



Continuité et Discontinuité dans la Géologie

C. Cramez

(Rue du Nord 203, 2003 La Chaux de Fondss, Suisse)

Keywords: Geology, Tectonics, Discontinuity, Continuity, Atomist School, Peripathetician School, C. E. Wegmann, E. Argand, E. Stille, Tectonic phases, Unconformities, Sequence Stratigraphy, Petroleum Exploration.

Abstract: Review of two major geological schools. The concepts of tectonic phase and unconformity are discussed as well as the continuity, or discontinuity, of the tectonic events. The consequences in Sequence Stratigraphy and Petroleum Exploration are analyzed as the impact of ecstacy and tectonics in the creation of space available for sediments (accommodation).

Préface: Quand j'étais étudiant à l'Université de Neuchâtel (Suisse), notre professeur C. E. Wegmann insistait sur le rôle de la discontinuité et continuité des événements géologiques, sujets qu'il avait admirablement traités dans les années 50s (« Diskonzinuität in Der Erdeschichte » Geol. Rundschau, v. 38, p.125-138, 1950). Par contre, tout au long de ma carrière professionnelle, j'ai constaté que ces problèmes étaient totalement oubliés, ce que m'a obligé à faire une note interne adressée a mes collègues de Total Sa. Malheureusement, le message a certainement été mal donné et ça malgré l'effort de J.P. Schaer (1995). J'ai donc décidé de venir à la marche et de mettre sur le site de l'Universidade de Fernando Pessoa la note interne légèrement modifiée que j'avais adressée à mes collègues de Total.

I- Introduction

La vision de l'évolution des chaînes de montagnes reste encore très controversée. En fait, d'un côté, nous trouvons les adeptes de la discontinuité dans l'histoire de la Terre, autrement dit, ceux de l'école de H. Stille et, de l'autre côté, les adeptes de la continuité, c'est-à-dire ceux de l'école de E. Argand).

Les différences entre ces deux écoles sont principalement d'ordre philosophique et concernent

(i) l'attitude envers l'uniformitarisme[□] et

[□] Principe admis par Hutton que *“the past history of our globe must be explained by what can seen to be happening now”*. Ce principe, que graduellement a remplacé les événements catastrophiques dans l'histoire de la Terre, a été appelé uniformitarisme par C. Lyell. Le terme uniformitarisme n'a pas été adopté par beaucoup de géologues. Il a été progressivement remplacé par **actualisme** qui est plus approprié pour traduire la pensée de Hutton *“actual causes”*.

- (ii) la croyance en la prépondérance de l'ordre (régularité) ou du désordre (irrégularité) dans les phénomènes tectoniques.

Ces différences ne sont pas confinées au XX siècle (Sengör, 1991). Leurs racines sont très antérieures à l'avènement de la Géologie comme science indépendante. Elles sont directement liées aux idées d'Hutton et de Werner (Wegman, 1958) qui expriment, dans la Géologie, les pensées philosophiques de Démocrite et Aristote (Sengör, 1979, 1982), autrement dit de l'école Atomiste et de l'école Péripatéticienne (Furley, 1987 et 1989).

Au XX siècle, le schisme des scientifiques de la Terre (H. Stille - E. Argand) est fondamentalement non géologique et de nature non empirique. Il souligne surtout les visions cosmologiques qui forment le "Leitbilder" philosophique à la lumière duquel les adeptes des deux écoles ont construit leurs modèles (Popper, 1968, 1982; Wegmann, 1950, Sengör, 1991).

En d'autres termes, très souvent, les discussions entre géologues (surtout structuralistes) cachent une vieille controverse, laquelle n'est pas le résultat des hypothèses géologiques admises *à priori*, ou de la nature des données d'observation utilisées, mais la conséquence directe des croyances métaphysiques sur des concepts comme le déterminisme, l'uniformité, le désordre, l'ordre, etc.

Indépendamment de l'aspect épistémologique, l'adoption d'une ou de l'autre de ces écoles dans la Géologie a des implications très différentes. Ainsi, il nous semble important de rappeler ci-dessous quelques principes de base et quelques applications sur des sujets très familiers. C'est le but de ces notes.

II- Rappel Historique

Avant l'avènement de la Géologie, les savants, et en particulier ceux qui s'intéressaient aux problèmes de la Nature, ce sont alignés derrière les deux grandes écoles philosophiques grecques:

- l'École Péripatéticienne (Aristote) et
- l'École Atomiste (Démocrite).

Aristote croyant à un "schéma divin" a basé toute sa pensée philosophique sur la régularité, l'ordre et le déterminisme. Au contraire, Démocrite, qui ne croyait en aucune intervention divine, a basé toute sa philosophie sur l'irrégularité et le non-déterminisme.

.....
 Ces deux écoles ont divisé les spécialistes des sciences de la Terre dès les débuts de la Géologie comme science à part entière. La pensée péripatéticienne a été adoptée par A. G. Werner (1749-1817), tandis que la pensée atomiste a été suivie par James Hutton (1726-1797).

Au XX siècle, H. Stille (1876-1966) en considérant l'orogénèse comme un événement géologique épisodique et synchrone à l'échelle de la terre entière, que devait être étudié par une approche déterministe, non-uniformitariste, a été le plus célèbre représentant de la philosophie d'Aristote dans les études géologiques.

À l'opposé, E. Argand (1876-1940), qui a étudié la formation des chaînes de montagnes d'une façon uniformitariste et non-déterministe, a été, jusqu'à sa mort, le chef de file de la philosophie de Démocrite, tout particulièrement dans les études tectoniques. Contrairement à Stille, Emile Argand considérait l'orogénèse comme un événement géologique continu dans lequel des événements épisodiques irréguliers pouvaient prendre place localement.

Les querelles entre ces deux écoles apparemment opposées ont beaucoup fait avancer la géologie, car derrière les concepts de "continuité" admise par E. Argand et de "discontinuité" admise par H. Stille, il s'est ouvert un monde nouveau pour les géologues. La "continuité" qui exige (i) une pensée rationnelle et (ii) une vue d'ensemble était surtout l'apanage des géologues de synthèse, alors que la "discontinuité", observée dans les données géologiques (terrain, subsurface, sismique, etc.) et qui est la base de la stratigraphie, était surtout le monopole des géologues de terrains analystes.

C. E. Wegmann (1950) a considéré que la continuité et la discontinuité divisaient les géologues déjà au XIX siècle[□] et qu'ils ont toujours essayé d'éclairer et d'interpréter l'histoire de la Terre, et des êtres vivants, en fonction de ces deux points de vue. De ce fait, il suggère qu'il est utile de ne pas considérer ces querelles uniquement comme le résultat de l'état de la recherche géologique, mais bien plutôt comme faisant partie intégrante d'un développement historique.

Les grandes idées géologiques séparant ces deux écoles ont été résumées par Sengör (1991):

A) Ecole atomiste

Hutton, James., (1726-1797):

Pas de stratigraphie à l'échelle de la terre entière.

Lyell, Charles., (1797-187):

[□] Sans les coupures géologiques il n'y aurait pas de stratigraphie et que sans continuité il n'y aurait pas de vue d'ensemble.

L'alternance d'épisodes orogéniques et de périodes de repos, à l'échelle de la terre entière, n'est que la conséquence de la confusion entre le temps géologique et l'âge donné par les roches (Ex: période Silurien - système Silurien, ou Crétacé Terminal - Crétacé Supérieur).

Suess, Eduard., (1831-1914):

Les chaînes de montagnes se soulèvent lentement et semi continuellement. Les épisodes orogéniques ne sont ni globaux, ni synchrones. Cependant, des corrélations stratigraphiques à l'échelle de la terre entière sont possibles grâce aux événements eustatiques.

Argand, Emile., (1879-1940):

L'orogénèse est continue, mais ses enregistrements ne le sont pas. Une discordance traduit la terminaison d'un dépôt, mais pas la fin du mouvement orogénique.

B) Ecole Péripatéticienne

Werner, A. G., (1749-1817):

La stratigraphie est à l'échelle de la terre entière.

Élie de Beaumont, L., (1798-1874):

La stratigraphie est la conséquence de l'existence d'épisodes orogéniques à l'échelle de la terre entière qui alternent avec des périodes de repos.

Chamberlain, T. C., (1843-1928):

Les chaînes de montagne se soulèvent durant les périodes critiques de l'histoire de la Terre, lesquelles alternent avec des périodes de tranquillité tectonique.

Stille, H., (1876-1966):

L'orogénèse est confinée à des phases tectoniques globales et synchrones de courte durée (300k ans). Ainsi, pendant le Phanérozoïque par exemple, uniquement 1/40 du temps a été orogénique.

Cependant, le schisme est pratiquement total au début du XX siècle à la suite des travaux de Stille et d'Argand. Cette division, qui s'est poursuivie après la mort d'Argand, a fait l'objet de nombreuses publications. Ainsi, en 1950, la "Geologische Rundschau" a dédié le deuxième cahier du volume 38 (1950) tout entier à la confrontation entre Stille et Gilluly. En effet, ce dernier, en 1949, dans son adresse présidentielle à la Société Géologique d'Amérique, a vivement critiqué la théorie des phases tectoniques de Stille qui, comme tous les adeptes de la pensée d'Aristote, soutiennent que les chaînes de montagnes, à l'échelle de la terre entière, sont des

.....
 phénomènes épisodiques synchrones et de courte durée, qui alternent avec des périodes anorogéniques nettement plus longues.

III- Phases tectoniques

Bien que la plupart des différences entre l'école de Stille et d'Argand soient liées aux croyances cosmologiques qui sont à la base des hypothèses géologiques admises *a priori* et des modèles pris pour interpréter les données plutôt qu'aux données elles-mêmes, et il faut dire aussi que l'approche scientifique de ces deux écoles n'est pas la même. L'école de Stille utilise une approche inductiviste, alors que l'approche utilisée par Argand est très proche de ce que K. Popper dans les années trente a appelé la méthode hypothético-déductive (K. Popper, 1982, pour la traduction française). En fait, les hypothèses de Stille sont basées principalement sur la croyance à la régularité (ordre) et au catastrophisme[□] dans la formation des chaînes de montagne. Il a introduit, dans la tectonique, le concept des phases tectoniques ubiquistes^{□□}, autrement dit, à l'échelle de la Terre entière, lesquelles sont soulignées par des discordances[□]. En d'autres termes, dans l'école tectonique non-uniformitariste, déterministe, les discordances et leurs corrélations à l'échelle de la terre entière ont une importance toute particulière car elles sont utilisées pour dater les événements tectoniques. En fait, pour Stille, les surfaces des discordances correspondent à des périodes de non de dépôt (idée originelle d'Elie de Beaumont) et sont les seuls indicateurs de l'orogénèse. Cette position traduit bien la pensée de Werner dans les études tectoniques, c'est-à-dire l'utilisation des concepts de régularité et non-uniformitarisme.

L'épisodicité de l'orogénèse admise par Stille a été vivement critiquée par Shepard (1923). Il a considéré les hypothèses admises par Stille et ses disciples comme non-

□ La doctrine connue sous le nom de "Catastrophisme" est basée dans le mythe des successives destructions de la surface de l'écorce terrestre par des violents et surnaturels cataclysmes, desquels le Déluge est l'exemple classique.

□□ Une position similaire est prise dans la Stratigraphie Séquentielle, par P. Vail et coauteurs. (1977). Ils ont tendance à corrélérer globalement tous les cycles stratigraphiques. C'est une attitude déterministe, non-uniformitariste, typique de l'École Péripatéticienne. Personnellement, comme nous l'avons montré en plusieurs publications (Duval et al, 1993, 1994), nous admettons la spécificité globale pour les cycles stratigraphiques associés aux cycles eustatiques de 1^{ère} ordre, dans lesquels l'eustatisme est la conséquence des variations du volume des bassins océaniques induites par les montagnes océaniques (rides océaniques). Quelques cycles stratigraphiques associés à des cycles eustatiques de 2^{ème} ordre peuvent être globaux d'autres ne le sont pas. Les séquences, c'est-à-dire les cycles stratigraphiques associés à des variations eustatiques de 3^{ème} ordre, dont les causes sont très diverses, ne sont pas corrélables à l'échelle de la Terre entière. Elles sont liées à des événements non-déterministes et irréguliers.

□ Une discordance souligne une rupture de la continuité du dépôt des couches sédimentaires, autrement dit, un hiatus qui peut correspondre à un temps géologique important. La représentation physique du hiatus est une surface d'érosion. Ainsi, on dit que la partie basale des sédiments concordants sus-jacents est en discordance sur les sédiments sous-jacents.

empiriques, autrement dit, comme métaphysiques car toute réfutation est impossible. En effet, l'idée d'une orogénie épisodique et synchrone, à l'échelle de la Terre entière, a été inductivement établie comme une loi de la nature ("Aristote dixit") contre laquelle toutes les autres hypothèses de travail devaient être testées.

D'autre part, les hypothèses admises par l'école de Stille impliquent un eustatisme, comme défini par Suess, c'est-à-dire une chute du niveau de la mer durant les périodes d'orogénèse et une montée pendant les périodes anorogéniques. Les mouvements tectoniques pendant les phases orogéniques induisant des montées et des chutes relatives des niveaux de la mer[□] étaient considérées par Stille, comme auparavant par Suess, comme épirogéniques (verticaux). Par contre, Argand pensait qu'on ne pouvait expliquer la géologie des Alpes que par des mouvements tectoniques horizontaux. C'est certainement pour cette raison qu'Argand a toujours défendu l'hypothèse de la dérive des continents de Wegner, car elle impliquait des mouvements et des forces tectoniques horizontales.

Malgré le fait que les idées de Stille aient été bien acceptées par la communauté géologique, plusieurs auteurs, entre lesquels Argand (1920) insistaient sur le fait que les discordances, et les transgressions, qui sont soulignées par les hiatus, servent uniquement pour dater certains épisodes du mouvement et rien de plus. Les hiatus ne prouvent pas l'interruption du mouvement, mais uniquement celle de la sédimentation. De surcroît, ils affirmaient que les déformations épisodiques, visibles à toutes les échelles géologiques, depuis l'échelle microscopique jusqu'à l'échelle de la carte géologique et des continents, sont, le plus souvent, associées à des déplacements tectoniques continus. Ceci est devenu plus qu'évidente après l'avènement du nouveau paradigme des Sciences de la Terre, c'est-à-dire: La Tectonique des Plaques qui n'a peu à voir avec la vieille idée de la dérive des continents de Wegner [□].

Sengör (1991), pour qui les déformations épisodiques sont associées à un mouvement continu (voir exemples données sur les prismes d'accrétion) considère que certaines déformations épisodiques prennent place dans des intervalles de temps beaucoup plus petits que la résolution de la biostratigraphie, et que de ce fait, des enregistrements discontinus peuvent potentiellement amener les géologues non avertis à considérer plusieurs phases orogéniques, car plusieurs discordances peuvent se développer localement. Ceci est très particulièrement important dans

^{□□} L'importance des variations du niveau de la mer dans la stratigraphie bien que très la mode depuis 1977 (P. Vail et ses coauteurs), est une vieille hypothèse qui avait été invoquée depuis longtemps par Benoit de Maillet (1748), Lavoisier (1789), Lemoine (1911), Wegmann (1950), Burrollet (1956) etc..

[□] Wegner n'a jamais considéré que la lithosphère été composée par des plaques qui se déplaçaient les unes par rapport aux autres, suite à la génération et à la subduction de la croûte océanique. Il a tout simplement admis que les continents flottaient sur la croûte océanique et se déplaçaient comme les "iceberg" se déplacent sur la mer.

.....
 l'exploration pétrolière, puisque les pièges, et surtout les pièges structuraux, doivent être datés par rapport à l'âge de la migration des hydrocarbures.

IV- Discordances

L'origine, la signification et l'extension (spatiale et temporelle) des discordances sont des questions que les géologues doivent se poser dans toutes les études tectoniques et stratigraphiques. Surtout, quand le terme discordance, avec le temps, et en particulier après l'avènement de la stratigraphie séquentielle, est le plus souvent, utilisé abusivement. À ce titre il est intéressant de rappeler ce que Goguel (1952) a écrit dans son *Traité de Tectonique* à ce sujet:

“Au point de vue structural, il est courant de contraster les régions tabulaires avec les régions plissées. Cette distinction dépend de l'âge des couches observées par rapport à l'âge de la déformation. Les couches postérieures à la déformation reposent sur les couches antérieures à la déformation par une discordance angulaire dont la mise en évidence est d'une importance fondamentale. Grabau a distingué deux termes pour différencier deux types de discordances “*nonconformity*”, autrement dit discordance angulaire et “*disconformity*”, autrement dit une interruption dans la succession des sédiments, dans laquelle, il n'y a pas de discordance angulaire apparente. Le terme “*unconformity*” indique un hiatus stratigraphique (lacune) et correspond à une transgression. A. d'Orbigny a utilisé les termes de *discordance réelle* pour les discordances angulaires et *discordance d'isolement* pour le hiatus stratigraphique, mais malheureusement ces termes ont tombé dans l'oubli.”

Bally (1989) considère que:

- (i) *les discordances caractérisées par des biseaux sommitaux développés dans les blocs faillés basculés;*
- (ii) *les discordances eustatiques associées à des sédiments d'eau peu profonde et soulignées par des biseaux sommitaux et des chenaux;*
- (iii) *les discordances associées à l'érosion des talus continentaux par l'action des courants sous-marins;*
- (iv) *les discordances induites par les courants géostrophiques dans les sédiments d'eau profonde;*
- (v) *les discordances associées à des bassins affamés (taux de sédimentation très faible);*
- (vi) *les discordances associées à l'étirement de la lithosphère ("rifting");*
- (vii) *les discordances associées à la rupture de la lithosphère (limite superior des bassins de type rift);*
- (viii) *les discordances associées à l'initiation des avant-fosses;*
- (ix) *les discordances associées à la relaxation des avant-fosses;*
- (x) *les discordances associées à la croissance et soulèvement des anticlinaux;*
- (xi) *les discordances associées aux failles de croissance;*
- (xii) *les discordances associées à l'halocinèse (autochtone ou allocthone), etc.,*

requièrent non seulement une description, mais aussi une caractérisation et une différenciation très poussées, car le plus souvent, elles sont prises dans un sens très général et interprétées uniquement en termes d'eustatisme comme proposé par P. Vail, ce qui n'est pas toujours le cas.

Rappelons à ce sujet, autrement dit, sur les rapports entre l'eustatisme, la tectonique, la sédimentation et l'érosion, ce que Wegmann enseignait dans les années 60, à l'Université de Neuchâtel, époque où j'étais son assistant:

“Lorsque les mouvements de l'écorce terrestre sont envisagés sous l'angle du transfert de matière, cela conduit à peu près au bilan suivant: Le comblement se fait par intermédiaire de sédiments détritiques qui proviennent de l'érosion du continent proche.

L'hypothèse d'une compression du socle sous le bassin ne rassemble pas beaucoup d'adeptes. Par contre, il paraît plus plausible, et cela est confirmé par plusieurs manifestations de la tectonique profonde, dont le matériau du soubassement du bassin migre latéralement au cours du temps sur les zones de soulèvement qui, de leur côté, fournissent à nouveau du détritisme pour son comblement. Les systèmes de terrasses qu'on rencontre dans de nombreux pays[□] montrent que souvent les soulèvements se font par saccades.

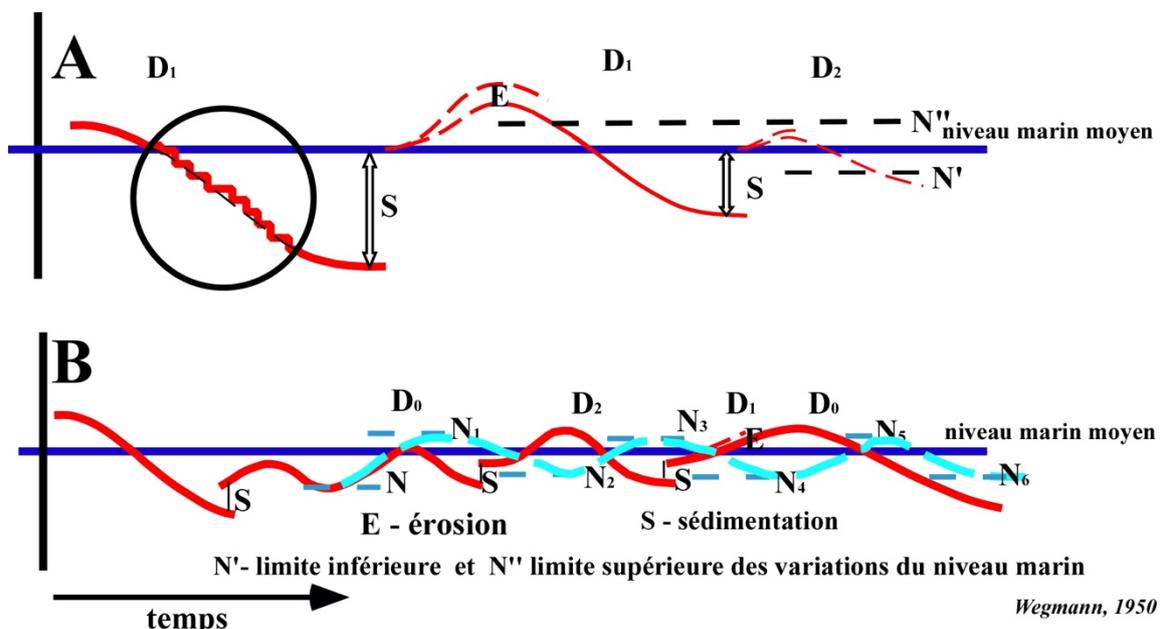


Fig. 1- Représentation graphique de la composante verticale des mouvements orogéniques. En A, la sédimentation et la subsidence sont plus au moins en équilibre. En B, la sédimentation n'est pas assez forte pour compenser la subsidence. Dans le cercle, il est montré l'agrandissement de la courbe qui, bien que continue en apparence, est en fait composée d'une suite de mouvements saccadés (voir texte).

Les mouvements majeurs de l'écorce terrestre se trouvent donc associés à des transferts de matière importants de même tendance qui s'étalent sur de longues durées. Dans les zones orogéniques étroites, la composante verticale présente une grande amplitude, alors qu'elle est plus faible dans les vastes étendues des boucliers.

[□] Ces terrasses sont fréquentes dans les pays scandinaves et en Irian Jaya (l'Est de l'Indonésie).

En s'additionnant, les transferts saccadés conduisent à des mouvements d'un ordre de grandeur supérieur, qui sont eux-mêmes délimités de manière différente (fig. 1). Par exemple, à une subsidence peut succéder une période de calme sinon de soulèvement, durant laquelle le début de l'inversion et l'amplitude du mouvement peuvent changer d'un endroit à l'autre.

Pour une région en soulèvement, l'inversion apportera une période de sédimentation qui débutera d'autant plus tôt que la région se trouve plus proche du niveau de base. La lacune de sédimentation, qui est parfois soulignée par une discordance, correspond à une entaille plus ou moins profonde de la partie sommitale de la courbe des mouvements de la croûte (fig. 1).

Si l'on considère les parties sommitales de ces courbes (pour autant qu'elles correspondent à des discordances) comme étant l'expression de phases tectoniques, on introduit des mouvements (pour cet ordre de grandeur) et on sélectionne d'étroits faisceaux à l'intérieur de larges bandes. Si nous opérons avec une résolution temporelle assez fine, nous obtenons une image relativement homogène qui s'insère plus facilement dans un schéma, surtout lorsqu'un choix différent impliquerait une situation nouvelle.

Les oscillations du niveau marin observées en un lieu donné peuvent être analysées en fonction de deux composantes:

- (i) l'une correspond aux déformations du continent (par exemple un bombement),
- (ii) la seconde aux variations du niveau marin de toutes les mers et océans, qu'on appelle variations eustatiques.

Dans certaines régions, les mouvements du continent et ceux du niveau marin évoluent dans le même sens alors qu'ailleurs, ils sont opposés (fig. 1). C'est surtout là que la formation de discordances est plus probable.

Comme la plupart des discordances sont dues à une transgression marine, le moment de leur formation est situé à l'intérieur de l'amplitude des oscillations principales d'un intervalle temporel donné[□]. Environ un tiers des continents actuels est situé à l'intérieur de la marge des variations eustatiques du Quaternaire. Dans les régions situées au-dessous et au-dessus de cette marge d'oscillation, les déformations structurales ne sont, en règle générale, pas scellées; de ce fait, elles ne peuvent pas être situées chronologiquement dans la documentation géologique.

D'autre part, comme les variations eustatiques se produisent partout simultanément, elles pourraient constituer un marqueur temporel de premier ordre. Cependant leur collecte s'accompagne encore de quelques difficultés. D'un point de vue purement théorique, les discordances qui reposent sur l'interférence de mouvements eustatiques et tectoniques sont synchrones. Par une méthode ingénieuse, il est possible de sélectionner dans le spectre continu des grands mouvements des bandes étroites où l'on choisit les segments de courbe

[□] Wegmann considère que la majorité des discordances sont produites par les transgressions marines, c'est-à-dire qu'il ne fait aucune différence entre les discordances induites par la tectonique ou celles qui sont induites l'eustatisme. Comme Argand, il s'intéresse surtout au hiatus, autrement dit aux biseaux d'aggradation de la série sus-jacente. Cette position est très différente de celle de Vail et coauteurs (1977) qui donnent une préférence toute particulière à l'érosion de l'intervalle sous-jacent.

qui, par rapport aux fluctuations du niveau marin, ont tendance à subir au même moment des mouvements opposés.

Dans la situation A de la fig. 1 la sédimentation et la subsidence sont plus ou moins en équilibre. La discordance D_1 , sur la partie descendante de la courbe \square n'appartient pas nécessairement à un ensemble synchrone. La discordance D_2 , comprise entre les extrêmes d'une oscillation (*eustatique*), appartient partout à un ensemble synchrone du fait que l'oscillation se trouve en tous les points simultanés $\square\square$.

Dans la situation B, la sédimentation n'est pas assez forte pour compenser la subsidence. Quelques exemples de cas possibles. N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 et N_6 sont des niveaux eustatiques successifs. D_0 représente le sommet de la courbe de fluctuation du niveau du continent, sur lequel il ne se produit pas de discordance, du fait d'une élévation simultanée du niveau marin ($N-N_1$). Comme continents et niveau de la mer évoluent en sens opposé (N_2-N_3), la discordance D_2 est étroitement limitée dans le temps. La discordance D_1 se produit pendant que le continent s'élève alors que le niveau marin (N_3-N_4) s'abaisse. Lors de D_0 , le continent et le niveau de la mer (N_5-N_6) s'abaissent simultanément, leur situation relative reste ainsi plus au moins stationnaire."

Sous l'influence de Vail et coauteurs (1977), la plupart des géologues pétroliers ont tendance à considérer les discordances comme des surfaces d'érosion induites par des chutes relatives du niveau marin, autrement dit, des surfaces développées soit pendant les montées ou les chutes eustatiques, soit durant les fluctuations positives ou négatives du niveau du continent. Dans ces conditions, leur mise en évidence est difficile. Elle n'est possible que quand elles sont fossilisées par des biseaux d'aggradation. D'autre part, la spécificité ubiquiste ne peut pas être rattachée à toutes les discordances.

Dans la stratigraphie et tout particulièrement dans la stratigraphie séquentielle, l'origine et la signification des discordances posent des problèmes très délicats surtout après l'avènement de la Tectonique des Plaques. Ainsi, dès le départ, on doit se demander si les discordances que limitent les différents cycles stratigraphiques sont des événements géologiques locaux ou si elles sont corrélables à l'échelle de la Terre entière. Dans cette dernière hypothèse, ont-elles une cause tectonique commune ou traduisent-elles uniquement un simple signal eustatique plus au moins renforcé par les régimes tectoniques?

Aujourd'hui, sous l'influence des travaux de P. Vail et al. (1977, 1989, 1991, etc.) beaucoup de géologues ont tendance à admettre que la corrélation des régimes tectoniques avec la hiérarchie des cycles stratigraphiques est difficile à défendre vu que la durée des régimes tectoniques qui est beaucoup plus importante que celle des

\square Cette courbe n'est pas la courbe eustatique, comme dans les modèles de Vail. mais la représentation graphique de la composante verticale des mouvements orogéniques, autrement dit la subsidence et le soulèvement.

$\square\square$ Les limites du niveau marin sont eustatiques, c'est-à-dire à l'échelle de la Terre entière (sens de Suess) sont non relatives, et pas comme ceux considérées plus tard par Vail dans ses modèles.

.....
cycles stratigraphiques, et que les variations des vitesses de déformation ne sont pas particulièrement confinées dans le temps géologique.

V- Discordances angulaires

Bally (1989) remarque que dans l'analyse séquentielle, l'introduction du concept de discordance tectoniquement renforcée[□] ("enhanced unconformity") avancé par P. Vail ne reconnaît que la nature tectonique de la subsidence, des soulèvements, du plissement, des failles, ainsi que d'autres événements géologiques qui ne varient beaucoup plus lentement que les changements eustatiques du niveau marin qui sont les vrais responsables des surfaces d'érosion qui caractérisent d'après Vail les discordances^{□□}.

Le concept de discordance angulaire implique un développement concomitant avec des structures à des échelles régionales et locales. Ainsi, les discordances angulaires peuvent être des marqueurs temps très sensibles qui enregistrent la progression des déformations structurales. Ceci est particulièrement vrai dans les bassins sédimentaires associés aux formations des megasutures (perisuturales et episuturales), ce qui est très souvent oublié par les géologues pétroliers. En fait, comme illustrée dans les fig. 2 et 3, la mise en évidence des enregistrements des épisodes tectoniques saccadés permet aux géologues d'appréhender la progression des déformations structurales continues, et de ce fait, de bien dater l'âge des pièges structuraux qui est une condition *sine qua non* pour rencontrer des hydrocarbures. L'âge des pièges doit être antérieur, ou au moins contemporain de la migration des hydrocarbures.

L'hypothèse du renforcement par la tectonique des discordances peut être testée très facilement. Tout ce qu'on a besoin est une bonne analyse stratigraphique et biostratigraphique des données d'observation pour démontrer si, oui, ou non, la subsidence et/ou le régime tectonique continuent après la discordance.

En fait, comme illustrée dans les figs. 2 et 3 la mise en évidence des enregistrements des épisodes tectoniques saccadés, permet aux explorateurs d'appréhender la progression des déformations structurales continues, et donc de choisir l'âge des pièges structuraux qui ont le plus de chances de piéger des hydrocarbures (l'âge de la migration doit être connue). Cette hypothèse du renforcement par la tectonique des discordances peut être testée très facilement. Tout ce qu'on a besoin est une analyse stratigraphique et biostratigraphique des données d'observation pour démontrer si, oui, ou non, la subsidence et/ou le régime tectonique continuent après la discordance.

□ En français, on peut dire discordance angulaire, ou discordance réelle comme proposée par d'Orbigny.

□□ Comme signalé auparavant et comme sera montré par la suite, cette définition de discordance diffère beaucoup de celle d'Élie de Beaumont, d'Argand ou de Wegmann, pour qui le non-dépôt, les géométries internes des intervalles et les épisodes transgressifs sont primordiaux.

Sur la fig.3, le type de cycles stratigraphiques considérés dans l'interprétation est difficile à déterminer. L'absence de calibration temporelle ne permet pas d'établir avec certitude l'hierarchie des cycles stratigraphiques (séquences ou sous-cycles d'empiètement continental. Cependant, les rapports géométriques entre les lignes chronostratigraphiques (marqueurs sismiques) permettent de mettre en évidence les principales discordances associées à des chutes relatives du niveaux marin (comme admises par P. Vail).

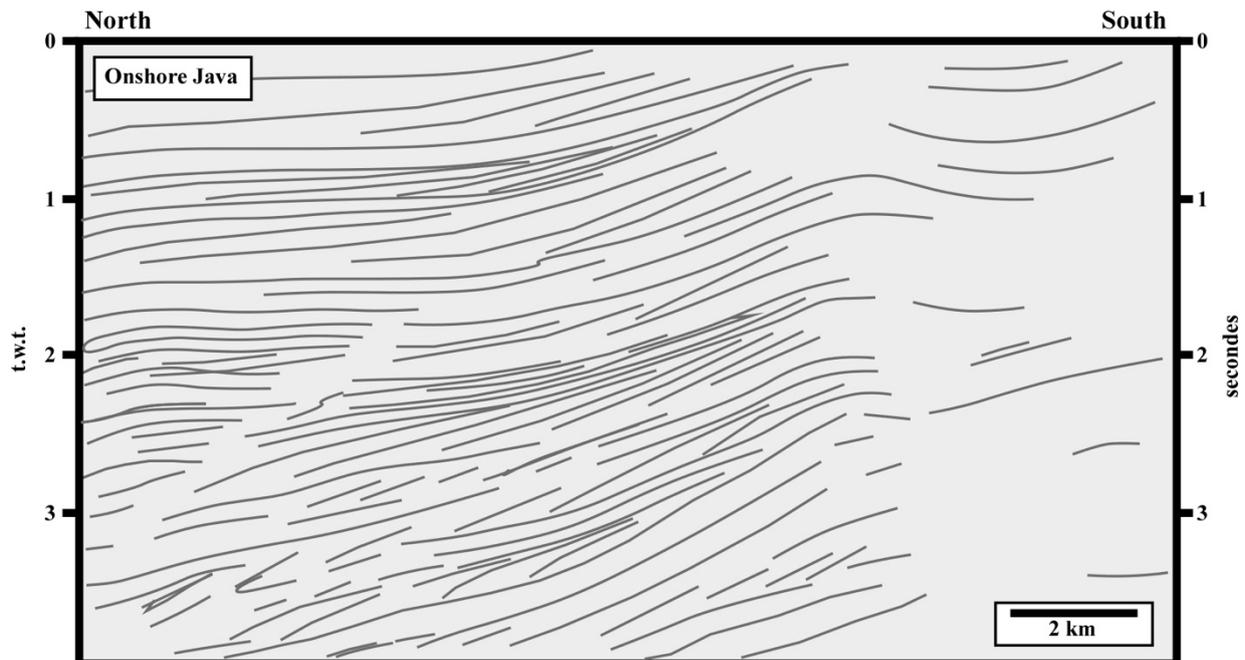


Fig. 2- Sur cette ligne, un géologue doit-il considérer le raccourcissement des sédiments comme épisodique et récent, autrement dit, postérieur à la migration des hydrocarbures, ou doit-il considérer que le raccourcissement est en continu et qu'il a démarré dès le début du bassin de type-rift?

Sur la fig.3, le type de cycles stratigraphiques considérés dans l'interprétation est difficile à déterminer. L'absence de calibration temporelle ne permet pas d'établir avec certitude l'hierarchie des cycles stratigraphiques (séquences ou sous-cycles d'empiètement continental. Cependant, les rapports géométriques entre les lignes chronostratigraphiques (marqueurs sismiques) permettent de mettre en évidence les principales discordances associées à des chutes relatives du niveaux marin (comme admises par P. Vail). On constate que le niveau moyen du continent a monté en continu dès la fin du bassin de type rift et que les discordances (soulignées en rouge dans l'interprétation) sont limitées dans le temps, car elle se forment uniquement quand le niveau eustatique chute. Le mouvement de soulèvement du continent se fait en continu dès la fin du bassin de type rift (il y a environ 30 millions d'années en arrière) et, de ce fait, les sédiments déposés pendant le bassin d'arrière-arc (au-dessus du bassin de type-rift) sont raccourcis par des transferts de matière saccadés qui en s'additionnant conduisent à un mouvement d'un ordre de grandeur supérieur.

Par conséquent, dans un tel environnement, si le sous-système pétrolier générateur est présent[□], autrement dit si le bassin est pétrolier, et dans l'absence d'un hydrodynamisme important, une exploration pétrolière scientifique passe, avant tout, par:

1) La datation de la migration des hydrocarbures.

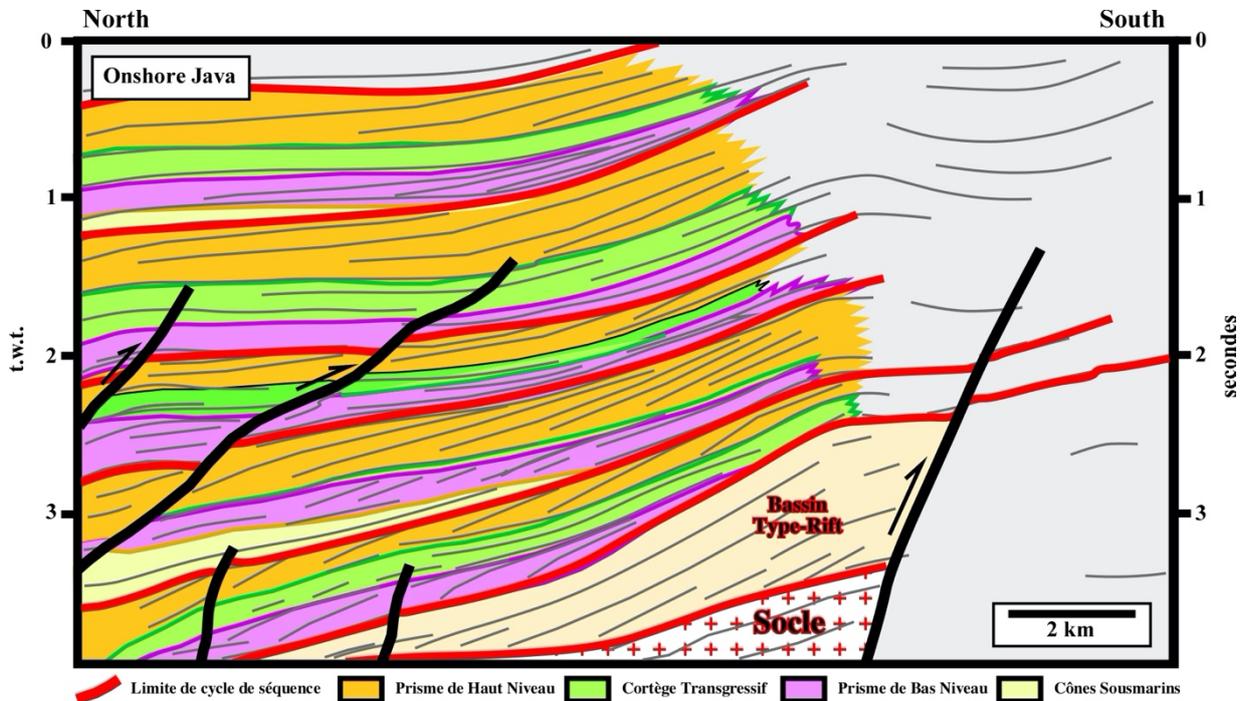


Fig. 3- Dans cette interprétation, les registres stratigraphiques soulignent des épisodes tectoniques saccadés qui étant à la limite de la résolution de la biostratigraphie peuvent amener les explorateurs non avertis à considérer le raccourcissement des sédiments comme polyphasé à la suite des différents régimes tectoniques. Une telle interprétation aurait inévitablement des conséquences dans la datation des pièges potentiels.

2) L'analyse séquentielle détaillée des données sismiques afin d'exclure les réservoirs potentiels dont la structuration (piège) est postérieur à l'âge de la migration des hydrocarbures.

3) L'identification d'une couverture régionale, ou induite, car sans couverture, il n'y a pas de fermeture (cartographie des épisodes transgressifs)^{□□}.

En conclusion, on peut dire que l'origine d'une discordance est mieux étudiée dans un contexte régional que dans un contexte local. Comme pour la genèse des cycles

□ Dans un bassin pétrolier, les chances de rencontrer des hydrocarbures sont d'environ 4% si les puits d'exploration sont implantés sans aucun critère géologique, autrement dit localisés à la fléchette.

□□ Partant du principe qu'auparavant l'explorateur a déterminé : (i) les zones à migration convergente au-dessous de la discordance (en général angulaire) entre le bassin de type rift et le bassin d'arrière-arc, et les voies de migration secondaire, c'est-à-dire les chemins empruntés par les hydrocarbures (zones de failles et réservoirs) pour aller depuis les roches-mères vers les réservoirs potentiels dans les pièges. Si des disigrations sont possibles, suite d'inversions tectoniques, les chemins de dismigration doivent également être déterminés.

.....
 stratigraphiques[□], pour appréhender le renforcement des discordances des événements tectoniques, nous devons déterminer:

- (i) Si les variations du niveau marin (eustatisme) sont synchrones avec des événements tectoniques. Dans ces cas, elles peuvent, localement, être plus ou moins exagérées par un renforcement structural avec des biseaux sommitaux de troncature bien marqués.
- (ii) Si les discordances sont limitées à des structures locales, régionales, ou si elles sont ubiquistes.
- (iii) Si la résolution structuralo-cinématique, depuis l'échelle des plaques tectoniques jusqu'à l'échelle locale, a suffisamment de confinement pour être associée à la spécificité des cycles stratigraphiques considérés^{□□}.

Ceci pose la question classique de l'analyse séquentielle: « *Est ce que les limites des cycles stratigraphiques ont une cause tectonique commune, ou traduisent-elles uniquement un signal eustatique plus au moins renforcé par les régimes tectoniques?* »

Avant tout, il faut dire qu'il n'y a pas d'accord dans les limites des cycles stratigraphiques, en particulier au niveau des séquences, et leurs définitions spécifiques. Les limites proposées par Vail (1977) sont différentes de celles proposés par Galloway (1989). Pour les premiers (*stratigraphie séquentielle*) les limites sont les discordances, pour Galloway (*stratigraphie génétique*) les limites sont les surfaces basales de progradation. De surcroît, il n'y a pas non plus accord dans les échelles temps. Il est donc nécessaire que les géologues, et en particulier les géologues pétroliers, soient rigoureux dans la terminologie et dans les concepts utilisés.

Deux exemples:

- a) *“In terms of reservoirs distribution my ideas can be summarised as follows: the sands / shale ratio of the seismic scale interval can be assessed directly from the ratio between aggradation and progradation, as seen on seismic lines, during the corresponding interval of time”.*

(i) Le terme aggradation est utilisé en géologie, et en sismique, uniquement pour souligner la composante verticale d'une succession continue des biseaux d'aggradation (aggradation positive ou négative). En d'autres termes, pour tirer des conclusions géologiques à partir de l'aggradation il faut, auparavant, être capable de localiser les biseaux d'aggradation. Car, dans la réalité, quand on dit qu'un intervalle sismique de 100 ms correspond

□ Nous utilisons l'expression cycle stratigraphique plutôt que séquence de dépôt, car celle-ci se prête à des confusions. En effet, une séquence est un cycle stratigraphique associé à un cycle eustatique de 3^{ème} ordre (durée comprise entre 0.5 et 3-5 Ma).

□□ Ceci pose dès le départ le problème de la hiérarchie des cycles stratigraphiques. La résolution structuralo-cinématique est souvent facile si on considère un cycle transgression-régression, mais très difficile, voire impossible dans le cas d'une séquence (cycle eustatique de 3^{ème} ordre).

à une aggradation (temps) de 100 ms, ceci n'est vrai que si l'espace disponible (accommodation) a toujours augmenté. Autrement dit, on peut avoir le même résultat (100 ms d'épaisseur), en additionnant des aggradations saccadées, les unes positives (montée relative du niveau marin), les autres négatives (chute relative du niveau marin). Cependant, bien que le résultat final soit le même, les conséquences géologiques et, pétrolières sont très différentes.

(ii) Le terme progradation exprime, en français et en anglais, le déplacement vers l'aval des dépôts littoraux, c'est-à-dire le déplacement vers la mer de la rupture de la pente côtière. Cependant, bien que pendant certaines périodes de l'histoire d'une séquence de dépôt (cycle eustatique de 3^{ème}), la rupture de la pente côtière coïncide avec la rupture de la pente continentale, dans d'autres périodes (épisodes transgressifs et début des épisodes régressifs) elles ne se superposent pas vu que le bassin a une plate-forme continentale. Ainsi, avant d'avancer des conjectures, il faut être capable de mettre en évidence la rupture de pente côtière pour ne pas courir le risque de prendre par une progradation continue ce qui est le résultat dû va et vient (globalement régressif) de la rupture de la pente côtière.

(iii) Admettant que les termes aggradation et progradation utilisées par l'auteur sont pris dans leur vrai sens étymologique, nous ne pouvons être d'accord avec les conclusions. Il faut entrer en ligne de compte avec l'empiètement, c'est-à-dire, la composante horizontale des biseaux d'aggradation. En fait, pour un même rapport aggradation / progradation, par exemple 1ms/1000m, si l'empiètement est de 3km nous trouverons très probablement du sable près la rupture de pente continentale. Par contre, si l'empiètement est de 50 kilomètres nous y trouverons certainement des argiles.

b) L'utilisation des stations de travail et des données sismiques 3D permet aux géologues, et en particulier aux géologues pétroliers, de mettre en évidence des détails stratigraphiques que les "anciens" données ne permettent pas d'appréhender. Cependant, il ne faut pas perdre de vue la spécificité des cycles stratigraphiques dits de séquence.

Les biseaux d'aggradation soulignent une discordance, mais il ne faut pas considérer tous les biseaux d'aggradation caractérisent une discordance. Les biseaux d'aggradation, visibles à l'intérieur des chenaux distributaires ou des méandres, ne définissent pas une discordance. Ils ne sont pas associés à une montée relative du niveau marin. Uniquement les vallées encaissées, et éventuellement quelques canyons localisées sur partie supérieure du talus continentale, sont associés à une chute relative du niveau marin.

.....
 Si l'on considère, les limites de séquence et les discordances associées aux bassins d'avant-fosse, le problème se complique encore plus. En effet, au-delà des discordances visibles dans les marges passives et les bassins sous-jacents aux bassins d'avant-fosses (marges ou des bassins d'arrière-arc), qui peuvent avoir une origine eustatique très marquée, on doit considérer au moins deux discordances principales dont l'origine tectonique est prépondérante:

- a) La discordance basale créée par érosion sous faible profondeur d'eau, laquelle est induite par la migration de l'anomalie périphérique de la plaque descendante (subduction de type A).
- b) La discordance (plus en aval que la discordance basale) qui sépare la série stratigraphique de la marge divergente des sédiments de base du bassin d'avant-fosse.

Ainsi, plus importante que le recueil et la codification des cycles stratigraphiques, et en particuliers des cycles stratigraphiques dits séquences, ce sont les trois obstacles conceptuels liés avec la stratigraphie séquentielle:

- a) *Hierarchie des cycles stratigraphiques,*
- b) *Limites des cycles stratigraphiques et*
- c) *Origine des discordances*

qui doivent être approchés, et bien étudiés, pour mieux appréhender le contexte géologico-stratigraphique, lequel est la base de la compréhension des systèmes pétroliers. Pour cela, dès le départ d'une interprétation, il faut clairement annoncer les hypothèses admises, *à priori*, et les modèles géologiques utilisés dans l'interprétation des données, qu'ils soient géologiques ou sismiques. Cas contraire, comme toute réfutation devient impossible, aucune idée nouvelle émergera, puisque les nouvelles idées ne sont que les conséquences de la réfutation d'anciennes conjectures.

La Chaux-de-Fonds, Mars 2006

.....
Bibliographie:

- Argand, E., 1920- La tectonique de l'Asie, *Compte-Rendu du Congrès Géologique Internationale*, 1922, pp. 171-372.
- Bally, A. W., 1980- Basins and subsidence- Summary, in Bally, A. W., ed., *Dynamics of plate interiors: American Geophysical Union Geodynamics Series*, v. 1, pp. 1-20.

.....
 Carlos Cramez, Switzerland

-
- Bally, A., 1989- Phanerozoic basins of North America, in *The Geology of North America, Vol. A, The Geology of North America- An overview*. The Geological Society of America,
- Burrolet, P. F., 1956- *Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie Centrale*. Tunis, Ministère des travaux Publics. Service des Mines de l'Industrie e de l'Energie. Annales des Mines et de la Géologie Næ 18, 345 p., 93 fig., 22 pls.
- Carrozzi. Av., 1970- Telliamed par de Maillet (1748)- *La théorie du retrait des mers*. Endeavour, GR. Vol. 29., n° 108, pp 140-143.
- Furley. D., 1987- *The Greek Cosmologies, vol.1. The formation of the Atomic Theory and its Earliest Critics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Furley, D., 1989- *Cosmic Problems. Essays on Grek and Roman Philosophy of Nature*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Galloway, W.E., 1989a.- *Genetic stratigraphy sequences in basin analysis I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units*. A.P.P.G. Bull., Vol. 73, pp.125-142.
- Galloway, W.E., 1989b.- *Genetic stratigraphy sequences in basin analysis II: Application to Northern Gulf of Mexico Cenozoic basin*. A.P.P.G. Bull., Vol. 73, pp.143-154.
- Goguel, J., 1952- *Traité de Tectonique*. Masson & Cie. Paris.
- Hutton, J., 1788- *Theory of the Earth ; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe*. Royal society of Edinburg. Transaction, v.1, p. 209-304.
- Lavoisier, A. L., 1789- *Histoire et Mer. Observations Générales sur les couches modernes horizontales, qui ont été déposées par la mer, et sur les conséquences qu'on peut tirer de leurs dispositions, relativement à l'ancienneté du globe terrestre*. Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, vol. 1789, 21 p., 7 fig.
- Lemoine P., 1911- *Géologie du Bassin de Paris*. Paris. Hermann Ed., 408 p., 137 fig., 9 pl.dpl..
- Lyell, C., 1830- *Principles of Geology*, (two volumes) University of Chicago Press Edition 1990.
- Popper, K. R., 1982 (édition française)- *La logique de la découverte scientifique*. Pay
- Popper, K. R., 1985 (édition française)- *Conjectures and Réfutations; la connaissance du savoir scientifique*, Payot.
- Popper, K. R., 1979 (édition française) - :*La société ouverte et ses ennemis. Tome 1- L'ascendant de Platon*. Editions du Seuil.
- Popper, K. R., 1979 (édition française)- *La société ouverte et ses ennemis. Tome 2- Hegel et Marx*. Editions du Seuil.
- Sengör, A. M. C., 1982- *Classic theories of orogenesis*. In Miyashiro, A., Aki, K. and Sengôr, A. M. C. *Orogeny*, pp. 1--48. John Wiley, Chichester.
- Sengör, A. M. C., 1982- *Eduard Suess' relations to the pre-1950 schools of though in global tectonics*, *Geol. Rundsch.*, 71, 381-420.
- Sengör, A. M. C., 1991- *Tectonics and Mountains Building Timing of Orogenic Events: a Persistent Geological Controversy*, in *Controversies in Modern Geology, Evolution of Geological Theories in Sedimentology, Earth History and Tectonics*. Edits. D. W. Muller, J. A. McKenzie, H. Weissert. Academic Press Limited. Harcourt Brace Jovanivich, Publishers. London.
- Shepard, F. P., 1923- *To question the theory of periodic diastrophism*. *J. Geol.*, 22, 599-6.
-

Suess, Ed., 1909- *Das Antlitz der Erde*. Tempsky, Vienna.

Vail, P.R., R.G. Todd and J.B. Sangree, 1977- *Chronostratigraphic significance of seismic reflections*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem., vol. 16, pp. 99-116.

Vail, P.R., R.M. Mitchum, Jr and S. Thompson III, 1977- *Global cycles of relative changes in sea level*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem., vol. 26, pp. 83-98.

Wegmann, C. C., 1950- *Diskontinuität in Der Erdeschichte* » Geol. Rundschau, v. 38, p.125-138.

Wegmann, C. E., 1958- *Das Erbe Werners and Huttons*, Geologie, 7, 531-559.

Wegmann, C. E., 1995- *Discontinuité et Continuité dans l'histoire de la Terre*. Traduit, dans Mém. Soc. Géol. France, 1995, 168, pp. 25-29 avec avertissement de J. P. Schaer.

