

LA TECTONIQUE DES PLAQUES :

L'HISTOIRE D'UN MODÈLE

0. introduction

- La tectonique des plaques est la théorie selon laquelle les continents font partie de plaques lithosphériques rigides en mouvement horizontal les unes par rapport aux autres à la surface de la Terre.
- Cette théorie, aujourd'hui largement acceptée, s'est construite progressivement. Sous sa forme initiale, il s'agissait de la théorie de la dérive des continents, proposée pour la première fois par Alfred Wegener en 1912.
- Comment cette théorie s'est-elle imposée dans le monde scientifique jusqu'à éliminer ses rivales ?

1. La théorie initiale et ses arguments

1.1 Présentation de la théorie

- En 1912, Wegener propose que les continents sont des masses rocheuses en mouvement horizontal à la surface de la Terre. Ils se déplacent sur une surface rocheuse qui forme aussi le fond des océans. Les continents sont constitués de matériaux riches en silicium Si et aluminium Al : c'est le SIAL. Le plancher océanique est constitué de matériaux riches en silicium, magnésium Mg et fer Fe: c'est le SIMA.
- Les continents actuels résulteraient de la fragmentation d'un supercontinent unique, la Pangée, à partir de -180 Ma.
- Remarque : La théorie de Wegener porte surtout sur la partie sud de la Pangée appelée Gondwana, dont la formation est plus ancienne et remonte à -600 Ma.
- Cette théorie est en concurrence avec plusieurs théories préexistantes, notamment la théorie fixiste de la rétractation thermique de la Terre. Dans cette théorie, le refroidissement progressif de la Terre depuis sa formation est à l'origine d'un plissement aléatoire de sa surface, à l'origine des zones émergées et des océans.

1.2 Les premiers arguments et la théorie de Wegener

Détail des arguments : activité T1

- Lorsqu'elle est proposée en 1912, la théorie de la dérive des continents est prise au sérieux parce que Wegener s'appuie sur un ensemble d'arguments variés :
 - parallélisme des côtes (complémentarité des contours côtiers de certains continents)
 - distribution géographiques des fossiles continentaux âgés de plus de 180 Ma et des climats anciens (paléoclimats)
 - répartition bimodale des altitudes (deux maxima : un à +200 m pour les Continents et un autre à -4500 m pour les plaines abyssales)
- Mais elle est d'abord rejetée sur la base de deux principaux arguments.

2. Les premiers arguments contre la théorie

2.1 les continents font partie d'une enveloppe solide

Document : la structure profonde du globe terrestre

- L'étude de la propagation des ondes sismiques permet de connaître la structure interne du globe terrestre. Les **séismes** sont des secousses dans l'écorce terrestre correspondant à la rupture de roches soumises à des tensions accumulées. L'énergie est brutalement libérée à partir d'un point appelé **foyer** (l'**épicentre** est le point de la surface terrestre qui se trouve à la verticale du foyer). Elle est transportée dans toutes les directions sur de grandes distances par les vibrations ou **ondes sismiques**.
- Le sismologue allemand Beno Gutenberg découvre en 1923 une **zone d'ombre** dans l'enregistrement de chaque séisme entre 105 et 143° de distance angulaire au foyer. Il interprète cette zone comme la preuve de la présence d'une limite entre le manteau solide rocheux ($d = 4$) et le noyau liquide de fer et de nickel ($d = 10$) à 2900 Km de profondeur (valeur réactualisée). Cette limite portera son nom : le **Gutenberg**
- Ce modèle suggère que la Terre est entièrement rigide sur 2900 Km d'épaisseur. Dans ce cas, **il semble impossible que les continents se déplacent les uns par rapport aux autres.**
- Remarque : le modèle manteau/noyau de Gutenberg a été depuis amélioré par une sismologue danoise, Inge **Lehmann**, qui a montré que le noyau liquide entoure lui-même une graine « solide » de Fer et de Nickel de densité moyenne 13.

2.2 peut-on mettre en mouvement un continent ?

- Dans sa théorie, Wegener imagine que les forces qui mettent en mouvement les continents sont générées par la rotation de la Terre (**force de Coriolis**) et les **cycles Lunaires** qui sont responsables du phénomène des marées. Mais le géophysicien anglais **Harold Jeffreys** montre que **ces forces sont inférieures d'un facteur 10 000 aux forces nécessaires.**
- En 1928, le géophysicien écossais **Holmes** propose que la source d'énergie de la dérive des continents pourrait être le **rayonnement radioactif naturel** des roches du manteau. Mais à l'époque, les connaissances sur ce rayonnement et ses conséquences ne permettent pas de comprendre comment il pourrait générer un mouvement horizontal des continents.

3. L'étude de la croûte terrestre et ses conséquences sur la théorie

3.1 La croûte terrestre est hétérogène

Document : tableau des caractéristiques des croûtes continentale et océanique (en activité)

- Au cours du 20^{ème} siècle, l'étude des ondes sismiques permet progressivement de préciser la structure superficielle du globe terrestre. Certaines de ces découvertes sont en accord avec la théorie de Wegener, d'autres non.

- Les continents et les océans sont constitués de **croûtes de nature et de densité différentes**. Donc, les océans ne sont pas issus de l'effondrement aléatoire des continents proposé par la théorie fixiste.
- La densité de la croûte continentale est inférieure à celle de la croûte océanique, ce qui lui permet de mieux « flotter » à la surface du manteau : c'est en accord avec l'idée que les continents et les océans se comportent différemment.
- **Les deux croûtes reposent sur le manteau** ; donc la croûte continentale ne se déplace pas sur le fond océanique comme le propose Wegener.

3.2 La croûte fait partie d'une enveloppe rigide, la lithosphère

- Les ondes sismiques P et S se propagent dans les roches solides ; leur vitesse augmente notamment à mesure que la densité des roches traversées augmente. Globalement, **la vitesse des ondes P et S augmente à mesure que l'on s'enfonce dans le manteau**.
- Cependant, au début du 20^{ème} siècle, les sismologues (Ernst Schweydar, 1877-1959) constatent que les ondes P et S sont ralenties dans une zone qui se trouve entre 100 Km et 200 Km de profondeur en moyenne (sous l'isotherme 1300°C) : **la LVZ ou Low Velocity Zone**. Cela montre qu'il existe une zone du manteau où la roche solide est ductile (pâteuse) : l'**asthénosphère**. Cette zone se trouve en-dessous de la **lithosphère** cassante qui est constituée de deux couches : la croûte et le manteau lithosphérique.
- L'étude de la répartition des séismes a permis ultérieurement de découper la lithosphère en 7 méga-plaques et 5 petites plaques. La lithosphère continentale se trouve associée à la lithosphère océanique à l'intérieur des plaques.
- **On peut ainsi imaginer un mouvement horizontal des plaques lithosphériques qui reposent sur l'asthénosphère. Ces plaques contiennent la croûte et une portion de manteau appelée manteau lithosphérique.**

3.3 Bilan

- Ainsi, après avoir été rejetée, la théorie de la dérive des continents recommence progressivement à intéresser un nombre croissant de géologues, au prix de quelques modifications : **ce ne sont pas des morceaux de croûte continentale qui se déplacent sur le fond des océans, mais des morceaux de lithosphère rigide qui se déplacent à la surface d'une asthénosphère ductile**. Cependant la théorie reste incomplète :
 - Les **forces** qui mettent en mouvement les continents ne sont pas identifiées (l'hypothèse de la radioactivité du manteau de Holmes n'a pas suffisamment d'arguments de terrain).
 - Le déplacement des continents suggère des **déformations de la croûte océanique** au sujet desquelles la théorie ne fournit aucune explication
- À partir des années 1950, les géologues vont découvrir les mécanismes qui mettent en mouvement la lithosphère océanique. Ces découvertes vont apporter une importante confirmation à l'idée de la mobilité des continents mais aussi amener à modifier profondément la théorie de Wegener.

4. Un renouveau dans la théorie : les mouvements horizontaux dans les océans

- En 1962, le géologue américain Harry Hess, propose une théorie selon laquelle le plancher océanique est renouvelé par de grandes **cellules de convection mantelliques**
- La **convection** est un mode de transfert de chaleur avec mouvement de matière. Hess propose que le matériel ductile de l'asthénosphère entre en convection grâce à l'énergie thermique issue de la radiocativité naturelle du manteau et de la cristallisation du fer dans le noyau.
- Diverses observations vont venir confirmer cette théorie.

4.1 Les mouvements d'expansion océanique

4.1.1 Arguments en faveur de l'expansion océanique

Document : topographie d'une dorsale océanique

- Les mouvements ascendants de matériel chaud au niveau des dorsales sont confirmés par :
 - le bombement des dorsales (dilatation ou **intumescence thermique** du plancher océanique)
 - la présence d'un fossé d'effondrement ou **rift** sur l'axe de la dorsale. Ce rift est bordé par des failles normales qui témoignent d'une **extension horizontale** de la croûte.
 - le **flux thermique** anormalement élevé des dorsales, conséquence de la présence de matériel chaud à faible profondeur. (c'est la remontée du matériel chaud **solide** qui provoquerait les séismes et le volcanisme sous-marin effusif des dorsales).
 - **Les basaltes situés de part et d'autre des dorsales ont enregistré les variations de la polarité du champ magnétique terrestre.** Or, à partir des années 60, ces variations sont connues et ont été datées par ailleurs (**échelle des inversions magnétiques**). On peut donc utiliser les variations de polarité des basaltes océaniques pour dater leur formation. On constate alors que plus on s'éloigne de la dorsale, plus les basaltes sont anciens. L'expansion océanique est ainsi confirmée et sa vitesse peut être mesurée (de l'ordre de quelques cm par an, elle peut varier au cours du temps et d'une dorsale à l'autre). Historiquement, la confirmation du mouvement de divergence par l'étude du magmatisme est due à **Fred Vine et Drummond Matthews en 1963.**

4.1.2 La formation du plancher océanique

Document : schéma en coupe du plancher océanique (activité)

- La **structure du plancher océanique** a pu être déterminée à l'aide d'observations directes (faille Vema) ou en étudiant les restes d'anciens planchers océaniques portés en surface lors de la formation des chaînes de montagne (dans les Alpes, dans la nappe du Semail du sultanat d'Oman).
- C'est une **série** caractéristique qui comprend (du sommet à la base) : sédiments/basalte en coussin (pillow-lava)/ filons de basalte intercalé dans du gabbro/gabbro lité/péridotite de type harzburgite, très ferro-magnésienne. La formation de cette série est principalement le résultat du fonctionnement de la **chambre magmatique** située sous la dorsale.

- Sous les dorsales océaniques, la péridotite du manteau (Iherzolite) subit une **fusion partielle** d'environ 15%, qui est provoquée par la baisse de pression du matériel chaud lors de sa remontée. **Le magma formé est enrichi en éléments facilement fusibles** et appauvri en éléments réfractaires. Il remonte vers la surface car il est **moins dense** que la roche environnante. La roche résiduelle, une péridotite de type harzburgite, forme la base du plancher océanique.
- En remontant, le magma refroidit. En profondeur son **refroidissement lent** donne du gabbro, et en surface, son **refroidissement rapide** donne du basalte.
- Ainsi se forme un plancher océanique à plusieurs couches. Ce phénomène est **l'accrétion océanique**. Des **sédiments** se déposent ensuite sur ce plancher à mesure qu'il vieillit et s'éloigne de la dorsale. Cet ensemble forme la **lithosphère océanique**, une plaque rigide qui repose sur le manteau asthénosphérique.

4.2 Des mouvements de fermeture des océans

- Dans les **marges actives**, une **fosse** océanique de 7 à 11 Km de profondeur borde la limite entre les plaques.
- Les séismes sont nombreux ; leurs foyers s'inscrivent dans un plan incliné à partir de la fosse : le **plan de Wadati(jap)-Bénioff(US)** (1935-49). Ce plan matérialise la plaque océanique s'enfonçant dans le manteau asthénosphérique dans un mouvement appelé **subduction**. Les séismes résultent de la fragmentation des roches cassantes de la plaque plongeante. La théorie de la subduction a été complétée par **Oliver et Isacks (US) en 1967**.
- La subduction de la lithosphère océanique empêche son accumulation à la surface de la terre et peut aboutir à la fermeture d'un océan (voir programme de Tle S).

4.3 Des mouvements de coulissement dans les océans

- Les plaques lithosphériques se déplaçant sur une surface sphérique, elles sont en rotation par rapport à un pôle appelé **pôle eulérien de rotation**. Cela implique que dans les zones de divergence, les parties des plaques les plus éloignées du pôle eulérien se déplacent plus vite que les parties proches de ce pôle.
- Lors de l'expansion océaniques, ces **différences de vitesse** sont compensées par la création de plancher océanique sur l'axe de la dorsale : plus rapide lorsqu'on s'éloigne du pôle eulérien.
- Mais lors de l'ouverture d'un océan, le dans le **rift continental** à l'origine d'un nouvel océan, il n'y a pas encore d'accrétion océanique ; les différences de vitesse entre les segments du rift les plus proches et les plus éloignés du pôle eulérien de rotation provoquent des tensions dans la croûte continentale, qui provoquent la formation de **failles transformantes** entre les segments du rift. Ces failles permettent des **mouvements de coulissement** qui accompagnent l'ouverture océanique.

4.4 Bilan : état de la théorie à la fin des années 1960

Une nouvelle théorie

schéma-bilan de la convection mantellique

- À l'échelle d'un océan, les mouvements d'expansion et de fermeture s'équilibrent rarement : ils dépendent de la géométrie des cellules de convection du manteau qui évolue au cours du temps. Ainsi **un océan peut s'agrandir ou se refermer**.
- Mais ces évolutions se compensent à l'échelle du globe

La théorie complétée

- **Plusieurs domaines de recherche** ont contribué à confirmer et améliorer la théorie :
 - sismologie
 - étude du flux thermique
 - paléomagnétisme
 - pétrologie (étude des roches de la croûte)
- Les découvertes ont permis de confirmer le déplacement horizontal des continents et de préciser le moteur du mouvement : des **cellules de convection mantellique** qui brassent les roches de la lithosphère et du manteau

La théorie corrigée

- Nous avons déjà vu que ce ne sont pas les continents qui se déplacent sur le fonds rocheux des océans, mais l'ensemble croûte+manteau qui se déplace sous la forme de plaques lithosphériques cassantes au-dessus de la LVZ ductile.
- **Le fond des océans n'est pas la surface passive imaginée par Wegener** : il est affecté par les mouvements de plaques plus encore que les continents, car il fait partie des cellules de convection mantelliques qui lui communiquent son mouvement et provoquent régulièrement son renouvellement.

5. De nouvelles données confirment la théorie

5.1 Confirmation grâce aux sédiments océaniques

- Des forages ont permis de prélever les **sédiments marins reposant sur le plancher océanique**. Plus on s'éloigne de la dorsale, plus la couche de sédiments est épaisse, et plus ceux qui sont au contact du plancher océanique sont anciens. Connaissant le temps écoulé depuis leur dépôt et la distance qui les sépare de la dorsale, il est possible de calculer la vitesse de l'expansion océanique (mouvement relatif des plaques). Or les vitesses calculées confirment celles obtenues par l'étude du paléomagnétisme.

5.2 Confirmation grâce au volcanisme intraplaque

- Le volcanisme intraplaque n'est *a priori* pas concerné par la théorie, mais la tectonique des plaques permet **d'expliquer l'alignement des volcans intraplaques par le déplacement de la plaque au-dessus du point chaud** qui produit le volcanisme. Connaissant l'âge des volcans et leur position, il est possible de reconstituer le mouvement de la plaque et de calculer sa vitesse. Les données obtenues confirment celles obtenues grâce au paléomagnétisme et aux sédiments océaniques. Elle permettent de connaître le mouvement « absolu¹ » de la plaque pendant la durée d'activité du point chaud.

¹ « absolu », c'est à dire le mouvement de la plaque dans le référentiel Terre.

5.3 Confirmation grâce aux données GPS

- Les données fournies en continu par le GPS permettent à présent de suivre au fil du temps le mouvement de chaque plaques ainsi que les mouvements relatifs des plaques considérées deux à deux. C'est une confirmation majeure de la théorie.

5.4 Confirmation par la tomographie sismique

- La tomographie sismique permet de visualiser les anomalies de la vitesse des ondes sismiques qui correspondent à des états différents des roches du manteau.
 - Dans les zones de subduction (plan de wadati-Benioff) les ondes sismiques sont accélérées : les roches présentes dans le manteau sont plus froides et plus rigides que la moyenne ;
 - À l'aplomb des dorsales, les ondes sismiques sont ralenties : les roches présentes dans le manteau sont plus chaudes et plus ductiles que la moyenne.
- Ces données confirment l'idée proposée par Hess en 1962. Le moteur de l'expansion et de la fermeture des océans est thermique : dans le manteau, des mouvements de matière ascendants et descendants provoquent, en surface, le renouvellement permanent de la lithosphère océanique et le mouvement des plaques. Mais la tomographie sismique montre aussi que les cellules de convections peuvent avoir des formes irrégulières et évoluer au cours du temps.

6. Conclusion

- La théorie initiée par Wegener s'est nourrie de ses critiques : elle s'est imposée en résolvant les problèmes soulevés par ses adversaires. En se développant, elle est devenue capable d'intégrer des faits annexes et de fournir des prédictions vérifiables, ce qui la renforce considérablement. Ce modèle est devenu un paradigme : le cadre de travail des géologues du monde entier, et le restera tant qu'il résistera à l'épreuve des faits.