

LA TECHNIQUE DE LA SISMIQUE REFLEXION

Objectifs : reconstitution de la structure voire de la nature des terrains géologiques dans la croûte terrestre (quelques km à dizaines de km maximum) sous la forme de coupes géologiques.

Cette technique consiste à envoyer des **ondes acoustiques** (équivalentes à des ondes sismiques) dans le **sous-sol** en provoquant des explosions ou des vibrations. Les sources sismiques couramment utilisées sont, **dans l'eau, les canons à air ou à eau et les décharges électriques à haute tension, dans l'air les chutes de poids (camion-vibreux), les explosifs ou un fusil sismique.**

Les ondes se propagent dans toutes les directions, et quand elles rencontrent des **discontinuités ou réflecteurs** (limites entre couches géologiques de natures différentes), une partie est réfléchié tandis que les autres continuent leur chemin et peuvent être réfléchies par des limites situées plus en profondeur, etc.

Le réflecteur sépare deux milieux dans lesquels la vitesse de propagation des ondes sismiques diffère du fait d'une densité, d'une composition chimique ou d'une compacité différente

Un **récepteur** enregistre le temps d'arrivée des ondes. Ce récepteur peut être un **hydrophone, un OBS (Ocean Bottom Seismometer) ou un géophone.**

Un **hydrophone** est un capteur piézoélectrique qui transforme les variations de pression dans l'eau en tensions électriques. Les hydrophones sont disposés le long d'un long câble appelé **flûte** (jusqu'à 7 km de long comportant 480 hydrophones) traîné derrière le bateau.

Un **OBS** est un **ensemble de sismomètres posés sur le fond marin.**

Un **géophone** est un capteur sensible à la vitesse de déplacement du sol.

- Les **profils de sismique-réflexion** résultent de l'analyse et du traitement **d'ondes réfléchies**. La distance entre la source sismique et le récepteur est **constante**.

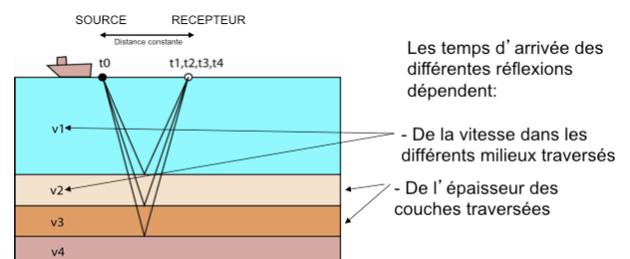
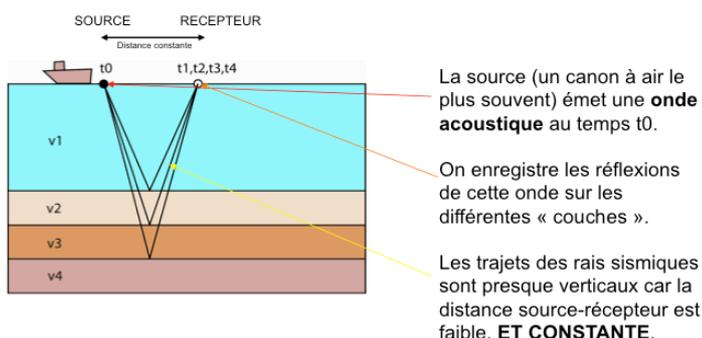
Le résultat de l'enregistrement se présente sous la forme **d'un profil ayant pour abscisse la distance horizontale et pour ordonnée un temps double** (temps pour l'aller- retour des ondes entre la surface et le réflecteur).

- Chaque **trait noir continu sur un profil correspond à un réflecteur**. Cette technique permet donc d'appréhender les **formations et structures géologiques superficielles** ; l'interprétation de ce type de profil vise à déterminer par une lecture verticale, la position des réflecteurs et donc des **discontinuités**, mais aussi, par une lecture horizontale, à révéler des **structures (plis et failles)**.

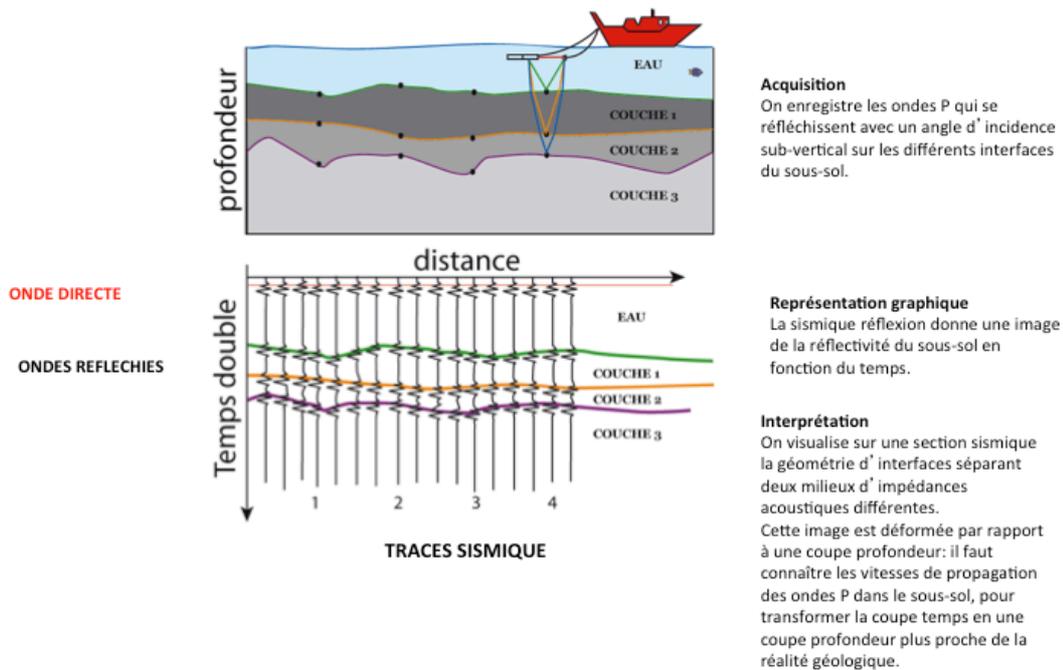
Cette technique est très utilisée en prospection pétrolière, car elle permet de chercher des réservoirs d'hydrocarbures.

Exemple : Mesures faites en mer sur des navires qui traînent lentement ($15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) un ou plusieurs **canons à air tirant à intervalles réguliers (source des ondes sismiques)**, ainsi qu'une **longue flûte sismique** (qui fait plusieurs centaines de mètres voire quelques kilomètres de longueur), équipée **d'hydrophones sensibles aux variations de pression de l'eau.**

Les tirs de canon (un toutes les dix secondes environ) produisent des ondes qui se propagent dans l'eau et qui sont transmises aux sédiments. Ces ondes se propagent, et sont réfléchies et réfractées à l'interface entre deux milieux d'indices différents).



ON PARLE DONC AUSSI DE SISMIQUE VERTICALE



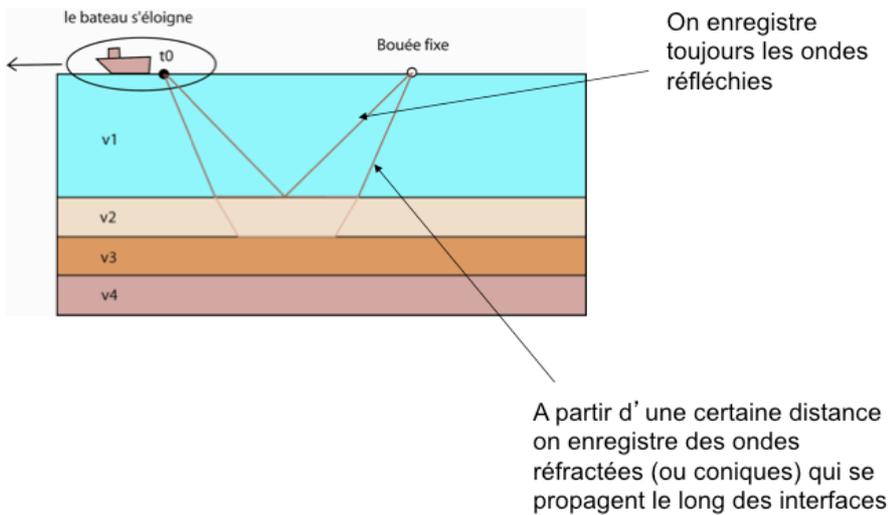
Savoir lire un profil sismique

- L'abscisse du profil sismique est en kilomètres : c'est le trajet parcouru par le bateau. L'ordonnée est en temps double. Ce temps double peut être converti en profondeur si l'on connaît la vitesse de propagation des ondes sismiques dans les différents milieux traversés.
Attention : Pour trouver la profondeur d'une interface il faut donc **diviser le temps par 2**.
- Les traits visibles sur le profil sont des **discontinuités**, qui peuvent être suivies sur plusieurs centaines de kilomètres dans certains bassins. En utilisant plusieurs profils perpendiculaires les uns par rapport aux autres, il est maintenant possible de faire des modèles en trois dimensions de la géométrie des sédiments dans un bassin. L'interprétation de ce type de profil vise à déterminer par une lecture verticale, la position des réflecteurs et donc des **discontinuités**, mais aussi, par une lecture horizontale, à révéler des **structures (plis et failles)**.
- La sismique réflexion ne donne aucune information sur la nature et l'âge des dépôts, seulement sur leur géométrie. Pour les connaître, il faut faire des sondages ou utiliser la sismique réfraction. Certains réflecteurs particuliers (ex. évaporites messiniennes) peuvent servir de repères.
Attention également à la **résolution (une dizaine de mètres) : les réflecteurs ne sont pas des limites de strates comme sur le terrain**.

- Ne confondez pas la **sismique réflexion qui vise plutôt à obtenir une image des structures** et dans laquelle le récepteur est très proche de la source, avec la **sismique réfraction** où les récepteurs - géophones sur terre ou OSS (Oceanic Bottom Seismometre) au fond de l'océan - sont loin de la source et qui vise plutôt à **calculer des vitesses sismiques**. Comme leurs noms l'indiquent, la sismique réflexion s'intéresse aux ondes réfléchies et la sismique réfraction aux ondes réfractées.

LA TECHNIQUE DE LA SISMIQUE REFRACTION

La technique de sismique-réfraction utilise des OBS en mer et des géophones sur les continents. La distance entre la source et le récepteur augmente au cours du relevé de mesure. Les résultats de sismique-réfraction se présentent sous forme d'un **diagramme dromochronique** qui exprime le temps mis par l'onde pour réaliser son trajet entre la source et le récepteur en fonction de la distance entre ces deux points. Dans ce graphique, les ondes réfractées décrivent une droite ne passant pas par l'origine. Sa pente permet de **calculer la vitesse de l'onde sismique et donc de déduire l'épaisseur de la couche** traversée. D'autre part, la vitesse dépendant de la densité des matériaux (loi de Birch), elle permet de **déterminer la nature des couches traversées par les ondes**.



Remarque : Les résultats de sismique-réfraction sont souvent présentés sous la forme d'un profil de sismique-réflexion sur lequel la **profondeur du Moho** (déterminée grâce à la différence de vitesse des ondes P dans la croûte et le manteau) est indiquée ou d'une coupe sur laquelle les **couches sont distinguées par leur masse volumique ou par la vitesse des ondes P qui les traversent.**

FORAGES ET LES DIAGRAPHIES

Forages et carottages

Les forages sont généralement réalisés pour trouver et exploiter des **ressources naturelles** (eau, hydrocarbures, minéral, chaleur, etc.), mais certains sont réalisés dans un but scientifique pur. Il s'agit de la technique d'étude de la croûte la plus directe. Elle est toutefois coûteuse (les outils de forage sont perfectionnés et consomment beaucoup d'énergie, et il faut souvent stabiliser le sous-sol le long du forage) et limitée : les forages les plus profonds ont atteint 12 km de profondeur dans la croûte continentale.

Lors de la réalisation d'un forage, il est possible de récupérer au fur et à mesure les **déblais de forage** (ou cuttings). Mais pour gagner en précision, on peut aussi réaliser un **carottage** : on prélève un échantillon du sous-sol tout le long du forage, et l'échantillon obtenu est appelé une carotte. La technique de forage est dans ce cas très particulière, la foreuse ayant une forme de cylindre creux, de manière à pouvoir récupérer la carotte intacte à l'intérieur du cylindre. Quelle que soit la technique utilisée, il est possible d'analyser la chimie, la minéralogie, des rapports isotopiques, etc. des matériaux prélevés dans les déblais de forage ou le long de la carotte.

DIAGRAPHIES : Objectifs : récolter des échantillons de sous-sol et/ ou effectuer des mesures de paramètres physico-chimiques dans le sous-sol.

Les diagraphies sont l'enregistrement de certains paramètres et propriétés physiques le long d'un forage. L'enregistrement de ces paramètres permet d'apporter de nombreuses informations sur la nature, la structure et le contenu en fluides (teneur en eau, hydrocarbures) des roches en profondeur.

Principe des diagraphies

Il est possible de réaliser des mesures physiques dans le puits de forage permettant de caractériser les lithologies traversées ; on parle de méthodes diagraphiques. Pour effectuer des mesures diagraphiques, un capteur est inséré dans le puits de forage. Ces informations sont enregistrées sous forme d'un profil montrant les variations du paramètre mesuré en fonction de la profondeur.

➡ **Les diagraphies gamma-ray sont des mesures de la radioactivité naturelle des roches traversées par le sondage. Cette méthode permet de caractériser la lithologie des roches traversées, car la radioactivité émise par une roche (le « gamma-ray ») dépend de sa nature et de sa composition en certains éléments radioactifs.**

Les rayonnements γ sont préférés aux autres rayonnements radioactifs car ils traversent plus facilement les matériaux, et ne sont pas arrêtés par le tubage du puits de forage. Les mesures gamma ray sont données en API qui est une unité basée sur le niveau d'émissions bien connu de roches d'une carrière de la région de Houston (Texas, USA). Les principaux éléments radioactifs naturels sont le ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U et le ^{235}U .

- Par exemple, les **argiles** (et les roches riches en argiles ou issues de la compaction d'argile) ont une **radioactivité plus élevée que les autres roches sédimentaires, car elles contiennent davantage de potassium, d'uranium et de thorium.**

- Parfois certaines roches peuvent également avoir une **radioactivité naturelle élevée (sels de potassium, roches sédimentaires riches en feldspaths)**, et ce sont des enregistrements gamma-ray spectraux qui permettent d'identifier ces anomalies.

- De plus, la forme de la courbe du gamma-ray apporte **des informations sur le milieu de dépôt** des sédiments (dunes aériennes, deltas, plages ...).

- Enfin, les diagraphies gamma-ray sont particulièrement intéressantes pour établir des corrélations entre différents forages et connaître ainsi la sédimentation du bassin à plus grande échelle.

➡ **Mise en œuvre et apport du sonic**

L'outil sonic est une diagraphie qui mesure le temps mis par des ondes sonores produites par une source pour arriver à des récepteurs, en traversant les roches dans lesquelles passe le forage.

La distance source-récepteur étant connue, il est possible de calculer la vitesse moyenne des ondes sonores dans les matériaux traversés. Or cette vitesse est liée aux propriétés physiques du milieu. Ainsi les mesures sonic permettent de déterminer la densité des matériaux traversés et d'estimer la porosité du milieu ainsi que le type de fluide la comblant.

En effet, plus une roche est poreuse (donc peu cimentée pour les roches sédimentaires) plus le temps de parcours de l'onde acoustique en son sein est long. Dans la pratique les dépôts argileux auront un temps de parcours plus long que les dépôts sableux car leur porosité est plus forte

- C'est également un bon outil pour corrélérer différents forages d'une même zone.

Pour corrélérer les données enregistrées sur différents forages, il faut regarder les pics dans les enregistrements et identifier les pics qui sont liés aux mêmes formations (même « motif » par ex.).

Ces corrélations ne sont pas toujours évidentes à faire, car la forme des enregistrements peut être influencée par des modifications des paramètres du milieu qui ne sont pas forcément liées à un changement de la lithologie (teneur en fluides, porosité ...).

- AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIFFERENTES METHODES

	Sismique	Diagraphies
Avantages	Étude de la géométrie des dépôts sur de très grandes surfaces et en trois dimensions. Cout faible par rapport aux forages.	Très bonne résolution (inférieure au mètre). Information sur la lithologie des roches, la profondeur des discontinuités.
Inconvénients	Résolution très faible (10 à 50 m). Pas d'information directe sur la lithologie et la profondeur.	Extrapolation à grande distance impossible. Cout élevé et mise en œuvre difficile des forages.

- Ces deux méthodes sont donc complémentaires. La sismique permet d'avoir une idée de la géométrie des dépôts à grande échelle mais est plus difficilement exploitable (par les pétroliers notamment) sans les diagraphies qui permettent d'établir localement une correspondance entre les dépôts visibles en sismique et la lithologie des roches en profondeur.

Il est néanmoins possible actuellement d'extraire pas mal d'informations sur la lithologie à partir de la seule sismique grâce à des modèles numériques.

L'importance accordée à la sismique ou aux diagraphies dépend beaucoup des objectifs de l'étude (recherche pétrolière, étude des variations du niveau marin à grande échelle ...) ainsi que des moyens économiques mis en œuvre (une campagne sismique avec les traitements informatiques coute environ 25 M\$, un forage coute entre 50 et 200 M\$...).

LA TOMOGRAPHIE SISMIQUE

La tomographie sismique peut être assimilée à un scanner pour la Terre = technique d'imagerie tridimensionnelle des hétérogénéités de la Terre interne.
Elle donne la localisation et l'amplitude des ANOMALIES DE VITESSE DES ONDES SISMIQUES PAR RAPPORT À UN MODÈLE MOYEN DE RÉFÉRENCE PREM : résultats en pourcentage de variation par rapport au modèle et non pas en vitesse absolue
Ces variations sont interprétées par des changements de la densité (et de la rigidité) du milieu traversé par les ondes, qui sont liés à des variations de la température et/ou des changements de la composition chimiques ou minéralogique, par rapport au modèle de référence.

Principe : en disposant de nombreuses données sismiques, il est possible de calculer la vitesse de propagation de l'onde sismique P (mais aussi S) pour chaque endroit du globe situé à une profondeur donnée. On peut alors comparer cette valeur locale VP (ou VS) à celle présentée par le modèle sismologique à symétrie sphérique de la Terre (PREM) soit VPREM.

Les écarts relatifs entre ces valeurs soit $\Delta VP = (VP - VPREM) \cdot 100 / VPREM$ appelés anomalies sont exprimés en pourcentage. Ces anomalies (quelques % tout au plus) sont rassemblées et représentées sous forme d'images

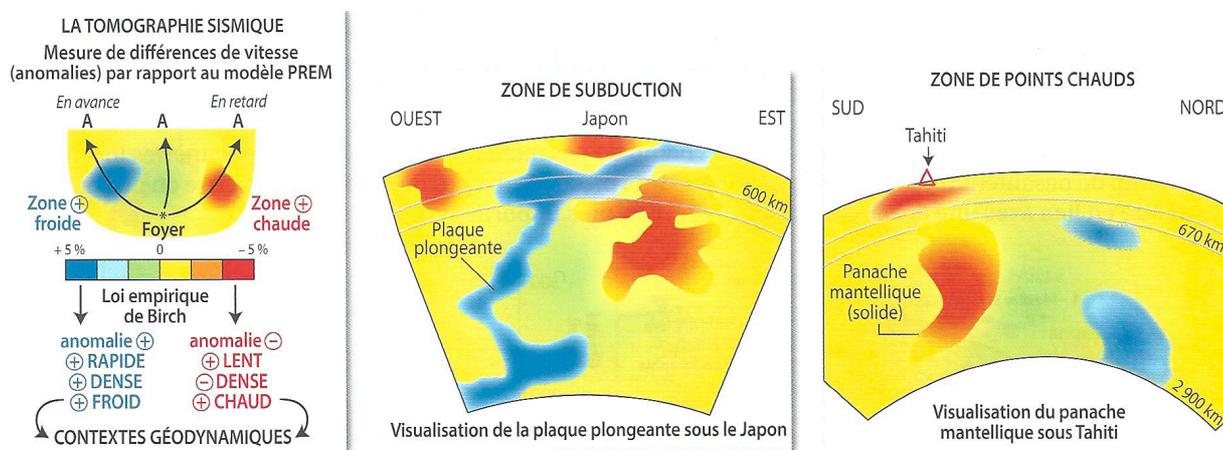
- La tomographie sismique (figures) est une cartographie en deux ou trois dimensions des anomalies* de propagations des vitesses d'ondes sismiques dans le globe, principalement dans la croûte et surtout le manteau.
- Les anomalies* de vitesses des ondes sismiques sont des écarts entre la vitesse effectivement calculée (à partir de nombreux séismes) en un point donné et la vitesse moyenne des ondes attendue à la profondeur considérée (soit la vitesse du modèle PREM).

*** Très important : la notion d'anomalie en géologie**

En géologie, une anomalie est un écart, pour un paramètre géologique, entre une valeur effectivement mesurée (éventuellement corrigée) et une valeur théorique attendue.

- On applique alors, dans l'interprétation, la loi empirique de BIRCH qui stipule que la vitesse des ondes sismiques dépend de la densité des roches. $v = A + B \rho$ où A et B sont des constantes.

Et l'on considère que la densité est, elle, reliée la température et donc qu'un écart à la densité attendue dans une zone est un écart de température par rapport à la température moyenne des matériaux à la même profondeur.



A chimie constante :

- les zones plus lentes sont interprétées comme étant plus chaudes donc moins denses et par conséquent ascendantes dans une enveloppe convective ;
- les zones plus rapides sont interprétées comme plus froides et plus denses donc descendantes dans une enveloppe convective.

PRINCIPES DE LA CHRONOLOGIE RELATIVE ENTRE LES TERRAINS (CARTE OU COUPE)

- Principe de continuité : une même couche a le même âge sur toute sa surface.
- Principe de superposition : dans une zone non déformée, les terrains les plus bas sont les plus anciens. Si les strates sont déformées, il est possible qu'elles soient inversées, et il faut donc rechercher des critères de polarité pour orienter la strate et distinguer le toit de la base.
Les critères de polarité sont variés : granoclassement, empreintes et terriers, fossiles en position de vie ...
- Principe de recoupement : toute structure qui en recoupe une autre lui est postérieure.
Ce critère est très utile pour étudier la chronologie relative des failles ou des roches magmatiques (ex. filons qui se recoupent).
- Principe d'inclusion : un morceau de roche inclus dans une autre roche lui est antérieur.
- Principe paléontologique : un fossile a le même âge que la roche où il se trouve.

- Pour appliquer ces principes, il faut tout d'abord identifier les strates

Pas toujours évident, car le **faciès de la strate change si le milieu de dépôt change** (ex. cas d'un littoral où les sédiments se déposent en milieu continental dans certaines zones et en milieu marin dans d'autres). De même, 2 strates d'âges différents peuvent avoir le même faciès si les dépôts se sont faits dans les mêmes conditions.

Le **faciès d'une roche ou d'un terrain est l'ensemble des caractères pétrographiques et paléontologiques qui caractérisent une roche** (ex. faciès gréseux, faciès schisteux, faciès granitique ...). Certains faciès permettent de préciser des conditions de dépôts (ex. faciès récifal).

LA BIOSTRATIGRAPHIE = METHODE STRATIGRAPHIQUE FONDEE SUR LE CONTENU EN FOSSILES DES STRATES GEOLOGIQUES

Elle est basée sur le principe de l'irréversibilité de l'évolution : une espèce ne vit qu'à un moment de l'histoire de la Terre et est donc caractéristique de la période à laquelle elle vit.

Des roches, même éloignées, qui contiennent les mêmes fossiles ont le même âge (principe d'identité paléontologique).

On peut établir une succession biostratigraphie à partir d'évènements (apparition, disparition, relai d'espèces...) ou à partir d'association d'espèces co-existantes.

Une espèce (ou un taxon plus généralement) présente une répartition dans le temps (entre son apparition sur Terre et sa disparition) et une extension géographique. Cette **distribution temporelle et spatiale** est déduite des observations de terrain, elle résulte donc de la qualité de la documentation.

- Les fossiles stratigraphiques sont des espèces qui sont bien conservées (présence d'un test ou d'une coquille par ex., individus nombreux ...), ont une durée de vie courte à l'échelle des temps géologiques et une répartition géographique vaste.

Ce sont généralement des **fossiles marins dont la morphologie varie rapidement**.

Les fossiles stratigraphiques les plus utilisés sont les **Trilobites** (caractéristiques du milieu marin, début Paléozoïque), les **Graptolites** (milieu marin, Ordovicien-Silurien), les **Cryptogames vasculaires** (milieu continental, Carbonifère), les **Ammonites** (milieu marin, Mésozoïque), les **Bélemnites** (milieu marin, Mésozoïque), les **dinosaures** (milieu continental, Mésozoïque), les **Rongeurs** (milieu continental, Cénozoïque).

Les **Foraminifères** constituent également un groupe particulièrement utilisé sur toute l'échelle géologique, car **certains sous-groupes de Foraminifères sont caractéristiques d'une période.**

- **La biozone est l'unité de base de la biostratigraphie définie par le contenu fossilifère des sédiments.**

Sur le terrain une biozone correspond à un **ensemble de couches comprenant verticalement (dimension temps) et latéralement (dimension espace) la même succession de taxons.** Cette unité est donc limitée par l'apparition, et/ou la disparition, d'une (ou plusieurs) espèce(s).

Elle peut être délimitée par des événements tels que l'apparition ou la disparition d'une espèce, l'abondance particulière d'une espèce ou par l'association de différentes espèces (ex. base correspondant à l'apparition d'une espèce et toit à la disparition d'une autre ...).

La **durée d'une zone est de l'ordre d'un million d'années**, mais cette durée peut parfois être plus courte.

- **Cette méthode est fiable, précise, rapide et peu chère pour dater des couches et faire des corrélations stratigraphiques, mais elle n'est pas sans inconvénients.**

En effet, elle ne s'applique qu'au Phanérozoïque, soit à partir de 540 Ma ; elle ne fournit pas directement d'âge chiffré ; elle n'est pas aussi facilement applicable à tous les milieux de dépôts (plutôt milieu marin que continental) et les corrélations ne sont pas toujours évidentes à faire (migration d'espèces).

Elle reste néanmoins une méthode très utilisée qui évolue encore (définitions des biozones par ex.).

- **Un stratotype est un affleurement de référence « type » désigné pour un étage, la plus petite division de l'échelle stratigraphique.**

La localité du stratotype lui donne son nom. Actuellement, les stratotypes et les limites des étages sont définis par l'International Commission on Stratigraphy (Commission internationale de stratigraphie - ICS), qui met à jour régulièrement l'échelle des temps géologiques. Il existe actuellement plusieurs catégories de stratotypes dont deux sont particulièrement utilisés.

- **Le stratotype d'unité est une coupe type qui sert d'étalon pour la définition et l'identification d'une unité stratigraphique (l'étage en général).**

Les critères actuels pour établir un stratotype d'unité sont un **contenu fossilifère important, la présence de marqueurs permettant de faire des corrélations avec d'autres affleurements (fossiles stratigraphiques, marqueurs géochimiques, magnétiques ou minéralogique) et la possibilité d'être subdivisé.**

Cette notion de stratotype a des **limites**. En effet, **les séries sédimentaires continues et complètes sont très rares, voire inexistantes, pour certaines lithologies et le stratotype est alors formé de plusieurs affleurements (stratotype composite).** De plus, un stratotype correspond à un milieu (généralement des plateformes continentales riches en fossiles et ayant une extension assez vaste) et il ne peut donc pas contenir tous les groupes de fossiles d'une époque. La représentativité d'un stratotype à l'échelle globale n'est donc pas toujours évidente. Du fait de ces limites, la notion de stratotype a récemment évolué.

- **Le stratotype de limite caractérise une limite d'un étage et comprend un ensemble continu de couches situées de part et d'autre de la limite.**

Au sein de ces stratotypes, la **limite appelée GSSP** (Global Boundary Stratotype Section and Point) est précisément identifiée et marquée sur le terrain à l'aide d'un « clou d'or » scellé dans la roche (Golden Spike). Les GSSP correspondent à la base des étages et sont signalés sur l'échelle stratigraphique par un symbole représentant le clou d'or.

Ils sont définis par **des marqueurs biostratigraphiques (apparition ou disparition de fossiles biostratigraphiques), géochimiques (courbe d'oxygène isotopique, anomalies géochimiques comme l'anomalie en iridium de la limite Crétacé-Tertiaire ...) et/ou magnétiques (inversions du champ magnétique terrestre).**

- **Ces deux catégories de stratotypes sont complémentaires.**

En effet, les stratotypes de limite permettent de définir précisément et rigoureusement les limites d'un étage, mais ils ne remplacent pas les stratotypes d'unité qui apportent des informations sur le contenu de l'étage.

• L'échelle chronostratigraphique internationale (ou échelle des temps géologiques) est établie et régulièrement révisée par l'ICS.

• L'unité de base de l'échelle chronologique est l'étage (ou âge selon la nomenclature utilisée).

Les coupures entre les périodes et les ères correspondent souvent à des crises biologiques (la plus connue est la crise Crétacé-Tertiaire, la plus importante est celle de la fin du Permien).

La figure présente une version simplifiée de l'échelle des temps géologiques.

Quelques événements importants de l'histoire de la Terre dont il est bon d'avoir l'âge en tête ont été placés, mais leur connaissance n'est pas exigible au concours. Vous devez en revanche connaître le nom des périodes et leur âge. Les indices et les couleurs associés à chaque période (ou époque pour le Cénozoïque) dont la connaissance permet de gagner beaucoup de temps lors de l'analyse des cartes sont également précisés (couleur milliardième)

Eon	Ere	Période	Époque	Âge (Ma)	Notation	Couleur	Oroge-nèse	Événements importants		
PHANEROZOÏQUE	CÉNOZOÏQUE	Quaternaire	Holocène	0,012	q	Saumon	Alpine	Fin de la dernière glaciation		
			Pléistocène	2,6	q	Jaune		Glaciations quaternaires		
		Néogène	Pliocène	5,3	p			Orange	Premiers Hominidés	
			Miocène	23	m	Crise messinienne				
		Paléogène	Oligocène	34	g	Orange		Début de la glaciation Cénozoïque		
				Éocène	56			e	Collision Europe - Apulie	
			Paléo-cène	66	e			Collision Inde Eurasie		
				Crétacé	Sup.			c	Premiers Primates	
			MÉSOZOÏQUE	Crétacé	Inf.			c	Vert	Premières Graminées
					Sup.					145
	Jurassique	Moy.		Bleu	201	Violet	Subduction de l'océan alpin			
		Inf.					Crise biologique			
		Trias					Sup.	t	Ouverture du Golfe de Gascogne	
	Moy.	Premières Angiospermes								
	Inf.	252	Crise biologique							
	PALEOZOÏQUE	Permien	r	Rouge	Hercynienne Caledonienne	Dislocation de la Pangée				
		Carbonifère	298	h		Bleu-vert	Premiers Mammifères			
			358	d		Marron	Crise biologique			
		Dévonien	419	s		Vert pâle	Formation de la Pangée			
		Silurien	443	o		Vert turquoise	Premiers reptiles			
Ordovicien		485	k	Vert kaki		Forêts houillères du Carbonifère				
Cambrien		541	b (carte de France)	Rose-orange		Crise biologique				
PRECAMBRIEN	PROTEROZOÏQUE	2 500		Rose	Cadomienne	Sortie des eaux des Vertébrés				
	ARCHÉEN	4 000		Rose		Apparition Insectes				
	HADÉEN					Premiers végétaux vasculaires terrestres				

Figure 1

Échelle chronostratigraphique simplifiée (d'après l'échelle de janvier 2013, en couleur et mise à jour sur le site www.stratigraphy.org) et quelques événements importants de l'histoire de la Terre.

LA RADIOCHRONOLOGIE PERMET D'ATTRIBUER UN AGE « ABSOLU », C'EST-A-DIRE UN AGE CHIFFRE AUX ROCHES

Cette méthode, appelée également **datation radiométrique**, est basée sur la **décroissance des éléments radioactifs** qui constituent la roche.

Les deux couples les plus utilisés en géologie sont le couple $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ (demi-vie: 11,9 Ga) et $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ (demi-vie: 48,8 Ga).

La **radiochronologie permet surtout de dater la cristallisation de minéraux, donc les roches magmatiques et certaines roches métamorphiques**. Les roches sédimentaires ne se prêtent donc pas directement à cette méthode de datation.

Les éléments sont mesurés grâce à des **spectromètres de masse**.

• **L'étalonnage temporel de l'échelle chronostratigraphique, qui ne donnait au début qu'une datation relative des terrains, a été permis par cette méthode.**

La datation absolue a permis de poser un cadre temporel et a montré que les durées en jeu étaient bien plus importantes que ce que les scientifiques pensaient.

• **Les limites de la datation absolue sont néanmoins nombreuses.**

- Il est un peu abusif de dire que la radiochronologie attribue un « âge », elle mesure un rapport isotopique qui est ensuite interprété en termes d'âge. Dans certains cas, l'interprétation est très difficile voire impossible (ouverture partielle ou non du système par ex.).

- **Les roches qui peuvent être datées par ce système sont peu nombreuses** particulièrement pour les roches sédimentaires et la datation de ces roches est souvent indirecte.

- De plus, ces **méthodes sont coûteuses** à mettre en œuvre.

- Enfin et surtout, **les marges d'erreur sont souvent assez importantes (1 % à 0,1 % ce qui se traduit vite en plusieurs millions d'années)**.

Bilan : La radiochronologie est donc abusivement qualifiée de datation absolue car elle permet d'attribuer un âge chiffré. En réalité, du fait des limites évoquées, ces datations sont à prendre avec précaution et dans de nombreux cas, les méthodes de la stratigraphie relative notamment la biostratigraphie sont beaucoup plus précises (quand elles sont applicables, ce qui n'est pas le cas du Protérozoïque).

LES MESURES DE GEODESIE SPATIALE TELLES QUE LE GPS ET L'INTERFEROMETRIE RADAR

Ces techniques permettent de quantifier les déplacements instantanés et de les comparer à ceux déterminés à l'échelle des temps géologiques : **permettent de préciser l'aléa.**

① **Le GPS permet de mesurer en temps réel les vitesses de déplacements des compartiments séparés par une faille avec une résolution allant jusqu'à 1 à 2mm (mesures à haute fréquence).**

- **Principe** : GPS (= **Global Positioning System**) est une méthode de positionnement par satellites. Une constellation de satellites GPS NAVSTAR (30 actuellement, 24 nécessaires) en orbite à 20 000 Km envoient en permanence un signal complexe appelé **onde porteuse ou phase porteuse** qui précise **leur position et l'heure d'émission du signal** donnée par une horloge atomique embarquée.

Chaque récepteur GPS (= station) génère le même signal que celui envoyé par les satellites au même moment. Doté d'une horloge, chaque récepteur peut donc **calculer la différence de phase**, c'est-à-dire la différence en nombre de cycles, qu'il y a entre le signal émis par le satellite et le signal reçu, enregistré à la station.

➡ **Le GPS permet ainsi de mesurer la position et le déplacement instantané de repères situés à la surface du sol à une précision qui peut atteindre le mm.an⁻¹**

- **De la position d'une station au mouvement du sol** : un programme informatique (TRACK) permet de calculer le mouvement d'une ou de plusieurs stations mobiles au cours du temps par rapport à une ou plusieurs stations supposées fixes : on parle de **positionnement relatif cinématique** : **mesure de la position relative de deux antennes par rapport à la constellation.**

➡ **Sachant que la croûte terrestre dans les régions soumises à l'aléa sismique se déforme à des vitesses de l'ordre de quelques millimètres à plusieurs centimètres par an, le système GPS a donc la précision nécessaire pour assurer le suivi de ces mouvements au cours du temps.**

En sismique, l'étude du déplacement de stations GPS permet l'établissement de carte de glissement qui permettent de comprendre la chronologie d'un séisme et d'identifier les zones de rupture.

Le GPS peut également permettre de distinguer dans les zones de calmes sismiques, les zones dangereuses où les failles sont bloquées par les aspérités, des zones peu dangereuses où le déplacement, plus régulier, sans accumulation importante d'énergie.

② **L'interférométrie radar permet de mesurer les faibles variations de la surface du sol**

➡ **Cette technique de cartographier les mouvements du sol, sur une surface (plusieurs dizaine de Km de large), avec une précision verticale centimétrique (voire millimétrique).**

Les mesures se font à basse fréquence et la résolution dépend de la longueur d'onde du radar

Principe : le radar émet des **ondes électromagnétiques** qui se réfléchissent sur des obstacles et qui sont détectées par un récepteur embarqué.

Si le satellite repasse exactement au même endroit et si le sol a bougé la distance parcourue est différente et **l'onde réfléchie présente un déphasage avec l'onde réfléchie enregistrée au premier passage**, déphasage détectable et analysable.

On exploite les différences de phase, point par point sur les images générées, pour retrouver la dimension verticale du terrain. Il est nécessaire de comparer à un **Modèle Numérique de Terrain**, pour soustraire les effets de la topographie et pour obtenir des déplacements verticaux avec une précision de 1cm.

Cf fiche M. Augere

LA GEOTHERMOBAROMETRIE

Cette technique consiste à utiliser les **équilibres de réactions entre minéraux** déterminer la **température (géothermométrie) ou la pression (géobarométrie)** à laquelle un assemblage minéralogique s'est formé.

La plupart des géothermomètres ou géobaromètres sont des **réactions continues d'échanges, entre deux minéraux, d'ions de charge et de rayon voisins**.

Des **microsondes électroniques**, à partir du spectre des rayons X émis lors de l'interaction entre des électrons et les éléments constituant un cristal, permettent de déterminer la **concentration** des éléments d'un minéral sur une surface de quelques microns carrés. La relation entre les rapports de ces concentrations et la température (ou la pression) peut alors être obtenue par calcul à partir de données thermodynamiques.

Les **géothermomètres** correspondent à des réactions dont les conditions d'équilibre sont quasi indépendantes de la pression : même si les conditions de pression sont imprécises, l'évaluation de la température reste alors possible. Une telle réaction se fait avec une **variation d'entropie élevée par rapport à la variation de volume** de la réaction.

De même, on recherche comme géobaromètres des réactions dont les conditions d'équilibre sont quasi-indépendantes de la température, ce qui est plutôt rare : ces réactions entraînent une **importante variation du volume des minéraux**, relativement à variation de leur entropie.

De façon plus intuitive, **les géothermomètres sont des réactions dont les courbes d'équilibre présentent une forte pente dans l'espace (P,T) alors que celle des géobaromètres est faible**.

Le calibrage des géothermomètres ou géobaromètres doit aussi être établi expérimentalement dans des conditions de pression, de température et de composition géochimique comparables à celles dans lesquelles s'est trouvée la roche étudiée.