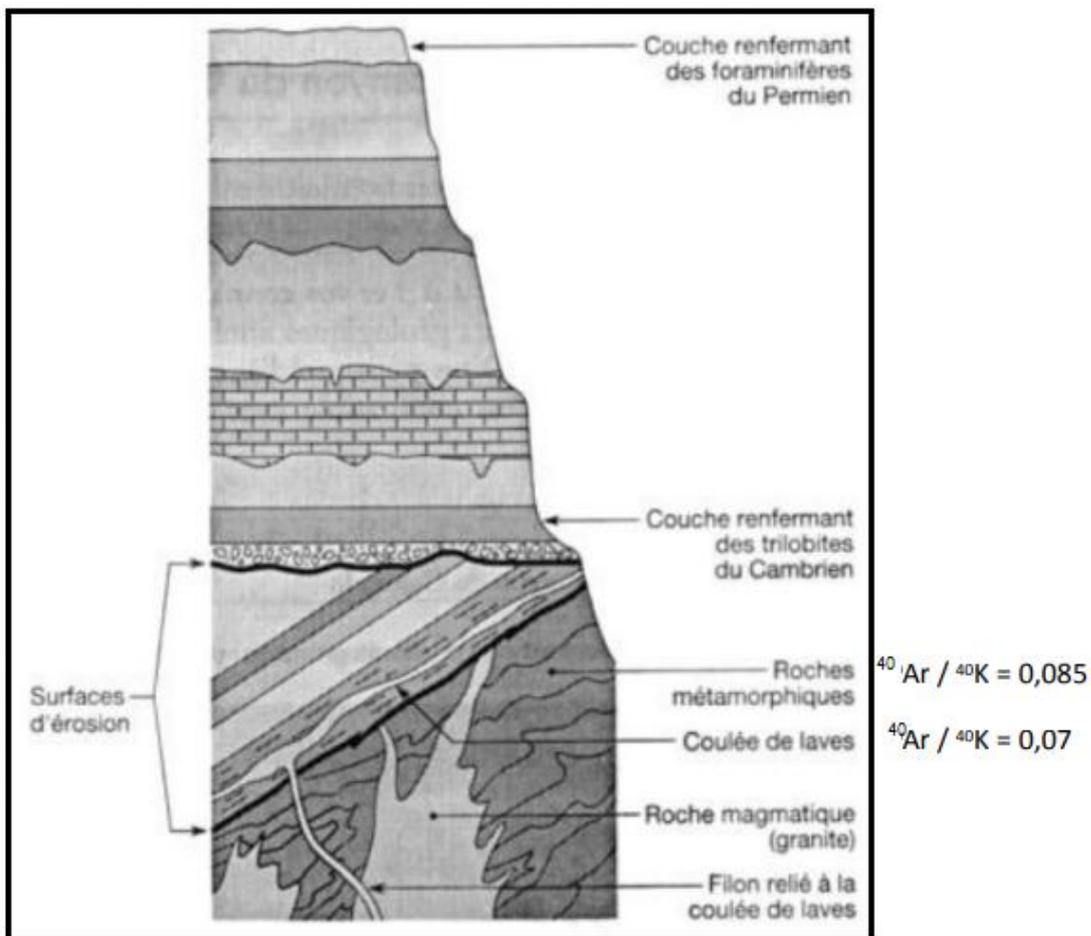
Document VI.12 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 12

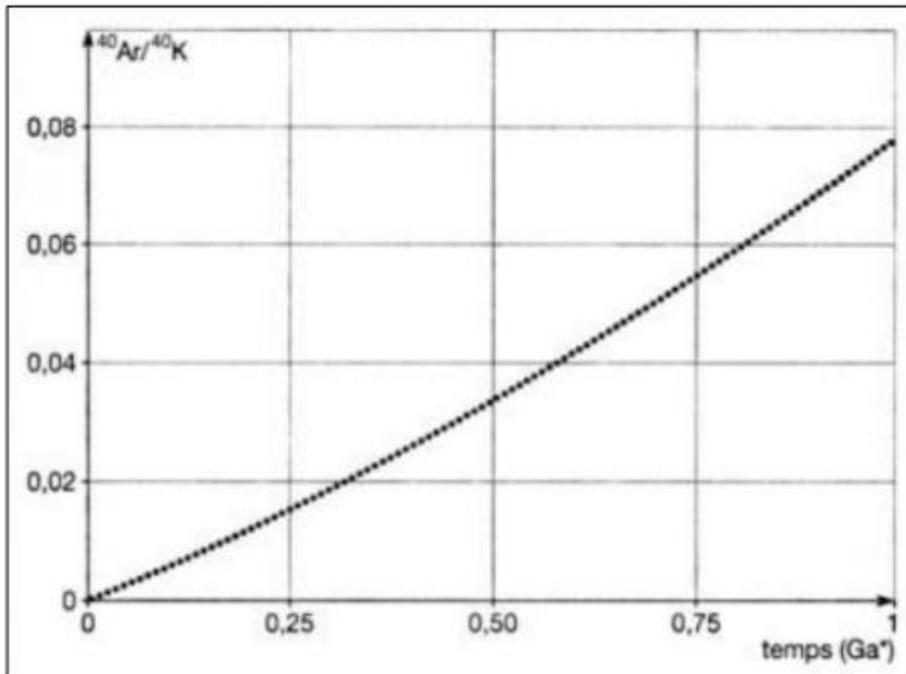
Chronologie dans le canyon du Colorado les parois du grand canyon du Colorado exposent sur plusieurs milliers de mètres des archives de l'histoire géologique de la région.



Document VI.13 Photographie d'une partie du grand canyon du Colorado



Document VI.14 Schéma d'interprétation de la série stratigraphique du Grand Canyon

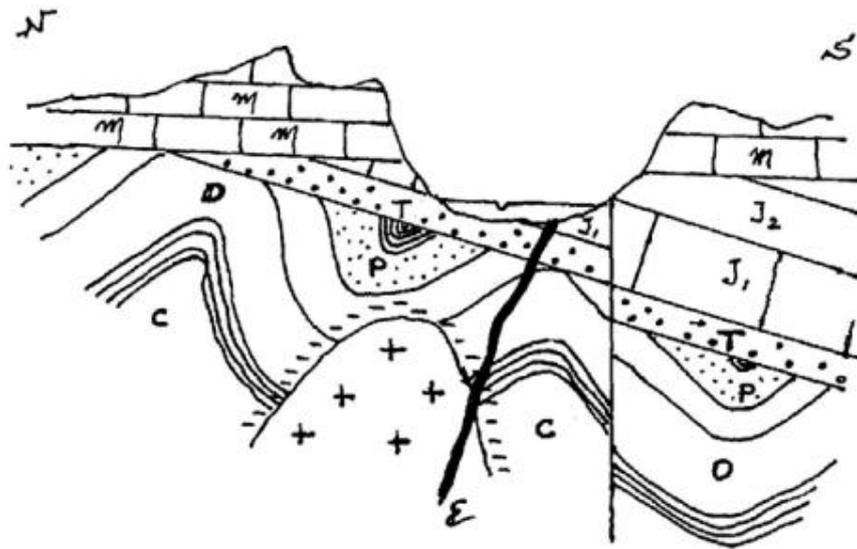


Document VI.15 Variation théorique du rapport isotopique $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K}$ en fonction du temps, dans un système clos.

- 1- Situez dans le temps, et décrivez les événements géologiques qui ont jalonné cet ensemble stratigraphique.
- 2- Expliquez en quoi l'âge Cambrien proposé pour la couche contenant les trilobites est compatible avec l'ensemble des données.
- 3- Dater par le calcul l'âge de roches métamorphiques qui présenterai un rapport $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K} = 0,085$.

Exercice 13

1. Nommer les événements géologiques ayant affecté cette région
2. Exploitez la coupe géologique suivant et établir une chronologie relative des événements en précisant le(s) principe(s) stratigraphique(s) utilisé(s)



ϵ : filon de roche magmatique

$+$ granite

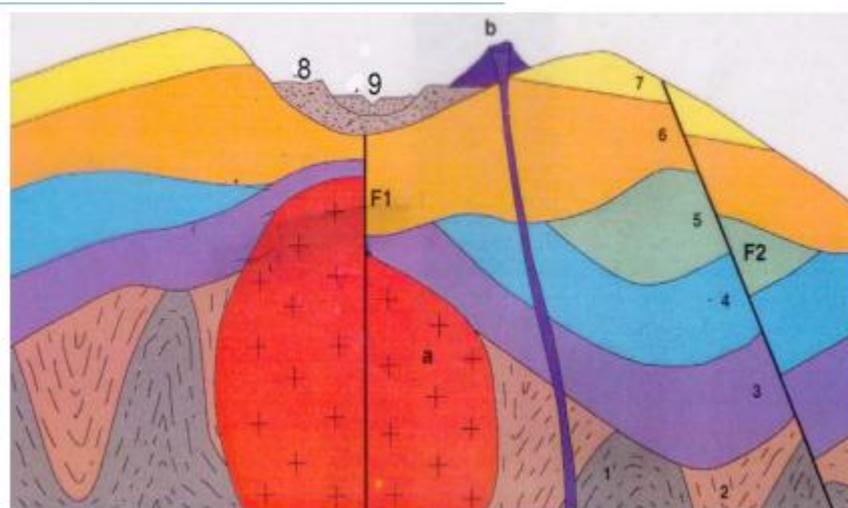
$- -$ roches métamorphiques

La roche T renferme des galets composés, entre autres, de roches métamorphiques.

Document VI.16 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 14 :

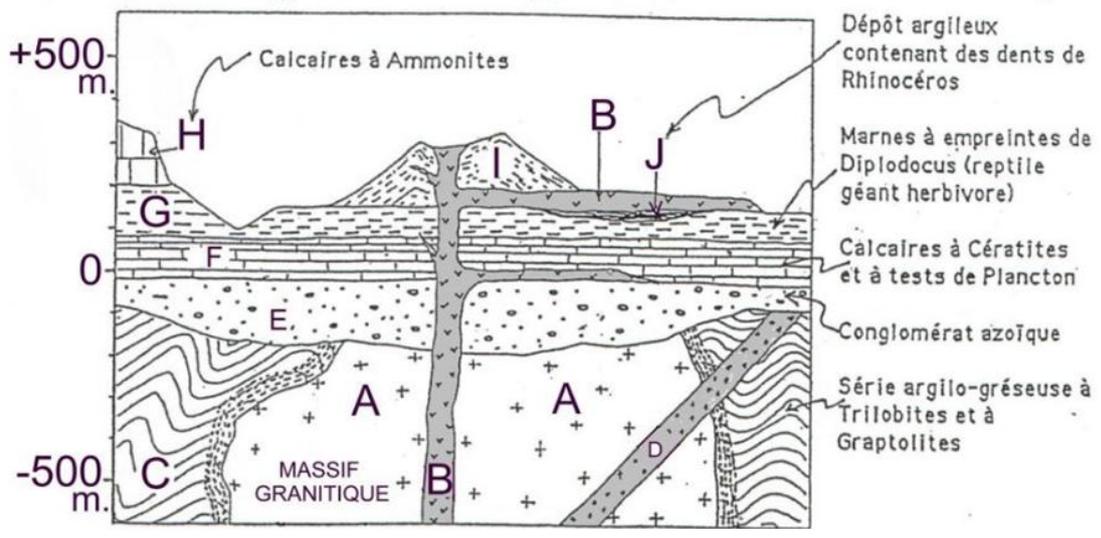
Nommer les événements géologiques ayant affecté cette région 2. Exploitez la coupe géologique suivant et établir une chronologie relative des événements en précisant le(s) principe(s) stratigraphique(s) utilisé(s).



Document VI.17 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Exercice 15 :

Retrouvez, arguments à l'appui, l'histoire de cette coupe



Document VI.18 Coupe géologique dans un bassin sédimentaire

Références bibliographiques

- 1- Aubouin J., Brousse R. et LEHMAN J.P., 1975 : Précis de Géologie. 2 Paléontologie, Stratigraphie, Dunod Edition (2^{ème} édition), 697 p.
- 2- Boggs S. Jr, 2014 : Principles of sedimentology and stratigraphy, Pearson Education (5^{ème} édition), 560 p.
- 3- Brookfield M.E., 2004: Principles of Stratigraphy, Blackwell Publishing, 340 p.
- 4- Bedir M. ,1995 : Mécanismes géodynamiques des bassins associés aux couloirs de coulissements de la marge atlasique de la Tunisie: seismo-stratigraphie, seismo-tectonique et implications pétrolières, Thèse Doctorat, Institut National de Recherches Scientifiques et Techniques Laboratoire de Géo-ressources, Université de Tunis El Manar Faculté des Sciences de Tunis, Département de Géologie.
- 5- Benjamin L., 2005 : Cycles de Milankovitch et variations climatiques, Institut de Mécanique Céleste, Paris, <https://planet-terre.ens-lyon.fr/pdf/milankovitch-2005.pdf>.
- 6- Cohen K.M., Harper D.A.T., Gibbard P.L., Car N. ,2022: Chart, Commission Internationale de Stratigraphie, Février 2022.
- 7- Chabane K., 2015 : Le cénonanien- turonien de nord de Tebessa (Nord-Est Algérien), Thèse Doctorat, Option Géologie, Université de Badji Mothtar Annaba, Faculté SNV, Département STU.
- 8- Chebah F. ,2021 : chapitre 02 stratigraphie, Institut des sciences de la terre et de l'univers, Département de géologie, université de Batna.
- 9- Christiane D., 2002 : La fossilisation : une exception conjoncturelle, in Pour la Science, n° 292, février 2002.
- 10- Hess H., 1962: « History of Ocean Basins » (PDF). In A. E. J. Engel, Harold L. James & B. F. Leonard. Petrologic studies: a volume in honor of A. F. Buddington, Boulder, CO: Geological Society of America, 1 novembre 1962, p. 599–620.
- 11- Foucault A. et Raoult J.F., 2001 : Dictionnaire de Géologie, Dunod Edition (5^{ème} édition), 379 p.
- 12- Mitchum, R. M., Vail, P.R. (1977). Seismic stratigraphic interpretation procedure. In C. E. Payton (Ed.): Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir 26: 135-143.
- 13- Mitchum, R. M., Vail, P.R., Sangree, J.B. (1977). Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In C. E. Payton (Ed.): Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration. AAPG Memoir 26: 117-133.

- 14- Nichols G., 2009: Sedimentology and Stratigraphy, Wiley-Blackwell Edition (2^{ème} édition), 432 p.
- 15- Pomerol Ch., Lagabrielle Y. et Renard M., 2002 : Eléments de géologie, Dunod Edition (12^{ème} édition), 746 p.
- 16- Pomerol Ch., Babin Cl., Lancelot Y., LE PICHON X. et RAT P., 1980 : Stratigraphie et paléogéographie, Principes et méthodes, Doin Edition, 209 p.
- 17- Rey J., 1997 : Stratigraphie terminologie française, mémoire n°19, Elf, 164 p.
- 18- Selley R.C., L. Cocks R. M. et Plimer I. R., 2005: Encyclopedia of Geology, Academic Press (1^{ère} édition), 2750 p.

Sites internet :

1. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/series-temporelles1.xml>
2. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/delta-temperature.xml>
3. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/temperature-des-glaces.xml>
4. <http://acces.enslyon.fr/acces/thematiques/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/indicateurs-paleoclimatiques/isotopes-oxygene>
5. <http://sepmstrata.org/>
6. <https://www.slideserve.com/raine/la-datation-relative>.
7. <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/CCCIC/ressources/delta13c>
8. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/delta-temperature.xml>
9. <http://acces.enslyon.fr/acces/thematiques/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/indicateurs-paleoclimatiques/isotopes-oxygene>
10. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/temperature-des-glaces.xml>
11. Site officiel de la Commission Internationale de Stratigraphie (avec l'échelle stratigraphique officielle, la liste des stratotypes...) : <https://stratigraphy.org/>
12. Site en open-access dédié à la géologie sédimentaire, avec cours et exercices (en anglais) : <http://sepmstrata.org>
13. Banque de donnée terminologique (pour traduire les termes de l'anglais au français ou vice-versa) : <https://www.btb.termiumplus.gc.ca/>
14. A propos de la stratigraphie isotopique : www.svt-biologie.premiere.bacdefrancais.ne