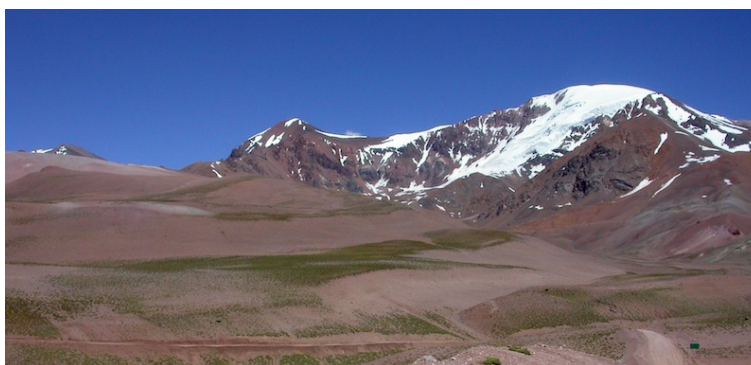




Dossier Miss Terre

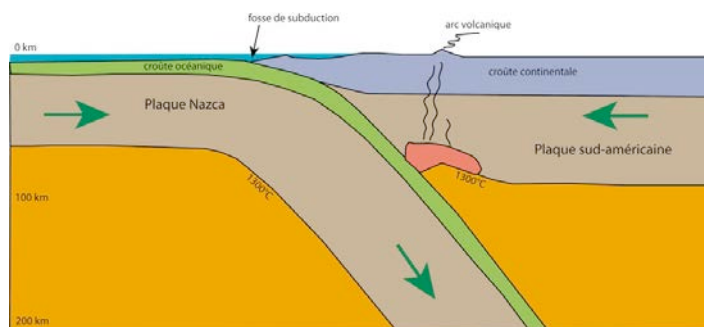
## Des océans, des îles et des montagnes

**Les Andes. Un cordon de montagnes et de volcans qui s'étirent sur 7000 km, d'environ 10° de latitude nord à plus de 50° de latitude sud, face à l'océan Pacifique. Pour le géologue, l'existence des Andes est un problème passionnant.**



*Le Cerro Tapado, 5536 m, à proximité de la frontière entre le Chili et l'Argentine. (©GET/J. Martinod)*

### Pourquoi les Andes sont-elles des montagnes ?



*La subduction d'une plaque lithosphérique océanique sous une plaque continentale. Quand la plaque plongeante atteint la température de 1300°C, elle libère ses fluides et provoque la fonte de la base de la plaque continentale. Les magmas remontent par les failles pour former un arc volcanique.*

Pourquoi y-a-t-il des montagnes à cet endroit du globe ? On a bien des idées, mais le débat fait rage. C'est d'ailleurs une question qui n'est pas aussi simple qu'elle en a l'air. Depuis au moins 350 millions d'années (plus de 100 millions d'années avant l'apparition des dinosaures !), le plancher de l'océan Pacifique passe sous ce qui s'appellera bien plus tard l'Amérique du Sud.

C'est le phénomène de subduction. En effet, une plaque tectonique, c'est un radeau rocheux d'environ 100 km d'épaisseur qui flotte sur la couche molle que forme le manteau supérieur. Elle peut être vue comme un gâteau de roches du manteau très denses (3,2 à 3,3 tonnes par m<sup>3</sup>) nappé d'une couche de roche plus légères. Cette couche superficielle moins dense a une épaisseur moyenne de 30 kilomètres pour les plaques continentales sur lesquelles nous marchons. Elle est constituée de roches comme les granites, dont la densité est d'environ 2,7 tonnes par m<sup>3</sup>. A cause de ce nappage de roches légères, les plaques continentales ont tendance à flotter efficacement sur le manteau de la Terre, ce qui oblige les continents à rester à la surface de la Terre. Par contre, la couche superficielle des plaques qui constituent les fonds océaniques est formée de roches plus denses (basaltes, gabbros, de densité 2,9 tonnes par m<sup>3</sup>). Elle est surtout



Délégation Midi-Pyrénées



beaucoup plus mince (7 km en moyenne) et ne constitue pas un flotteur suffisant pour permettre aux plaques océaniques de rester en surface. A la première occasion, celles-ci plongent dans le manteau profond, sous les plaques continentales. C'est le cas au niveau des zones de subduction.

La plaque continentale sud-américaine et la plaque océanique située à l'ouest du continent convergent l'une vers l'autre depuis au moins la fin de l'ère primaire il y a 250 millions d'années, à des vitesses comprises entre 4 et 15 cm/an. Le plus lourd des deux radeaux rocheux qui s'affrontent, à savoir celui qui constitue une partie du fond de l'océan Pacifique, passe sous l'Amérique du sud, entraîné en profondeur par son propre poids. Résultat : un gros morceau du plancher océanique situé sous le sud-est de l'Océan Pacifique, appelé plaque Nazca, disparaît petit à petit, avalé et digéré par les profondeurs de la Terre.

En descendant dans le manteau terrestre sous l'Amérique du Sud, la plaque océanique entraîne avec elles des minéraux hydratés. En effet, elle est restée pendant des millions d'années au contact de l'eau de mer, et les roches qui la composent se sont gorgées d'eau comme une éponge qu'on aurait oubliée au fond d'un bassin. En descendant en profondeur, la plaque relâche ces fluides, ce qui entraîne la fusion de la base de la plaque supérieure. Le magma remonte, il se faufile par des failles à travers le plafond que constitue la plaque Amérique du Sud. Une partie du magma formé atteint même l'air libre où il forme des volcans explosifs.



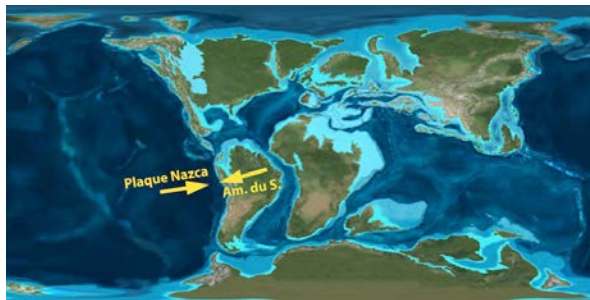
*Le volcan Llaima est un volcan actif d'Araucanie, dans le sud du Chili. Il a connu une activité volcanique fréquente au cours de la période historique, depuis le XVIIe siècle. Il culmine à 3200 mètres d'altitude. (©GET/G. Hérial)*

Il se forme alors un long cordon de volcans tout le long de la zone de subduction : on appelle ça un arc volcanique.

Mais un arc volcanique, si on en trouve au dessus de toutes les zones de subduction ou presque, ce n'est pas une chaîne de montagnes. Ca produit des cônes de volcans disparates, mais pas une bonne grosse chaîne de montagnes accompagnée de plateaux de haute altitude comme l'Altiplano bolivien. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder ce qui se passe de l'autre côté du Pacifique. La plongée de la plaque Pacifique produit un arc volcanique qui s'étend du Kamchatka à la Nouvelle Zélande, mais en général pas de chaîne de montagnes, et en tout cas pas aussi imposantes que la Cordillère des Andes. Pourquoi un tel contraste de part et d'autre du Pacifique ?



## L'océan Atlantique, père des Andes ?



La Terre, il y a 100 millions d'années. L'ouverture de l'océan Atlantique Sud pousse l'Amérique du Sud à la rencontre de l'océan Pacifique. (© Northern Arizona University/R. Blakey)

La réponse à cette question est peut-être à chercher de l'autre côté de l'Amérique. Il y a environ 100 millions d'années, au milieu du Crétacé (145 à 65 millions d'années dans le passé), l'Afrique s'est séparée de l'Amérique du Sud ; C'est la fin du super continent Gondwana. L'océan Atlantique Sud s'ouvre, ce qui pousse l'Amérique du Sud vers l'ouest à la rencontre de l'océan Pacifique. Ce mouvement devrait repousser vers l'ouest la fosse de subduction, mais celle-ci résiste et refuse de céder du terrain si facilement.

Parce que, au cours de sa plongée, la plaque Nazca s'est plantée dans le manteau inférieur de la Terre, à environ 700 km de profondeur. Le manteau inférieur est bien plus pâteux que le manteau supérieur. Du coup, la plaque Nazca est comme ancrée et résiste à la poussée vers l'ouest de l'Amérique du Sud. A cause de cette résistance, la bordure occidentale de la plaque américaine se déforme, la croûte continentale s'épaissit, et les Andes commencent à se soulever il y a environ 80 ou 90 millions d'années, en plein Crétacé.

Ce modèle, qui explique pourquoi les Andes ne se soulèvent que depuis 90 millions d'années alors que la subduction avait commencé longtemps auparavant, proposé pour la première fois en 1998, est toujours discuté. Même s'il explique pourquoi il y a des montagnes à l'ouest de l'Amérique du Sud et la date de leur apparition, il ne rend pourtant pas compte de la multiplicité des Andes...



Le désert d'Atacama, à l'Ouest des Andes centrales, est le désert le plus sec du monde. (©GET/J. Martinod)



## Les Andes au pluriel

Les Andes sont multiples. Le plus frappant, c'est l'évolution de la largeur de la chaîne du nord au sud. Celle-ci est très variable, fluctuant de 200 km à près de 2000 km. La partie la plus large définit ce qu'on appelle les Andes centrales, s'étendant du nord du Pérou (5° sud) jusqu'à Santiago du Chili, vers 35° sud. Les Andes centrales couvrent une bonne partie du Pérou, l'ouest de la Bolivie, le nord-ouest de l'Argentine et le nord du Chili. C'est là qu'on trouve les sommets les plus élevés des Andes, dont l'Aconcagua, qui culmine à 6962 m d'altitude.

C'est là aussi qu'on trouve l'Altiplano, gigantesque plateau qui flirte avec les 4000 m d'altitude. Au sud des Andes Centrales, la chaîne perd rapidement de l'altitude, 1000 m devenant plutôt la norme, si on excepte les volcans qui se sont implantés sur cette modeste chaîne de montagne. Elle devient aussi nettement plus étroite, quelques centaines de kilomètres au mieux. Au nord, la largeur diminue aussi considérablement même si on garde des sommets de haute altitude.



Les Andes : les points roses donnent la localisation des volcans actifs. On voit clairement la zone d'ombre volcanique au nord des Andes Centrales. (©Google Earth)



Le volcan Parinacota est situé dans la Cordillère occidentale, à la frontière entre le nord du Chili et la Bolivie. Il culmine à plus de 6300 mètres d'altitude. Il repose sur un haut plateau dont l'altitude moyenne dépasse largement les 4000 mètres. (©GET/J. Martinod)

Et puis, il y a des différences plus subtiles. La chaîne est truffée de volcans actifs. Pourtant, on n'en trouve pas dans toutes les régions : l'arc volcanique n'est pas continu. Il y en a un bon paquet dans les Andes du nord, un autre bon paquet dans les Andes du sud. Mais dans les Andes centrales, c'est plus compliqué. Si on trouve des volcans actifs dans le sud du Pérou et en Bolivie, une grande partie des Andes Centrales (centre et nord du Pérou par exemple) en est complètement dépourvue !



Qu'il y ait des volcans au-dessus d'une zone de subduction, on l'explique facilement. Mais pourquoi pas partout dans la chaîne des Andes ? Qu'est-ce qui explique ces zones d'ombre volcanique ? Et y-a-t-il un lien entre cette absence de volcans et la largeur maximale de la chaîne ?

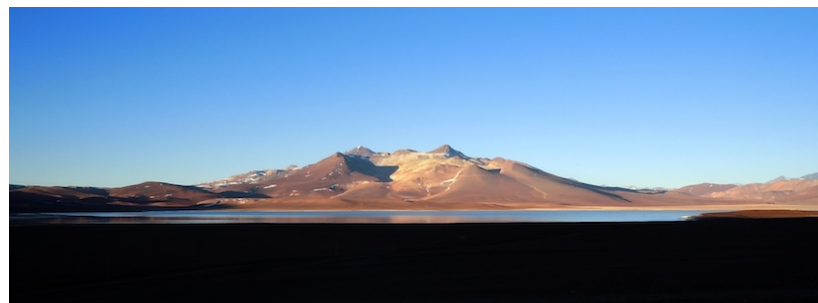
### Point chaud

Pour comprendre, il faut quitter le continent et s'aventurer dans l'océan Pacifique. Face à la zone des Andes sans volcan actif du Pérou s'étend une longue chaîne de reliefs sous-marins qui s'étire depuis l'île de Pâques sur près de 3600 km. On l'appelle la ride de Nazca. Alors que le fond de l'océan se situe à près de 5000 m sous la surface de l'eau, le sommet de la ride de Nazca se situe plutôt vers 2500 mètres sous le niveau de la mer. En certains endroits, il culmine même à 150 m seulement sous la surface, voire émerge carrément, comme à l'île de Pâques.



Localisation de la ride de Nazca, résultat de l'activité du point chaud de l'île de Pâques (©Google Earth).

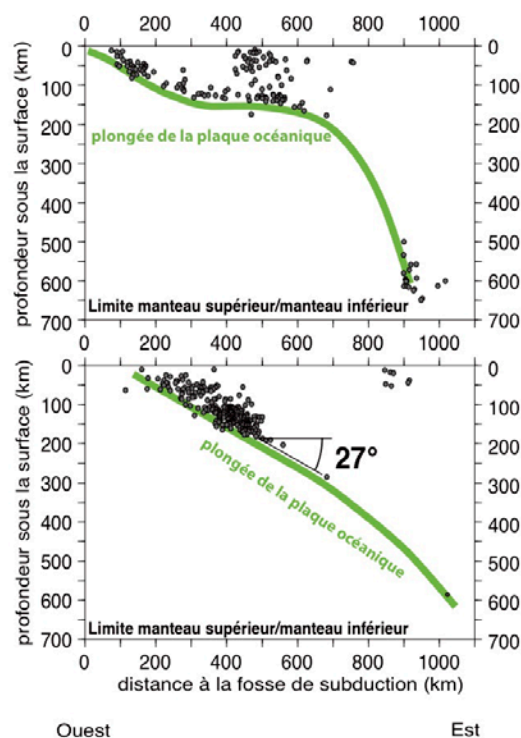
Cette chaîne de montagnes est constituée de basalte, une roche qui se forme lorsque les magmas du manteau terrestre atteignent le fond de la mer. Ici, j'en appelle à votre imagination... Imaginez une colonne de remontée de magma de plusieurs milliers de km de haut à travers le manteau terrestre qui perce la surface de la Terre en un point situé sous la mer. Le résultat sera un volcan sous-marin actif, appelé « point chaud ». Mais si la plaque tectonique qui porte ce volcan se déplace lentement, de quelques centimètres par an, au bout de quelques millions d'années, le résultat sera une chaîne de volcans sous-marins éteints, le seul volcan actif étant celui situé à la verticale du point chaud. Et la ride de Nazca, c'est exactement ça ! Elle a été formée par une colonne de magma fixe dans le manteau terrestre et qui se trouve aujourd'hui au bout occidental de la chaîne (l'île de Pâques).



Laguna del Negro Francisco, dans la Cordillère occidentale, en bordure de la Puna (Altiplano). La laguna est un lac salé perché à 4200 mètres d'altitude, sans exutoire. Ce lac s'est formé lorsque le Volcan Copiapo, au fond de la photo, est venu boucher la vallée qui continue en pente douce vers le nord. (©GET/J.Martinod)



La ride de Nazca est donc une chaîne d'anciens volcans issus du point chaud de l'île de Pâques, qui se baladent, portés et emmenés par la plaque de Nazca vers l'Est, en direction du continent sud américain. Ces volcans anciens sont entraînés en subduction avec le reste de la plaque Nazca, et plongent donc sous le Pérou. Mais toute cette masse de basaltes accumulés sur la plaque qui plonge gêne la subduction. Pourquoi ? Parce que des basaltes, c'est un peu moins lourd que les péridotites qui forment la base de la plaque océanique. Rappelez-vous, 3,2 à 3,3 tonnes par m<sup>3</sup> pour le manteau, contre 2,9 pour les basaltes. Si la croûte océanique superficielle n'est pas trop épaisse, ça ne gêne pas la subduction, mais si le point chaud l'a sur-épaissie, alors la plaque océanique plonge toujours mais... nettement moins bien. En fait, elle n'a plus trop envie de descendre dans le manteau, elle a trouvé sa bouée, un peu comme les continents, même si la bouée constituée par la croûte continentale est bien plus efficace.



Une image de la subduction sous les Andes. Le diagramme du haut montre la position en profondeurs des foyers des séismes sous les Andes Centrales. La compilation suggère un angle très plat pour la subduction, la plaque Nazca se glissant sous la plaque américaine. Le diagramme du bas donne la même chose, mais plus au sud, sous la Bolivie, où la subduction est "normale". (modifié d'après Martinod et al., 2010)

Ce processus expliquerait l'absence de volcans dans le secteur nord des Andes centrales. En effet, plutôt que de plonger dans le manteau avec un angle d'une trentaine de degrés comme c'est normalement le cas, la croûte océanique, trop légère, se glisse sous l'Amérique du Sud, caressant celle-ci par en-dessous sous un angle proche de 0°. La plaque océanique constitue alors un bouclier froid qui isole ce secteur du continent sud-américain du manteau chaud qui se trouve en-dessous. Elle a beau libérer en direction de la plaque continentale les fluides accumulés lorsqu'elle était au fond de l'océan, ceux-ci ne parviennent pas à déclencher du magmatisme dans cet environnement devenu trop froid. Les sismologues mettent en évidence le parcours de la plaque Nazca sous cette portion du continent sud-américain, car la friction au contact entre les deux plaques engendre des séismes, situés à 100 km de profondeur environ, qui sont localisés par les réseaux sismologiques mondiaux. Les données sismologiques montrent que la plaque Nazca se glisse horizontalement sous le Pérou sur une distance de près de 600 km depuis la fosse de subduction.



Délégation Midi-Pyrénées



Cette configuration particulière « pousse » le continent par en-dessous, favorisant le développement d'altitudes importantes sur une grande largeur. Les chercheurs du GET montrent, en analysant l'histoire du magmatisme et des déformations dans les Andes centrales, que des épisodes de subduction horizontale tels que celui observé actuellement sous le Pérou, se sont produits de façon répétée depuis plus de 40 millions d'années. Et en effet, on constate que cette période correspond au début de l'élargissement et à une accélération du soulèvement des Andes centrales.

Reste que ceci est un scénario possible, qui a le mérite d'expliquer pas mal de choses, mais qui reste sujet à débat... Seuls les Sith ont des théories définitives et absolues !

---

### Les chercheurs

Les arpenteurs des Andes sont Joseph Martinod, Sébastien Carretier, Vincent Regard, Gérard Hérail, tous basés au laboratoire Géosciences-Environnement Toulouse (CNRS-Université Toulouse III Paul Sabatier-IRD) et travaillant en étroite collaboration avec leurs collègues du laboratoire Géosciences Rennes (Pierrick Roperch, Benjamin Guillaume).



© M. Moreira

---

### Sites des labos concernés

Géosciences Environnement Toulouse  
<http://www.get.obs-mip.fr>

---

### Contact

Miss Terre | [misssterre@dr14.cnrs.fr](mailto:misssterre@dr14.cnrs.fr) | <http://misssterre.dr14.cnrs.fr>  
Service communication | Délégation Midi-Pyrénées du CNRS | [com@dr14.cnrs.fr](mailto:com@dr14.cnrs.fr) |