

TRAVAUX DU COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGÉO)

TROISIÈME SÉRIE, t. XX, 2006, n° 5
(séance du 14 juin 2006)

Michel DURAND-DELGA

*Trois essais de tectonique globale avant la lettre,
par Léonce Élie de Beaumont, Eduard Suess et Alfred Wegener*

Résumé. Trois essais de compréhension de mécanismes essentiels expliquant la structure du globe terrestre ont été faits avant l'actuelle « *tectonique des plaques* ». 1) Aux aurores de la géologie moderne, Léonce Élie de Beaumont développe les hypothèses des « *cratères de soulèvement* » et des « *systèmes de soulèvements* » donnant un âge aux montagnes successives. Ce système rigide, couronné par la théorie du « *réseau pentagonal* », s'effondra avant la mort de son auteur. 2) À la fin du XIX^e siècle, Eduard Suess remplace l'hypothèse des « *soulèvements* » par celle des « *affaissements* », à l'origine des océans. L'action des forces tangentielles explique la polarité des chaînes plissées, avec déplacement de grandes « *vagues solides* » vers un avant-pays, lors de trois grands plissements successifs. 3) Niant le dogme de la contraction par refroidissement du Globe, Alfred Wegener lance en 1912 son hypothèse de « *dérive des continents* », déplacés vers le sud et vers l'ouest après rupture d'une Pangée post-Carbonifère. Cette théorie, vigoureusement combattue, fut cependant prise en compte par Émile Argand dans les chaînes alpines. On y voit un avatar prématuré de l'actuelle tectonique globale.

Mots-clés : Tectonique globale - système des soulèvements - Élie de Beaumont - affaissements - mouvements tangentiels - Suess - dérive des continents - Wegener.

Abstract. Three attempts of understanding the mechanisms that could account for the Earth structure have been developed before the current Global Tectonics exists. First attempt, on the eve of modern geology, Léonce Élie de Beaumont hypothesizes the occurrence of “*uplifted craters*” (*cratères de soulèvement*) and “*uplifted systems*” related to the age of the successive mountain belts. This rigid system, crowned with the “*pentagonal network*” theory, eventually collapsed. Second attempt, at the end of the 19th century, Eduard Suess replaces the “*uplift*” hypothesis by that of the “*downwarps*”, at the origin of the oceans. Tangential forces explain the polarity of the fold belts that moved as giant “*solid waves*” towards their foreland, during three major periods of foldings. Third attempt, in 1912, Alfred Wegener rejects the dogma of the cooling and shrinking globe, and launches his hypothesis of “*continental drift*” following the

break of a post-Carboniferous “*Pangea*”. This theory was fiercely combated, but Émile Argand took it into account for the Alpine belts. It appears as a premature avatar of Global Tectonics.

Key words: Global tectonics - uplifted systems - Élie de Beaumont - downwarps - tangential stress - Suess - continental drift - Wegener.

Peut-on parler de « *tectonique globale* » avant que ne s'impose, dans le dernier quart du XX^e siècle, l'actuelle « *tectonique des plaques* » ? Oui, puisque celle-ci est qualifiée (Isacks *et al.*, 1968) de « *New Global Tectonics* » : ce qui postule que des essais antérieurs ont eu lieu. En effet, comme le rappelle François Ellenberger (1994), Mott Greene a vu (1982) dans la doctrine d'Élie de Beaumont la « *First Global Tectonics* », dont nous allons rappeler les bases. Cependant, l'effondrement de cette tentative incita l'Autrichien Eduard Suess, jusque-là paléontologiste, à dessiner sa fresque gigantesque « *Das Antlitz der Erde* » (1885 à 1909), devenant ainsi l'architecte d'une nouvelle tectonique globale, qui inspira la géologie mondiale jusqu'au milieu du XX^e siècle. Comme celle d'Élie de Beaumont, la doctrine de Suess était basée sur le principe du refroidissement du globe, très généralement accepté depuis Buffon et, a souligné Daubrée, déjà par Descartes.

Put s'en dégager Alfred Wegener, météorologiste allemand qui, à partir de la seule considération des données géologiques et géophysiques du début du XX^e siècle, proposa sa géniale hypothèse de la dérive des continents. Toutefois, à la différence de celles d'Élie de Beaumont et surtout de Suess, la théorie de Wegener n'exerça guère d'influence sur la géologie mondiale, sinon par de vives controverses, seuls quelques géologues inspirés, tel Argand, en utilisant les recettes. Cette tentative du savant allemand n'aurait plus qu'un intérêt historique si la « *New Global Tectonics* » ne retrouvait pas en elle l'affirmation d'un mobilisme planétaire généralisé.

I. La théorie d'Élie de Beaumont

Léonce Élie de Beaumont (1798-1874) fut, on le sait (Gohau, 1987 et 1998), un brillant polytechnicien devenu ingénieur des mines (Fig. 1). Bon observateur, mais piètre interpréteur des faits géologiques concrets, ce « *géologue mathématicien* » – qui, durant un demi-siècle, domina la géologie française – était avant tout un cérébral à la pensée géométrique. On se bornera ici à rappeler les idées essentielles qui sont à la base de son système, en laissant de côté ce qui a trait à sa brillante carrière et sans parler non plus de l'avatar final de sa pensée, la « *théorie du dodécaèdre pentagonal* »

(Fallot, 1938 ; Touret, 2007), la dénomination de « *réseau pentagonal* » apparaissant en 1850 dans un exposé à l'Académie des sciences.

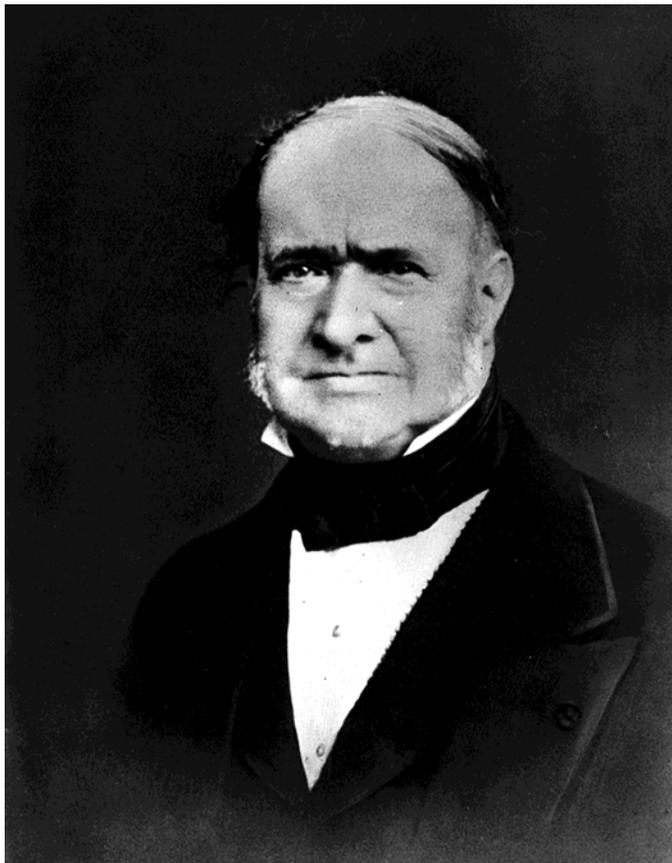


Figure 1. Léonce Élie de Beaumont (1798-1874)

Si le jeune élève de l'École des mines avait pu, en écoutant Brochant de Villiers – qu'il remplacera un jour – acquérir les bases de la géologie (Grandchamp, 2005), c'est cependant essentiellement à Leopold von Buch (1774-1853) qu'il empruntera les germes de son système. Entre deux voyages d'études, le pittoresque baron prussien passait beaucoup de son temps à Paris (il était parfaitement francophone, comme son ami Humboldt, qu'il fréquentait). Les rapports entre von Buch et Élie de Beaumont étaient intimes, et ils voyagèrent ensemble, par exemple en 1835 à l'Etna. Peu d'années avant sa mort, le Prussien écrivait d'Avignon (lettre du 13 juillet 1846, dossier Leopold von Buch, archives de l'Académie des sciences, Paris) à celui qui régnait alors sur l'Académie des sciences : « *Vous rejetez vos rayons de lumière autour de vous comme les planètes autour de leur soleil, et vous leur permettez de réfléchir la lumière, dont vous voulez les éclairer...* ». C'était l'époque du dodécaèdre pentagonal, et l'on a peine à voir dans le baron un humoriste !

Outre ses entrées en Allemagne, par von Buch et aussi par Humboldt, Élie de Beaumont cultiva de puissantes relations en Grande-Bretagne. Il y avait fait avec son ami Armand Dufrénoy un long séjour pour s'informer sur les méthodes cartographiques et les distinctions stratigraphiques des assises secondaires, ce qui permit aux deux hommes de réaliser les levés de la célèbre carte de la France au 500 000^e, qui fera leur légitime gloire. Ainsi, dès sa jeunesse, Élie de Beaumont avait-il tissé dans les deux grands pays voisins des liens étroits qui expliquent l'aura et le respect qui l'y accompagnèrent toute sa vie, et cela même si ses confrères manifestèrent souvent leur désaccord avec sa doctrine.

Si l'on veut résumer celle-ci, on peut dire : le principe, alors unanimement admis, du refroidissement du Globe, entraîne un rétrécissement des formations de sa croûte. L'image qui en fut donnée en 1840 par Constant Prévost (pourtant adversaire résolu de la théorie des « *soulèvements* ») était celle « *d'une pomme qui se fane ou d'une prune qui se dessèche* ». C'est une image analogue que Félix de Boucheporn (1844, p. 86) donnera par la suite : « *Lorsque le dessèchement amené par le tems fait rider la surface d'un fruit, cette modification s'opère par un procédé analogue à ce qui est indiqué pour le globe [...] ; l'écorce de ce fruit se replie sur elle-même et rachète par des plissemens son excédant [sic] de composition [...]. L'analogie est donc complète. Mais a-t-on remarqué jamais que ces rides végétales fussent parallèles entre elles ? [...] Entrecroisées en tous sens et grimaçant de la façon la plus capricieuse, elles se distinguent au contraire par l'absence de toute régularité. Pourquoi en serait-il autrement sur le globe ?* »¹ Cette remarque judicieuse n'empêche pas Élie de Beaumont de continuer à affirmer que chaque système de soulèvement, « *Brusque et de peu de durée* » entre des périodes de tranquillité, est caractérisé par une direction spéciale, qui lui est spécifique, et que l'on retrouve sur tout le Globe (en tenant compte, bien sûr, de sa sphéricité). Il en résulte des anomalies lithologiques dans la sédimentation, en particulier des discordances (« *solutions de continuité* »). Ainsi s'expliquent les coupures entre les « *étages consécutifs des terrains de sédiment* ». Parallèlement, ces « *révolutions* » entraînent la destruction puis le renouvellement des organismes vivants, et en cela Élie de Beaumont s'inspire de Georges Cuvier. Ainsi se montre-t-il l'adversaire de la systématisation des « *actual causes* », agissant constamment et uniformément.

A. Les cratères de soulèvement

L'idée et le terme sont empruntés à Leopold von Buch qui, en 1823, avait attribué à un soulèvement l'origine du Teide, volcan des Canaries : le « *cratère de*

¹ Frapolli (1847) résuma ce passage de façon imagée en parlant « *d'une pomme qui se flétrit et se dessèche, et dont la peau, attirée par la partie intérieure en tous ses points, ne forme pas des rides parallèles, mais [...] se grimace, au contraire, de la façon la plus capricieuse* ».

soulèvement » y étant suivi par le « *cratère d'éruption* ». Son compatriote, Alexander von Humboldt, lors de son expédition (1799-1803) aux Amériques, avait déjà évoqué le cas du Jorullo, au Mexique, qui, le 29 septembre 1759, avait surgi au milieu de champs cultivés en soulevant les masses rocheuses de surface, avant de les percer et de former son cratère, en suivant un alignement étroit (« *crevasse* »).

Cette idée de soulèvement occasionna, on le sait, de vives discussions, tant à propos des volcans en activité (Vésuve, Etna) que des édifices éteints, comme le Cantal. On se bornera ici à un exemple en région non-volcanique, le massif de l'Oisans (Pelvoux).

Voilà donc, en 1827, Élie de Beaumont, assisté de son jeune collègue Fénéon, qui escalade les pentes de l'Oisans, dans le cadre du lever de la carte géologique de la France. Il exposera ses résultats le 7 mars 1829 à la Société philomathique de Paris, mais la diffusion de la publication, modifiée et complétée, aura lieu beaucoup plus tard, en 1834, dans les *Annales des Mines*. Entre temps, Élie de Beaumont était revenu en Oisans en 1830, accompagné par Brochant de Villiers, son camarade Dufrénoy et Charles d'Orbigny, manifestement pour les convaincre de ses idées sur la formation de ce massif, à la singulière forme, grossièrement circulaire.

1. Le « *soulèvement* » de l'Oisans. Pour le jeune ingénieur, le massif de l'Oisans, au sud de la Romanche, semble être un « *cratère de soulèvement* », au sens de Leopold von Buch. Présentant « *en masse un profil incliné vers l'extérieur* », il comporte un anneau intérieur de granite sur les 4/5 de sa circonférence. Ce granite pénètre au sein de gneiss qui plongent presque constamment vers la périphérie sous des « *masses secondaires* » (Jurassique et Crétacé). Comme ces terrains sédimentaires, malgré les failles qui souvent les séparent des « *roches primitives* », plongent vers l'extérieur du massif, le pendage similaire des gneiss doit résulter d'un « *soulèvement postérieur au dépôt de la craie* » (les assises à nummulites étaient, à cette époque, incluses dans cette appellation).

2. Le cratère central. On accède au cœur de l'Oisans en remontant le cours du Vénéon, qui débute près du « *cirque de la Bérarde* » (1700 m), d'un diamètre de 20 km, dominé de toutes parts par une ligne de crête à parois subverticales, dépassant 3000 m. Ce cirque aurait « *la forme de ces dépressions plus ou moins régulières que, dans les contrées volcaniques, M. de Buch a nommées cratères de soulèvement* ». Le cirque résulterait d'un effondrement de la partie centrale du bombement de l'Oisans, à la manière – hasarde-t-il – des cirques de la lune ! Élie de Beaumont généralise de la sorte l'idée de son maître : que de telles structures se placent au milieu de basaltes (c'est, selon von Buch, le cas à Tenerife), de la craie (comme les « *vallées d'élévation* » de Buckland, en Angleterre) ou de gneiss (cas de l'Oisans) ne s'oppose en rien, affirme-

t-il, « à ce qu'on suppose que trois portions de la surface du globe, recouvertes respectivement de ces trois espèces de roches, aient cédé d'une manière analogue à des forces agissant du dedans au dehors. »

3. La fracturation radiale. Le bombement résultant de la « *pression intérieure* » a engendré un crevassement radial de l'enveloppe gneissique des granites. Le mathématicien calcule que le phénomène a dû se traduire au sommet de l'édifice – qui, image empruntée à von Buch, affecterait « *la forme d'une fleur à moitié éclos* » –, par des ouvertures égales au total à 1/12 de la circonférence du massif, estimée à « *62 830 m* » [sic]. Élie de Beaumont insiste longuement sur ces fractures, qui peuvent être restées béantes.

4. Les formes du relief. Il pourfend les « *partisans exclusifs des Actual Causes* », visant les tout frais parus *Principles of geology* de Lyell (et, du même coup, son propre adversaire Prévost). Au vu de ces murailles impressionnantes, de ces « *fentes* » qui les accidentent, « *quel géologue de cabinet songerait à plaider [...] la cause de l'influence exclusive des agents qui opèrent sous nos yeux ?* » Pour lui, les eaux et autres agents atmosphériques ne sont pour presque rien dans les formes actuelles du relief : le rôle insignifiant des cascades en est pour lui une preuve ! De même exclut-il le rôle d'une « *longue succession de tremblements de terre* » pour expliquer les fractures. À ses yeux, la faille, qui serait restée ouverte, de la haute Romanche résulte d'une grande secousse, « *événement de dimensions colossales, comparativement aux événements dont nous sommes journellement les témoins* ».

Le soulèvement du massif de l'Oisans a dû se faire « *dans un temps très court* ». Il n'y a rien d'exagéré, conclut-il, « *à donner à des événements de cette grandeur [...] le nom de "révolutions de la surface du globe"* ». Ainsi est introduite la désignation portée dans le titre du mémoire qu'il présentera trois mois plus tard à l'Académie des sciences et qui fera sa célébrité.

5. La cause du soulèvement. Bien sûr, après son maître Leopold von Buch, il envisage le rôle des gaz souterrains (encore que ceux-ci seraient plutôt « *l'effet que la cause des grandes commotions souterraines* »). Il s'étonne cependant que les « *gypses et roches altérées* » – qui en seraient la trace – soient très rares à la périphérie du massif de l'Oisans. De ce fait, les substances gazeuses ont dû se faire jour vers le centre du cirque (de la Bérarde) où, si l'on n'en trouve pas les stigmates, c'est que « *les roches primitives sont peu altérables* »...

Il conclut, un peu en Normand : « *peut-être les substances gazeuses [...] n'ont-elles paru qu'en très-petite quantité lors du soulèvement définitif du massif [...] il serait certainement très-hasardé de considérer la forme de ce massif comme le résultat du dégagement d'une grande masse de gaz par son point central* ».

A-t-il pensé un moment à attribuer un rôle aux granites, qui forment une espèce d'anneau au centre du massif ? En tout cas, il repoussait l'idée wernérienne y voyant la base des terrains primitifs. Bien sûr, il avait entendu Brochant de Villiers la défendre devant lui à l'École des mines, mais il était plus sensible à l'avis de Leopold von Buch qui, dès 1799, et bien que disciple favori de Werner, l'avait abandonnée après avoir traversé les volcans d'Auvergne.

En 1830 d'ailleurs – période du travail sur l'Oisans – Ami Boué se gaussait devant la Société géologique de la « *théorie neptunienne* » de Werner qui, si elle avait eu encore vers 1818 de nombreux partisans, n'était plus conservée que dans « *la secte de Freyberg, Chine géologique au milieu de toute l'Europe éclairée !* »

En Oisans, les terrains sédimentaires sont généralement superposés au granite. Cependant dans deux secteurs, en particulier au sud-sud-ouest de « *Villard-d'Areine* » [= Villar d'Arène] près de La Grave, c'est-à-dire au nord du massif, le granite repose avec un angle de 40° sur les couches jurassiques. Élie de Beaumont élimine – à tort – l'intervention d'un « *simple accident dû à des circonstances extérieures et purement mécaniques* », ce qui pourtant nous paraît évident, en fonction de la bréchification et de la minéralisation qu'il décrit au contact granite-sédiments... Et pourtant il écrit : « *Il est parfaitement évident [c'est lui qui souligne] que les roches granitiques observées en contact avec les assises jurassiques n'étaient pas complètement réduites à l'état de masses froides et inertes, lorsque les superpositions décrites [...] se sont définitivement opérées.* » Mais comme, pour lui, le « *soulèvement* » de l'Oisans a dû se faire « *dans un temps très court* », et que le « *Crétacé* » (s.l.) a été affecté par le phénomène, il lui aurait été difficile d'attribuer un rôle moteur au granite, qu'il voyait s'épancher localement, presque froid, sur les sédiments jurassiques.

B. Les systèmes de soulèvement

Le 22 juin 1829, Élie de Beaumont présente à l'Académie des sciences son célèbre manifeste « *Recherches sur quelques-unes des révolutions de la surface du globe* ». Il débute par ces phrases, d'expression modeste, tout en se plaçant sous d'illustres parrainages : « *M. Cuvier a montré que la surface du globe a éprouvé une série de révolutions subites et violentes. M. Léopold de Buch a signalé les différences nettes et tranchées entre les systèmes de montagnes qui se dessinent à la surface de l'Europe. Je ne fais autre chose qu'essayer de mettre en rapport ces deux ordres d'idées* ».

Il est vrai que le baron prussien avait déjà distingué en 1824 trois directions dans les chaînes du centre de l'Europe, dont il séparait nettement les mouvements alpins. En cela, von Buch était le continuateur de son maître Werner, qui avait constaté que les

essaims de filons métallifères de l'Erzgebirge pouvaient être divisés en plusieurs systèmes se recoupant, les filons d'un même système étant plus ou moins parallèles entre eux.

Élie de Beaumont généralise l'idée de von Buch à la surface du globe et aux diverses périodes géologiques, en fonction des connaissances de l'époque. Il n'a pas d'hésitation pour affirmer que les couches montrant une inclinaison ont été « soulevées », c'est-à-dire redressées postérieurement à leur dépôt. Ainsi sont balayées définitivement les idées de beaucoup de géologues antérieurs, tel Palassou qui, encore en 1815, persistait, dans les Pyrénées, « à *présumer que l'inclinaison générale des couches date de la même époque que leur origine* ».

De Cuvier, Élie de Beaumont hérite de la notion de « *révolutions subites [à] phénomènes violents et passagers* », séparées par des périodes de tranquillité, comme l'actuelle. Il précise que « *Chaque chaînon de montagnes, convenablement circonscrit [est] un tout unique qui a pris son relief actuel en un moment, et, pour ainsi dire, d'un seul coup* ».

Comme pour les « *cratères de soulèvement* » mais sans insister dessus, il lie les « *systèmes de soulèvement* » à des poussées volcaniques profondes. La planche II de son article de 1829-1830 le prouve. Des pastilles circulaires représentant des roches vertes (serpentinites du Viso ou du mont Genève) jalonnent le « *système des Alpes occidentales* ». Quant au « *système de la Chaîne principale des Alpes* » [= les Alpes orientales], il est parallèle à un alignement de « *mélaphyres et dolomies* » (après von Buch, Élie de Beaumont met en relation les deux types de roches !) qui forme « *comme un immense filon dont la direction est celle de la chaîne de montagnes* » : en cela, il reproduit l'axe de « *roches pyroxéniques* » qu'avait déjà proposé von Buch, apparemment en accord avec Humboldt.

Un point essentiel de la doctrine d'Élie de Beaumont s'affirme progressivement : l'orientation, au degré près, voire à la minute, des alignements montagneux de chaque « *révolution* », sur toute la surface du « *dodécaèdre pentagonal* », sur les arêtes duquel les divers alignements montagneux doivent se replacer².

Lors de son exposé de juin 1829, Élie de Beaumont ne citait que quatre « *systèmes de soulèvement* » : 1) à la fin du Jurassique, le système de l'Erzgebirge – « *grès vert* » sur roches anciennes – dit aussi « *de la Côte d'Or* », N-45°E ; 2) à la fin du Crétacé, le système des Pyrénées, les sédiments tertiaires s'étendant « *horizontalement jusqu'au pied des Pyrénées sans pénétrer dans leur intérieur* », à la

² Il s'agit en réalité de la surface de la projection du « *dodécaèdre pentagonal* » sur la surface terrestre, les arêtes correspondant aux cordes des grands cercles sur lesquels se placent les alignements montagneux.

différence des Alpes ; 3) vers la fin du Tertiaire, le système des Alpes occidentales, N-26°E, de Marseille à Zurich ; 4) le système « *de la chaîne principale des Alpes* », du Valais à l'Autriche, pendant le « *dépôt des terrains qu'on appelle d'atterrissement, de transport et d'alluvions* ».

Élie de Beaumont n'hésite pas à étendre géographiquement ses conclusions. Le soulèvement des Pyrénées doit se retrouver... dans les Alleghanys et le golfe du Bengale ! Quant au soulèvement le plus récent, il le rencontre en Provence et aussi dans la plupart des grandes chaînes alpines du ruban allant de Gibraltar à l'Insulinde, ruban dont l'existence semble pour la première fois mise en valeur. Affectant les « *terrains sub-apennins* » (= notre Pliocène), ce système serait postérieur aux « *cailloux roulés* » qui remplissent la vallée du Rhône entre Saône et Isère, mais antérieur aux « *blocs et cailloux erratiques* » des vallées des Alpes et des pentes du Jura (= ? notre Glaciaire), ainsi qu'à ceux de la Crau. Ce qui amène Alexandre Brongniart, André Brochant de Villiers et François-Sulpice Beudant, à écrire, dans le rapport extrêmement élogieux qu'ils font sur le manuscrit d'Élie de Beaumont déposé à l'Académie des sciences : « *nous disons [avec Élie de Beaumont] que les Alpes [sont] comme nées d'hier et qu'elles ont enseveli les mastodontes et les éléphants européens, témoins du soulèvement du Mont Blanc, ce géant des montagnes européennes* »... Et vient leur conclusion, qui peut faire sourire : « *l'Académie des sciences saura toujours distinguer les idées nouvelles, résultant d'expériences et d'observations nombreuses et bien faites, discutées avec une saine critique, de celles qui ne sont que le résultat des conceptions d'une imagination active entraînée par quelques aperçus* », ce qui classe le mémoire d'Élie de Beaumont parmi « *les vérités fondées sur de solides bases* »...

Le texte de ce travail, imprimé en deux parties dans les *Annales des Sciences naturelles de Paris*, en septembre 1829 et janvier 1830, porte dans sa table des matières des compléments importants. En six mois, l'auteur est passé de 4 à 10 « *révolutions* » : les quatre premières – qui sont nouvelles – se répartissent de la base du « *Houiller* » au début du Jurassique ; est aussi ajouté un épisode au milieu du Tertiaire, affectant Corse et Sardaigne. Enfin, en surnombre, est figuré le soulèvement de la chaîne volcanique des Andes, peut-être contemporain de « *l'inondation subite et passagère* » du Déluge historique.

Bien que, dans son mémoire, Élie de Beaumont ait écarté « *la supposition d'un nombre presque illimité de soulèvements partiels arrivés à des époques réparties sans règle fixe pendant toute la durée des temps géologiques* », on assiste par la suite à la prolifération de ses révolutions ! En 1847, lors d'une séance de la Société géologique où assistent ses amis Sir Roderick Murchison et Leopold von Buch, « *notre maître illustre et chéri* », Élie de Beaumont ajoute cinq nouveaux « *systèmes* » pour les temps paléozoïques, jusque-là non traités. De 14, on en sera en 1850 à 50 épisodes, pour

arriver en 1867, au terme des recherches de l'illustre Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, au nombre de... 96 !

Cette évolution avait entraîné l'ironie de certains, tel Ami Boué, mettant en doute l'intérêt d'une méthode où la distinction des révolutions, basée sur leurs directions différentes, n'était plus réellement possible ! En 1850, Élie de Beaumont se pose lui-même la question : s'il croit que « *les chaînes d'un même âge sont généralement comprises dans un même faisceau de l'écorce terrestre* », il reconnaît qu'aux extrémités de ces fuseaux, « *la direction des chaînes doit tendre à devenir incertaine* ». De même, pour des points éloignés du globe, il est probable qu'une même « *direction s'est reproduite à deux époques différentes et fort éloignées l'une de l'autre* ». Cependant, ces accès de « *faiblesse* » ne dureront pas !

C. Les idées d'Élie de Beaumont sur les formations sédimentaires

Pour lui, les divisions sédimentaires doivent être basées préférentiellement sur les épisodes, brefs et brutaux, des « *révolutions* ». Celles-ci sont donc le chronomètre de la stratigraphie. Ainsi s'explique que le « *Rapport sur les progrès de la stratigraphie* » qu'il écrivit en 1869 soit, en fait, une illustration de sa théorie du réseau pentagonal.

Il ne faut cependant pas douter qu'Élie de Beaumont n'ait possédé une solide connaissance de la géologie sédimentaire, spécialement des formations secondaires. Comme son ami Dufrénoy, il avait pris en compte, pour le lever de la carte de France, les divisions des stratigraphes britanniques et, pour le Tertiaire du Bassin parisien, les conclusions de Cuvier et Brongniart lui étaient familières. Les divisions stratigraphiques, lors de ses premières études (1829), étaient basées sur des formations-type, le concept d'étages ne devant s'affirmer, avec Alcide d'Orbigny en particulier, qu'à partir du milieu du XIX^e siècle. Ainsi distingue-t-il, au-dessus des « *terrains de transition* » [= Paléozoïque anté-Houiller] de l'école de Freiberg, une succession de « *terrains secondaires* ».

Cette appellation englobe alors la « *série houillère* » (notre Carbonifère supérieur), le « *Grès rouge des Vosges* », qu'il sépare du « *Grès bigarré* » celui-ci formant avec le Muschelkalk et les « *Marnes irisées* » le futur Trias de von Alberti. Viennent enfin le « *Calcaire du Jura* » (Lias et Oolithe des Anglais) et, subdivisant notre Crétacé, « *Grès vert* » puis « *Craie* ». Sa division des « *terrains tertiaires inférieurs* », « *terrains tertiaires supérieurs* », « *terrains marins de transport anciens* » préfigure les futures (1833) divisions de Lyell en « *Eocene* », « *Miocene* » et « *Pliocene* ». Enfin, ses « *terrains de transport moins anciens* » correspondent grosso modo à notre Quaternaire.

Entre deux révolutions successives, la sédimentation s'opère grâce à l'affaissement progressif du bassin, par subsidence dirions-nous. Cependant chaque

bassin, où l'on peut voir une ébauche de ce qui sera nommé par la suite « géosynclinal », est dissymétrique. Une bordure (que l'on peut qualifier d'« interne ») correspond au pied des reliefs, tectoniques ou d'érosion, engendrés par une première « révolution » : la nouvelle sédimentation débute au-dessus d'une discordance angulaire. Inversement, sur la bordure opposée (que l'on peut dire « externe »), l'ensemble de la pile sédimentaire déposée dans le bassin est soulevée lors d'une seconde « révolution » et sa partie haute va être soumise à l'érosion. Cela postule un déplacement des aires de sédimentation, dont la profondeur est toujours inférieure au millier de mètres (ce qui est effectivement valable dans les séries d'Europe occidentale que connaissait Élie de Beaumont).

Quant à la durée des temps géologiques, une remarque que celui-ci fit en 1871 à l'Académie des sciences peut traduire sa pensée : « *Les derniers travaux de M. Poisson permettent de conserver tous les phénomènes géologiques accomplis jusqu'à ce jour comme renfermés dans une période de cent millions d'années, ou même dans une période plus courte encore* ».

Comment Élie de Beaumont considérait-il la paléontologie ? Élève ou au moins auditeur de Brongniart et s'inspirant de Cuvier, il ne pouvait pas ignorer l'intérêt de cette nouvelle discipline. Celle-ci ne l'attira guère cependant : dans ses quelque 200 publications, on ne trouve que peu d'allusions, sauf dans deux cas qui firent couler beaucoup d'encre ! Ce fut d'abord « *l'affaire de Petit-Cœur* », en Tarentaise, avec l'observation (1828) de l'alternance de couches à bélemnites et d'horizons à végétaux. Du fait de l'apparente contemporanéité de ces restes, il choisit l'âge liasique des bélemnites en pensant que les flores, dites (selon lui à tort) carbonifères, avaient une répartition stratigraphique plus large. Il était trop tôt pour envisager un écaillage d'ordre tectonique. N'accablons cependant pas trop l'illustre ingénieur : Ami Boué, l'Italien Angelo Sismonda, Leopold von Buch et apparemment Humboldt (sur la foi d'une lettre du premier à Élie de Beaumont) étaient du même avis. Sir Roderick Impey Murchison, le maître de la géologie britannique d'alors, n'écrivit-il pas au *Quarterly Journal* un long plaidoyer pour justifier l'opinion de son ami français à ce sujet ?

Autre cas de mépris pour la valeur des fossiles, celui de l'attribution au Crétacé des couches à nummulites des Pyrénées, spécialement des Corbières. Avec son ami Dufrénoy, Élie de Beaumont décida que, puisque ces couches étaient affectées par le « *système de soulèvement des Pyrénées* », elles devaient être crétacées. En effet, par définition (définition fondée sur la rupture sédimentaire observée dans le Bassin parisien entre la Craie et les « *terrains tertiaires inférieurs* »), cette « révolution » doit séparer Crétacé et Tertiaire. Dans cette affaire, Élie de Beaumont fit bon marché des objections de ses opposants paléontologistes, tel le vicomte d'Archiac.

L'état d'esprit d'Élie de Beaumont apparaît bien quand, en 1831, Gérard Deshayes expose devant la Société géologique ses conclusions sur la division du Tertiaire en trois « époques », en se basant sur les différences, apparues brutalement, dans les proportions d'espèces fossiles « analogues » aux espèces actuelles. Élie de Beaumont rétorque qu'il est lui-même arrivé aux mêmes conclusions « *en s'attachant à suivre les dépôts [...] d'après la disposition géométrique...* », chacun des « trois étages [correspondant] à une période de tranquillité entre deux soulèvements de montagnes » et à « une génération particulière de grands animaux » (clin d'œil à Cuvier !). Cependant, quand on considère aujourd'hui les sites indiqués pour chacun des trois « étages », il apparaît que la méthode « zoologique » de Deshayes donne de meilleures indications que la méthode « géologique » de l'illustre géomètre !

IV. Conclusions sur la théorie d'Élie de Beaumont

En résumé, la naissance et l'évolution des bassins sédimentaires, comme aussi les changements paléontologiques observés dans les formations successives étaient pour Élie de Beaumont le simple résultat des « soulèvements », jugés brutaux et rapides, des « systèmes de montagnes » successifs. On doit le créditer du fait que – comme l'écrivit un jour Marcel Bertrand (qui ne devait pourtant guère l'aimer !) – il fut le premier « à donner un âge aux montagnes ». Dépassant la pensée de Leopold von Buch, il envisagea le problème à l'échelle du globe et voulut l'insérer dans une succession stratigraphique sérieuse, déjà considérée comme universelle.

Arago, écrivant en 1830 dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* « *Sur l'ancienneté relative des différentes chaînes de montagnes de l'Europe* », afin d'exposer les idées d'Élie de Beaumont, posa clairement le problème : « *Dès que le géologue a admis la formation des montagnes par voie de soulèvement [...] il doit se demander, par exemple, si toutes les grandes chaînes ont surgi à la même époque et, dans le cas d'une réponse négative, quel est l'ordre de leur ancienneté relative. Telles sont précisément les questions dont M. Élie de Beaumont vient de s'occuper, et tout porte à supposer qu'il les a complètement résolues* ». De ce fait, « *aujourd'hui [...] la Géologie a pris rang parmi les sciences exactes.* »...

Si le principe de la succession dans le temps des chaînes de montagnes représente un progrès considérable, en revanche le caractère rigoureusement rectiligne de celles-ci et le parfait parallélisme qu'Élie de Beaumont attribuait aux chaînes nées lors d'une même « révolution » ne résistèrent pas aux réalités du terrain. On s'aperçut vite – Ami Boué, pourtant initialement admirateur de cette théorie, fut l'un des premiers à le voir, dans les Carpates – que la même chaîne pouvait avoir un tracé sinueux et qu'inversement des chaînes parallèles pouvaient être d'âges différents.

On sait que les idées d'Élie de Beaumont régnèrent longtemps en France, du fait de la position éminente de leur auteur et de l'appui inconditionnel de la plupart des membres de l'Académie des sciences, après la proclamation d'Arago, qui avait l'oreille de l'opinion publique et celle des corps constitués. De plus, ces idées furent répandues dans les universités par divers traités pédagogiques (les traités, en figeant les progrès de la science, peuvent être la pire des choses...), ceux d'Alexandre Leymerie, de Victor Raulin, d'Alexandre Vézian : ce qui prolongea les effets de la néfaste théorie du réseau pentagonal jusqu'à la fin du XIX^e siècle en France et dans les pays latins. Cependant, chez les géologues, une sourde opposition se développait : en 1862, Charles Martins écrit au Suisse Desor : « *Mr de Beaumont est un fossile Silurien, personne ne s'occupe plus de lui [...] C'est un homme mort de son vivant* ».

En réalité, les fidèles existaient toujours. Ainsi Alexandre Béguyer de Chancourtois s'efforça d'être le défenseur de son maître, après sa mort. L'érection en août 1876 d'une statue (fondue lors de l'occupation allemande) d'Élie de Beaumont à Caen, capitale de sa province d'origine, fut l'occasion de discours dithyrambiques. Charles Sainte-Claire Deville (1878), son successeur au Collège de France, proclama : « *La France a eu la gloire de donner en Élie de Beaumont, un Képler à la géologie.* »

Eduard Suess, encore en 1861, faisait allusion aux « *soulèvements* » du géologue français. Il s'en dégagea dans sa première synthèse (1875) sur les Alpes. Et, en parlant dans ses *Souvenirs* (« *Erinnerungen* ») de l'« être suprême » qui l'avait reçu à Paris lors d'un voyage en 1856, Suess tint à souligner le respect que lui inspira Élie de Beaumont, « *celui qui, le premier, osa proposer une vision d'ensemble pour le fonctionnement du globe* ». Ce n'est pas un mince compliment !

II. La vision globale d'Eduard Suess

La théorie des « *systèmes de soulèvement* » apparaissait comme obsolète, moins d'un demi-siècle après la célèbre proclamation d'Élie de Beaumont, au contact des réalités du terrain, qui s'étaient accumulées. « *Devant l'abondance des détails, le besoin s'imposa de forger des lois très étendues et d'établir des principes* » (Zittel, 1899). Ce fut un paléontologiste autrichien, Eduard Suess (1831-1914), qui en prit l'initiative.

Un nombre considérable d'études ont été consacrées à Suess (Fig. 2), spécialement en langue allemande. On possède depuis peu, en français, un aperçu biographique (Seidl, 2004) donnant la liste des principales références existantes, une appréciation des principaux résultats de son œuvre (Durand-Delga et Seidl, 2007) et un

exposé des relations qu'eut Suess avec les géologues français (Durand-Delga, 2007), d'abord avec ses confrères paléontologistes, puis avec les tectoniciens alpins, Marcel Bertrand et Pierre Termier en particulier.



Figure 2. Eduard Suess (1831-1914)

Suess a clairement exprimé son désir de remplacer le modèle périmé d'Élie de Beaumont. En décembre 1889, il est élu correspondant de l'Académie des sciences de Paris : à Daubrée, son présentateur, qui l'avise de sa nomination, le géologue viennois répond (dossier Suess : Archives Acad. sci. Paris) : « *C'est Élie de Beaumont, auquel appartient le mérite d'avoir le premier osé une grande synthèse orogénique. Mais la ligne droite [des systèmes de soulèvement] et la notion géométrique devaient nécessairement, selon l'organisation spéciale de l'esprit humain, devancer la ligne courbe* », c'est-à-dire celle que Suess reconnaissait dans les arcs montagneux, qui sont « *simplement inscrits dans nos cartes et se livrent [= peuvent se voir] dans ces cartes.* »

D'où viennent les capacités et le courage que manifesta Suess dans son entreprise ? On peut tenter de l'expliquer : une éducation raffinée dans un milieu riche,

un trilinguisme parfait (anglais, français, allemand) acquis dès l'enfance, un enseignement de qualité à l'université technique de Vienne, tels furent les piliers sur lesquels le jeune Autrichien, tôt ouvert sur le monde, à l'esprit audacieux et parfois rebelle, saura s'appuyer. Nommé à vingt ans assistant au Muséum de la capitale autrichienne, puis ayant conquis – sans le doctorat et après un appel direct au ministre ! – un poste de professeur à l'université, Suess va, durant deux décennies, parcourir les Carpates occidentales et les Alpes autrichiennes. Ayant la charge de récolter et d'étudier diverses faunes, spécialement du Trias et du Jurassique, et devant les situer stratigraphiquement et paléogéographiquement, il est amené à s'intéresser à la structure de ces chaînes.

À moins de quarante ans, titulaire d'une chaire à l'université et membre de l'Académie impériale des sciences de Vienne, Suess a atteint ses objectifs professionnels. Renonçant vers 1870 à l'observation sur le terrain, son extraordinaire activité va être fixée à Vienne : enseignement universitaire (à la différence d'Élie de Beaumont, il sera un remarquable professeur et aura de très nombreux élèves), activité politique nationale ou municipale dans les rangs contestataires « *libéraux* », enfin – et surtout – travaux de synthèse géologique. C'est dans son cabinet, au n° 9 de l'Afrikanergasse, entouré de ses documents et de ses cartes, qu'il va écrire ses ouvrages et spécialement son énorme ouvrage *Das Antlitz der Erde* (de 1885 à 1909). Dirigés et contrôlés par Emmanuel de Margerie, une douzaine d'éminents géologues et géographes vont le traduire et l'adapter dans *La Face de la Terre* (1897 à 1918). C'est de cette version française (en abrégé : LFT) que seront extraites les phrases de Suess rapportées dans ce texte.

A. Le premier corps de doctrine : « Die Entstehung der Alpen » (1875)

Ce petit ouvrage sur la genèse des Alpes s'applique au seul « *système alpin* », conçu alors comme s'étendant de l'Apennin jusqu'aux Carpates et aux « *Alpes dinariques* ». Cela n'empêche pas l'auteur de s'étendre sur les prolongements en Asie méridionale. Constatant – Ami Boué l'avait déjà écrit – que les sédiments tertiaires bousculés au pied sud de l'Himalaya sont l'homologue de la molasse pareillement chevauchée au bord septentrional des Alpes autrichiennes, il en conclut justement que la poussée tectonique s'est exercée dans des directions opposées, vers le sud en Asie, vers le nord en Europe.

Suess se base sur le même axiome qu'Élie de Beaumont, le refroidissement du globe : « *les dislocations visibles dans l'écorce terrestre sont le produit de mouvements qui résultent de la diminution du volume de notre planète* » (LFT, I, p. 139). Néanmoins, il va prendre le contre-pied de la plupart des thèses de son prédécesseur parisien.

Aux « *soulèvements* », il oppose l'idée que les « *affaisements* » sont le phénomène essentiel. Aux mouvements verticaux, il ajoute le rôle des mouvements tangentiels : les chaînes de montagnes ont une structure transversale dissymétrique, avec une polarité orogénique. Leurs « *lignes directrices* » (« *Leitlinien* ») ne sont pas rectilignes, mais souvent courbes : lors de leur propagation, ces « *grandes vagues solides* », qui n'intéressent que la partie supérieure de la croûte, doivent, en se propageant, se mouler autour de noyaux indurés des orogénèses antérieures. On ne peut donc pas se baser sur la direction des chaînes pour leur assigner un âge.

Dans cet ouvrage, Suess estime que les grandes chaînes plissées dérivent fréquemment de géosynclinaux. S'il utilise le terme proposé par Dana en 1873 (pour des accumulations sédimentaires à la limite continent-océan, modèle que ce dernier propose pour les Appalaches), Suess l'utilise pour des fosses remplies de sédiments pélagiques, qui ont été par la suite comprimées entre les mâchoires de deux masses continentales.

B. Le développement des idées de Suess : La Face de la Terre

Sans utiliser le mot « *tectonique* » (il ne le cite qu'une fois, en rappelant les tremblements de terre « *tectoniques* » de la classification de Rudolf Hoernes), Suess met en relation tous les faits géologiques observables avec les « *dislocations* » et les « *mouvements* » de l'écorce terrestre, ce qui est le propre d'une « *tectonique globale* », dans le sens actuel.

1. La formation des océans

Pour Suess, la croûte terrestre possède une constitution à peu près uniforme, que ce soit sous les continents ou les océans. Bien qu'il soit à l'origine des désignations de « *sima (Si, Mg)* » et de « *sal (Si-Al)* », le géologue de Vienne se ferme les yeux en niant que les roches lourdes, signalées dans l'Atlantique, aient une extension générale – comme ailleurs – qu'existe un déficit de masse sous les chaînes de montagnes. En cela, il était prisonnier de son hypothèse sur l'origine des océans. Ce sont, pour lui, « *des aires d'affaissement* », que des fractures ont séparées des continents voisins. On ne peut cependant pas parler de « *permanence* » à leur sujet, puisqu'ils apparaissent à des époques différentes, par effondrement de certaines parties de continents, et puisqu'ils peuvent disparaître (cas de la Téthys).

Le Pacifique en est un premier type. La présence de sédiments triasiques marins à son pourtour atteste son ancienneté. Suess est en accord avec Ferdinand von Richthofen estimant que « *le bassin du Pacifique est bordé de fractures étagées d'une grande amplitude* ». Dans les chaînes de montagnes qui s'allongent parallèlement aux rivages, les zones externes font face à l'océan, ce qui reproduit la tendance générale au

chevauchement vers les dépressions. À la différence de Haug, qui verra dans l'aire du grand océan un ancien continent bordé périphériquement par des géosynclinaux qui évolueront en chaînes plissées, Suess pense « *qu'il n'existe pas, sur le globe, de géosynclinal plus important que le Pacifique* » (LFT, II, p. 339). On remarquera que c'est, en 1888, sa seule (et dernière) utilisation du terme de Dana. En 1909 (LFT, III, p. 1618), il regrettera de l'avoir employé, du fait de l'ambiguïté de cette notion.

L'Atlantique est d'un autre type. Ses rivages – arcs de Gibraltar et des Antilles mis à part – ne correspondent jamais aux parties externes des chaînes plissées et ils les recoupent souvent. Les fractures responsables de l'affaissement de l'océan (et, en particulier, de la disparition de... l'Atlantide !) datent du début du Miocène.

Il existe enfin un espace océanique disparu, qu'il nomme « *Téthys* » : dirigé est-ouest, existant depuis le Trias, il émanait à l'ouest du Pacifique, courait à travers l'Asie centrale et les Alpes jusqu'à la « *Méditerranée centrale* » (que Neumayr, gendre de Suess, avait définie en 1885), et se poursuivait à l'ouest des Antilles. Cette « *Téthys* » y aurait perdu son individualité lors de l'effondrement de l'Atlantique.

À l'est de Gibraltar, il en resterait le souvenir dans les parties profondes de l'actuelle Méditerranée. Partout ailleurs, les dépôts téthysiens ont été portés en hauteur, dans les Alpes, et plus encore, dans l'Himalaya.

2. La formation des continents et des chaînes de montagnes

Les formations qualifiées d' « *archéennes* » par James Dwight Dana, antérieures au Paléozoïque, forment la masse des continents de l'hémisphère nord (les « *boucliers* » canadien ou « *Laurentia* » et baltique) et de l'hémisphère sud : là, le « *Gondwana* », figé depuis un lointain passé, sera morcelé, selon Suess, par les effondrements de l'Atlantique sud et de l'océan Indien.

Aux yeux du maître viennois, « *tous les terrains archéens [...] ont subi un plissement et une compression équivalente* » [comme si] « *la force plissante a jadis agi sur toute l'étendue du globe* » (LFT, III, p. 6). Ces chaînes anciennes – que Marcel Bertrand regroupera dans une « *chaîne huronienne* » – ont été arasées par l'érosion, pour être ensuite recouvertes en discordance par les sédiments cambriens. Parfois, ceux-ci, n'ayant pas été dérangés tectoniquement, ont été dégagés par l'érosion, déterminant de chaque côté de l'Atlantique, les fameux escarpements des « *lignes de glint* » (LFT, II, p. 96).

Par contre, « *la force plissante est localisée aujourd'hui* [Suess veut dire depuis le début du Paléozoïque !] *dans des régions spéciales.* » Et c'est alors la définition célèbre des trois « *chaînes de plissement principales, disposées en retrait l'une sur l'autre et*

toutes refoulées vers le nord » : 1. la « *chaîne Calédonienne, anté-dévonienne* » ; 2. la chaîne anté-permienne regroupant, avec un « *rebroussement* » [« *Schaarung* »], « *l'arc armoricain* » et « *l'arc varisque* » que M. Bertrand regroupera dans sa « *chaîne hercynienne* » et que par la suite, la retrouvant en Asie centrale, Suess qualifia d' « *Altaïdes* » ; 3. enfin, la chaîne la plus récente, « *la chaîne alpine* » de Bertrand, édifiée à l'intérieur des rameaux des Altaïdes, entre lesquels elle devra « *s'encadrer* », avec son tracé sinueux.

On a nommé « *loi de Suess* » son affirmation que les chaînes de montagnes ne sont pas, transversalement, symétriques. Elles montrent une polarité des mouvements, la poussée tangentielle s'exerçant entre un « *arrière-pays* » [« *Rückland* »] et un « *avant-pays* » [« *Vorland* »], progressant de zones internes vers des zones externes qui, elles-mêmes, chevauchent une « *avant-fosse* » [« *Vorgraben* »]. En outre, suivant le principe de la « *tendance au recouvrement des dépressions* », il peut y avoir des chevauchements vers l'intérieur des chaînes [« *Rückfaltung* »] ou vers leur arrière-pays, quand celui-ci d'effondre.

En 1883, quand Suess publie le début de son premier tome sur « *les mouvements de la croûte extérieure du globe* », s'il insiste sur les poussées tangentielles, leur ampleur apparaît limitée. Il parle de plis couchés, parfois associés en « *structures imbriquées* », pouvant aboutir à des chevauchements horizontaux. Cependant, la « *grande faille du Midi* » que viennent de révéler les ingénieurs belges François-Léopold Cornet et Alphonse Briart en 1877 dans le bassin houiller franco-belge, avec son « *énorme amplitude* », lui apparaît comme une complication extraordinaire.

En 1888, dans le deuxième tome de l'*Antlitz der Erde*, Suess commence à prendre conscience de l'ampleur des charriages. Ceux-ci viennent en effet d'être révélés à la fois dans les chaînes paléozoïques et dans les Alpes. Dans les Calédonides, Charles Lapworth a décrit en 1883 le Moine-thrust, et bientôt, en 1888, ce sera la grande nappe scandinave de Törneböhm, avec une flèche de déplacement de 100 km, dont Suess avait pu, lors d'un voyage en 1885, s'assurer de la réalité. Dans les Alpes, la proposition des « *nappes de recouvrement* » est due à Marcel Bertrand : sa grande nappe de Glaris remplace le singulier « *double-pli* » couché, à charnières s'affrontant, des précédents auteurs. Et surtout est suggérée par lui l'allochtonie générale, sur un front de 100 km, de l'Arve aux Alpes rhétiques, des nappes préalpines.

En 1909 enfin, le vieux maître avoue que « *l'examen de la nature a montré que les hypothèses les plus hardies qu'on pouvait avancer, il y a seulement quelques années, demeurent bien au-dessous de la réalité* » : c'est l'époque où Pierre Termier vient d'annoncer le charriage de l'ensemble des Alpes calcaires septentrionales d'Autriche,

sous lesquelles le domaine occidental pennique apparaît dans les grandes fenêtres de l'Engadine et surtout des Tauern.

3. Sédimentation et successions sédimentaires

Suess a souligné que les édifices montagneux alpins, tels que l'Himalaya ou les Alpes orientales, révélaient des séries mésozoïques qui « *se succèdent sans interruption, sur des épaisseurs de plusieurs milliers de mètres, et sans cesser de présenter des faciès nettement pélagiques* », prouvant la permanence d'une « *mer profonde* ». De même, les premières missions océanographiques ont-elles découvert les grands fonds océaniques. Ainsi, Suess connaît-il les sédiments à radiolaires que l'on retrouve, indurés en radiolarites, associés à des « *roches vertes* », dans certaines chaînes. Il en conclut, avec Gustav Steinmann, à la grande profondeur de ces futures associations « *ophiolitiques* ».

Les incursions de Suess dans la question des divisions stratigraphiques sont relativement limitées. Il reconnaît – il fut quand même paléontologiste ! – que « *sans aucun doute ce sont les débris organiques qui nous fournissent l'un des premiers et des plus puissants secours pour éclairer l'histoire des temps passés* » (LFT, I. p. 360), tout en affirmant que « *le but de nos recherches doit demeurer la connaissance des grands changements physiques, auprès desquels les changements du monde organique ne se présentent que comme des phénomènes de second ordre, comme de simples conséquences.* »

Dans son éloquente préface à *La Face de la Terre*, Marcel Bertrand rappelle qu'on ne peut plus, avec Élie de Beaumont, se servir du « *soulèvement des montagnes* » pour délimiter les périodes géologiques. Au contraire, avec Suess, il estime que les mouvements généraux de la mer, qu'il qualifie avec lui d'« *eustatiques* » (LFT, II, p. 841), « *semblent plus aptes à jouer ce rôle et peuvent fixer sur l'histoire du globe des dates assez étroitement définies* ».

Ces mouvements sont liés aux affaissements de la lithosphère : « *l'écorce terrestre s'effondre, la mer la suit* ». Ainsi s'expliquent les phases négatives (que Munier-Chalmas baptisera « *régressions* »). Quant aux « *transgressions* », elles sont plus difficiles à expliquer : est-ce, se demande Suess, la conséquence des apports sédimentaires, tendant à combler les espaces disponibles, ou un phénomène lié à la rotation de la Terre ? Suess cite ainsi spécialement les grandes transgressions cénomaniennes et oligocènes, illustrations de ces mouvements mondiaux.

Du point de vue de la nomenclature, il s'élève contre l'emploi abusif de noms d'étages à désignation géographique, en s'en prenant en particulier aux innombrables termes créés par Mayer-Eymar dans le Tertiaire. Il veut mettre de l'ordre pour les temps

post-oligocènes dans le Sud de l'Europe en définissant quatre « *étages méditerranéens* », qui ont eu un succès durable (avant les désignations actuelles, basées sur des stratotypes bien datés) : « *premier Étage méditerranéen* » (= première moitié du Miocène) ; « *deuxième Étage méditerranéen* » (= Miocène supérieur) que, dans le domaine danubien de notre Paratéthis couronne l'étage « *Sarmatique* », apparemment seul étage baptisé (1866) par Suess ; 3^e et 4^e Étages méditerranéens, divisant notre Pliocène.

C. Conclusions sur la synthèse globale de Suess

Les idées de Suess ont eu une immense influence sur la géologie mondiale, grâce à la diffusion de son œuvre majeure dans les trois grandes langues scientifiques occidentales. À titre d'exemple, la seule version française aura connu de 1897 à 1918 de nombreuses éditions, totalisant un tirage de 18 000 exemplaires ! Dans les pays francophones, et plus généralement latins, les idées de Suess – influencées toutefois par l'interprétation des « *géosynclinaux* » faite par Haug – furent acceptées, maints traités les diffusant largement.

Par rapport à la tentative d'Élie de Beaumont, le maître autrichien avait l'avantage, à l'époque charnière des XIX^e et XX^e siècles, de pouvoir prendre en compte la quasi-totalité du monde émergé, avec aussi les premières données sur les fonds marins. Et, grâce à sa connaissance des langues – Termier dira que Suess en connaissait treize ! – et à un labeur stupéfiant, il put faire face à une documentation qui, déjà à cette époque, était considérable.

Essayons de dégager les points majeurs de la fresque de Suess. On retiendra son insistance à affirmer l'importance des mouvements tangentiels dans les chaînes de montagnes, la polarité du déplacement des zones internes vers les zones externes, le développement des grandes chaînes montrant l'« *écoulement* » dirigé des « *grandes vagues solides* » de la partie supérieure de la croûte. Quant aux océans, il a souligné l'originalité et l'ancienneté du Pacifique, aux rivages bordés de chaînes sur le bord américain et de « *guirlandes insulaires* » de la Nouvelle-Zélande à l'Alaska, du côté asiatique : il a observé la disposition transversale de la « *virgation* » gigantesque de l'Asie orientale avec, du continent vers l'océan, de longs alignements volcaniques, des cordillères ou fragments de cordillères à matériel sialique, enfin des avant-fosses, longues et étroites, beaucoup plus profondes que l'océan, où l'on reconnaît actuellement les fosses de subduction.

S'il a souligné l'importance des océans, actuels ou anciens (la Téthys), Suess n'a cependant pas eu l'intuition qu'auront Wegener et Argand de la généralité du « *Sima* » ni, bien sûr, de son explication. Pour le maître viennois, l'uniformité supposée de la

croûte sous les continents et les océans obligeait à affirmer que ces derniers résultaient d'affaissements. Ursula B. Marvin (1973) a remarqué l'absence du terme « *radioactivité* » dans l'index des matières de *La Face de la Terre*, alors que le phénomène venait d'être découvert autour de 1900 et que certains géologues percevaient peu après son intérêt pour la datation des roches. C'était aussi un argument puissant pour mettre en doute le refroidissement progressif et donc la contraction du Globe. Si Suess eut connaissance de ces découvertes physiques, il ne pouvait guère les admettre, sa thèse des affaissements des océans ne pouvant pas s'accorder avec elles. De même, il était sans doute trop tard (le dernier tome de *Antlitz der Erde* est de 1909) pour qu'avant sa mort, l'illustre maître viennois ait compris l'intérêt du message que Wegener venait de lancer en 1912. Cependant, à la différence de la théorie d'Élie de Beaumont, qui était abandonnée avant même la mort de son auteur, le système bâti par Suess – qui représente un énorme progrès pour les chaînes plissées – continuera pendant un demi-siècle à imprégner la géologie mondiale, la « *dérive des continents* » n'ayant pas été, sauf exception, acceptée.

III. Le système de Wegener

Avant même la mort de Suess, des voix discordantes commençaient à se faire entendre, même à Vienne. Outre la mise en doute du dogme, jusque-là unanimement accepté, du refroidissement du Globe, l'ampleur parfois d'ordre hectokilométrique des nappes de charriage, spécialement dans les chaînes alpines, pouvait, aux yeux de certains, tel Franck B. Taylor (1910), difficilement s'expliquer par la seule contraction de la croûte. Quant au principe de l'isostasie, dont Suess discutait la pertinence, il s'imposait progressivement.

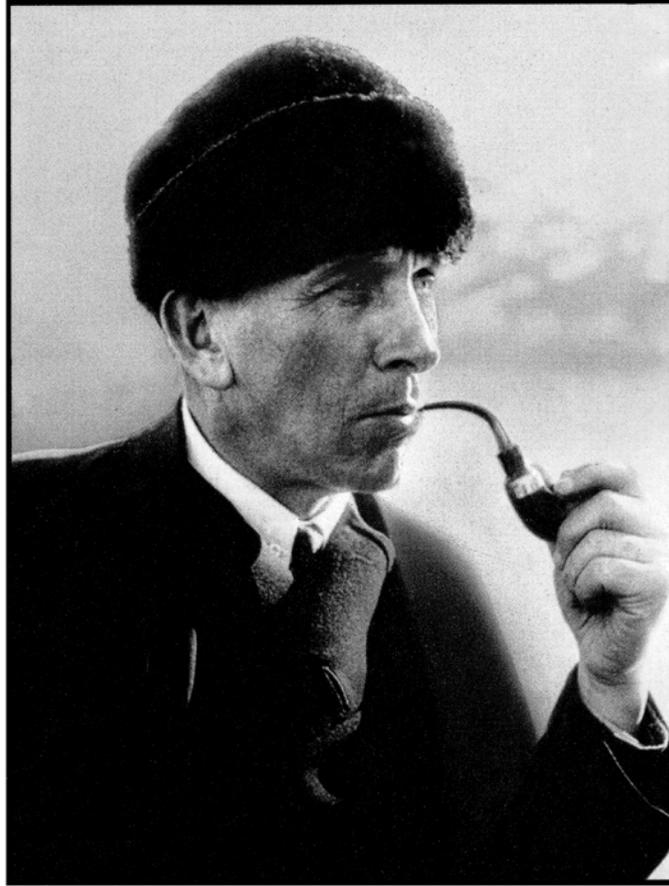


Figure 3. Alfred Wegener (1880-1930)

Ce fut un géophysicien externe, le météorologiste prussien Alfred Wegener (1880-1930), qui s'intéressa dans un esprit nouveau, en amateur, aux relations entre continents et océans. Wegener (Fig. 3) lui-même donne (1924, cf p. 6) « *quelques remarques sur leur genèse* » entre 1910 et 1920 : ce fut en janvier 1912 qu'il donna deux conférences, à Francfort-sur-le-Main puis à Marbourg, et bientôt parurent ses deux premières publications sur le sujet. Pendant la Grande Guerre, à laquelle il participa en y étant deux fois blessé, Wegener publia la première édition (1915) de son célèbre petit ouvrage *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*, qui connaîtra de son vivant quatre autres éditions (1920, 1922, 1924 et 1929), progressivement complétées, la dernière précédant de peu la disparition de son auteur, mort d'épuisement et de froid au Groenland. La 3^e édition, traduite en diverses langues, connut une influence mondiale et provoqua un véritable séisme intellectuel chez les géophysiciens et les géologues. Jusque-là ignorées, spécialement en France à cause des quatre années de guerre, les idées de Wegener furent enfin connues et débattues. Il n'en avait pas été de même en Suisse, où Émile Argand dit en avoir parlé dès 1915 dans ses leçons à Neuchâtel. Son collègue de Lausanne, Élie Gagnebin (1922), résumera avec clarté l'ouvrage pour les géologues français, en proclamant la grande valeur – malgré ses

points faibles – de « l'hypothèse » de Wegener, « *un esprit systématique et un géophysicien* ». Mais sa diffusion a été surtout due à la traduction (1924) de Manfred Reichel, alors assistant d'Argand (Schaer, 1991), qui s'est targué d'avoir revu la version de son collaborateur. Une traduction en anglais par J. Biram l'avait précédée en 1922. À partir de là débutent les « *hostilités* » entre Wegener et ses rares partisans d'une part, et ses nombreux adversaires, surtout géophysiciens, de l'autre. Ursula B. Marvin (1975) en a remarquablement décrit les phases (avec une abondante bibliographie anglo-saxonne) jusqu'à la proposition en 1962 – baptisée humoristiquement par lui « *an essay in geopoetry* » – de Harry H. Hess de l' « *ocean-floor spreading* », qui fut incorporée à la fin de 1968 dans la « *far more fundamental and all-embracing theory of the earth called the new global tectonics, or plate tectonics* » (Marvin, 1975, p. 165). Cette nouvelle théorie amena à exhumer l'hypothèse de Wegener, dont les raisons du rejet ont été analysées par Marcel Lemoine (2004).

A. Les arguments de Wegener

Ils étaient sans doute trop nombreux et trop divers pour ne pas compromettre sa proposition !

1. L'emboîtement possible du contour des continents bordant l'Atlantique fut, a écrit Wegener, le déclenchement, en 1910, de sa réflexion. Cette idée n'était pas nouvelle : ainsi, cette même année 1910, Franck B. Taylor avait, reconnaît Wegener, émis des idées analogues. Cet emboîtement possible était conforté par la correspondance de traits structuraux communs, en particulier en Amérique du Sud et en Afrique occidentale (ce que Alexander Du Toit développera longuement en 1937). De même, la chaîne calédonienne d'Écosse se retrouve (cf. Marcel Bertrand) à Terre-Neuve. Le regroupement des continents permet donc de reconstituer une « *Pangoea* » au début du Carbonifère. Cette Pangée devait être entourée par un océan universel, dont l'actuel Pacifique serait le reste : c'est la « *Panthalassa* » qu'avant Wegener, Suess – à qui ce terme est dû – avait envisagé avoir, à l'origine, recouvert la planète entière.

2. La répartition des altitudes de la surface solide du Globe montre deux paliers maxima, rappelle Wegener : à + 100 m pour la partie émergée (en fait – Marvin le souligne – à 230 m) et à – 4700 m pour la partie submergée. Ce fait était connu « *depuis 50 ans* », les sommets plus hauts et les fosses océaniques plus profondes n'occupant que très peu de la surface du globe. Wegener ajoute : « *Il n'y a qu'un pas, inévitable semble-t-il, à concevoir les aires continentales et les fonds océaniques comme deux couches distinctes [= le « Sal » et le « Sima » de Suess !] de l'écorce terrestre* », dans l'hypothèse d'un parfait équilibre isostatique du Globe. Acceptant l'idée d'Airy que le matériel granitique « *léger* » (Sial) des continents s'enfonce dans le Sima

en rétablissant cet équilibre, Wegener conclut que les continents flottent sur le Sima, qui affleure pratiquement sous les fonds marins.

3. La répartition des faunes et flores fossiles continentales, actuellement séparées par des espaces océaniques considérables. La reconstitution du « *Gondwana* », regroupant des ensembles possédant les mêmes puissantes séries, essentiellement continentales, allant du Carbonifère supérieur aux basaltes (trapps) du Crétacé supérieur, en est le meilleur exemple. Au lieu de faire appel à d'étroits et provisoires « *ponts continentaux* » pour expliquer que se trouve dans tous ces ensembles (allant du Brésil à l'Inde par l'Afrique méridionale), aujourd'hui séparés, la même flore à *Glossopteris* (Carbonifère supérieur), il est plus simple d'admettre leur disjonction par écartement.

B. Les conclusions de Wegener

Les conclusions de Wegener sont donc, pour l'essentiel, les suivantes. La rupture de la Pangée à partir du début du Secondaire a dû se produire le long de rift-vallées. Quant aux chaînes plissées tertiaires (alpines), elles sont dues au choc entre blocs continentaux. De leur côté, les cordillères de l'est du Pacifique résulteraient de la résistance offerte par le Sima océanique à l'avancée vers l'ouest des deux continents américains, provoquant devant elle l'affaissement de fosses profondes. Inversement, à l'ouest du Pacifique, la naissance de fosses analogues serait liée à la séparation d'arcs insulaires restant à l'arrière (à l'est) du bloc eurasiatique dérivant vers l'ouest.

Wegener croyait trouver une confirmation actuelle, par mesures géodésiques, des mouvements continentaux : la dérive du Groenland vers l'ouest se serait opérée, en confrontant des estimations de 1823 à 1907, à des vitesses annuelles de 9 à 32 m (Wegener, 1929), vitesses que les mesures ultérieures n'ont pas retrouvées.

C. Les essais d'explication de Wegener

Géophysicien de l'atmosphère, ce dernier a initialement recherché des explications dans le milieu externe. Il croit constater que les continents dérivent vers le sud et vers l'ouest. Ainsi évoque-t-il une « *action Eötvös* » (du nom du géophysicien hongrois, le baron Robert Eötvös), force centrifuge liée à la rotation du Globe et ayant tendance à repousser les masses continentales vers l'équateur (« *Polflucht* »). Quant à la dérive vers l'ouest, il l'explique par la combinaison des attractions solaire et lunaire avec la rotation de la Terre vers l'est, ce qui occasionnerait un retard des masses « *sialiques* » se découplant du Sima qui, lui, tournerait plus vite que son enveloppe. L'insuffisance d'intensité de ces mécanismes serait compensée par leur application pendant de longues périodes de temps.

Dans l'édition finale (1929) de son ouvrage, Wegener semble cependant prêt à suivre Otto Ampferer qui avait énoncé en 1906 sa théorie des sous-écoulements (« *Unterströmung* »), mouvements thermiques convectifs dans la lithosphère : hypothèse qui est – on le sait – à la base de la notion de « *succion* » (« *Verschluckung* ») du même Ampferer, premier avatar de l'actuelle « *subduction* ». Cette théorie des courants de convection, longtemps méconnue, a été retrouvée par l'Irlandais John Joly en 1928 et par l'Écossais Arthur Holmes (1931), qui l'illustra dans une figure devenue célèbre (Lemoine, 2004), avant que s'en empare le Bavarois Ernst Kraus au milieu du xx^e siècle.

D. Le sort de la théorie de Wegener

Cette théorie eut quelques enthousiastes partisans. Alexander Du Toit (1937) fut, dans l'hémisphère sud, l'un de ceux-ci. En Europe, Émile Argand l'utilisa hardiment. Dans sa fresque sur *La Tectonique de l'Asie* (1924), il s'aidera de sa connaissance des Alpes pour proposer la manière dont les blocs continentaux peuvent se bousculer : Wegener avait déjà attribué « *les chaînes de montagnes à la compression d'un vaste compartiment de l'écorce terrestre* » contre un autre. Argand va plus loin. Dépassant l'idée de Wegener, parlant de la « *compression lémurienne* » entre la chaîne himalayenne et l'Inde péninsulaire, il ajoute l'enfoncement de l'Inde sous l'Asie, produisant la surrection de l'Himalaya. En Europe, il affirme le déplacement du promontoire adriatique (le « *traîneau écraseur* » de Pierre Termier) à l'origine des charriages austro-alpins. Inversement, Argand propose l'ouverture en ciseaux du golfe de Gascogne et la rotation corso-sarde, entraînant la naissance d'aires océaniques, qu'il voyait – l'une et l'autre – dater du début du Miocène, en même temps, à ses yeux, que l'Atlantique nord.

La signification de la ride médio-atlantique était à peu près la même pour Wegener que pour Argand. Le premier y voyait, sur le bâti volcanique de « *la faille [d'ouverture] atlantique* », des dépôts terrigènes et des masses sialiques résiduelles. Le second considérait que « *la crête médiane de l'Atlantique [était] semblable à une épave de Sal ballottée et déformée dans le sima [...] héritage des temps pendant lesquels le Nouveau Monde commençait à se séparer de l'Ancien.* »

Malgré l'audience d'Argand, les idées wegeneriennes ne firent guère d'émules, même parmi les hérauts des nappes de charriage, pourtant d'essence « *mobaliste* » ! En France, l'illustre Pierre Termier vit dans la construction du géophysicien allemand un « *rêve de grand poète* » (Ray, 2005), qualificatif somme toute sympathique dans la bouche du « *géopoète* » qu'il savait être lui-même ! À cette voix respectée succédera, à partir de 1930, celle de Charles Jacob, largement écoutée dans les universités françaises que garnissent alors ses disciples. Dans son cours « *Tectonique générale* »

de 1944 (Fonds Jacob, Archives Acad. Sci., Paris : dossier I, C-42), on peut lire : « *Vous savez tous l'hypothèse de Wegener, c'est ce que l'on a appelé la dérive des continents [...]. Évidemment, c'est un roman magnifique et qui fait tiquer les physiciens qui vous disent : tout cela est fort intéressant mais où sont les forces de dérive, comment les trouve-t-on ? Mais comme les physiciens ne peuvent pas mieux nous expliquer comment tout cela est possible avec la théorie des effondrements [= celle de Suess], il y a lieu de considérer cette théorie de la dérive comme pouvant produire une explication en attendant qu'on trouve mieux* ». Et, tout en évoquant Argand – qu'il admire –, Jacob conclut : « *Voilà où nous en sommes. Effondrez, n'effondrez pas ! Dérivez, ne dérivez pas ! À l'heure actuelle [nous sommes en 1944], personne ne peut vous donner une explication quelconque du phénomène général.* »

On s'explique ainsi la démobilisation des esprits en France ! Aux réticences, voire aux silences du plus grand nombre (Gaudant, 1955, avec bibliographie), on ne peut opposer que bien peu de défenseurs de la théorie du génial Prussien. En Suisse romande, ce furent les professeurs Léon B. Collet à Genève et Élie Gagnebin à Lausanne, ainsi que Rudolf Staub en Suisse alémanique. À Paris, dans le laboratoire de Léon Lutaud à la Sorbonne, Boris Choubert réalisa en 1935 une carte de l'« *assemblage des continents* », « *qui préfigure assez exactement celle publiée trente ans plus tard par E. C. Bullard, J. E. Everest et A. G. Smith [lors d'un symposium de la Royal Society à Londres, en 1964], qui omirent étrangement de citer leur prédécesseur* » (Gaudant, 1995). Mais est-ce si étrange ?

Les ouvrages successifs de Léonce Élie de Beaumont, d'Eduard Suess et d'Alfred Wegener – qu'il faut juger en fonction de l'état des connaissances à chacune de leurs époques – sont de véritables tentatives de « *tectonique globale* ». Les deux premières, basées l'une et l'autre sur l'axiome de la contraction due au refroidissement du globe terrestre, eurent un grand succès, chacune pendant près d'un demi-siècle. Celle de Wegener, qui est sur bien des points une préfiguration de certains aspects de l'actuelle « *tectonique des plaques* », si elle trouva quelques illustres défenseurs, fut critiquée, repoussée ou oubliée par le plus grand nombre et n'exerça guère d'influence sur l'évolution de la géologie mondiale.

Les trois essais ont, tous les trois, apporté quelques idées-clé fondamentales : Élie de Beaumont – émule de Leopold von Buch – proposait la succession dans le temps de ses « *systèmes de montagnes* » ; Suess, affirmait l'influence des forces tangentielles expliquant la polarité transversale des chaînes plissées, classées en trois grands cycles, calédonien, varisque et alpin ; Wegener enfin, faisait dériver les continents et les

océans s'ouvrir, permettant à Argand d'ajouter une touche essentielle qui joignit dans un même cadre mobiliste charriages et dérives continentales.

Remerciements. – Tout particulièrement au professeur Rolf Schroeder (Frankfurt am Main) pour son aimable communication de précieux documents, et à M. André Michard pour la traduction anglaise du résumé.

Références

- AMPFERER, O. (1906). Ueber des Bewegungsbild von Faltengebirgen. *Jb. k. k. geol. Reichsanstalt*, Wien, **56**, p. 539-622 (cf p. 597-601).
- ARAGO, E. (1830). Notice scientifique sur l'ancienneté relative des différentes chaînes de montagnes de l'Europe, *in Annuaire pour l'an 1830, présenté au Roi, par le Bureau des Longitudes*, seconde édition, p. 294-318, Paris (1829).
- ARGAND, É. (1924). La Tectonique de l'Asie. *C. R. 13^e Congr. Géol. Int.* (Bruxelles, 1923), fasc. **1**, Liège, p. 171-372.
- BOUCHEPORN, F. DE (1844). *Études sur l'histoire de la Terre et sur les causes des révolutions de sa surface*. Carilian-Goeury et Langlois & Leclerc, Paris, 364 p.
- BRONGNIART, Al., BROCHANT DE VILLIERS, A. et BEUDANT, F. S. (1829). Rapport (sur l'exposé de L. Élie de Beaumont, séance du 26 oct. 1829), *P. V. séances Acad. Sci.*, **IX**, 1829 (publié en 1921), p. 338-343.
- CHOUBERT, B. (1935). Recherches sur la genèse des chaînes paléozoïques et antécambriennes. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, **8**, p. 5-50.
- DURAND-DELGA, M. (2007). Les confiantes et fructueuses relations entre Eduard Suess et les géologues français. *Schr. Archivs Univ. Wien*, **1**, sous presse. (Résumé in *Berichte Geol. Bundesanst., Wien*, **69**, 2006, p. 15-17).
- DURAND-DELGA, M. et SEIDL, J. (2007). Eduard Suess (1831-1914) et sa fresque mondiale "La Face de la Terre", deuxième tentative de tectonique globale. *C. R. Geoscience (Acad. Sci. Paris)*, **339**, p. 85-99.
- DU TOIT, A. L. (1937). *Our Wandering Continents*. Oliver and Boyd Ltd, Edinburgh.
- ÉLIE DE BEAUMONT, L. (1829-1830). Recherches sur quelques-unes des révolutions de la surface du globe. *Ann. Sci. nat., Paris*, **18**, p. 5-25 et 284-416 ; **19**, p. 5-99 et 177-240.
- ÉLIE DE BEAUMONT, L. (1834). Faits pour servir à l'histoire des montagnes de l'Oisans. *Ann. Mines*, Paris, (3), **5**, 63 p.
- ELLENBERGER, F. (1994). *Histoire de la géologie*, t. II, Tec-Doc (Lavoisier), Paris.

- FALLOT, P. (1938). Élie de Beaumont et l'évolution des sciences géologiques au Collège de France. *Ann. Mines*, Paris, (13), **15**, p. 75-107.
- FRAPOLLI, L. (1847). Réflexions sur la nature et sur l'application du caractère géologique. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (2), **4**, p. 604-646.
- GAGNEBIN, E. (1922). La dérive des continents selon la théorie d'Alfred Wegener. *Rev. gén. Sci.*, **33**, p. 293-304.
- GAUDANT, J. (1995). La réception de l'idée de dérive des continents en France et en Suisse romande : les enseignements d'une enquête. *Mém. Soc. géol. Fr.*, **168**, p. 129-138.
- GOHAU, G. (1987). *Histoire de la géologie*. Éd. La Découverte, Paris, 259 p.
- GOHAU, G. (1998). Léonce Élie de Beaumont (1798-1874), pour le bicentenaire de sa naissance. *Trav. Comité fr. Hist. Géol.*, (3), **12**, p. 71-77.
- GRANDCHAMP, P. (2005). Le cours de géologie professé par Brochant de Villiers à l'École des mines dans les années 1810. *Trav. Comité fr. Hist. Géol.*, (3), **19**, p. 149-171.
- GREENE, M. (1982). *Geology in the Nineteenth Century, Changing Views of a Changing World*. Cornell Univ. Press, Ithaca and London.
- ISACKS, B., OLIVIER, J. et SYKES, L. (1968). Seismology and New Global Tectonics. *J. Geophys. Res.*, **73**, p. 5855-5899.
- LEMOINE, M. (2004). De Wegener à la tectonique des plaques : sept fois sept ans de réflexion. *Trav. Comité fr. Hist. Géol.*, (3), **18**, p. 103-131.
- « LFT » (La Face de la Terre) (1889-1918). Traduction et adaptation par E. de Margerie et coll. de SUESS, E. (*Das Antlitz der Erde*, 1885-1909). Paris, Armand Colin.
- MARVIN, U. B. (1975). *Continental Drift, the Evolution of a Concept*. Smithsonian Inst. Press, Washington, 3^e éd., 240 p. (1^e éd., 1973).
- RAY, N. (2005). Pierre Termier (1859-1930) et la mobilité continentale. *Trav. Comité fr. Hist. Géol.*, (3), **18**, p. 133-146.
- SCHAER, J.-P. (1991). Émile Argand (1879-1940). Life and portrait of an inspired geologist. *Eclogae geol. Helv.*, **84**, p. 511-534.
- SEIDL, J. (2004). Eduard Suess (1831-1914). Aperçu biographique. *Trav. Comité fr. Hist. Géol.*, (3), **18**, p. 133-146.
- SUESS, E. (1875). *Die Entstehung der Alpen*. Braumüller, Wien, 168 p.
- SUESS, E. (1885-1909). *Das Antlitz der Erde*. Tempsky, Prag und Freitag, Leipzig.
- TAYLOR, F. B. (1910). Bearing of the Tertiary mountain belts on the origin of the Earth' plan. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **21**(2), p. 179-225.

TOURET, J. (2007). Le réseau pentagonal d'Élie de Beaumont. *Trav. Comité fr. Hist. Géol.*, séance du 13 juin 2007, à paraître.

WEGENER, A. (1924). *La Genèse des continents et des océans* (traduction par M. Reichel de la 3^e éd. de « *Die Entstehung der Continente und Ozeane* »), Blanchard, Paris, 161 p.

ZITTEL, K. von (1899). Geschichte der Geologie und Paläontologie bis Ende des 19. Jahrhunderts. *In Geschichte der Wissenschaft in Deutschland*, **23**, R. Oldenbourg, München und Leipzig, XI + 868 p.