



Université Cadi Ayyad

جامعة القاضي عياض



FACULTE DES SCIENCES EXACTES
فakولفة العلوم السفاةفة

DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

Laboratoire - Dynamique des bassins et Géomatique

DYBAGEO

« *L'homme triomphaliste, s'est créé une ère pour fêter son apparition.* » (Ere Quaternaire)

« *C'est l'homme maître de la Terre qui a jugé que son apparition marquait un nouvel air.* »

Auteurs anonymes

MODULE STRATIGRAPHIE ET PREHISTOIRE

COURS DE STRATIGRAPHIE

S6

Pr. Taj-Eddine Kamal

2006 / 2007

Contenu sommaire

Ce document est un complément au cours. Il s'articule en trois parties :

1- Concepts fondamentaux de la stratigraphie analytique. Cette partie renferme un rappel des notions fondamentales de la stratigraphie, dont une partie est tirée des travaux des Auteurs, avec :

- Les principes et les méthodes de la stratigraphie.
- Domaines d'application.

2- Analyse synthétique, fondée sur la relation cause à effet, de tous les phénomènes géologiques abordés. L'accent est mis sur :

- Les diverses composantes du phénomène (lithologiques, sédimentologiques, paléontologiques, géométriques...) et leur évolution spatio-temporelle.
- Fonctionnement et caractéristiques du moteur naturel responsable du phénomène abordé.

3- Eustatisme :

- Causes.
- Conséquences.

Ce cours est appuyé par des TD : cf. documents distribués par le Prof. ETTACHFINI M. Ils portent sur les concepts de l'évolution appliqués aux Céphalopodes.

Bibliographie

** POMEROL Ch. et RENARD M.– Eléments de géologie. Editions Armand Colin 1989, Paris, France.

** REY J. – Biostratigraphie et lithostratigraphie. Editions Technip 1983, Paris, France.

REY J. – Cours et conférences à la Faculté des Sciences Semlalia.

** THEOBALD N. et GAMA A.– Stratigraphie : éléments de géologie historique. Editions Doin 1969, Paris, France.

TASCH P.– Paleobiology of the invertebrates : data retrieval from the fossil record. Editions Wiley 1980, U.S.A.

SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS, éd. Vuibert, 1999

** disponibles à la bibliothèque centrale de la FSSM.

Première partie

Concepts et méthodes de la stratigraphie

1 Définitions

Stratigraphie

C'est la discipline géologique qui étudie la forme, la disposition, la distribution géographique, la succession chronologique, la classification et surtout la corrélation et les rapports entre les couches (et autres corps associés) en position normale.

Fondée sur l'observation, la description et l'interprétation, elle englobe l'analyse des roches sédimentaires, magmatiques et métamorphiques. Elle nous permet de déterminer l'agencement dans l'espace et dans le temps des corps géologiques et des événements qu'ils matérialisent.

Tout corps géologique enregistre dans son faciès l'histoire de sa formation. Cette dernière, grâce aux principes et méthodes de la stratigraphie et à l'apport d'autres disciplines et concepts de la géologie, peut être tracée par une analyse détaillée des caractères suivants: milieu et mode de formation, lithologie, forme géométrique, limites, contenu fossilifère, âge, distribution géographique, rapports avec l'évolution biologique....

La stratigraphie est à la fois une discipline d'analyse et de synthèse.

L'environnement

C'est l'ensemble des paysages naturels reconnus sur notre planète, avec leurs composantes lithologiques et organiques, individualisées par l'interaction d'un certain nombre de facteurs, essentiellement qualitatifs, notamment :

- nature physique et chimique du milieu (continental, aquatique, ...)
- facteurs dynamiques (énergie du milieu),
- facteurs architecturaux : bathymétrie, altitude, topographie horizontale ou inclinée, plane ou accidentée,
- facteurs biologiques : peuplements organiques et leurs relations.

Les ensembles géologiques doivent être localisés dans leur cadre spatial originel qualitatif (environnement).

Ces environnements peuvent être définis à diverses échelles : locale (biotope métrique) ou régionale, à l'échelle d'un continent ou d'un océan.

On aboutit ainsi à la notion de paléoenvironnement puis de paléogéographie qui est la façon idéale de reconstituer et faire revivre des paysages anciens et leur évolution au cours des temps géologiques. Le principe de l'actualisme et la loi de Walther (causes actuelles - causes anciennes) trouvent ici leur application principale.

2 Objectifs

Les objectifs de la stratigraphie sont :

- a) La localisation des corps géologiques dans un système à 4 dimensions : les trois dimensions de l'espace et la dimension du temps.
Elle devra donc assigner aux roches une place dans l'espace, (milieu de formation et situation géographique initiale), et dans le temps (âge). Cette localisation implique l'établissement de cadres de référence, spatial et temporel, dans lesquels pourront être situés tous les objets sédimentaires.
- b) L'établissement des rapports existant, entre ensembles et phénomènes géologiques identifiés en des lieux distincts (corrélations lithologiques, paléontologiques, événementielles et autres de valeur locale, régionale ou globale). Ces corrélations peuvent donc être synchrones ou hétérochrones.
- c) Reconstitution de l'histoire géologique de la terre par une stratigraphie fine, associée aux approches complémentaires de la géophysique, de la géochimie, de la tectonique...

La sédimentologie et la paléontologie occupent une place fondamentale en stratigraphie car ils permettent de reconstituer les environnements, de déterminer les mécanismes de la mise en place des sédiments et d'identifier les marqueurs-temps.

3 Principes

Les concepts et méthodes de la stratigraphie sont fondés sur six principes ou lois : le principe de l'uniformitarisme ou actualisme, le principe de l'horizontalité originelle, le principe de superposition, le principe de continuité (latérale), le principe de l'identité et corrélations paléontologiques et la loi de Walter.

L'application de ces derniers nécessite une analyse correcte des mécanismes de la sédimentation et des relations entre lignes d'isofaciès et lignes-temps.

Principe de superposition (Niels Stensen, 1669)

Dans une succession sédimentaire non déformée (contexte de polarité normale), les couches se superposent les unes sur les autres dans un ordre chronologique décroissant (une couche est plus récente que celle qu'elle recouvre). Avec ce principe on a l'introduction de la notion de datation relative. Il est donc le principe fondamental de la stratigraphie et de la datation relative.

Ce principe est à appliquer avec précaution (non valable) dans les cas suivants :

- quand les strates sont verticales ou inversées,
- pour les plutons (plus récents que les roches encaissantes) et les unités métamorphiques,
- dans le cas de contacts tectoniques,
- pour les slumps (valable uniquement pour déterminer l'âge relatif de la mise en place du slump et non des roches qui le composent).

Dans certains cas, l'ordre de mise en place ou de superposition (polarité) peut être déduit sur la base de critères paléontologiques, sédimentologiques ou structuraux ([Tab. Polarité en annexe](#)).

Une extension de ce principe est celui du recoupement des structures : une structure plus jeune recoupe les structures plus anciennes (filons, failles, plis).

[Principe de l'uniformitarisme ou actualisme \(James Hutton 1785\)](#)

Le terme est de Charles Lyell (1797-1875). Le principe peut être synthétisé par la citation de Archibald Geikie : "The present is the key to the past".

Sur la base du degré de sa validité, cette définition doit être réversible : "Le passé est la clé du présent (Valentine, 1974) et du futur".

Fondé sur l'observation de la nature et l'expérimentation, ce principe permet d'utiliser les observations actuelles pour expliquer des phénomènes et des objets semblables du passé.

Ce principe est applicable aux aspects biologiques, lithologiques et mécaniques du phénomène abordé.

Les phénomènes liés aux propriétés intrinsèques de la matière et de l'énergie (au niveau physique, chimique et biochimique) se vérifient chaque fois que les conditions se présentent, indépendamment du temps (capacité érosive en fonction de la pente,

L'application de ce principe comporte toutefois des limites liées essentiellement au caractère changeant de la distribution des continents et des océans, du climat, du milieu et de la biosphère. Les phénomènes qui leur sont liés peuvent conduire donc à des résultats qui varient en fonction des diversités environnementales et biologiques dans lesquelles ils opèrent.

[Principe de l'horizontalité originelle \(Niels Stensen, 1669\)](#)

« Les couches fossilifères résultent d'un dépôt aqueux, leur surface doit donc être horizontale. Toutes les couches contenues entre deux plans parallèles à l'horizontale sont de plus en plus récentes au fur et à mesure qu'on remonte dans la série »

La dérive générale des sédiments est de créer des surfaces (limites de bancs) horizontales même si le fond du bassin est à l'origine ondulé.

Ce principe n'est valable que pour une sédimentation gravitaire. Dans une sédimentation contrôlée par les courants (accrétion latérale) les limites des couches sont subparallèles mais non horizontales (ils sont horizontales d'une nappe à l'autre).

[Principe de continuité \(latérale\) \(Niels Stensen, 1669\)](#)

Une strate continue (comprise entre deux surfaces limites de strates) est de même âge sur toute son étendue même si sa lithologie change.

Ce principe, à caractère géométrique, est applicable uniquement dans le cas où les limites inférieure et supérieure d'une unité seraient des lignes isochrones (lignes temps). Il est à usage essentiellement local ou régional et non global.

[Principe d'identité et de corrélations paléontologiques \(William Smith, 1790\)](#)

Des fossiles (espèces) semblables dans des roches diverses permettent leur corrélation temporelle. De ce fait, deux unités lithostratigraphiques qui renferment les mêmes fossiles (espèces) sont considérées de même âge.

Ce principe est fondé sur le renouvellement faunique au cours du temps, lié aux phénomènes de l'évolution (biostratigraphie). Comme le précédent il est indépendant de la lithologie des strates.

L'application et la précision (pouvoir de résolution) de ce principe sont tributaires de plusieurs facteurs :

- diachronisme engendré par la dispersion non immédiate des populations (exemple des transgressions eustatiques),
- problème de synchronisation des échelles biostratigraphiques régionales (corrélations à grande distance, corrélations entre dépôts marins et dépôts continentaux).
- échelle de la corrélation (sous-étage, étage, série, système ou erathème), cf. Fig. 7.

La loi de corrélation de faciès ou loi de Walther (1893)

« On ne peut rencontrer en superposition que les faciès et les provinces de faciès géologiques qui sont juxtaposés à l'heure actuelle ».

Par cette loi, Walther précise, conformément au principe de l'actualisme, que les explications génétiques les plus satisfaisantes des phénomènes anciens s'obtiennent par analogie avec des phénomènes géologiques actuels. (Figs. 1 et 2)

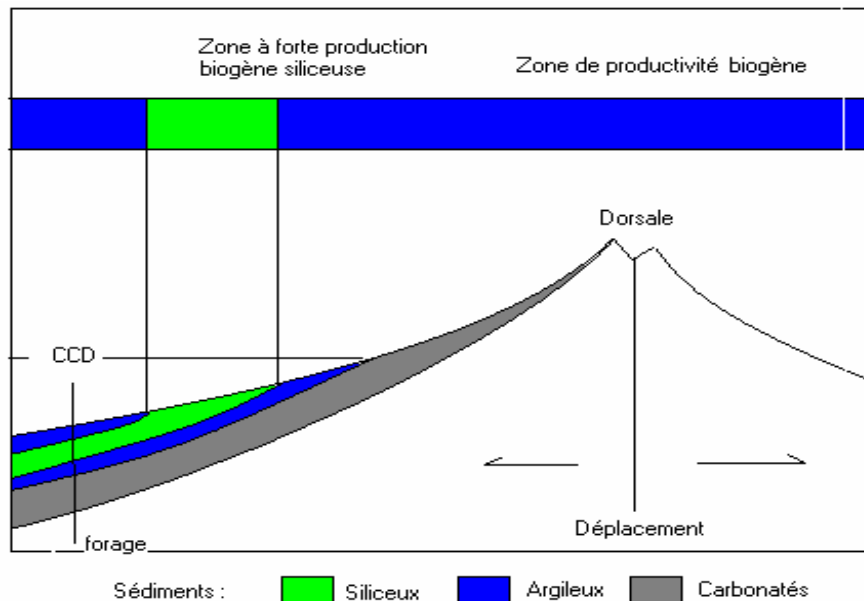


Fig. 1: Un point situé sur le socle basalitique se déplace perpendiculairement à l'axe de la dorsale. Il va être couvert par un sédiment carbonaté dont l'épaisseur va augmenter avec le temps.. Lorsque l'interface dépositionnelle passe sous la limite de compensation des carbonates (CCD), la sédimentation devient argileuse. Si au cours de son déplacement il passe sous une zone de production biogène particulière (siliceuse), le temps de passage sera enregistré par un sédiment biogène siliceux. Le forage montre une correspondance entre la colonne sédimentaire (verticale) et la succession horizontale (juxtaposition) des faciès. (D'après Lancelot, modifié)

Dans une série géologique, les variations lithologiques verticales dérivent alors d'une migration latérale des environnements sédimentaires au cours du temps. Il en résulte une obliquité des lignes-temps par rapport aux lignes d'isofaciès (limites des couches).

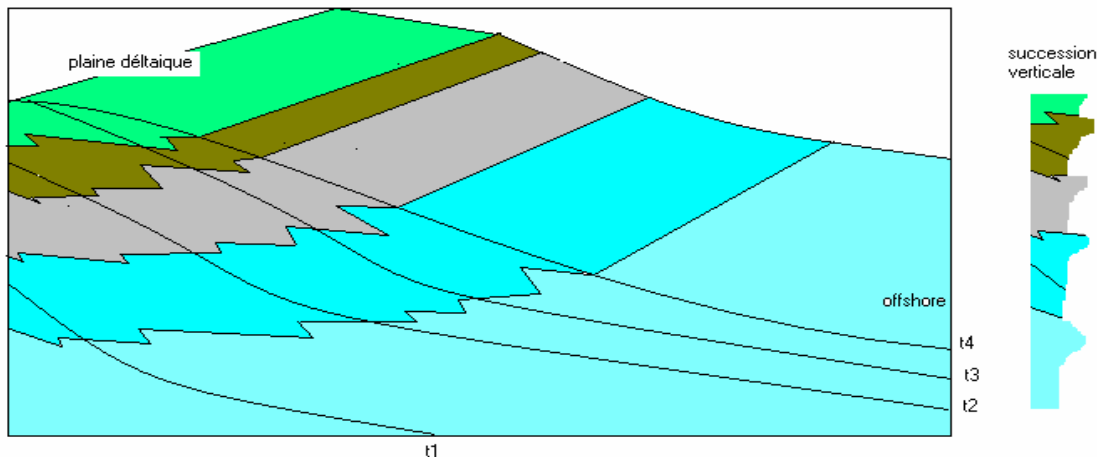


Fig. 2 : Lignes temps et lignes d'isofaciès lors d'une migration latérale des environnements sédimentaires au cours du temps

De ce fait, toute corrélation fondée sur l'identité de faciès (corrélation de faciès) est incompatible avec le principe de continuité latérale. En effet, l'âge d'une couche ou d'une formation, délimitées par des lignes d'isofaciès (non isochrones) peut changer d'un point à l'autre.

Cette loi ne s'applique que pour les caractéristiques primaires des roches qui matérialisent l'expression lithologique d'un environnement sédimentaire (faciès d'une roche), avant l'intervention de la diagenèse et pour des changements progressifs du faciès. Les changements brutaux d'environnements sont matérialisés par des variations brusques du faciès et des discontinuités corrélatives.

Les variations de faciès observées dans une série sédimentaire peuvent être locale, régionale ou globales. Les premières sont produites par des paramètres autocycliques (chenaux, levée et plaine alluviale dans un milieu fluvial). Les secondes par des paramètres ou phénomènes allocycliques d'intensité plus grande (eustatisme, subsidence, comblement d'un bassin).

4 Les unités stratigraphiques

Dans tout affleurement, examiné à divers degrés d'approximation, on distingue des aspects ou caractéristiques qui permettent la subdivision ou le regroupement des roches dont il est constitué (stratifiées ou non), en ensembles ou unités descriptives hiérarchisées.

Les unités stratigraphiques sont des instruments logiques, fruits d'un long processus d'analyses et de pratiques stratigraphiques. Elles sont les unités de mesure de la stratigraphie, comme le mètre est l'unité de mesure linéaire.

Mis à part les unités lithostratigraphiques (et pour la partie non évolutive, les unités biostratigraphiques), toutes les autres unités sont utilisées uniquement pour des corrélations, par l'emploi d'échelles de référence régionales ou planétaires, fondées sur les temps.

Dans l'analyse et la description des unités stratigraphiques, le respect des lois et principes de la stratigraphie est fondamental. L'application de ces derniers nécessite en outre une analyse correcte des mécanismes de mise en place des ensembles géologiques, des relations entre lignes d'isofaciès et lignes-temps et de la signification des limites (diagenèse, érosion ou arrêt de sédimentation).

Unités Lithostratigraphiques

L'unité de base est la formation (unité lithologique cartographiable). Un ensemble de formations constitue un groupe et la formation est subdivisée en membres composés de strates (bancs ou couches).

Ces unités lithostratigraphiques sont matérialisés par des corps généralement tabulaires, de matériel homogène ou génétiquement lié, d'épaisseur et extension variables, séparables d'autres corps par des caractères propres ou par une nette interruption physique dans la mise en place (limites), ou par les deux à la fois. Elles peuvent être constituées de roches sédimentaires, magmatiques, métamorphiques ou de diverses alternances de ces dernières.

Ce sont donc des unités descriptives qui matérialisent le degré le plus simple d'une étude stratigraphique. Elles permettent une classification, fondée sur la lithologie, des roches ou corps géologiques, en unités distinctes.

Les fossiles, comme composante lithique et non comme distribution zonale, sont parmi les caractères lithologiques utilisés dans cette classification et particulièrement s'ils sont abondants (en position de vie ou par concentration mécanique).

Sur le plan de la dynamique de leur mise en place et de l'analyse séquentielle, les unités lithostratigraphiques peuvent être décomposées en séquences délimitées par des surfaces (limite inférieure et limite supérieure) qui matérialisent le début et la fin du phénomène responsable de leur mise en place ; l'épaisseur des séquences est liée uniquement au taux de sédimentation :

Séquence élémentaire : à évolution générale de comblement, elle correspond à l'unité de base dans une analyse séquentielle.

Mégaséquence : c'est l'ensemble des sédiments (séquences élémentaires) déposés au cours d'un événement sédimentaire. Son évolution peut être d'approfondissement à la base et de comblement au sommet ou uniquement de comblement. Dans le premier cas la mégaséquence est dite cyclique et sera composée de deux mésoséquences (la première d'approfondissement et la seconde de comblement).

La mésoséquence d'approfondissement est alors constituée de séquences élémentaires de comblement à dérive générale d'approfondissement. La mésoséquence de comblement par des séquences élémentaires de comblement à dérive générale de comblement. Le moteur responsable de la création des mégaséquences cycliques ne peut être qu'un moteur lui-même cyclique : variations relatives du niveau marin.

A l'échelle locale, le pouvoir de résolution de la lithostratigraphie, par l'analyse verticale et horizontale des lithofaciès (à l'échelle de la strate ou même de la séquence élémentaire), est largement suffisant pour la reconstitution la plus fine de l'histoire géologique d'une région.

Unités Biostratigraphiques

Le but de la biostratigraphie est la classification des couches en fonction de leur contenu fossilifère (fossile autochtone). Dans ce cadre, les fossiles (espèces, genres, ...) sont utilisés comme des instruments de datation et donc de corrélation ou indicateurs des paléomilieus (écostratigraphie ou paléoécologie) et non comme éléments lithologiques (lithostratigraphie).

A l'état actuel des connaissances, l'évolution biologique (matérialisée par les biozones) est le meilleur moyen (à pouvoir de résolution maximal) pour dater (corrélés avec le temps géologique) les unités lithostratigraphiques.

La définition des unités chronostratigraphiques de référence (zone, étage, série, système, erathème, eonothème) est fondée sur les fossiles qui présentent l'évolution la plus rapide et la plus large diffusion géographiques. (Tab.1)

Age/ M.A	Ere Erathème	Période Système	Fossiles de référence
1,8	CENOZOIQUE	QUATERNAIRE	Alveolinides Nummulitides Globorotalides Mammifères
		TERTIAIRE	
65	MESOZOIQUE	CRETACE	
		JURASSIQUE	
230	PALEOZOIQUE	TRIAS	Ammonites
		PERMIEN	Bélemnites
570	PALEOZOIQUE	CARBONIFERE	Cératites
		DEVONIEN	Clyménies
		SILURIEN	
		ORDOVICIEN	Goniatites
		CAMBRIEN	Graptolites
			Trilobites
3000	PRECAMBRIEN	IV	
		III	
		II	
		I	

Tab. 1 : Unités chronostratigraphiques et fossiles de référence

L'espèce peut être considérée comme l'unité de base en biostratigraphie et comme toute autre unité naturelle elle comporte une limite inférieure, une limite supérieure et une épaisseur. L'enchaînement vertical des espèces est ainsi caractérisé par : (Fig. 3)

- apparition = FAD " First Appearance Datum " (limite inférieure)
- durée de vie = extension verticale (épaisseur)
- disparition = LAD " Last Appearance Datum " (limite supérieure)

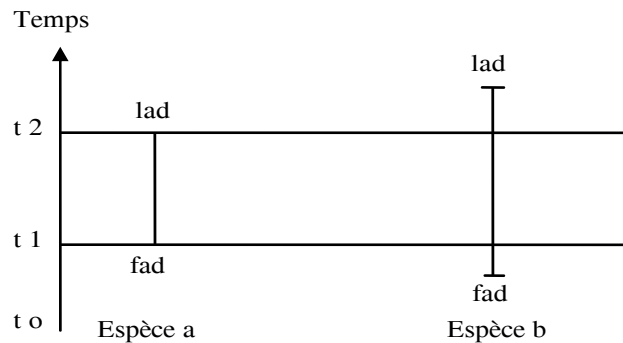
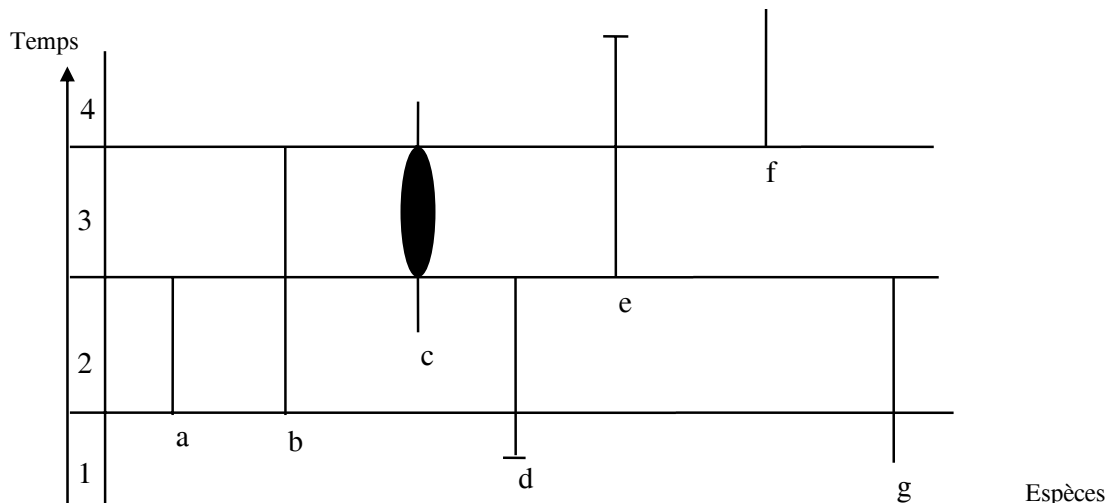


Fig. 3

Les unités biostratigraphiques sont définies sur la base de leur contenu paléontologique (Cénozone = Biozone = Zone) : (Fig. 4)

- Zone d'association (cénozone ou assemblage zone) : composée d'un assemblage ou mélange naturel d'espèces distinctes.
- Zone d'extension (range zone) : définie par la durée de vie d'une ou plusieurs espèces.
- Zone d'extension partielle (partial range zone) : définie par une partie de la durée de vie d'une espèce, relayée, dans la zone suivante, par l'apparition d'une autre espèce (FAD).
- Zone d'extension concomitante (concurrent range zone) : comprise entre le FAD d'une ou plusieurs espèces et le LAD d'une ou plusieurs autres espèces.
- Zone d'apogée (acme zone) : matérialisée par le maximum de développement quantitatif d'une espèce.
- Zone d'intervalle (interval zone) : caractérisée par l'absence de fossiles entre un LAD et un FAD.



zone de distribution partielle: (2-b,d et g) (3-b,c et e) (4-c et e);
zone de distribution concomitante: (2-abdg) (3-be);
zone de distribution totale: (2-a); **zone d'intervalle:** (3-af,df et gf); **zone d'apogée:** (3-c)

Fig. 4

Les unités Chronologiques

Les unités lithostratigraphiques et biostratigraphiques sont des unités concrètes et objectives. Toutefois, les premières par définition (cf. Formation) et les secondes par les variations qu'elles subissent suite aux développements des connaissances (cf. Biozones), sont généralement diachrones.

Pour les lier à l'histoire de la Terre (datations et corrélations), il est nécessaire d'utiliser d'autres unités logiques et non matérielles (unités chronologiques) qu'on obtient par une subdivision du temps géologique fondée sur différents critères : temps cardinal absolu (échelle géochronométrique) ; phénomènes successifs dans le temps comme l'inversion magnétique (échelle des inversions magnétiques) ; évolution biologique (échelle stratigraphique standard)...

La fixation dans le temps des événements (ou des ensembles géologiques), nécessite donc l'utilisation d'un calendrier ou échelle chronologique (Tab.2 et 3). Ce cadre temporel doit répondre à un certain nombre d'exigences pour avoir une valeur universelle :

- exprimer tout âge en tout lieu,
- s'appliquer aux diverses échelles d'analyse,
- être indépendant de toute opinion subjective,
- être stable,
- être utilisé internationalement.

Deux échelles peuvent être distingués :

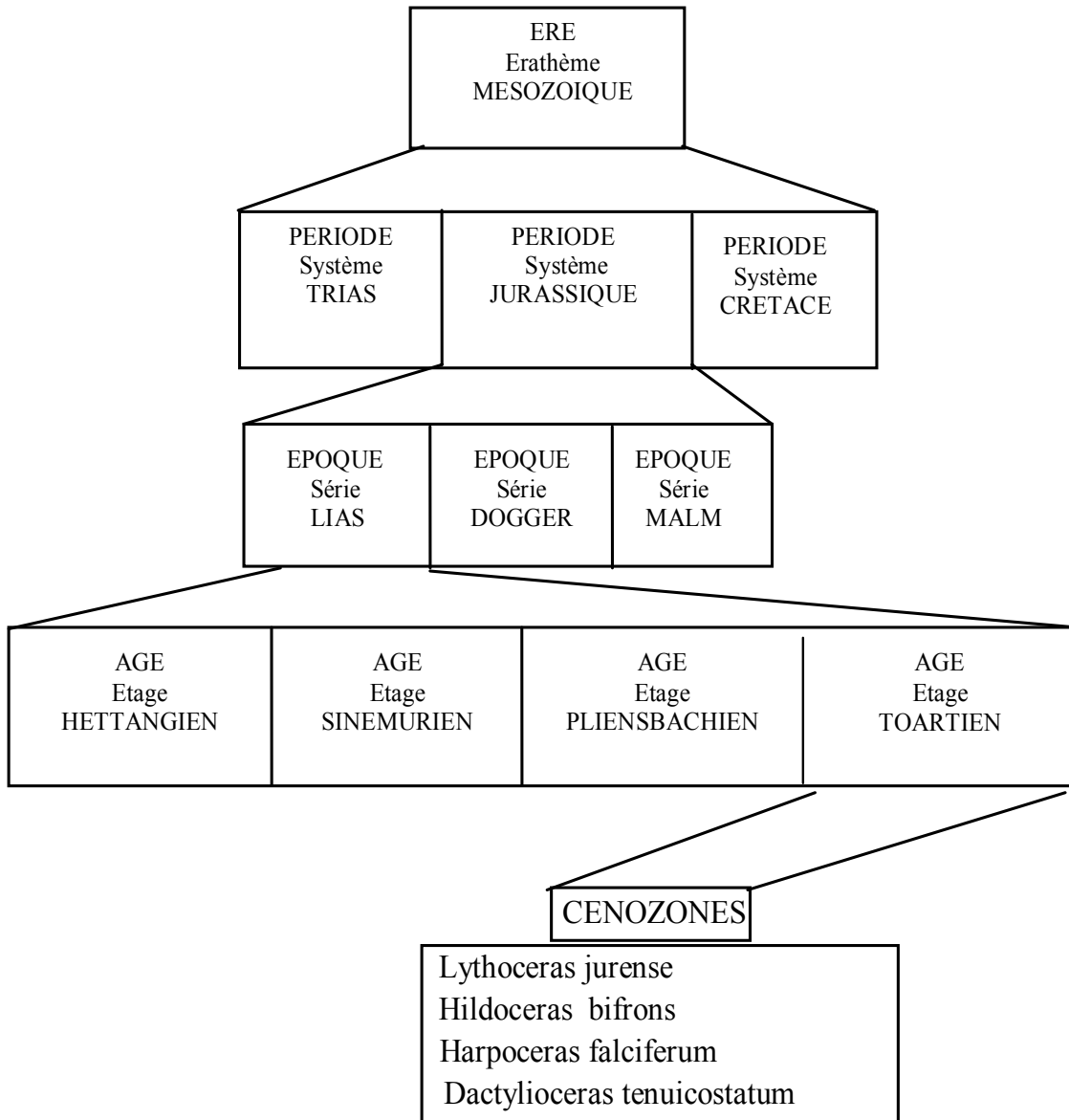
1. L'échelle chronométrique : elle permet d'évaluer dans l'absolu (en années) le temps écoulé (datations absolues).
2. L'échelle chronostratigraphique avec :

- Les unités chronostratigraphiques (stratomètres): matérielles (concrètes) et représentées par des strates déposées durant un certain temps (Eonothème, Erathème, Système, Série, Etage et Chronozone). Elles ont été établies pour éviter toute confusion et donner une signification homogène et stable au système des unités chronologiques de l'échelle stratigraphique standard (afin qu'elles puissent être utilisées comme des systèmes de référence qui enregistrent les événements de l'histoire de la planète). Ces unités matérielles et conventionnelles, sont stables et ne peuvent être changées ou modifiées qu'après un accord international. Les unités chronostratigraphiques sont liées aux unités biostratigraphiques dans la phase du choix de leurs limites. Une fois ces unités définies, leurs limites deviennent des surfaces physiques conventionnelles et interchangeable en dépit des caractères des biozones qui ont permis leur établissement (possibilité de diachronisme et de changement des limites des biozones).
- Les unités géochronologiques (chronomètres): intangibles (immatérielles ou abstraites) et représentant des intervalles de temps ou durées (Eon, Ere, Période, Epoque, Age et Chron).

Ces unités stratigraphiques vont permettre aux géologues d'utiliser un langage et une terminologie uniformes et compréhensibles à l'échelle planétaire.

ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE		
Unités Chronostratigraphiques (stratomètres)	Unités Géochronologiques (chronomètres)	Exemples
EONOTHEME	EON	PHANEROZOÏQUE
ERATHEME	ERE	MESOZOÏQUE
SYSTEME	PERIODE	JURASSIQUE
SERIE	EPOQUE	LIAS
ETAGE	AGE	TOARCIEN
CHRONOZONE/CENOZONE	CHRONE	Zone à Lithoceras jurensis

Tab. 2 : Unités Chronostratigraphiques et Géochronologiques équivalentes
(L'Erathème est l'ensemble de roches déposées dans un intervalle de temps nommé Ere. Ex: Mésozoïque, etc.)



Tab. 3

5 Relations entre unités lithostratigraphiques : rapports et géométries

Dans un affleurement ou dans une coupe les relations entre des roches génétiquement distinctes, sont strictement liés à la géométrie (dimension et forme) de chaque corps.

La grande différence entre les dimensions horizontale (extension) et verticale (épaisseur) des corps rocheux a conduit, dans un premier moment, à favoriser le développement de l'analyse des relations verticales entre unités stratigraphiques au détriment des relations latérales.

Avec le développement de la recherche pétrolière (et des substance utile enfuies) et de la stratigraphie haute résolution, il est apparu que la forme exacte des corps rocheux ne pouvait être déterminée que par une étude géométrique en trois dimensions d'où la notion ou définition de lithosome.

Lithosome

C'est un corps rocheux ou unité vertico-latérale distincte et mutuellement interdigité avec un ou plusieurs corps de lithologie différente (Wheeler et Malory, 1954-1956).

Vue que la géométrie d'un corps rocheux dépend de sa genèse, un lithosome peut être défini aussi comme un corps rocheux lithologiquement, morphologiquement et génétiquement différent des corps adjacents. (Fig. 5)

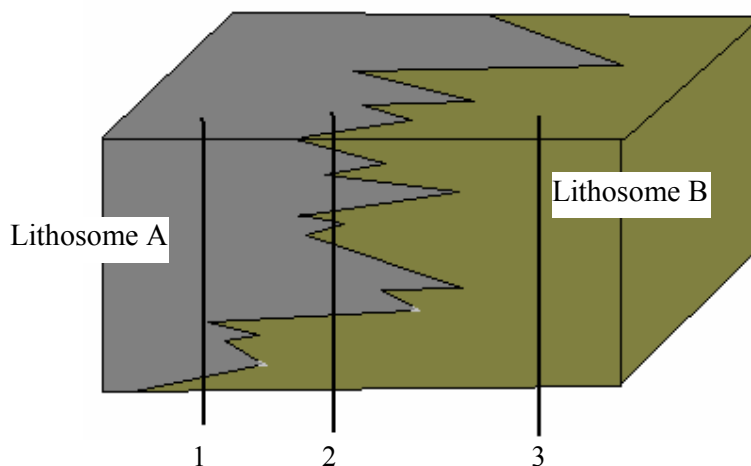


Fig. 5 : Dans l'espace la coupe 1 montre deux unités lithostratigraphiques cartographiables, dans la coupe 2 quatre et dans la coupe 3 une seule.

La forme géométrique des lithosomes est variable et pour la définir on utilise des termes à caractère géométrique (lentille, prisme, cône) et d'autres à signification génétique (delta, banc, chenal, récif....)

Par rapport aux lithosomes, les unités lithostratigraphique ont une signification plus artificielle et elles sont utilisées essentiellement dans des découpages verticaux ou temporels des ensembles géologiques.

Rapports verticaux entre unités lithostratigraphiques

Les relations verticales entre corps géologiques ou unités lithostratigraphiques permettent de déterminer les mécanismes de leur mise en place ainsi que d'éventuelles phases d'érosions ou de déformations tardives.

Ces relations sont facilement observables et les premiers à être étudiés et analysés.

Ces rapports peuvent être :

1. Continu (conformity), sans interruption significative de sédimentation entre unités en contact vertical. Une zone de transition (relais lithologique progressif) assure le passage d'une unité à l'autre :
 - graduels : par variation progressive de la lithologie ou par alternance de deux types lithologiques.
 - nets : rares et localisés. Elles caractérisent les zones à faible taux de sédimentation (hard ground et niveau de condensation) et les limites liées à des modifications diagénétiques (série rythmiques).
 - non concordants (discordants, non conformity) par déformation sédimentaire ou mouvements verticaux (fluidification).
2. Discontinu avec interruption de sédimentation, dissolution et/ou érosion entre deux unités successives (relais brusque). La mise en évidence de cette discontinuité se fait soit par datation des deux strates superposées (détermination d'une lacune) ou par l'application de la loi de Walther (superposition de faciès qui ne devrait pas être juxtaposés. Elles peuvent être :
 - concordants (disconformity) entre des strates essentiellement parallèles séparées par des lacunes de sédimentation (hiatus ou diastème), par érosion mécanique ou chimique (parallèle aux strates) ou par une variation brusque de la lithologie.
 - discordants (angular unconformity, nonconformity) entre strates déformées (plissées, inclinées) ou métamorphosées et d'autres subhorizontales.

Continuité et discontinuité sont fonction de l'échelle d'observation et de la précision à atteindre dans une étude.

Rapports latéraux entre unités lithostratigraphiques

Les rapports, contacts ou limites latérales entre les unités lithostratigraphiques sont de plusieurs types :

- Terminaison latérale en langue ou fermeture par convergence ou pinch out. Ils ont, en général, un angle très bas ($<1^\circ$). Cet angle peut être plus grand uniquement dans des corps bioconstruits ou chenalisés. Ils représentent d'importants pièges stratigraphiques pour le pétrole et le gaz.
- Interdigitation.
- Passage graduel mixte ou continu par variation latérale de faciès.
- Discontinu ou discordants suite à une phase d'érosion sous-marine ou aérienne.

Rapports verticaux et latéraux entre unités lithostratigraphiques

La distinction entre rapports verticaux et rapports latéraux est purement artificielle et ne se justifie que sur le plan analytique. C'est le déplacement ou migration spatiale des facteurs ou moteurs de la sédimentation qui détermine la différente forme géométrique en trois dimensions des lithosomes. En effet le changement lithologique vertical dans une coupe (log)

dérive de la migration latérale des différents milieu de sédimentation (loi de Walter : principe de base qui permet de comprendre les passages verticaux et latéraux de faciès).

Discordances et Discontinuités

Les discordances et les discontinuités peuvent être locales ou régionales (voir planétaires). Plusieurs critères permettent de les reconnaître :

- **Sédimentologiques** : conglomérat de base (souvent continental, rarement régressif ou transgressif), horizons à glauconie, à galets phosphatisés, à manganèse, non déposition, diastèmes, érosion ou dissolution.
- **Paléontologiques** : saut de biozone (relais paléontologique brusque), horizons à ossements et dents associées à pellets phosphatisés.
- **Structurelles** : changement de pente (discordance angulaire), surfaces irrégulières (érosion), différence de niveau structural (discordance).

Transgression et régression

Ce sont des processus sédimentaires qui se matérialisent par le déplacement vers le continent ou vers le large, de la ligne de rivage. Ces déplacements dérivent de la montée ou de la baisse relative du niveau marin par glacio-eustatisme, tecto-eustatisme, variation de la forme du bassin... (Fig. cf. Cours)

Suite à ces mouvements, les différents milieux d'érosion ou de sédimentation se déplacent dans un sens ou dans l'autre. Ceci provoque le déplacement latéral et donc la superposition de milieux différents.

Une régression (transgression continentale) peut être provoquée aussi par une simple progradation de corps sédimentaires à accroissement latéral (delta, récif) sans aucune variation relative du niveau marin ou par des mouvement tectoniques sur les marges continentales (soulèvement).

Une transgression peut être aussi provoquée par des mouvements tectoniques sur les marges continentales (subsidence).

Au cours d'une transgression, la lithologie et les fossiles indiquent des milieux de plus en plus profonds de la base vers le sommet de la série (mesoséquence d'approfondissement). Ils sont moins profonds, du bas vers le haut, dans une régression (mesoséquence de comblement).

Lors d'une transgression nous avons :

- Réduction de la surface continentale
- Déplacement ver le continent des milieux de sédimentation (rétrogradation)
- Augmentation du niveau marin avec réduction du pouvoir érosive des fleuves et donc d'apports détritiques
- La séquence dépositionnelle caractéristique est positive (grossière à la base, fine au sommet)
- A la base il y a une discontinuité (érosive ou dépositionnelle) ou une discordance angulaire

Au cours d'une régression ce vérifie le contraire

Transgression et régression se succèdent dans le temps, ils déterminent ainsi des cycles sédimentaires.

Cycles sédimentaires : suite de sédiments se concluant par une situation présentant les mêmes caractéristiques que celles du départ (régression \Rightarrow transgression \Rightarrow régression). (Fig. 6)

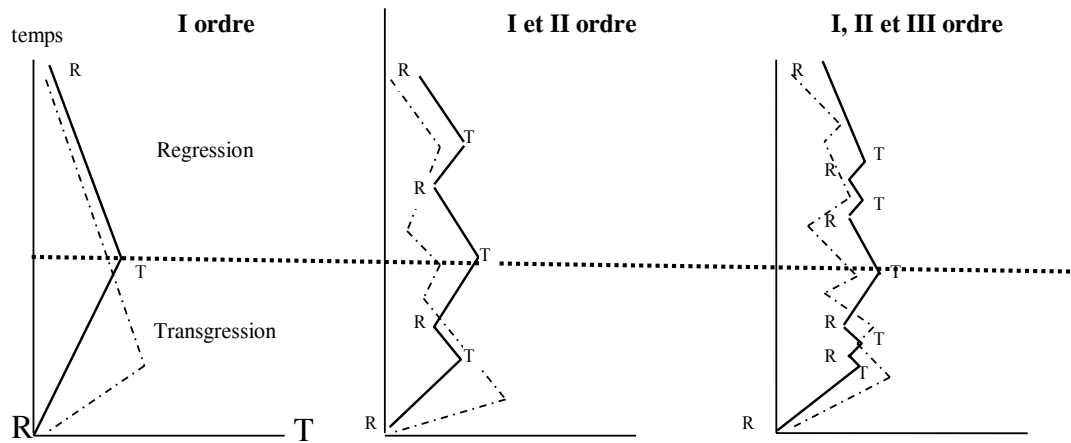


Fig. 6 : Dans la nature les cycles asymétriques, avec dominance de la partie régressive, semblent être les plus fréquents (en hachuré)

6 Temps et espace en géologie

La notion de temps en géologie peut être perçue grâce à un certain nombre de phénomènes naturels aux effets fossilisables. Ces phénomènes peuvent être schématiquement regroupés en quatre ensembles : (Tab. 4)

- a- **phénomènes continus irréversibles**: ce sont des processus de transformation de la nature qui sont permanents et unidirectionnels (évolution biologique, désintégration atomique). Ces deux processus seront utilisés pour dater les séries, soit d'une manière relative (évolution biologique), soit de manière absolue (radioactivité).
- b- **phénomènes continus réversibles ou répétitifs** : ils comportent les processus de transformation de la nature qui se déroulent de manière pratiquement permanente mais bidirectionnelle (aller et retour) ou répétitive (variations architecturales et physico-chimiques, variations climatiques, variations de la direction magnétique). Ils permettent la localisation dans l'espace des corps sédimentaires (milieu de sédimentation, situation géographique, établissement de corrélations synchrones ou hétérochrones locales ou être utilisés comme moyen de datation).
- c- **phénomènes discontinus répétitifs** : ce sont des processus naturels qui se déroulent en un temps assez bref et pouvant se reproduire plusieurs fois dans les temps géologiques (crises climatiques, migrations organiques, crises biologiques). Ces processus, généralement perceptibles à l'échelle du globe, permettront des corrélations d'événements (formations géologiques mises en place durant ces événements) sur de vastes étendues.
- d- **phénomènes instantanés répétitifs** : il s'agit de phénomènes naturels ayant exigé un laps de temps très bref, mais ayant pu se reproduire plusieurs fois dans l'histoire géologique de la terre. Ils permettent des corrélations événementielles synchrones et très fines, de valeur locale et régionale (ruptures sédimentaires majeures, éruptions volcaniques) ou de valeur globale (inversions de polarité magnétique).

Les ensembles géologiques avec leur contenu lithologique, minéralogique, physique, chimique et organique, sont donc des documents exploitables pour la détermination de l'espace et du temps. Ces données de surface ou de subsurface, sont toutefois toujours incomplètes :

- dans l'espace en raison de la discontinuité géographique des formations géologiques (par érosion, tectonique) et du caractère ponctuel des observations.
- dans le temps en raison de la discontinuité de la sédimentation.

En effet, les formations géologiques ne matérialisent qu'une partie très réduite des dimensions espace et temps.

De l'observation actuelle (principe de l'actualisme), nous constatons que le mécanisme de formation des roches stratifiées est la sédimentation (accumulation de particules, les unes sur les autres).

DISCIPLINE D'APPROCHE	METHODE D'APPROCHE	PHENOMENES NATURELS			
		Continus Irréversibles	Continus Réversibles et Répétitifs	Discontinus Répétitifs	Instantanés Répétitifs
Paléontologie	Biostratigraphie	Evolution biologique	Paléoécologie	Migrations et crises biologiques	
Sédimentologie Géochimie Géophysique	Lithosédimentologie Diagraphies Sismique		Variations architecturales et physico-chimiques du milieu Eustatisme		Ruptures sédimentaires majeures
Physiques	Radiométrie Paléomagnétisme	Désintégration atomique	Variations de la direction magnétique		Inversions de la polarité magnétique
Paléontologie Géochimie Géomorphologie Physique	Paléoclimatologie		Variations climatiques	Crises climatiques	
Pétrologie	Marqueurs volcaniques				Eruptions volcaniques

Tab. 4 : Les divers phénomènes naturels et leurs caractéristiques (in : J. Rey 1983, modifié)

Dans le cas d'une sédimentation continue, gravitaire et sur une surface de référence horizontale <o> on a : (Fig. 7)

$$S = \delta t$$

δ = taux de sédimentation = constant

s = épaisseur du sédiment

t = temps

Dans cette relation < s > est proportionnel à < t > et nous pouvons construire une échelle du temps fondée sur les valeurs de < s >.

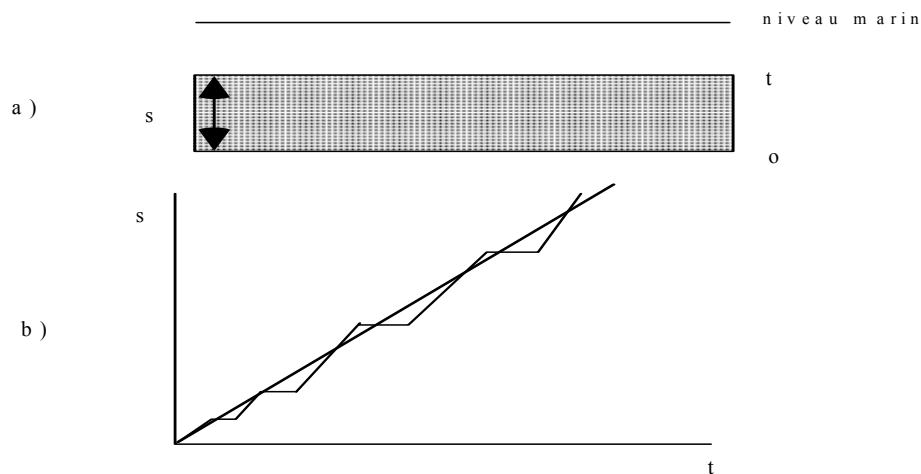


Fig. : 7

Dans la réalité, le rapport entre sédimentation et temps n'est pas continu (droite) mais discontinu (ligne brisée). [Fig. 7](#)

Les relations géométriques entre le temps et l'espace ne peuvent être exactement perçues que par une analyse correcte des mécanismes de la sédimentation et des relations entre lignes d'isofaciès et lignes-temps.

En milieu de basse énergie (glacis continental, marin calme ...), la sédimentation est assurée par la gravité et l'accroissement des dépôts se fait par le haut (accrétion verticale). Les lignes d'isofaciès (limites des couches) sont parallèles aux lignes-temps.

Les peuplements paléontologiques successifs s'enchaînent verticalement dans les séries sédimentaires. Le vecteur temps et le vecteur paléontologique (relais) sont verticaux à toutes les échelles d'observation (séquence élémentaire, mesoséquence et mégaséquence).

Dans les milieux où l'agent dynamique dominant est constitué par les courants de traction (vent, vagues et courants), la sédimentation est discontinue sous forme de prismes successifs (accrétion latérale) croissant vers le centre de l'aire de sédimentation (plate-forme continentale, plate-forme deltaïque, zones littorales, bassins désertiques.....).

La juxtaposition des dépôts (en prismes sédimentaires à accrétion latérale) constitue une nappe de remblayage. Les nappes se superposent les unes aux autres du fait de la subsidence.

A l'échelle de la séquence élémentaire (à l'intérieur de la nappe), les lignes-temps sont obliques par rapport aux lignes d'isofaciès et la nappe sédimentaire n'est pas de même âge sur toute son étendue.

A l'échelle de la mégaséquence (nappes successives), les lignes-temps sont horizontales et matérialisées par les limites des nappes.

Les relais paléontologiques et les vecteurs temps sont progressifs et horizontaux dans les nappes. Ils sont brusques et verticaux d'une nappe à l'autre.

Dans les secteurs sous-marins ou continentaux en pente (ruptures de pente, talus continental, talus prodeltaïque, glacis) la sédimentation, discontinue, est assurée par des glissements gravitaires, des transports en masses ou par des courants de turbidité qui resédimentent le matériel.

Deuxième partie

Méthodes de la paléontologie

1 Introduction

La paléontologie est la science qui étudie les vestiges des êtres qui ont peuplés la biosphère au cours des temps géologiques. Elle s'appuie fondamentalement sur le principe de l'actualisme ou uniformitarisme.

2 Objectifs

Les études paléontologiques sont soit d'ordre fondamental soit d'ordre appliqué. Grâce aux connaissances du monde vivant actuel, la contribution de la paléontologie est primordiale dans les domaines suivants :

Géologie:

Chronologie relative des phénomènes géologiques (failles, plis, chauvauchements, lacunes, transgressions et régressions, chronologie des cycles orogéniques, calcul de la subsidence...); corrélations; élaboration de certaines théories de grande valeur géologique (dérive des continents, stratigraphie séquentielle); paléogéographie; évolution des bassins sédimentaires; recherche de matières premières telles que hydrocarbures, eau, charbons fossiles, soufre, potasse, bauxite, diatomeites ...

Biologie:

- étude de la modification de l'organisation anatomique et des transformations morphologiques des organismes au cours du temps (évolution),
- reconstitution de l'histoire des êtres vivants et établissement de leur systématique qui, du type horizontal des botanistes et zoologistes, devient de type vertical, à inspiration phylogénétique, dite aussi naturelle car plus proche de la réalité,
- détermination des relations qui pourraient relier les différents groupes biologiques.

Ecologie:

- caractérisation des environnements et paléoenvironnements,
- reconstitutions paléobiogéographiques et analyse des voies migratoires des populations au cours du temps,
- détermination des biotopes (biofaciès) fondée sur l'analyse morphofonctionnelle des êtres vivants (paléo-écologie),
- climatologie, zoo et phytogéographie.

Chimie et paléobiochimie :

Paléobiochimie, cycle du carbone, du phosphore ..., diagenèse, accumulation des éléments en traces.

3 Définitions

Fossile

Depuis l'apparition de la vie, les organismes qui ont occupé les différents domaines de la biosphère ont laissé des signes de leur existence sous différentes formes.

Ces signes sont en relation étroite avec la nature de l'organisme, son mode de vie, son biotope, le milieu et le mécanisme de fossilisation.

Un fossile se présente sous la forme de :

- vestiges anatomiques animales ou végétales : momies, parties dures, empreintes de parties dures, moules internes, moules externes,
- restes biogéniques : pelotes fécales ou œufs,
- traces ou artefacts : perforations, bioturbations,
- empreintes.

Fossilisation

C'est l'ensemble des mécanismes et conditions qui assurent la conservation des signes et vestiges d'organismes (fossiles).

La fossilisation est un phénomène très particulier du fait que la probabilité de conservation des fossiles est de l'ordre de 1/5000.

Cette basse fréquence vient du fait que la fossilisation nécessite des conditions particulières :

- l'organisme doit avoir des parties dures ou minéralisées,
- l'enfouissement rapide par des sédiments de préférence fins, condition nécessaire pour isoler le vestige ou la trace de l'action destructrice des agents externes se présente que rarement,
- le vestige englobé dans le sédiment, va subir, avec le sédiment, les effets des phénomènes diagénétiques (altérations post-dépôt). L'impact de ces derniers sera soit une conservation totale ou partielle du vestige, soit sa destruction définitive.

Espèce

L'espèce est l'unité fondamentale de la classification des êtres vivants (systématique).

Elle occupe une place importante dans les sciences naturelles et appliquées dans lesquelles la détermination de l'objet d'étude constitue une étape importante à toute recherche (systématique, anatomie, physiologie, génétique, biochimie, paléontologie, biogéographie, évolution, stratigraphie, biologie appliquée, philosophie).

Dans ce cadre l'espèce biologique (bio-espèce) est définie comme étant un groupe d'individus interféconds et incapable de se reproduire avec des individus d'autres espèces. Une espèce est donc une "communauté reproductrice de populations (reproductivement isolées d'autres communautés) qui occupe une niche particulière dans la nature (Mayr, 1982).

L'individu est considéré comme étant un des porteurs temporaires d'une partie du patrimoine génétique de l'espèce. Ce n'est que par mutation que ce dernier peut contribuer à l'accroissement de ce patrimoine.

L'espèce paléontologique est matérialisée par un ensemble d'individus morphologiquement identiques. Elle est définie sur la base d'arguments ou paramètres uniquement morphologiques combinés avec le temps (Chrono-espèce).

La chrono-espèce serait donc matérialisée par un ensemble de bio-espèces, en succession verticale (unité évolutive ou phylum), liées par un patrimoine génétique qui change progressivement tout en gardant une structure potentiellement compatible avec la fertilité interne et l'isolement reproductif.

Pour que le patrimoine génétique d'une espèce change, au point de provoquer l'isolement reproductif, il faut un temps relativement important et variable d'un groupe à l'autre.

Sur le plan mathématique, la chrono-espèce (phylum chronospécifique) correspondrait à un intégral et une bio-espèce à un segment infinitésimal de ce dernier. La bio-espèce idéale serait donc celle détectée dans un temps infinitésimal (Westoll, 1956).

La durée de vie d'une espèce varie d'un groupe à l'autre et pour le même groupe d'une espèce à l'autre. Les repères chronologiques fournis par les fossiles n'ont pas donc des durées égales.

Mode de vie et fossilisation

Chez les organismes marins actuels, on distingue trois modes de vie (planctonique, nectonique et benthique) : (Fig. 8)

- Les organismes planctoniques, flottent à la surface, dans la zone photique (phytoplancton et zooplancton), leur dispersion est assurée par les courants marins.
- Les organismes nectoniques ou nageurs.
- Les organismes benthiques qui vivent sur la surface dépositionnelle (épibiontes), fixés (sessiles) ou mobiles (vagiles) et ceux qui vivent enfouis dans le substratum (fouisseurs ou endobiontes).

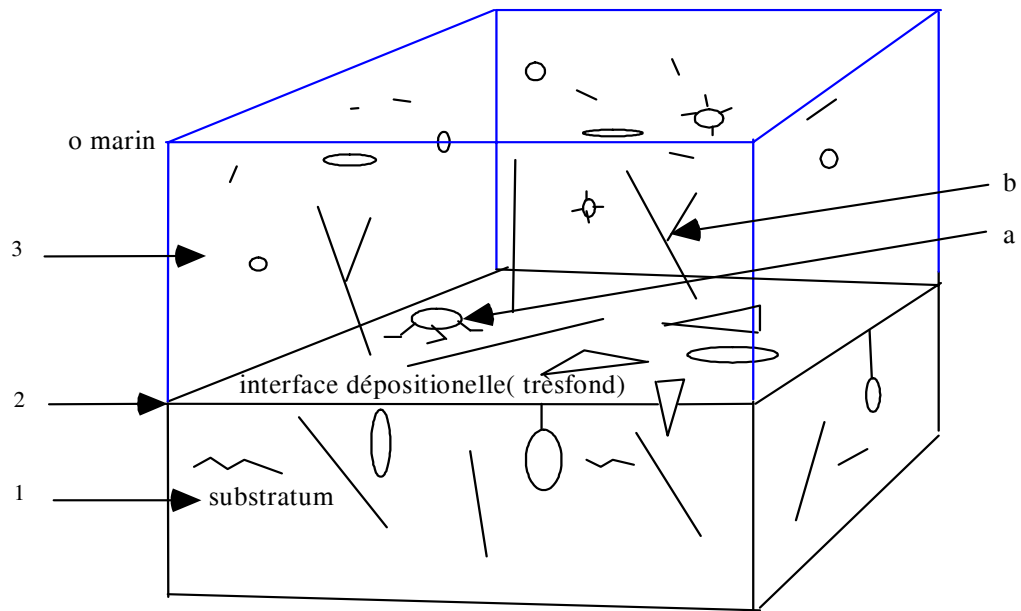
Milieu de vie (biotope) et mode de vie sont facilement déterminables pour des organismes actuels. Pour les organismes anciens le biotope n'est pas directement appréhendé. Ce qui est matérialisé par les couches sédimentaires, qui renferment les fossiles, c'est le milieu de dépôt.

Le mode de vie des fossiles est déterminable grâce au principe de l'actualisme et aux données acquises à travers les études sur la morphologie fonctionnelle.

Pour tout groupe paléontologique, et en fonction de son mode de vie, nous pouvons avoir une indication sur la relation existante entre milieu de vie (biotope) et milieu de fossilisation. Avec :

- Pour les organismes planctoniques et nectonique aucune relation directe entre milieu de vie et milieu de fossilisation (épi-autochtones).
- Pour les benthiques fouisseurs et sessiles ils s'agit des mêmes milieux (autochtones). Les vagiles sont sub-autochtones.
- Dans le cas d'intervention de phénomènes de déplacement horizontale (vagues, courants) des restes d'organismes, la population fossilisée sera allochtone.

L'utilité des fossiles réside dans leur capacité de nous fournir des indications plus ou moins précises sur le milieu et l'âge de formation des roches qui les renferment.



- 1- ENDOBIONTE (INFAUNA)
- 2- EPIBIONTE (EPIFAUNA) : a-vagile, b-sessile
- 3- NECTON ET PLANCTON

Fig. 8

Un fossile nous donne toujours ces deux indications mais avec un degré de précision, sur l'une ou l'autre, qui dépend de son mode de vie et de sa vitesse d'évolution : Tab. 5

MODE DE VIE	EVOLUTION	PRECISION SUR LE MILIEU	PRECISION SUR L'AGE
benthique sessile	rapide	grande	grande
benthique sessile	lente	grande	faible
benthique vagile	rapide	grande	grande
benthique vagile	lente	grande	faible
planctonique	rapide	faible	grande
planctonique	lente	faible	faible

Tab. 5

La notion de bon fossile stratigraphique et de bon fossile de faciès est toutefois tributaire du contexte d'utilisation (locale, régionale ou planétaire) et non du groupe paléontologique employé.

De l'analyse des diagrammes et tableaux on constate que la précision du critère paléontologique, comme moyen de corrélations chronologiques, dépend de facteurs multiples.

De ce fait, les biozones les plus utiles dans les corrélations chronostratigraphiques et chronologiques sont, dans l'ordre, les zones évolutives, les zones de distribution concomitante, de distribution partielle et de distribution totale. Les organismes les plus adaptés sont les planctoniques et les nectoniques.

Dans la pratique aucun groupe paléontologique ne se comporte comme un bon indicateur du temps tout au long de son évolution.

Les Graptolites, les Ammonites, les Conodontes, les Spores, les Foraminifères planctoniques..., sont des fossiles largement utilisés pour dater et corréler (à grande distance) les séries stratigraphiques. Toutefois, ces derniers n'ont pas eu toujours la même valeur de bons indicateurs du temps, au cours de toute leur durée de vie.

Actuellement le meilleur moyen de corrélation géochronologique (ou chronostratigraphique) est celui de l'intégration des meilleures biozones (indépendamment du groupe d'appartenance).

Milieu de vie

Depuis leur apparition, les êtres vivants ont occupé, successivement, les différents domaines de la biosphère. Les premiers signes de vie ont été retrouvés dans des sédiments marins. Il s'agit d'organismes unicellulaires (bactéries et cyanophycées).

Des organismes de plus en plus complexes ont occupé par la suite les autres domaines de la biosphère. Des formes transitoires ou intermédiaires marquent le passage d'un groupe à un autre et d'un milieu de vie à un autre (Ichtyostega, premier Tétrapode connu, marque le passage de la vie aquatique à la vie terrestre; Archeopteryx, premier oiseau connu, montre l'acquisition des plumes et l'adaptation au vol).

Pour chaque grand groupe (ou phylum), on remarque que les formes marines précèdent les formes continentales dans un ordre de complexité croissante.

Les stratégies adaptatives

L'adaptation des organismes est l'un des concepts fondamentaux de l'évolution ; c'est la capacité d'adéquation d'un organisme avec son environnement naturel.

Deux stratégies adaptatives sont proposées par les Auteurs :

La stratégie < **K** > pour les habitats stables et favorables à la croissance et à la survie. Cette stratégie est matérialisée par :

- Un développement lent
- Une grande taille des adultes
- Une reproduction tardive
- Un petit nombre de descendants par génération
- Une descendance plus soignée
- Une bonne survie
- Une durée de vie longue
- Une longue durée des générations

La stratégie < **r** > pour les habitats instables avec :

- Développement rapide
- Petite taille des adultes
- Reproduction précoce
- Grand nombre de descendants par génération
- Abandon des œufs ou des petits
- Forte mortalité (œufs ou petits)
- Durée de vie courte

Courte durée des générations

Evolution

Les études paléontologiques montrent que l'espèce est une entité qui change au cours du temps.

La nécessité d'adaptation à de nouvelles conditions de vie (pression externe) déclenche chez les individus des populations certaines transformations morphologiques.

D'autres transformations, purement génétiques, sont des adaptations des populations aux pressions internes.

Pression interne (compétitivité génétique avec brassage génétique) et pression externe (variation des caractères physiques et chimiques du milieu) deviennent des paramètres qui aident à mieux comprendre les mécanismes et les différentes stratégies adaptatives suivies par les populations au cours du temps.

Pour désigner ces transformations morphologiques des populations, au cours du temps, on utilise le terme d'évolution.

Gradualisme phylétique et équilibres ponctués sont les deux types d'évolution proposés par les Auteurs.

Le premier est assuré par une évolution continue, progressive et généralement lente, des populations, sous l'action de la sélection naturelle (pression interne).

Le second, proposé par Eldredge et Gould en 1973 est essentiellement guidé par la pression externe et considère l'espèce comme une entité stable durant toute sa vie (stase). Dans ce cas, la spéciation ou évolution novatrice (crise), passe par l'intermédiaire de petites populations marginales. Ces dernières, isolées dans des milieux généralement différents de ceux de l'espèce souche, vont évoluer très vite en s'adaptant aux nouvelles conditions de vie et, une fois la stabilité atteinte, la nouvelle espèce se développe quantitativement (spéciation allopatrique par effet d'étranglement ou effet Bottle neck).

La diversification des organismes au cours du temps est donc due à une interaction complexe et concomitante de variations évolutives (essentiellement linéaires) et de variations du milieu (essentiellement irrégulières et cycliques).

L'identification paléontologique d'unités chronostratigraphiques de brève durée est beaucoup plus influencée par le milieu que par l'évolution. En effet, plus la durée augmente plus l'impact de l'évolution augmente et celui du milieu décroît : (Fig. 9)

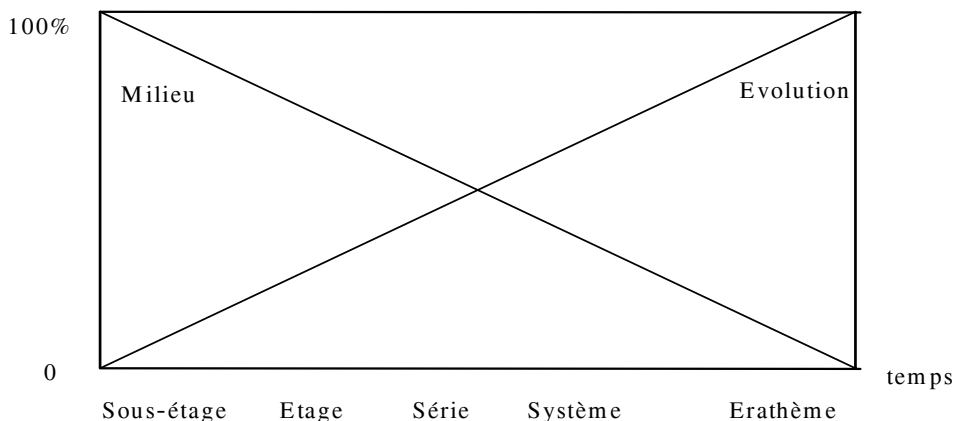


Fig. 9

Mécanismes de l'évolution: Fig. 10 a et 10 b (cf. cours)

Les documents géologiques révèlent que la spéciation ou formation de nouvelles espèces emprunte plusieurs voies : anagenèse, cladogenèse, quantique et stasigenèse :

L'anagenèse ou évolution phylétique qui est une évolution graduelle qui transforme une espèce en une autre (chrono espèce).

La cladogenèse ou évolution divergente est la formation d'une ou plusieurs espèces nouvelles à partir d'une espèce mère (lors des migrations ou par isolement forcé d'une partie de la population).

L'évolution quantique ou par saut liée à des modifications brusque dans les condition du milieu.

La stasigenèse (sans variations visibles) est caractéristique des populations qui occupent des milieux stables.

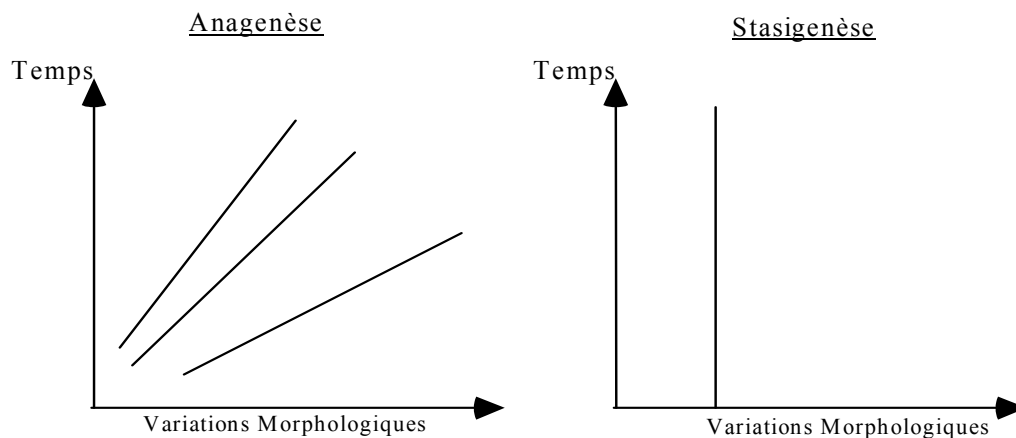


Fig. 10 a

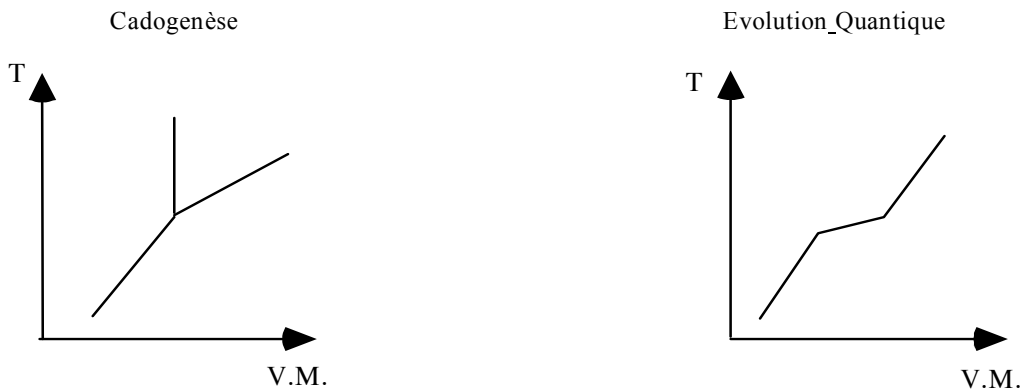


Fig. 10 b

[Relations entre mode et milieu de vie et mécanismes de l'évolution \(cf. cours\)](#)

Anagenèse \Rightarrow milieux faiblement variables \Rightarrow populations pélagiques

Quantique \Rightarrow milieux souvent variables \Rightarrow populations benthiques

Stasigenèse \Rightarrow milieux stables \Rightarrow populations benthiques

Cladogenèse \Rightarrow toutes les populations

4 Méthodes

Les étapes suivies dans les études paléontologiques sont:

[Echantillonnage](#)

La récolte et le traitement du matériel paléontologique est fonction de l'objectif recherché :

- Pour des études stratigraphiques, dont l'objectif est la datation des couches par leur contenu paléontologique, c'est la quantité et la diversité qui l'emportent sur la qualité.
- Pour des études systématiques, dont l'objectif est l'étude des caractéristiques morphologiques des populations, c'est la qualité et la diversité qui l'emportent sur la quantité.

Dans tous les cas, un ensemble de précautions s'imposent tels que :

- L'établissement d'un log stratigraphique détaillé et la description des niveaux où les prélèvements sont effectués,
- Le bon positionnement des points de prélèvement dans le log et la numérotation des échantillons,
- Le placement du log sur la carte topographique, la détermination des coordonnées des extrêmes et la description détaillée du cadre géologique.

[Prélèvement et préparation des échantillons](#)

Les échantillons peuvent être prélevés soit dans des roches meubles soit dans des roches dures.

La préparation des échantillons nécessite un traitement préalable pour mettre en relief toutes les caractéristiques morphologiques utiles à leur détermination.

Pour ce faire, et en fonction du type de roche et d'organismes qu'elle renferme (macrofossiles ou microfossiles), plusieurs méthodes sont utilisables :

- Trempage, lavage avec tamisage puis séchage pour les échantillons renfermés dans des roches meubles (marnes, argiles...).
- Pour dégager les fossiles renfermés dans des roches compactes, on utilise des méthodes mécaniques (burins, fraises dentaires, éclatement thermique) ou des attaques chimiques (acide chlorhydrique dilué et acide acétique pour les roches carbonatées, acide fluorhydrique pour les roches siliceuses, ébullition dans une solution à 10% de soude ou de potasse pour les marnes, schistes et calcaires marneux).
- Passage aux ultrasons pour mieux dégager les échantillons.
- Dans les roches dures, l'étude du microfaciès est faite grâce à la confection de lames minces. Il s'agit de coupes très minces effectuées dans la roche en la rendant transparente et donc les objets renfermés visibles au microscope.
- Pour l'étude de la morphologie interne des fossiles, on effectue des sections sériées et orientées.
- Dans le cas où la roche ou les échantillons sont friables, on procède à leur consolidation par l'utilisation de colles spéciales (colles et vernis durcisseurs).

Détermination

Pour la détermination, on utilise les paramètres de la classification systématique que sont les caractéristiques morphologiques qui dépendent de la nature du fossile (Végétal ou Animal, Unicellulaire ou Pluricellulaire, avec ou sans parties dures, nature minéralogique de la coquille ou du squelette, géométrie et architecture de la coquille ...).

Quand c'est possible, on utilise des catalogues appropriés où sont reportées des figurations (planches photographiques, dessins à main libre ou à l'aide d'une chambre claire) accompagnées souvent des diagnoses et des distributions stratigraphiques (âge).

Figuration

La représentation graphique des échantillons est effectuée à l'aide de matériel photographique approprié (microscopes et loupes équipées de prise de vues, microscope électronique à balayage ou à transmission, appareil photographique) ou de dessins à main libre ou à l'aide d'une chambre claire.

Reconstitution, Simulation, Modélisation, et Quantification

C'est un ensemble de techniques d'étude et d'interprétation des fossiles, fondé sur des méthodes mathématiques, statistiques et informatiques.

Troisième Partie

Causes et conséquences de l'Eustatisme

1 Introduction

L'eustatisme est toute variation relative du niveau de l'océan mondial (à l'échelle de la planète). Cette variation se manifeste par des déplacements de la ligne du rivage et par conséquences par une augmentation ou une diminution des surfaces du domaine marin et du domaine continental. L'eustatisme est provoqué par les moteurs responsables de la variation du volume d'eau ou/et du volume de l'océan mondial. Par leur impact direct sur le milieu, la vie et la sédimentation, perceptible à différentes échelles, les effets de l'eustatisme sont directement observables dans les séries stratigraphiques. (Planches annexes cf. cours)

2 Définitions

Variations relatives du niveau marin

Ce sont des processus qui se matérialisent par le déplacement vers le continent ou vers le large, de la ligne de rivage (transgressions et régressions). Ces déplacements (à l'échelle globale) dérivent de la montée ou de la baisse relative du niveau marin.

Suite à ces mouvements, les différents milieux d'érosion ou de sédimentation se déplacent dans un sens ou dans l'autre. Ceci provoque le déplacement latéral et donc la superposition de milieux différents.

Une régression peut être provoquée aussi \Rightarrow par une simple progradation de corps sédimentaires à accroissement latéral (delta, récif) sans aucune variation relative du niveau marin (régression forcée) \Rightarrow par des mouvements tectoniques sur les marges continentales (soulèvement).

Une transgression peut être provoquée aussi par des mouvements tectoniques sur les marges continentales (subsidence).

Au cours d'une transgression, la lithologie et les fossiles indiquent des milieux de plus en plus profonds de la base vers le sommet de la série (mesoséquence d'approfondissement). Ils sont moins profonds, du bas vers le haut, dans une régression (mesoséquence de comblement).

Causes

L'origine des variations relatives du niveau marin est à rechercher dans les causes de la variation du volume des bassins océaniques (tecto-eustatisme) et du volume de l'eau contenue dans ces bassins (glacio-eustatisme).

Tecto-eustatisme : changement du volume des bassins océaniques

La variation du volume de l'océan mondial est liée au changement du volume des dorsales médio océaniques. En effet (et en manière générale) on note que le passage d'une période de collision maximale (à super continent/s) à une période de dislocation maximale s'accompagne par une augmentation progressive de la longueur absolue du système dorsale. Elle diminue régulièrement lorsque d'une période de dislocation on va vers une période de collision.

Le tecto-eustatisme se présente donc comme un phénomène important. Les études ont montré un certain parallélisme entre la dérive des continents et les variations relatives du niveau marin à long et court termes rythmées par de tectonique des plaques.

a-Variation de la longueur du système dorsale (ensemble des rides médio-océaniques)

La collision des plaques provoque la disparition de certains océans et une diminution corrélative de la longueur globale du système dorsale et son volume absolu diminue (volume lié à la longueur). Ceci provoque une augmentation du volume du bassin océanique et donc une diminution du niveau marin.

La dislocation, par création de nouveaux océans, rallonge le système des dorsales. Les dorsales sont plus longues et donc leur volume absolu augmente. Par conséquent, le volume du bassin océanique diminue et le niveau marin augmente.

b-Variation du volume des rides médio-océaniques

La vitesse d'expansion océanique est variable dans le temps et dans l'espace. A l'échelle globale elle varie entre 2 et 24 cm/an en relation avec la position des dorsales sur le globe terrestre et à aux caractéristiques intrinsèque des cellules convectives (effet moteur). En absolu on peut considérer que l'activité des cellules convectives dans le manteau supérieur est continue dans le temps et que leur température est variable dans le temps et dans l'espace.

L'impact thermique des cellules convectives sur les dorsales se matérialise par une augmentation (dilatation) ou diminution (contraction) de leur volume.

Ceci provoque des variations positives ou négatives du volume du bassin océanique par augmentation ou diminution du volume des dorsales. Ces variations seraient donc directement liées à l'activité des cellules convectives dans le manteau supérieur et donc à la vitesse d'expansion océanique.

Quand la vitesse augmente le niveau marin augmente et il diminue quand la vitesse diminue.

c-Orogenèses

Les orogenèses tendent à réduire la surface des continents en plissant et même éventuellement en redoublant la croûte continentale. En conséquence, la surface des

continents diminue, le volume des bassins océaniques s'accroît et le niveau de la mer s'abaisse.

Glacio-eustatisme : changement du volume d'eau contenue dans les océans

Le climat contrôle d'une façon primordiale toute variation du volume d'eau contenue dans l'océan mondial et provoque donc des variations positives ou négatives de son niveau : c'est le glacio-eustatisme.

Ce type d'eustatisme est un phénomène assez particulier et pour qu'il y est des variations du niveau marin (montées ou baisses) dues à ce phénomène, il faut qu'il se produise un refroidissement (ou réchauffement) climatique et que des terres émergées importantes soient présentes au niveau ou à proximité des pôles.

Le glacio-eustatisme provoque des grandes régressions et transgressions liées respectivement à un refroidissement climatique (avec formation de calottes polaires) ou à un réchauffement climatique (fusion des calottes polaires).

Conséquences de l'eustatisme

La dérive des continents provoque des changements relatifs importants de la surface du domaine marin et du domaine continental et le maximum de ces changements s'enregistre au niveau des plates-formes continentales.

En période de dislocation maximale la surface occupée par les plates-formes est nettement supérieure à celle occupée par ces dernières lors des périodes à super continents. Ceci est en relation avec la diminution ou l'augmentation de la distribution des masses continentales auxquelles les plates-formes sont strictement liées.

Les transgressions et les régressions causées par le tecto-eustatisme, le glacio-eustatisme ou la combinaison des deux provoquent une augmentation ou une diminution de la surface absolue des domaines marin et continental.

Ceci a un impact sur :

Le milieu

Les modifications des surfaces, du domaine marin et du domaine continental, engendrées par les variations relatives du niveau marin, influent sur les caractéristiques biotiques et abiotiques des différents milieux :

- en période transgressive, la grande surface du domaine marin accroît l'évaporation, donc la nébulosité et les précipitations. Le climat sera humide et à faible écart thermique. Au niveau du domaine continental, les mers épicontinentales pénètrent, parfois profondément au sein des terres émergées. L'altitude relative des reliefs diminue. Le climat sera plus océanique avec faible écart thermique.
- en période régressive la pluviosité diminue et le climat est sec. Les mers épicontinentales sont réduites, voir absentes. L'altitude relative des reliefs augmente et le climat sera plus continental avec un fort écart thermique.

La sédimentation

Les modifications progressives de la configuration terrestre, causées par la dérive continentale, entraînent des changements dans le régime et la dynamique sédimentaire. Ceci est en relation avec la modification conséquente du profil de la courbe d'équilibre des fleuves.

a - Détritique :

- les périodes à super continents (phase tectonique convergente) sont caractérisées par un climat aride, défavorable à la végétation (déforestation) et de vastes surfaces sont ainsi livrées à l'érosion mécanique et chimique (rhexistasie). L'abaissement du niveau marin (régression) entraîne en plus, un surcreusement des fleuves et les apports terrigènes vers le bassin sont alors importants.
- lors des périodes de dislocation (phase tectonique divergente), les mers épicontinentales pénètrent entre les continents séparés. Le climat océanique favorise le développement du couvert végétal (Biostasie) et l'érosion mécanique est faible.

Les avancées marines (transgressions) déplacent graduellement la ligne de rivage vers le continent. Les sédiments terrigènes, piégés près des rivages, s'éloignent progressivement du centre du bassin.

b- Carbonatée :

Les dépôts carbonatés sont essentiellement constitués par l'accumulation de bioclastes. C'est donc le facteur biologique qui dirige, en grande partie et d'une manière directe (bioconstructions) ou indirecte (accumulations) la sédimentation carbonatée.

Les transgressions correspondent à des périodes à forte sédimentation carbonatée car elles augmentent la surface des biotopes favorables au développement des organismes marins (plate-forme continentale).

Lors des régressions, c'est la sédimentation terrigène qui domine.

c- Les dépôts anoxiques (black shales) :

Il s'agit de vases organiques noires (détritiques fines riches en matière organique), qui se déposent dans des milieux anoxiques en période de confinement (régressions) ou de ralentissement des circulations océaniques (transgressions). Ces vases sapropéliques deviennent par diagenèse des black shales, roches mères du pétrole.

Pendant les périodes transgressives, se vérifient toutes les conditions favorables au développement de ce type de sédimentation :

- les dépôts de bassin sont argileux, se déposent lentement et peuvent se charger en matière organique.
- la faible profondeur de la CCD (limite de compensation des carbonates) restreindra l'aire de répartition de la sédimentation carbonatée,
- le climat chaud et humide (à faible écart thermique) accompagné de la disparition des calottes polaires fait que pendant les transgressions les températures marines sont plus homogènes, ainsi, les courants produits par les écarts de température seront moins actifs.
- la montée du niveau marin permet de larges communications entre les océans, ce qui tend à diminuer les différences entre leurs caractéristiques physico-chimiques et réduire l'activité des courants dus à ces processus. Il faut noter que dans cette analyse nous n'avons pas tenu compte de la configuration des bassins et des forces de Coriolis, qui sont deux paramètres essentiels dans la formation des courants.
- la teneur en oxygène, de la colonne d'eau océanique, bien que très élevée en surface (activité importante du phytoplancton), diminue rapidement avec la profondeur.

La vie

L'influence de l'eustatisme sur la vie est très importante, qu'il s'agisse de vie marine ou continentale.

a – Marine

L'eustatisme aurait de nombreuses conséquences sur la vie marine du fait de ces conséquences sur le climat, la surface du domaine marin, la sédimentation, la teneur en oxygène et en dioxyde de carbone.

Les périodes transgressives seraient caractérisées par le développement de conditions favorables à la vie marine avec un enrichissement tant en espèces qu'en individus ; certains groupes évoluent rapidement pour coloniser les niches écologiques nouvelles, créées par la montée du niveau marin.

La faune pélagique connaît un grand développement, lors des transgressions, aussi bien dans le bassin (zone photique) que dans la plate-forme continentale.

La faune benthique, toujours en période transgressive et suite au développement de larges surfaces à faible tranche d'eau (plates-formes), connaît-elle aussi un grand développement qualitatif et quantitatif.

Lors des régressions, on assiste à une forte réduction des surfaces favorables à la vie benthique (plates-formes) avec en conséquence une réduction des populations.

b – Continental

Les variations relatives du niveau marin influenceraient la vie continentale par le biais de deux facteurs :

- lors des périodes régressives, la surface des continents augmente et, par conséquent, l'aire de répartition des organismes continentaux devient théoriquement plus importante. Toutefois, les régressions, en créant des ponts de terre entre des continents jusque là séparés, mettent en compétition des populations dont les biotopes sont identiques et entraînent ainsi de nombreuses extinctions.
- la baisse du niveau marin entraîne une baisse dans le niveau des nappes et par la suite, un manque d'eau pour les animaux et végétaux. Ceci entraîne une désertification de plus en plus accentuée au centre des continents avec en conséquence une réduction des surfaces favorables à la vie.

Résumé

Origine de la vie

Complexité croissante
Occupation progressive des milieux

Evolution

Transformations morphologiques et génétiques des populations au cours du temps (géologique).
C'est un phénomène naturel continu et irréversible dans le temps.

Moteurs: pression externe et pression interne

La pression externe \Rightarrow provoquée par des variations dans les conditions du milieu \Rightarrow continue ou discontinues dans le temps

Pression externe discontinue dans le temps \Rightarrow provoque une réduction dans le nombre de la population par migration et/ou disparition d'une partie de cette dernière. Le reste de la population, une fois adapté aux nouvelles conditions du milieu, se développe progressivement.

La pression interne \Rightarrow guidée par la compétitivité et l'interfécondité entre les individus de la population \Rightarrow continue dans le temps \Rightarrow provoque des modifications par brassage génétique.

Evolution \Rightarrow Pression interne + Pression externe \Rightarrow variations morphologiques/temps \Rightarrow continue et irréversible

Pression interne \Rightarrow fonction de la densité et de la compétitivité

Pression externe \Rightarrow fonction de la vitesse de variation des conditions milieu \Rightarrow lente ou rapide \Rightarrow brusque ou progressive

Vitesse de l'évolution:

Augmentation de la vitesse d'évolution \Rightarrow changement brusque de la vitesse de variation des paramètres physico-chimiques du milieu

Diminution de la vitesse d'évolution \Rightarrow adaptation aux nouvelles conditions du milieu

Notion d'espèce:

Espèce biologique \Rightarrow population \Rightarrow individus \Rightarrow interféconds

Espèce paléontologique \Rightarrow population \Rightarrow individus \Rightarrow identiques

Mécanismes de l'évolution:

Anagenèse \Rightarrow continue \Rightarrow vitesse constante

Quantique \Rightarrow continue \Rightarrow vitesse variable

Stasigenèse \Rightarrow pas d'évolution \Rightarrow vitesse zéro

Cladogenese ⇒ continue

Relations entre mode et milieu de vie et mécanismes de l'évolution

Anagenèse ⇒ milieux faiblement variables ⇒ populations pélagiques

Quantique ⇒ milieux souvent variables ⇒ populations benthiques

Stasigenèse ⇒ milieux stables ⇒ populations benthiques

Cladogenese ⇒ toutes les populations

Fossiles

Stratigraphiques et/ou de Faciès :

	AGE	MILIEU
A	+	+
B	+	-
C	-	+
D	-	-

Litho stratigraphie

Mécanismes de la sédimentation:

Gravitaire ⇒ décantation ⇒ Lignes temps horizontales à toutes les échelles d'observation ⇒ Vecteurs temps horizontaux à toutes les échelles d'observation

Accrétion latérale ⇒ Lignes temps obliques à petites échelles (nappe) et horizontales à grande échelle (plusieurs nappes superposées) ⇒ Vecteurs temps horizontaux à petite échelle (nappe) et verticaux à grande échelle (plusieurs nappes superposées)

Relais

Progressifs ⇒ avec zone de transition

Brusques ⇒ zone de transition absente

Séquences de dépôt

Séquence élémentaire ⇒ essentiellement de comblement

Mésoséquence ⇒ approfondissement ou comblement

Mégaséquence ⇒ approfondissement, comblement ou cyclique

Faciès = lithologie ⇒ texture ⇒ contenu paléontologique ⇒ figures et structure sédimentaires ⇒ épaisseur ⇒ etc....

Couches dures ⇒ strates

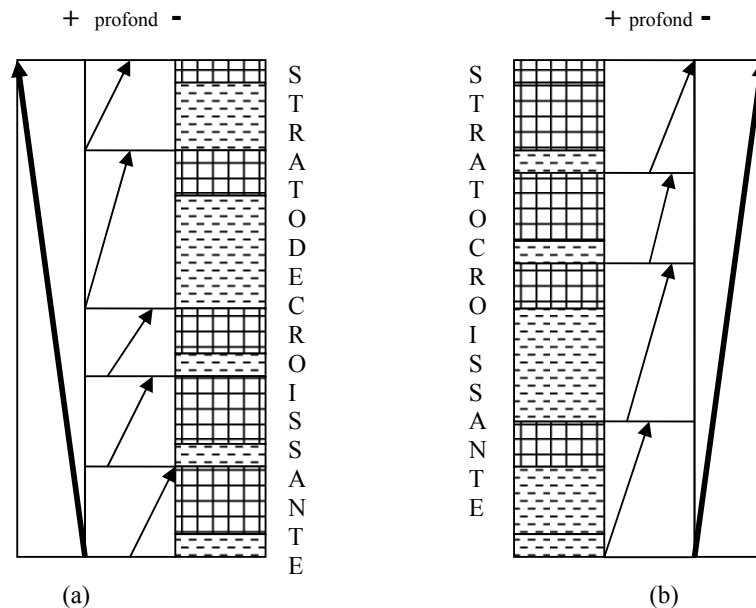
Couches tendres ⇒ interstrates

Stratonimie ⇒ stratocroissante ou stratodecroissante

Evolution bathymétrique ⇒ approfondissement ou comblement

Séquence d'approfondissement (a) ⇒ essentiellement stratodécroissante ⇒ composée de séquences élémentaires de comblement à dérive générale d'approfondissement

Séquence de comblement (b) ⇒ essentiellement stratocroissante ⇒ composée de séquences élémentaires de comblement à dérive générale de comblement



Transgression et régression

Ce sont des processus qui se matérialisent par le déplacement vers le continent ou vers le large, de la ligne de rivage. Ces déplacements dérivent de la montée ou de la baisse relative du niveau marin

Suite à ces mouvements, les différents milieux d'érosion ou de sédimentation se déplacent dans un sens ou dans l'autre. Ceci provoque le déplacement latéral et donc la superposition de milieux différents.

Une régression peut être provoquée aussi ⇒ par une simple progradation de corps sédimentaires à accroissement latéral (delta, récif) sans aucune variation relative du niveau marin ⇒ par des mouvements tectoniques sur les marges continentales (soulèvement).

Une transgression peut être provoquée aussi par des mouvements tectoniques sur les marges continentales (subsidence).

Au cours d'une transgression, la lithologie et les fossiles indiquent des milieux de plus en plus profonds de la base vers le sommet de la série (mesoséquence d'approfondissement). Ils sont moins profonds, du bas vers le haut, dans une régression (mesoséquence de comblement).

A l'échelle globale les déplacements de la ligne de rivage sont strictement liés aux variations relatives du niveau marin (montée et baisse). Ces derniers sont provoqués par la variation du volume d'eau (lors de périodes glaciaires) et/ou la variation du volume du bassin (tectonique des plaques).

A l'échelle locale les déplacements de la ligne de rivage peuvent être provoqués en outre par simple progradation de corps sédimentaires à accroissement latéral (delta, récif) ou par des mouvements tectoniques sur les marges continentales (affaissement ou soulèvement).

Composition minéralogique et pétrographique

Pour les sédiments détritiques, elle permet de déterminer l'origine (relief, climat et lithologie de l'aire nourricière), le transport (maturité) et la diagenèse. Pour les sédiments endogènes elle renseigne sur le milieu de dépôt et sur la diagenèse.

Texture

Elle permet de déterminer la provenance (forme), la dynamique de transport et de dépôt (usure, sélection, compétence, orientation ...).

Contenu fossilifère

Permet des datations et des corrélations. Informe sur la paléoécologie et sur le transport (remaniement).

Orientations et directions

Permettent de déterminer les paléocourants et paléopentes, les dispersions de sédiments; sur la base de structures de courant et slump et de la géométrie des corps sédimentaires.

Structures sédimentaires

Informent sur les procédés et les mécanismes, milieu, vitesse de sédimentation, diagenèse, paléobathymétrie.

Géométrie des corps sédimentaires

Elle permet de déterminer le milieu et le système dépositionnel.