

METHODES D'ETUDE DE LA STRATIGRAPHIE

I. BIOSTRATIGRAPHIE

Introduction

La **biostratigraphie** est une branche de la géologie qui utilise les fossiles pour dater et diviser les couches sédimentaires en fonction de leur âge et de leur contenu biologique. C'est une méthode fondamentale pour comprendre l'histoire de la Terre, notamment l'évolution des espèces au fil du temps.

Définition

La biostratigraphie consiste à étudier la répartition des fossiles dans les couches géologiques afin de définir des intervalles de temps géologiques (périodes, époques) et de corréler ces couches à différents endroits du globe.

But

Le principal objectif de la biostratigraphie est de :

- **Datation relative** des roches : en utilisant la présence de fossiles caractéristiques, il est possible de déterminer l'âge relatif des couches géologiques.
- **Corrélation** des strates : elle permet de relier des formations géologiques à différentes localités, même si elles sont éloignées géographiquement.
- **Évolution paléontologique** : elle aide à retracer l'évolution des espèces et à reconstituer les environnements passés.

Utilité

La biostratigraphie est cruciale dans de nombreux domaines :

- **Exploration pétrolière et gazière** : elle permet de localiser des réservoirs potentiels en identifiant des couches géologiques favorables à la présence de pétrole ou de gaz.
- **Études environnementales et climatologiques** : elle aide à reconstituer les changements climatiques anciens, en analysant l'évolution des écosystèmes au travers des fossiles.
- **Chronostratigraphie** : elle fournit des repères pour déterminer l'ordre des événements géologiques, ce qui est essentiel pour comprendre l'histoire de la Terre

Les caractéristiques d'une espèce bio-stratigraphiquement utile sont les suivantes :

- Extension stratigraphique courte ;
- Dispersion géographique rapide et large ;
- Bonne préservation ;
- Reconnaissance relativement facile.

L'unité fondamentale en biostratigraphie est le **biozone**.

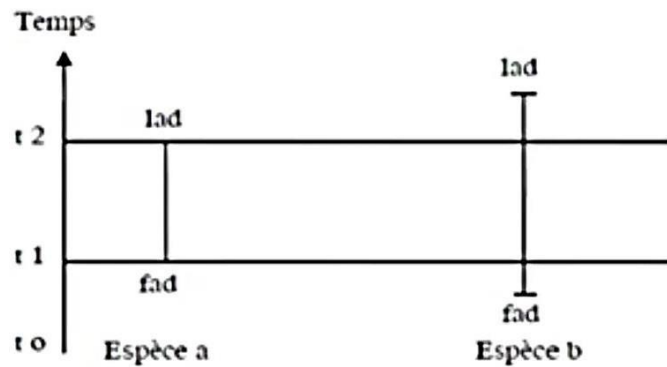
Le **biozone** est un ensemble de couches (ou une couche) correspondant à l'extension verticale et horizontale (géographique) d'un **taxon** (espèce caractéristique).

Le **taxon** est un groupe d'organismes qui descendent d'un même ancêtre et qui ont certains caractères communs.

Exemple : Les embranchements, classes, ordres, familles, espèces sont des taxons.

Les biozones sont fondés sur des apparitions ou disparitions d'espèces. Le moment d'apparition est le **FAD** = *First Appearance Datum* et le moment de disparition est le **LAD** =

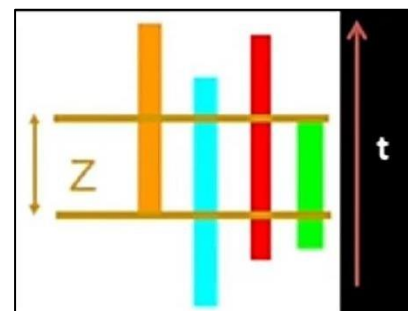
Last Appearance Datum.



On distingue plusieurs types de biozones :

- 1- **Une zone d'association ou d'assemblage** est un ensemble de couches dont le contenu en fossiles, ou en un certain type de fossiles, pris dans sa totalité, constitue une association naturelle qui le distingue des couches adjacentes.

Zone pendant laquelle les 4 espèces considérées sont présentes.



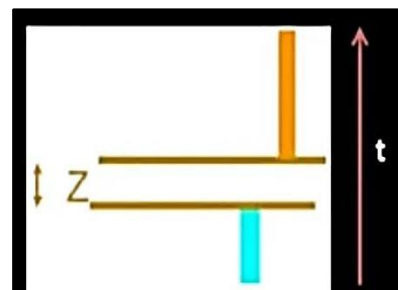
- 2- **Une zone d'extension** est l'ensemble des couches correspondant à l'extension totale de la présence d'une espèce. le mot extension s'entend à la fois horizontalement et verticalement.

Zone entre la première apparition (A) et la disparition (D) d'une espèce.

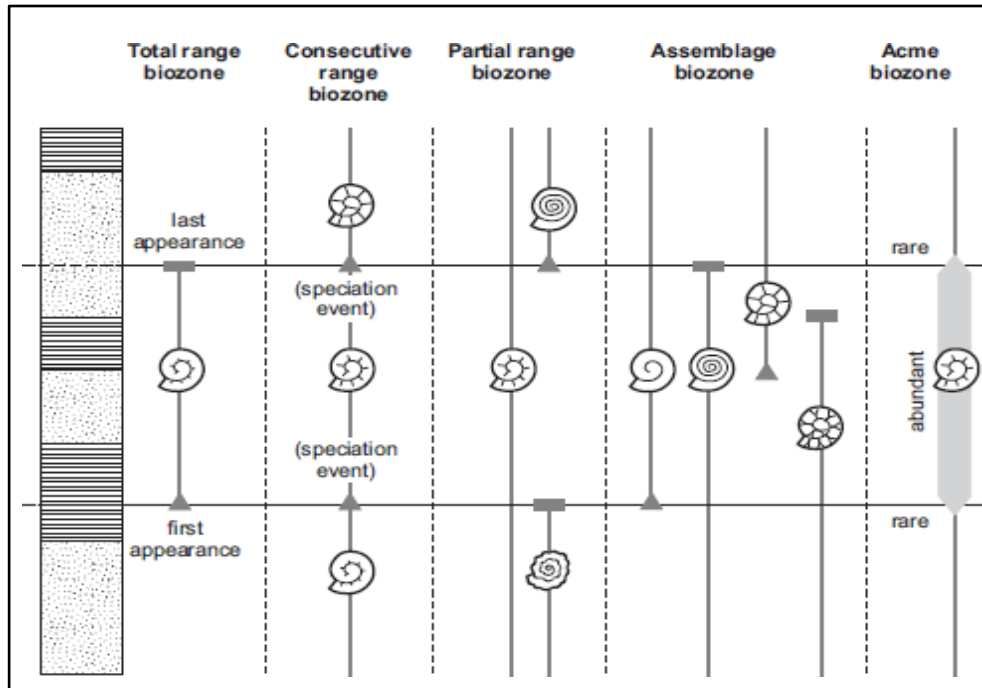


- 3- **Une zone d'intervalle** est l'intervalle entre deux horizons biostratigraphie donnés. La base ou le sommet d'une telle zone peut être marquée par la première apparition d'un taxon ou la dernière présence d'un autre taxon.

Zone entre la disparition d'une espèce et l'apparition d'une autre.



- 4- **Une zone d'abondance** : est définie par la prédominance ou la concentration élevée d'une ou de plusieurs espèces de fossiles dans les couches géologiques. Cette concentration élevée peut être le résultat de conditions environnementales favorables à la multiplication de ces espèces à une époque particulière.
- 5- **Une zone de distribution concomitante** : est caractérisée par la présence simultanée de plusieurs espèces de fossiles dans une séquence de roches sédimentaires sur une période donnée.



Les différents types de biozones.

Les fossiles évoluent avec le temps à travers un processus appelé diagenèse, qui est le résultat de changements chimiques et physiques qui se produisent au sein des roches sédimentaires qui les entourent. La diagenèse permet de transformer les restes organiques en fossiles et est un élément clé de l'utilisation des fossiles pour dater les roches.

1- Décès : Le processus commence par la mort de l'organisme. Pour devenir un fossile, les restes ne doivent pas être récupérés ni détruits.

2- Enterrement : Les restes doivent être rapidement enfouis dans des sédiments pour les protéger de la décomposition. Un enfouissement rapide dans de la boue, du sable, des cendres volcaniques ou d'autres sédiments est essentiel.

3- Décomposition et sédimentation : A mesure que les tissus mous se décomposent, des parties dures restent tandis que des couches supplémentaires de sédiments s'accumulent, se compactant au fil du temps.

4- Minéralisation : Les minéraux présents dans les eaux souterraines s'infiltrent lentement dans les vestiges, remplaçant la matière organique par les gisements minéraux. Cela peut créer une réplique pierreuse de la structure originale.

6- Erosion et Découverte : Au fil des millions d'années, l'activité géologique ou l'érosion peuvent exposer des fossiles à la surface. Ces fossiles exposés peuvent ensuite être découverts, étudiés et classés par les paléontologues.



Pourquoi les fossiles sont utiles pour dater les roches ?

Les fossiles sont utiles pour dater les roches en raison de leur relation avec la chronologie géologique. Voici comment cela fonctionne :

- Succession des fossiles : Les fossiles évoluent au fil du temps et sont caractéristiques de certaines périodes géologiques. En étudiant la succession des fossiles dans les couches sédimentaires, les géologues peuvent établir une chronologie relative des dépôts.
- Principe de superposition : Le principe de superposition stipule que les couches de sédiments plus anciennes se trouvent en bas, tandis que les couches plus récentes se trouvent en haut. En identifiant les fossiles caractéristiques dans ces couches, il est possible de déterminer l'âge relatif des roches.
- Index fossiles : Certains fossiles, appelés "index fossiles", sont particulièrement utiles pour dater les roches parce qu'ils étaient répandus et avaient une durée de vie géologiquement courte. Les couches contenant ces fossiles peuvent être datées de manière plus précise.

Caractéristiques des index fossiles

Les index fossiles sont généralement des organismes qui répondent à plusieurs critères spécifiques :

- Ils doivent avoir existé sur Terre pendant une période relativement courte sur l'échelle géologique.
- Leur apparition (FAD) et leur disparition (LAD) dans le registre fossile doivent être bien définies.
- Ils doivent avoir une large distribution géographique, ce qui signifie qu'ils se trouvaient dans de nombreuses régions du monde à la même époque.
- Ils doivent être relativement faciles à identifier et à distinguer d'autres fossiles, ce qui facilite leur reconnaissance dans les roches.

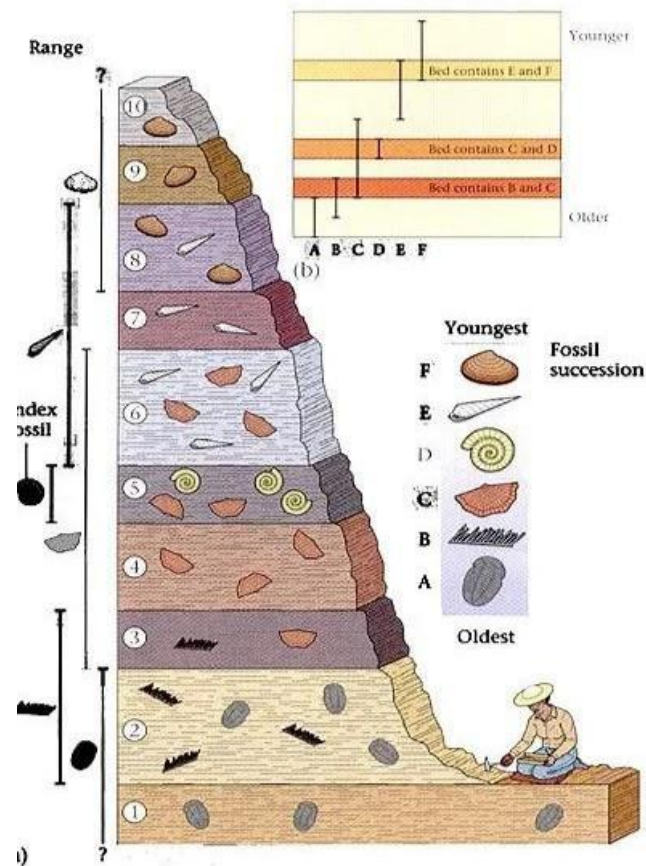
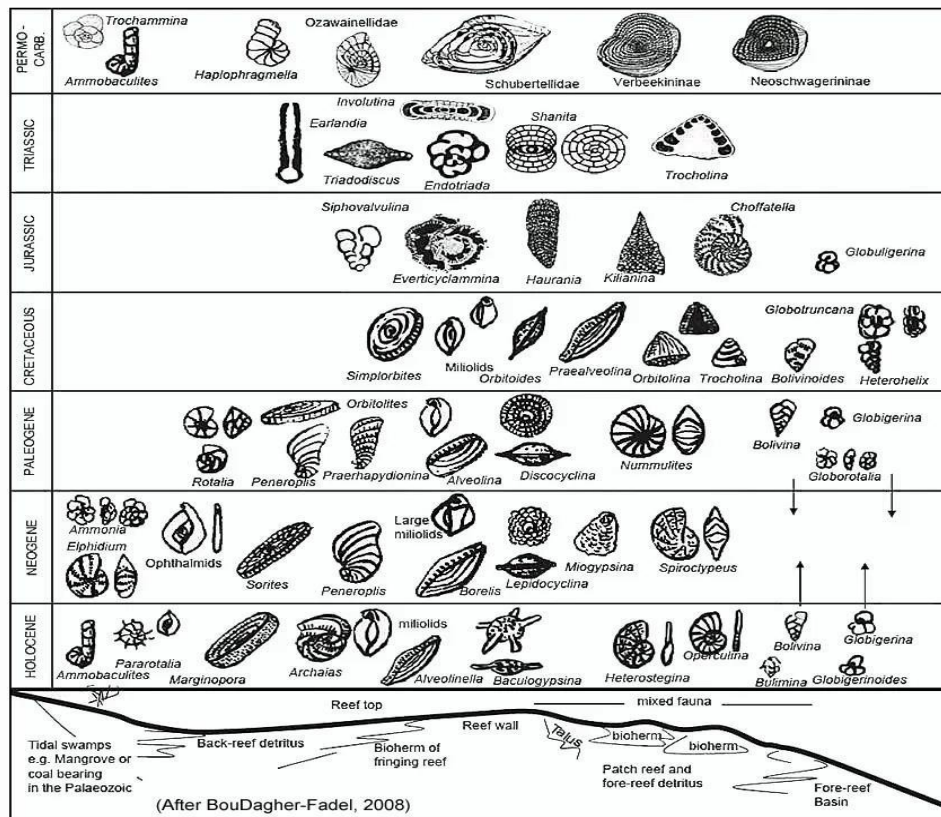
Utilité des index fossiles

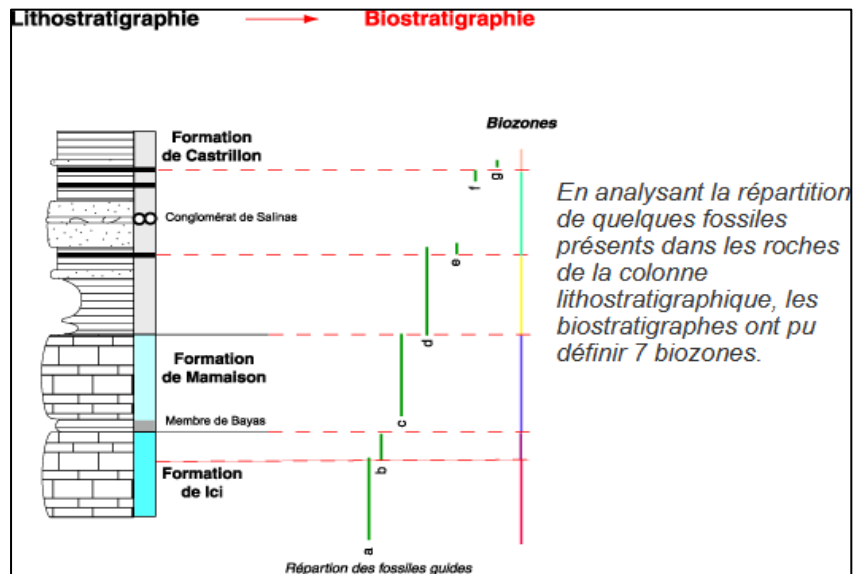
Les index fossiles sont utilisés pour plusieurs buts en biostratigraphie :

- Ils permettent de dater des couches géologiques relativement précisément, car leur FAD et leur LAD fournissent des limites temporelles.
- Ils servent de marqueurs pour identifier des intervalles de temps spécifiques, ce qui facilite la corrélation entre différentes régions géologiques.
- Ils aident à déterminer l'âge relatif des roches, c'est-à-dire à indiquer si une couche est plus ancienne ou plus récente qu'une autre.

Exemples d'index fossiles : Il existe de nombreux exemples d'index fossiles, chacun associé à une période géologique spécifique.

Exemples de fossiles index





Les Fossiles en tant qu'indicateurs de Paléoenvironnement

Les fossiles sont des indicateurs précieux de paléoenvironnements, c'est-à-dire des environnements passés de la Terre. Ils nous fournissent des informations cruciales sur les conditions environnementales qui prévalaient à l'époque où ces organismes vivaient et peuvent révéler des détails sur le climat, l'hydrologie, la géographie et l'évolution de la planète.

- **Associations fauniques et florales** : Les associations de fossiles d'animaux et de plantes dans une couche géologique donnée fournissent des informations sur l'écosystème de l'époque. Par exemple, la présence de fossiles de palmiers dans une couche peut indiquer un climat chaud et tropical, tandis que la présence de fossiles de conifères suggère un climat plus tempéré.
- **Fossiles de micro-organismes** : Les micro-organismes tels que les foraminifères, les diatomées et les pollens sont souvent utilisés pour reconstituer les conditions environnementales passées. Par exemple, les foraminifères benthiques et planctoniques dans les sédiments marins sont sensibles à la température de l'eau et à la salinité, ce qui permet de déduire des informations sur la composition de l'eau de mer ancienne.
- **Fossiles d'invertébrés marins** : Les fossiles d'invertébrés marins, tels que les coraux, les éponges et les coquillages, fournissent des indices sur la qualité de l'eau, la profondeur et la température de l'océan à l'époque de leur existence.
- **Fossiles de vertébrés terrestres** : Les fossiles de dinosaures, de mammifères anciens et d'autres vertébrés terrestres permettent de reconstituer les paléoenvironnements terrestres, y compris la végétation, le climat et les régimes alimentaires.
- **Trace fossiles** : Les traces fossiles, telles que les empreintes de pas, les terriers et les excréments, donnent des informations sur les comportements et les interactions entre les organismes, ainsi que sur les conditions environnementales, telles que la texture du sol et le niveau de l'eau.
- **Isotopes stables** : L'analyse des isotopes stables dans les coquilles de fossiles marins et les dents d'organismes terrestres peut fournir des informations sur les conditions de température, de salinité, d'altitude et de régime alimentaire.
- **Fossiles de plantes** : Les fossiles de plantes, y compris les feuilles, les troncs, les pollens et les graines, sont essentiels pour la reconstitution des paléoenvironnements terrestres, tels que les forêts anciennes, les marécages, les prairies et les climats.
- **Fossiles de micro-organismes marins** : Les assemblages de nannofossiles calcaires et de radiolaires marins peuvent indiquer les conditions de l'eau de mer, notamment la température, la salinité et la productivité.

Les Limitations de la Biostratigraphie

La biostratigraphie est une méthode précieuse pour dater les roches et reconstituer l'histoire géologique de la Terre en utilisant des fossiles. Cependant, elle présente certaines limitations et défis.

- Présence de fossiles absents ou rares : Dans certaines régions géologiques ou couches rocheuses, il peut être difficile de trouver des fossiles, car les conditions de préservation n'étaient pas favorables. Cela rend la biostratigraphie difficile à appliquer dans ces endroits.
- Fossiles éphémères : Certains fossiles, en particulier les micro-organismes, peuvent avoir des durées de vie très courtes à l'échelle géologique. Cela signifie qu'ils ne sont pas utiles pour dater des couches géologiques sur de longues périodes de temps.
- Migrations géographiques : Les populations d'organismes, en particulier les vertébrés, peuvent avoir migré géographiquement au fil du temps, ce qui rend difficile la corrélation des couches rocheuses entre différentes régions.
- Perturbations géologiques : Les mouvements tectoniques, les plissements, les failles et d'autres perturbations géologiques peuvent déplacer des couches rocheuses et perturber la succession des fossiles. Cela peut rendre difficile l'application du principe de superposition.
- Erreurs de datation : La datation relative basée sur la biostratigraphie peut souffrir d'erreurs si les fossiles utilisés comme indicateurs sont mal identifiés ou s'ils ont des durées de vie géologique plus longues ou plus courtes que prévu.
- Événements de faune et flore majeurs : Les extinctions de masse ou les événements de radiation évolutive peuvent perturber les associations de fossiles et compliquer la datation relative, car de nombreuses espèces peuvent apparaître ou disparaître simultanément.
- Limitations de la datation absolue : La biostratigraphie permet de dater les roches de manière relative, mais elle ne fournit pas de dates absolues. Pour obtenir des âges absolus, d'autres méthodes de datation, telles que la datation radiométrique, doivent être utilisées en conjonction avec la biostratigraphie.
- Imperfection des enregistrements fossiles : Les enregistrements fossiles ne sont pas complets, car de nombreux organismes n'ont pas été préservés sous forme de fossiles. Cela signifie que certaines périodes de temps ou certains environnements peuvent être sous-représentés.

II. CHRONOSTRATIGRAPHIE

Introduction

La chronostratigraphie est une sous-discipline de la géologie qui se concentre sur la division de l'histoire de la Terre en unités temporelles basées sur les événements stratigraphiques. En d'autres termes, elle permet de dater et de classer les différentes couches de roches (ou formations géologiques) selon leur âge et leur position dans le temps.

La **chronostratigraphie** consiste à établir des correspondances entre les ensembles de couches et les intervalles de temps.

Chaque unité chronostratigraphie qui représente un ensemble de couches équivaut au temps nécessaire à son dépôt.

Les **unités chronostratigraphie** sont des unités de références servant de base aux corrélations.

Les principales unités de la chronostratigraphie

Les principales unités chronostratigraphiques sont les suivantes :

- Plusieurs *étages* forment une *série*
- Plusieurs *séries* forment un *système*
- Plusieurs *système* forment un *érathème*
- Plusieurs *érathèmes* forment un *éonothème*.

Unité Chronostratigraphie	Son équivalent en Géochronologie	Exemple
Eonothème	Eon	Protérozoïque
Erathème	Ere	Paléozoïque
Système	Période	Crétacé
Série	Epoque	Néogène
Etage	Age	Cénomaniens

Echelle Internationale des temps géologiques :

Elle combine à la fois l'échelle relative des stratigraphes et les données de géochronologie absolue.

L'unité de base est donc l'Etage = ensemble des strates comprises entre deux coupures dont les caractéristiques constituent un stratotype.

Stratotypes : Pour chaque unité de temps, un emplacement spécifique appelé "stratotype" est défini. Le **stratotype** est une séquence de couches rocheuses représentative contenant des fossiles ou des caractéristiques géologiques utilisées pour définir cette unité de temps.

Voici quelques-uns des événements marquants dans chaque subdivision, en commençant par les éons et en descendant jusqu'aux étages géologiques :

1. les Eons (= Eonothèmes)

Intervalle de temps géologiques le plus grand de plusieurs centaines de millions d'années (MA).

On distingue 4 Eons :

1. Le *Hadéen* (-4600Ma à -3800 Ma) ; Formation de la terre.
2. L'*Archéen* (-3800 Ma à -2500 Ma) ;

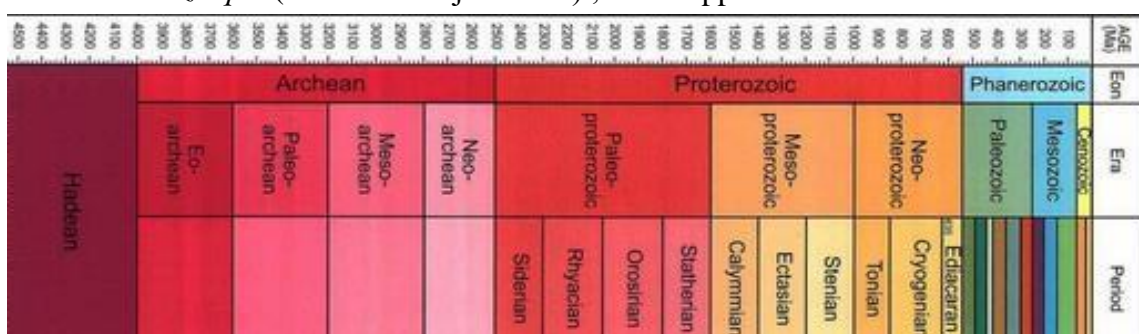
Pendant l'Archéen, la Terre était encore en grande partie inhospitalière, avec une atmosphère riche en gaz volcaniques. Les premières formes de vie, les cyanobactéries, ont évolué et commencé à libérer de l'oxygène dans l'atmosphère, provoquant la Grande Oxydation il y a environ 2,4 milliards d'années.

3. Le *Protérozoïque* (-2500 Ma à – 542 Ma) ;

L'Éon Protérozoïque a vu l'émergence de cellules eucaryotes, plus complexes, et l'apparition des premiers organismes multicellulaires. C'est également une période marquée par des glaciations majeures, telles que la "Terre boule de neige."

Hadéen + Archéen + Protérozoïque = Précambrien.

4. Le *Phanérozoïque* (-542 Ma à aujourd'hui) ; Développement de la vie.



2. les Eres (= Erathèmes) :

Leurs limites sont marquées par de grands bouleversement biologique (grandes extinction), paléogéographique (orogénèse).

Eon Phanérozoïque = 3 Eres

- Cénozoïque (vie récente -65,5 Ma à aujourd'hui)

L'ère Cénozoïque a été témoin de l'explosion de la diversité des mammifères et de l'ascension de l'homme. Elle comprend l'événement de l'extinction des dinosaures à la fin du Crétacé et le développement de l'homme moderne à partir de ses ancêtres primates.

- Mésozoïque (vie intermédiaire -251 Ma à -65,5 Ma),

Cette ère est marquée par l'âge des dinosaures, avec des événements tels que la Pangée se divisant en Laurasia et Gondwana, ainsi que l'extinction massive à la fin du Crétacé.

- Paléozoïque (vie ancienne -542 Ma -245)

Eon Protérozoïque = 3 Eres

Néoprotérozoïque (-1000 Ma à -542 Ma), Mésoprotérozoïque (-1600 Ma à 1000 Ma),

Paléoprotérozoïque (-2500 Ma à -1600 Ma).

Eon Archéen = 4 Eres

Néoarchéen (-2800 Ma à -2500 Ma), Mésoarchéen (-3200 Ma à -3800Ma), Paléoarchéen (-3600 Ma à -3200Ma), Eoarchéen (-4000 Ma à -3600Ma).

3. les périodes (= Systèmes)

Ils regroupent des étages sur des références lithologiques

- ✓ Carbonifère
- ✓ Crétacé

Ou des références paléontologiques :

- ✓ Nummulitique = Paléogène. Durée moyenne entre 20 Ma et 70 Ma

4. les Epoques (Séries)

La subdivision en époque est basée sur les associations de fossiles stratigraphiques spécifiques :

- ✓ Crétacé inférieur
- ✓ Crétacé supérieur
- ✓ Eocène : l'éocène a vu une grande diversification des mammifères et des premiers (ancêtres des chevaux). Il était également marqué par un climat chaud.
- ✓ Miocène. Durée moyenne d'environ 15 M a (sauf pour le quaternaire).

5. les Etages (Age)

- ✓ Yprésien : L'étage Yprésien est associé à la montée des eaux marines au début de l'Éocène, provoquant la transgression marine et la diversification des faunes marines.
- ✓ Lutétien : L'étage Lutétien est caractérisé par une période de réchauffement climatique, avec des impacts sur les faunes terrestres et marines.
 - Barrémien (Barème en France).
 - Tortonien (Tortona en Italie).

Ère	Période	Epoque	Engage	Cénozoïque												Mésozoïque ou secondaire																	
				Quaternaire						Tertiaire						Jurassique						Trias											
				Holocène			Pliocène			Néogène			Paléogène			Supérieur			Moyen			Inférieur			Supérieur			Moyen			Inférieur		
				Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.	Sup.	Moy.	Inf.



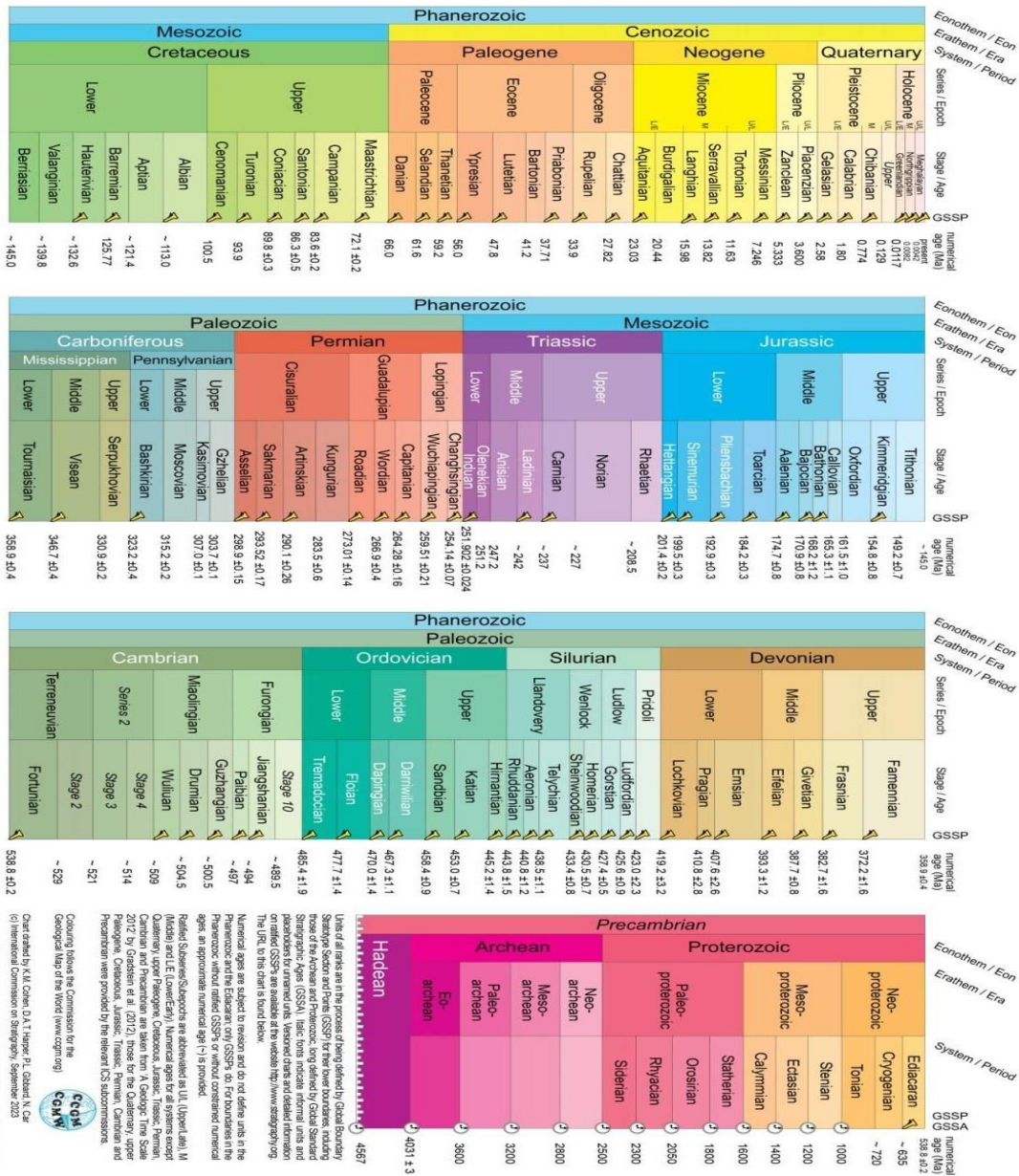
www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy

v 2023/09



INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART



Utilisation des Échelles Chronostratigraphiques

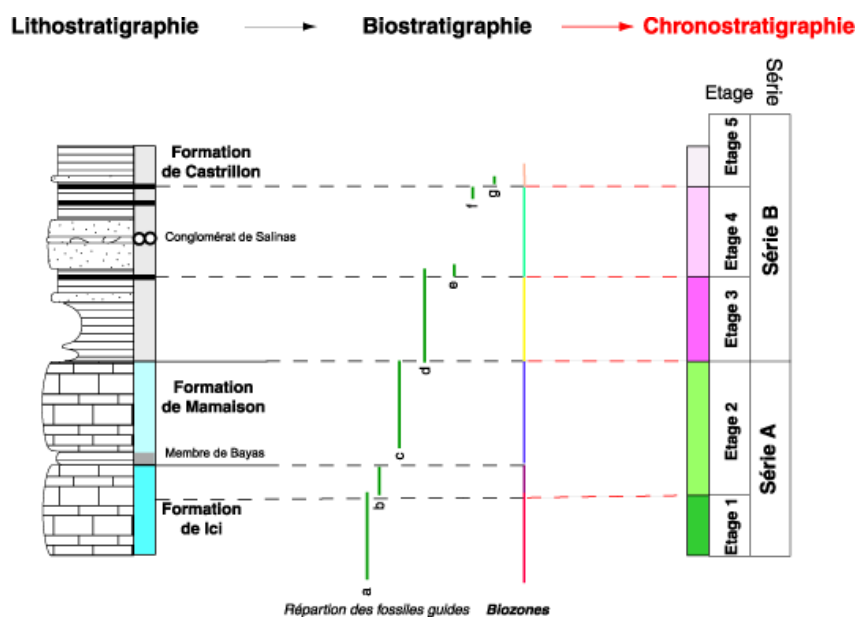
- Datation Relative :** Les échelles chronostratigraphiques permettent de dater les couches rocheuses de manière relative. Cela signifie qu'elles aident à déterminer l'âge relatif des roches par rapport les unes aux autres. Par exemple, elles permettent de dire si une couche est plus ancienne ou plus récente que la couche voisine. Cette datation repose sur la superposition des couches, le principe de l'horizontalité initiale, et la présence de fossiles indicatifs.
- Corrélation Globale :** Les échelles chronostratigraphiques servent de base pour corréler les couches rocheuses d'une région à une autre et même à l'échelle mondiale. Cela permet aux géologues de relier des événements géologiques et des fossiles spécifiques, facilitant ainsi la compréhension des changements environnementaux et de l'évolution de la vie au fil du temps.
- Identification des Événements Marquants :** Les échelles chronostratigraphiques sont utilisées pour identifier des événements marquants dans l'histoire de la Terre. Cela peut inclure des extinctions massives, des éruptions volcaniques majeures, des changements climatiques significatifs, des variations du niveau de la mer, etc. Les géologues associent ces événements à des unités de temps spécifiques pour en faciliter la référence.

4. **Études Environnementales et Climatiques** : Les échelles chronostratigraphiques sont cruciales pour les études environnementales et climatiques. Elles permettent de reconstruire l'histoire des climats passés, des changements océaniques, des variations du niveau de la mer et de l'évolution des paysages terrestres. Cela aide à prédire les futures tendances environnementales et climatiques.
5. **Exploration des Ressources** : Les échelles chronostratigraphiques sont utilisées dans l'exploration de ressources naturelles telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon et les minéraux. Elles aident à localiser des formations géologiques potentiellement riches en ressources et à déterminer l'âge des roches hôtes.
6. **Recherche en Paléontologie** : Les paléontologues utilisent les échelles chronostratigraphiques pour situer les fossiles dans leur contexte temporel. Cela permet de reconstituer l'évolution de la vie sur Terre, d'étudier les extinctions et les radiations biologiques, et de comprendre les relations évolutives entre les espèces.

Méthodes de datation et liens avec l'échelle chronostratigraphique

Les échelles chronostratigraphiques sont basées sur des techniques de datation relatives et absolues :

- **Datation relative** : Basée sur la position des couches géologiques les unes par rapport aux autres. Le principe fondamental est que les couches les plus profondes (les plus anciennes) se trouvent sous les couches plus récentes.
- **Datation absolue** : Utilisation de méthodes comme la datation au radiocarbone, la datation par potassium-argon, ou d'autres techniques isotopiques pour obtenir une estimation précise de l'âge d'une couche ou d'un événement géologique.
- **Biostratigraphie** : Utilisation des fossiles pour dater les couches géologiques. Certains fossiles ont une distribution temporelle bien définie, ce qui permet de déterminer l'âge des strates en les associant à ces fossiles spécifiques.



A l'aide des biozones précédemment définies, 5 étages ont pu être délimités en se référant à une échelle chronostratigraphique internationale.

Importance de l'échelle chronostratigraphique dans la science moderne

L'échelle *chronostratigraphique* est essentielle non seulement pour les géologues et les paléontologues, mais aussi pour d'autres domaines scientifiques, tels que :

- **L'étude des changements climatiques** : En comprenant les périodes de réchauffement ou de refroidissement, les scientifiques peuvent mieux interpréter les tendances climatiques passées et les appliquer à des modèles modernes.
- **La recherche en astrophysique** : Les événements géologiques sont souvent utilisés pour tester des hypothèses sur les processus cosmiques (ex. : l'impact d'astéroïdes ou la formation de la Terre).
- **L'exploitation des ressources naturelles** : L'étude des strates et des échelles chronostratigraphiques aide à localiser et à dater les ressources minérales, fossiles et énergétiques.

Limitations de la méthode chronostratigraphique

- *Manque de Datation Absolue* :

La chronostratigraphie fournit des âges relatifs, ce qui signifie qu'elle permet de classer les événements et les couches rocheuses dans un ordre chronologique, mais sans donner d'âges numériques précis. Pour obtenir des datations absolues, il est souvent nécessaire de recourir à des méthodes de datation radiométrique, ce qui peut être coûteux et complexe.

- *Séquences Incomplètes* :

Les séquences stratigraphiques complètes ne sont pas toujours présentes dans toutes les régions. L'érosion, la tectonique des plaques, et d'autres processus géologiques peuvent entraîner la perte de certaines couches rocheuses, ce qui complique la corrélation entre différentes régions.

- *Fossiles Absents* :

Dans de nombreuses régions, les fossiles peuvent être absents ou rares, ce qui rend difficile la datation relative basée sur les fossiles index. Les méthodes de datation alternative, telles que la datation radiométrique, sont alors nécessaires.

- *Conflits d'Interprétation* :

Les limites stratigraphiques peuvent être interprétées de différentes manières par différents chercheurs. Les conflits d'interprétation peuvent survenir, ce qui rend la datation relative sujette à des débats et à des révisions.

- *Événements Rapides* :

La méthode chronostratigraphique est mieux adaptée pour dater des événements géologiques relativement lents, tels que les changements évolutifs dans la faune fossile. Elle peut être moins précise pour dater des événements géologiques rapides, tels que les éruptions volcaniques ou les impacts de météorites.

- *Dépendance aux Données de Terrain* :

La chronostratigraphie repose largement sur des données de terrain, et dans certaines régions, l'accès aux roches exposées peut être limité ou difficile, ce qui complique l'obtention de données pertinentes.

III. TECTONOSTRATIGRAPHIE

Introduction

La **Tectonostratigraphie** est une approche très détaillée et spécifique de l'étude des roches et des structures géologiques, qui examine la relation entre les événements tectoniques (les mouvements de la croûte terrestre) et les dépôts sédimentaires au fil du temps. Cette méthode d'analyse est particulièrement utile pour comprendre l'histoire géologique des bassins sédimentaires, les formations de montagnes et d'autres structures géologiques complexes. Pour mieux comprendre cette discipline, examinons ses principes à travers des exemples concrets.

Concepts fondamentaux de la tectonostratigraphie

La tectonostratigraphie repose sur deux grandes idées :

- **La stratigraphie** : étude des couches géologiques et de leur ordre de dépôt.
- **La tectonique** : étude des forces qui modifient la structure de la croûte terrestre.

En combinant ces deux approches, la tectonostratigraphie permet d'interpréter l'histoire géologique d'une région, notamment en analysant comment les forces tectoniques ont influencé la sédimentation.

Exemples de processus tectonostratigraphiques

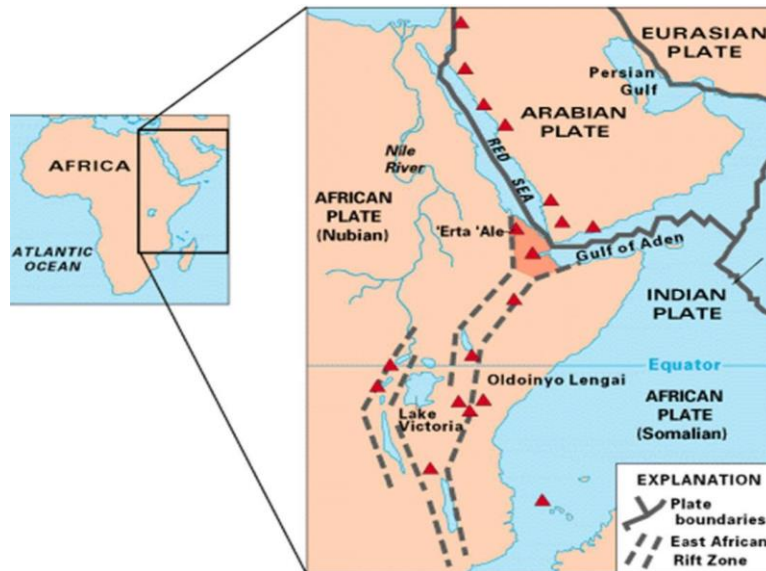
a. Bassins de rift (Extension tectonique)

Les bassins de rift se forment lorsque des plaques tectoniques s'écartent les unes des autres, créant un bassin dépressif où les sédiments peuvent s'accumuler. Ce type de bassin est un excellent exemple de la tectonostratigraphie en action, car l'activité tectonique (extension) déforme la croûte terrestre et crée des conditions favorables à l'accumulation de sédiments.

Le bassin du Rift est-africain

- Ce bassin est une région tectonique active où la croûte terrestre est étirée en raison de l'extension lithosphérique.
- L'extension crée un rift, un fossé ou une dépression dans lequel les sédiments, comme les grès et les argiles, s'accumulent au fil du temps.
- La tectonostratigraphie de cette région montre une évolution de la stratigraphie liée directement à l'étirement et au graben (bassin intrusif) créé par l'activité tectonique. Les strates qui se forment dans ces zones de rift sont souvent assez jeunes et permettent de comprendre les phases d'extension.

Dans le cas de ce bassin, on observe des changements dans la nature des sédiments déposés : au début de l'ouverture du rift, des sédiments volcaniques peuvent être déposés, suivis par des sédiments plus classiques (grès, argiles) avec l'expansion du rift.



b. Bassins de subduction (Compression tectonique)

Les bassins de subduction se forment lorsqu'une plaque tectonique est forcée sous une autre (subduction), ce qui entraîne une compression et une déformation des couches sédimentaires. Cette activité crée des structures géologiques complexes, comme des plis, des failles et des zones de chevauchement.

Le bassin de la mer des Caraïbes

- La subduction de la plaque océanique sous la plaque continentale (plaque sud-américaine) a créé un bassin sédimentaire complexe. Cette région a été fortement influencée par la tectonique de subduction, où la déformation compressive des sédiments a créé une série de structures géologiques, y compris des plis, des failles et des chevauchements.
- La tectonostratigraphie de cette région montre des couches sédimentaires qui ont été déformées, plissées et parfois inversées sous l'effet des forces de compression. Les sédiments qui se déposaient auparavant horizontalement sont maintenant courbés et comprimés.

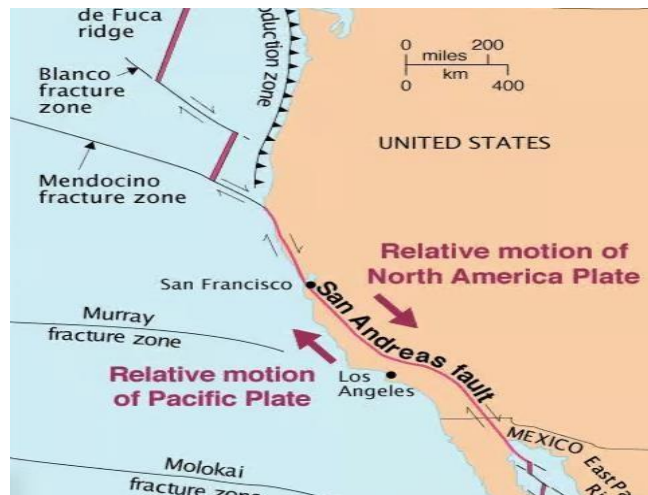
Cette déformation tectonique a conduit à la formation d'anticlinaux et de synclinaux dans la région, qui sont des structures en forme de montagnes ou de vallées résultant de la compression.



Représentation schématique de la double subduction de la plaque Caraïbe.

La faille de San Andreas (Californie, USA)

- La faille de San Andreas est une faille transformante où les plaques pacifique et nord-américaine glissent horizontalement l'une par rapport à l'autre.
- Cette activité a déformé les strates géologiques au fil du temps, créant une série de discontinuités dans les couches de roches et produisant des structures géologiques particulières.
- Les recherches tectonostratigraphiques dans cette zone montrent comment les dépôts sédimentaires ont été déplacés et fracturés à cause des mouvements de la faille, ce qui a affecté la stratigraphie de la région.



Importance de la Tectonostratigraphie dans la géologie appliquée

La tectonostratigraphie est utilisée pour résoudre de nombreux problèmes géologiques pratiques, notamment dans l'exploration des ressources naturelles telles que le pétrole, le gaz et les minéraux. Voici quelques exemples d'applications concrètes :

- **Exploration pétrolière et gazière** : La compréhension de l'évolution des bassins sédimentaires sous l'influence des processus tectoniques aide à localiser des réservoirs d'hydrocarbures. Par exemple, dans les bassins de rift ou les zones de subduction, les déformations tectoniques peuvent piéger des hydrocarbures sous des structures comme des anticlinaux ou des failles.
- **Évaluation des risques sismiques** : L'étude des failles et des mouvements tectoniques dans des zones actives, comme la faille de San Andreas, permet d'évaluer les risques de séismes et d'anticiper les impacts sur les infrastructures.

Principaux Processus Géologiques Liés à la Tectonostratigraphie

Les principaux processus géologiques liés à la tectonostratigraphie incluent les suivants :

1. Subsidence et Levée de la Croûte

- **Subsidence** : C'est le processus par lequel une région de la croûte terrestre s'enfonce sous l'effet de forces tectoniques. La subsidence crée des dépressions où les sédiments peuvent s'accumuler pour former des formations stratigraphiques. Ce processus est typiquement associé aux bassins sédimentaires, tels que les fosses océaniques et les bassins continentaux.
- **Levée** : À l'inverse, la levée est le soulèvement d'une région de la croûte terrestre en réponse à des forces tectoniques compressives ou extensives. La levée peut entraîner l'érosion et la création de nouvelles surfaces terrestres.

2. Plissement

- Le **plissement** est une déformation ductile des couches de roches qui se produit sous l'effet de forces tectoniques comprimant la croûte terrestre. Il peut donner naissance à des structures géologiques telles que des anticlinaux (plis convexe) et des synclinaux (plis concaves). Ces

plissements influencent l'agencement des couches stratigraphiques et peuvent jouer un rôle majeur dans la distribution et la préservation des ressources minérales et énergétiques.

3. Extension et Compression

- L'extension (divergence des plaques) et la compression (convergence des plaques) sont des processus fondamentaux de la tectonique des plaques qui modifient la structure de la croûte terrestre. L'extension mène à la formation de bassins d'effondrement (ex. fosses océaniques), tandis que la compression peut engendrer des chaînes de montagnes et des plis. Ces processus affectent la distribution des roches sédimentaires et la manière dont elles sont stratifiées.

4. Subduction et Métamorphisme

- **Subduction** : Ce processus se produit lorsqu'une plaque tectonique océanique dense plonge sous une plaque plus légère, souvent continentale. Cela entraîne des cycles de déformation et de métamorphisme qui modifient les formations géologiques dans les zones de subduction. Le métamorphisme généré dans ces environnements peut être directement lié aux conditions de pression et de température associées à la subduction.
- Les zones de subduction peuvent aussi entraîner la formation de chaînes volcaniques et de fosses océaniques, affectant les séries stratigraphiques.

5. Formation de Bassins Sédimentaires

- L'interaction entre les forces tectoniques et les processus de dépôt sédimentaire forme des bassins où des sédiments peuvent s'accumuler et former des couches géologiques. Ces bassins peuvent être liés à des processus d'extension, comme dans les fosses océaniques, ou à des processus de compression, comme dans les bassins intracontinentaux associés aux chaînes de montagnes.

6. Volcanisme et Accumulation de Laves

- Le volcanisme est souvent le résultat d'une activité tectonique, notamment à la marge des plaques convergentes ou divergentes. Les couches de lave déposées lors des éruptions volcaniques peuvent interagir avec les couches sédimentaires, créant des unités stratigraphiques distinctes qui sont souvent identifiées dans l'analyse tectonostratigraphique.

7. Rifting et Formation de Nouveaux Océans

- Le rifting est le processus par lequel une plaque continentale se divise sous l'effet de forces d'extension, créant un bassin où de nouvelles roches océaniques peuvent se former, comme dans les dorsales océaniques. Ce processus est directement lié à la tectonique des plaques et a un impact majeur sur la distribution des couches géologiques dans les zones de rifting.

Quelques Méthodes d'Étude en Tectonostratigraphie

Voici quelques méthodes clés utilisées pour étudier cette discipline :

- **Sismique Réflexion** :

Utilisation d'ondes sismiques réfléchies pour cartographier la structure des couches géologiques et identifier les déformations tectoniques.

- **Sismique Réfraction** :

Mesure des temps de propagation des ondes sismiques pour déterminer les propriétés des couches sédimentaires et rocheuses.

- **Gravimétrie** :

Mesure des variations de la force gravitationnelle pour cartographier les variations de densité des matériaux sous la surface.

- **Magnétométrie** :

Mesure des variations du champ magnétique terrestre pour détecter les variations dans la composition des roches.

Techniques de Forage et d'Échantillonnage

- Forage Direct :

Utilisation de foreuses pour recueillir des échantillons de roches directement du sous-sol.

- Carottiers :

Utilisation de carottes de forage pour prélever des échantillons de sédiments, permettant une analyse détaillée des couches.

- Échantillonnage de Sédiments Marins :

Utilisation de carottes sédimentaires pour étudier l'histoire sédimentaire des fonds marins.

- Échantillonnage de Carrières :

Prélèvement d'échantillons dans des carrières pour étudier des formations géologiques exposées.

- Échantillonnage de Surface :

Collecte d'échantillons de roches à partir de la surface pour une analyse géochimique.

- Échantillonnage de Sub-surface :

Utilisation de méthodes géophysiques pour guider les emplacements de forage dans des zones spécifiques.

- Datation Radiométrique :

Utilisation de méthodes radiométriques pour déterminer l'âge des échantillons.

- Analyse des Fossiles :

Étude des fossiles présents dans les couches pour aider à dater et à interpréter les séquences.

Quelques domaines d'application de la tectonostratigraphie

Voici quelques domaines d'application de la tectonostratigraphie :

1. **Étude des bassins sédimentaires** : La tectonostratigraphie permet de reconstituer l'évolution des bassins sédimentaires en fonction des mouvements tectoniques (extension, compression, subduction, etc.). Cela aide à mieux comprendre la dynamique géologique et à prédire les zones susceptibles de receler des ressources naturelles comme le pétrole, le gaz, ou les minéraux.
2. **Prospection pétrolière et gazière** : En analysant la relation entre la tectonique et les couches sédimentaires, la tectonostratigraphie est essentielle pour localiser les réservoirs de pétrole et de gaz. Elle permet de mieux comprendre les conditions de formation et de piège des hydrocarbures dans les bassins.
3. **Analyse des zones de subduction et de collision** : La tectonostratigraphie aide à l'étude des zones de subduction et de collision, en identifiant les structures de déformation liées à ces processus (plis, failles, etc.). Cela permet de mieux comprendre la formation des chaînes de montagnes et des arcs insulaires.
4. **Reconstruction paléogéographique** : Grâce à l'étude des couches sédimentaires et des déformations tectoniques, la tectonostratigraphie permet de reconstruire l'évolution des anciens environnements géographiques, en suivant les mouvements des plaques tectoniques à travers le temps.
5. **Séismologie et gestion des risques** : La tectonostratigraphie peut être utilisée pour mieux comprendre les zones à risque sismique en analysant les déformations tectoniques dans les strates géologiques. Cela est crucial pour la gestion des risques liés aux tremblements de terre.
6. **Études des failles et des zones de cisaillement** : Elle permet d'étudier la formation et l'évolution des failles et des zones de cisaillement, éléments clés dans la compréhension des mouvements relatifs des plaques tectoniques et de leur influence sur les environnements géologiques.
7. **Études de l'impact des mouvements tectoniques sur le climat et les écosystèmes** : En analysant l'histoire tectonique d'une région et son influence sur les bassins sédimentaires, la tectonostratigraphie permet d'étudier les impacts de ces mouvements sur le climat et les changements environnementaux à travers le temps.

IV. SISMOSTRATIGRAPHIE

Introduction

La sismostratigraphie est une discipline scientifique interdisciplinaire qui combine la sismique et la stratigraphie pour l'étude des couches géologiques enfouies. Elle est principalement utilisée pour l'analyse des strates sous la surface terrestre grâce à des techniques de prospection sismique, principalement en exploration géophysique pour les ressources naturelles comme le pétrole, le gaz ou l'eau, ainsi que pour des études géologiques plus fondamentales.

Principe Fondamental

La sismostratigraphie repose sur l'étude de la propagation des ondes sismiques à travers les couches de la Terre, dont la vitesse varie selon les propriétés des roches. Lorsqu'une onde rencontre une interface entre deux couches ayant des caractéristiques élastiques différentes, elle est partiellement réfléchie et partiellement transmise. En mesurant le temps que met l'onde réfléchie pour revenir à la surface, les géophysiciens peuvent déterminer la profondeur et la position des interfaces géologiques.

Les données sismiques sont généralement collectées à l'aide de profils sismiques, où une source d'énergie, comme un explosif ou un marteau génère les ondes sismiques, et des récepteurs (géophones) enregistrent leur retour. L'analyse de ces données permet de cartographier la subsurface.

Les ondes sismiques et leur interaction avec les couches géologiques

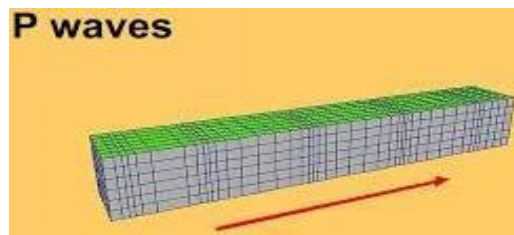
Les ondes sismiques : Ce sont des énergies provoquées par la rupture soudaine de roches dans la terre.

Les ondes sismiques ont deux types principaux :

1- Ondes P (ondes de compression) :

Les ondes P sont des ondes de compression longitudinales qui se propagent dans la même direction que la vibration. Elles peuvent se propager à travers les milieux solides, liquides et gazeux.

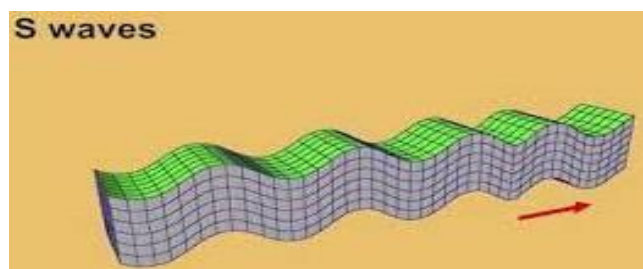
Dans les couches géologiques, les ondes **P** provoquent des compressions et des dilatations successives des particules du matériau. Elles sont donc capables de se propager à travers des couches variées, y compris les roches sédimentaires, métamorphiques et ignées.

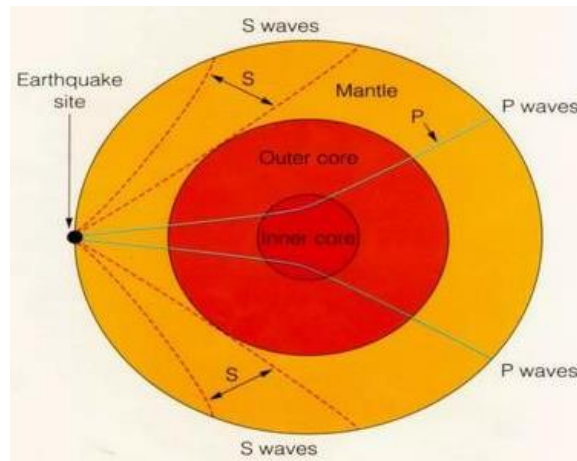


2. Ondes S (ondes de cisaillement) :

Les ondes S sont des ondes de cisaillement transversales qui se propagent perpendiculairement à la direction de la vibration. Elles ne peuvent se propager que dans des milieux solides, car elles nécessitent une résistance au cisaillement.

Les ondes S provoquent des mouvements de cisaillement perpendiculaires à la direction de propagation, ce qui peut être bloqué ou réfléchi par des interfaces rocheuses.





Interaction avec les Couches Géologiques

Lorsque ces ondes sismiques traversent les différentes couches géologiques, plusieurs phénomènes d'interaction se produisent, permettant aux géophysiciens d'obtenir des informations sur la sub-surface :

Réfraction des Ondes Sismiques

La réfraction se produit lorsque les ondes sismiques passent à travers une couche ayant une vitesse d'onde différente. Cela peut se produire lorsque les ondes sismiques pénètrent dans des couches géologiques avec des propriétés élastiques différentes.

La loi de Snell-Descartes décrit la relation entre les angles d'incidence et de réfraction dans le processus de réfraction sismique.

La réfraction peut être utilisée pour déterminer l'épaisseur des couches géologiques et pour estimer les propriétés élastiques des matériaux.

Méthode sismique de réfraction

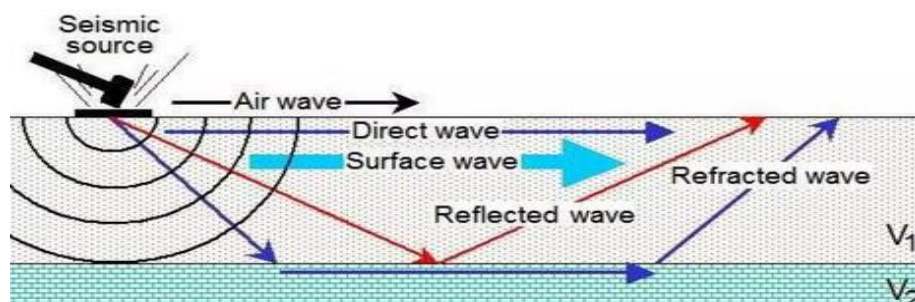
Méthode sismique de réfraction pour déterminer la structure des formations sous-superficielles.

- **Principe**

Les ondes sismiques artificielles sont réfractées pour être courbées à la surface de discontinuité alors qu'elles se déplacent vers le bas sous la surface.

- **Processus**

- Lorsque les ondes rencontrent une discontinuité à un angle critique (angle d'incidence pour lequel l'angle de réflexion est de 90°), certaines des ondes sont réfractées ou courbées
- Les ondes réfractées se déplaceront le long du haut de la couche sous-jacente à la surface de discontinuité avec une vitesse plus grande que celle à laquelle elles ont traversé la couche supérieure parce que la vélocité des ondes sismiques augmente avec la profondeur.



Réflexion des Ondes Sismiques

Lorsqu'une onde sismique rencontre une interface entre deux matériaux ayant des propriétés élastiques différentes, une partie de l'onde est réfléchie à la surface.

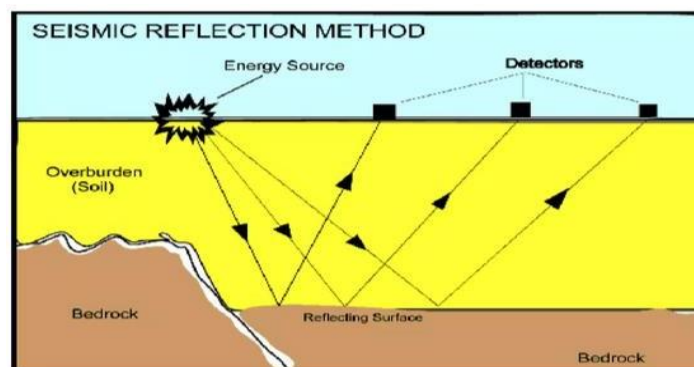
La loi de réflexion sismique stipule que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, et la proportion d'onde réfléchie dépend des contrastes de propriétés élastiques entre les deux couches. Les ondes réfléchies sont enregistrées par des récepteurs sismiques (géophones), et leur analyse permet de déterminer la profondeur et la nature des interfaces géologiques.

Méthode sismique de réflexion

- La méthode de réfraction ne fonctionnait pas bien pour les structures plus profondes en raison des distances excessives requises entre les points courts (source d'ondes sismiques) et les détecteurs (Géophones).
- Dans la méthode de réflexion, les ondes créées par une explosion ou réfléchies directement à la surface de la roche sous-superficielle sans être réfractées et voyageant le long des surfaces de discontinuité.
- Les méthodes de réflexion sont relativement plus que des techniques réfringentes parce que les détecteurs peuvent être situés à des distances relativement courtes de points courts
- Les ondes de réflexion sont également générées mais en raison de la proximité des détecteurs ne sont pas captées.

Principe

- Les ondes sismiques se déplacent à des vitesses connues dans les matériaux rocheux, et ces vitesses varient selon le type de roche.
- Lorsque la lithologie sous-superficielle est relativement bien connue à partir de l'information sur le forage, il est possible de calculer avec précision le temps nécessaire pour qu'un signal sismique se déplace de la surface à une profondeur donnée et soit ensuite réfléchi vers la surface.



Application de la méthode sismique par réflexion

- La science de la stratigraphie sismique a été développée en grande partie par les compagnies pétrolières, en raison de la nécessité pragmatique ((réalisable) de localiser des gisements de pétrole dans des profondeurs
- Il est également utilisé pour étudier les structures profondes et les caractéristiques comme les plis, les failles, etc
- La réflexion sismique est utilisée pour identifier et cartographier les attitudes structurales des couches sédimentaires sous-marines
- Cette méthode est également utilisée pour trouver la profondeur de l'océan

Paramètres utilisés dans l'interprétation stratigraphique sismique

Les réflexions sismiques sont essentielles à tout le concept de stratigraphie sismique parce qu'elles se produisent en réponse aux changements de densité-vitesse des discontinuités

Les paramètres importants de l'interprétation sismique sont :

1. configuration de la réflexion
2. continuité de la réflexion
3. amplitude de réflexion
4. fréquence de réflexion
5. vitesse d'intervalle

A. Configuration de la réflexion

Il correspond aux grands modèles de stratification identifiés sur les enregistrements sismiques. Les types de configuration de la réflexion sont :

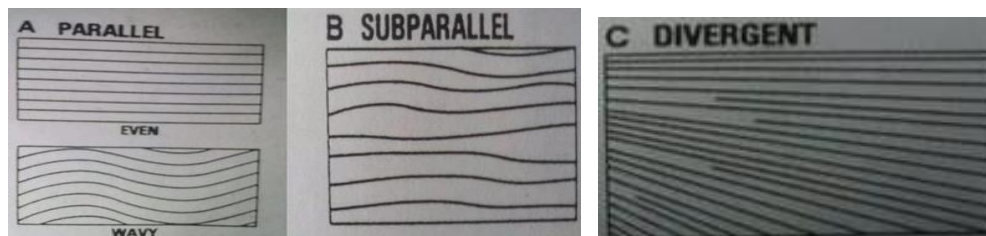
- modèles de parallèle.
- configurations divergentes.
- Configuration de la réflexion progressive.
- configuration de la réflexion chaotique.

1- Des modèles parrallel.

Les modèles de Parelle, y compris les modèles sous-parallèles et ondulés sont générés par des strates qui ont été déposées à des taux uniformes.

2- Configuration divergente

- Ils sont caractérisés par une unité en forme d'angle dans laquelle l'épaississement latéral de l'ensemble est causé par l'épaississement des sous-unités individuelles dans l'unité principale.
- Ils sont étudiés pour signifier la variation des taux de dépôt ou d'inclinaison de la surface sédimentaire pendant le dépôt.

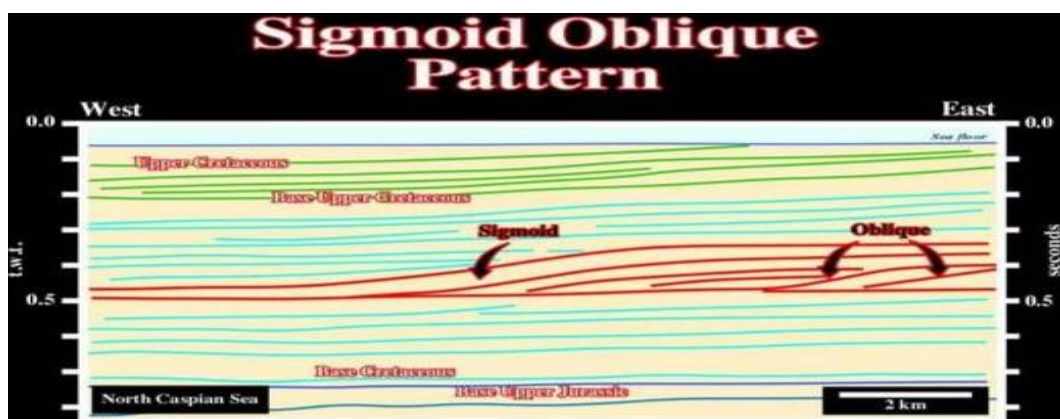


3- Les schémas de réflexion progressive

Ce sont des motifs de réflexion générés par les strates qui ont été déposés par la dépendance latérale e. g : Clinoform, sigmoïde (réflecteurs superposés en forme de S)

4- Motif de réflexion chaotique

Ils sont la disposition perturbée de la surface de réflexion, montrant une déformation des sédiments mous.

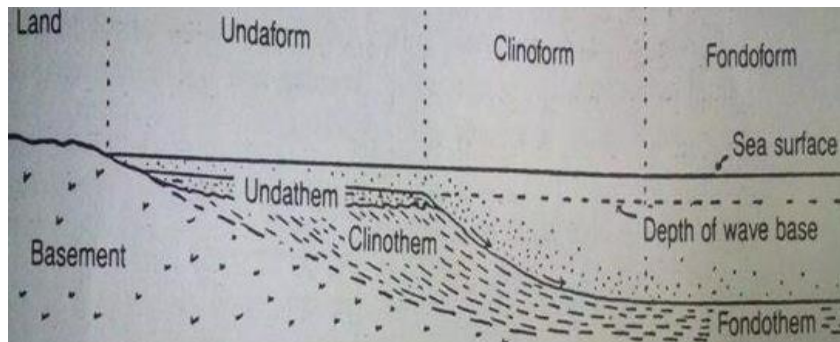


Environnements de dépôt

Il existe trois environnements de dépôt par rapport à la base des vagues :

1. En forme : Surface plane au-dessus de la base des vagues où les sédiments sont déplacés par les vagues.
2. Clinofrom : La surface en pente s'étendant de la base des vagues jusqu'au plancher plat.
3. Fondoform : La surface plane dans la profondeur de la base des vagues.

Les unités de roche qui se forment dans chacun de ces milieux sont appelées UNDATH, CLINOTHEM et FONDOTHEM.



B. Continuité de la réflexion

- Cela dépend de la continuité du contraste densité-vitesse le long de la surface de la couche ou des non-conformités
- Il est étroitement associé à la continuité des strates
- Il fournit des informations sur le processus de dépôt et l'environnement

C. Amplitude de réflexion

- Elle est mesurée comme la distance entre la position médiane d'une vague et la position extrême.
- L'amplitude d'une onde sismique représente la hauteur maximale de ses oscillations. Elle est liée à l'énergie de l'onde.
- L'amplitude des ondes sismiques enregistrées dépend de la quantité d'énergie qui est réfléchie ou diffusée par les différentes couches géologiques.

D. Fréquence de réflexion

- Nombre de vibrations d'ondes sismiques par seconde.
- Les ondes sismiques générées par des sources telles que des explosions ou des secousses sismiques naturelles peuvent avoir des gammes de fréquences variées.
- En général, les ondes sismiques de basse fréquence pénètrent plus profondément dans la sub-surface, tandis que les ondes de haute fréquence sont plus sensibles aux détails géologiques fins.

E. Vitesse d'intervalle

- Il s'agit de la vitesse moyenne des ondes sismiques entre les réflecteurs.

Applications de la Sismostratigraphie

- **Exploration pétrolière et gazière** : La sismostratigraphie est primordiale dans l'industrie pétrolière pour la cartographie des réservoirs et des pièges à hydrocarbures. Les données sismiques permettent de décrire l'architecture des couches géologiques, d'estimer les propriétés des roches et d'identifier les structures géologiques favorables à l'accumulation d'hydrocarbures.
- **Cartographie des réservoirs géothermiques** : Les principes de la sismostratigraphie sont également utilisés pour étudier les réservoirs géothermiques, en identifiant les zones où la chaleur terrestre peut être extraite de manière économique.

- **Géotechnique** : L'analyse sismostratigraphique aide à évaluer les propriétés du sous-sol pour les projets d'infrastructure comme les routes, les ponts ou les bâtiments, en identifiant les risques géotechniques et en fournissant des informations sur la stabilité des sols.
- **Gestion des risques naturels** : Dans le cadre de l'étude des risques sismiques, la sismostratigraphie permet d'identifier les zones de failles actives et d'analyser les mouvements tectoniques, contribuant à l'évaluation des risques de séismes et de tsunamis.
- **Recherche en géologie et en paléontologie** : La sismostratigraphie peut être utilisée pour étudier les formations anciennes et les environnements paléogéographiques en combinant des données stratigraphiques et sismiques pour mieux comprendre l'évolution de la Terre au fil des âges géologiques.
- **Études environnementales** : Elle est utilisée pour évaluer les caractéristiques géologiques d'un site avant la réalisation de projets d'aménagement ou d'exploitation, comme dans les études de faisabilité pour les projets d'exploitation minière ou les installations de stockage de déchets.

Limitations de la Sismostratigraphie

- **Résolution limitée** : La sismostratigraphie est souvent limitée par la résolution des données sismiques disponibles. Les couches géologiques fines peuvent être difficiles à distinguer si elles sont trop proches les unes des autres, surtout à grande profondeur. Les résolutions horizontales et verticales des sismiques sont en général limitées par les fréquences utilisées lors des acquisitions, ce qui empêche de détecter de petites structures ou des stratifications fines.
- **Complexité du signal** : Les données sismiques peuvent être affectées par des interférences dues à la présence de structures géologiques complexes telles que des failles, des chevauchements, ou des matériaux de type sableux ou argileux qui affectent la propagation des ondes. Cela rend parfois l'interprétation des couches géologiques plus complexe.
- **Profondeur d'investigation** : Les études sismiques ont des limites en termes de profondeur d'investigation. En fonction de la fréquence du signal sismique utilisé, l'onde peut ne pas pénétrer assez profondément pour observer les couches géologiques sous-jacentes ou l'analyse peut devenir trop imprécise à des profondeurs très élevées.
- **Interpretation subjective** : L'analyse des données sismiques peut être sujette à une certaine subjectivité. Différents géologues peuvent interpréter les mêmes données de manière différente, et l'interprétation peut être influencée par des hypothèses préalables ou des erreurs humaines.
- **Absence d'informations directes sur la lithologie** : La sismostratigraphie permet de caractériser les structures géologiques (épaisseur, profondeur, stratigraphie), mais elle ne donne pas directement d'informations sur la composition lithologique des formations. Pour obtenir des informations plus détaillées sur la composition (type de roche, minéraux présents, porosité), des forages ou d'autres méthodes géophysiques sont nécessaires.
- **Discontinuités and noise** : Les données sismiques peuvent être affectées par des discontinuités ou des anomalies locales telles que des zones d'ombre, des reflets multiples, ou des bruits, rendant parfois difficile l'interprétation des résultats.
- **Saturation des données à haute fréquence** : Les équipements sismiques à haute fréquence peuvent être limités par des réflexions multiples ou des effets de dispersion dans certaines conditions géologiques, affectant la qualité des images obtenues.