Chili, pays forgé par la tectonique des plaques

Par Daniel Levert, membre de la SAGA.

Compte rendu des observations et déductions d'un amateur de géologie en excursion au Chili, au mois de novembre 2012.

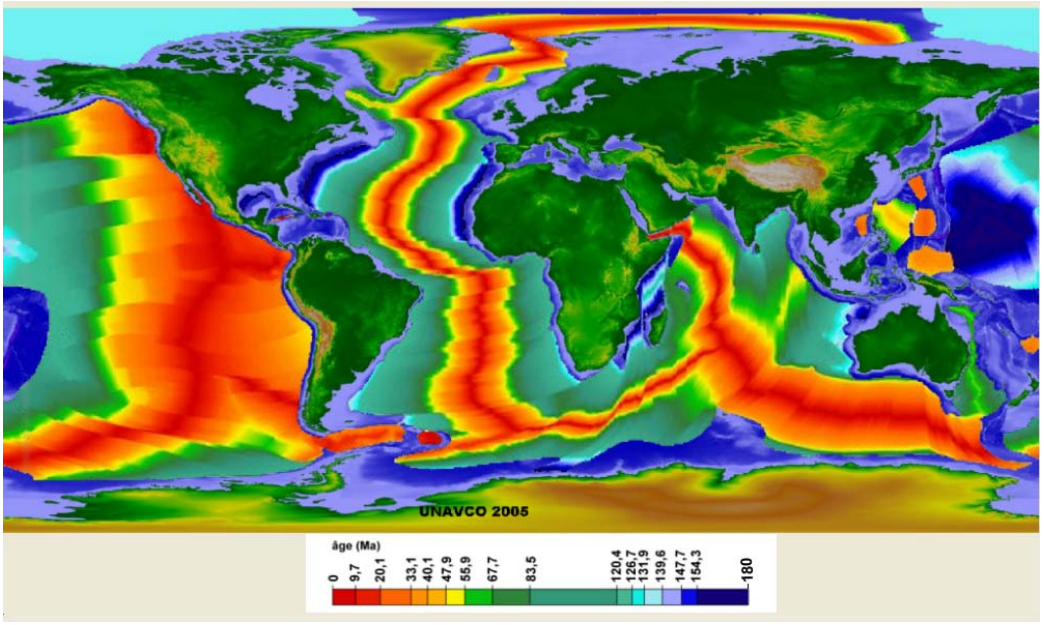


Figure 1. Intensité de la tectonique globale.

Pour un regard de géologue, le Chili est un pays où rien n'est similaire à l'Europe. Alors qu'en Europe l'orogenèse est essentiellement caractérisée par des plissements et les charriages d'une sédimentation océanique, le Chili est assis sur une plaque continentale très ancienne, aujourd'hui recouverte d'un épais manteau de produits volcaniques toujours renouvelés. La cordillère volcanique chilienne, de près de 4 000 km de long, se situe à environ 150 km de l'océan Pacifique. Elle est aujourd'hui aussi active qu'il y a des dizaines de millions d'années.

Sans la tectonique des plaques qui a créé une puissante et difficilement franchissable frontière naturelle, les contrées d'Argentine et de Bolivie s'étendraient jusqu'à l'océan.

Notre voyage n'a pas été un voyage d'étude géologique mais un séjour familial et amical, avec ses contraintes… qui a cependant émerveillé l'amateur de géologie qui rapporte ici ses observations volées et ses déductions ultérieures. Les observations s'étendent sur 2 000 km, depuis le désert d'Atacama au nord jusqu'à l'île de Chiloé plus au sud.

Convergence de la plaque Farallon vers la plaque continentale Sud-américaine

Au Jurassique moyen (185 Ma), la Pangée commence à se fragmenter. À l'ouest, une immense plaque océanique, la plaque Farallon, entre alors en subduction sous les Amériques Nord et Sud. Un premier magmatisme est identifié dès lors sur les côtes nord et centrales des Andes (Pichowaik et *al*. 1990). La figure 1 permet de réaliser immédiatement combien est violente la subduction de la plaque océanique Farallon sous les Amériques.

Les fonds océaniques près des côtes sont très récents : de l'Éocène (50 Ma) pour les plus vieux, au Pléistocène pour les plus récents. Cette forte dynamique de convergence tout au long d'un méridien terrestre est unique sur Terre.

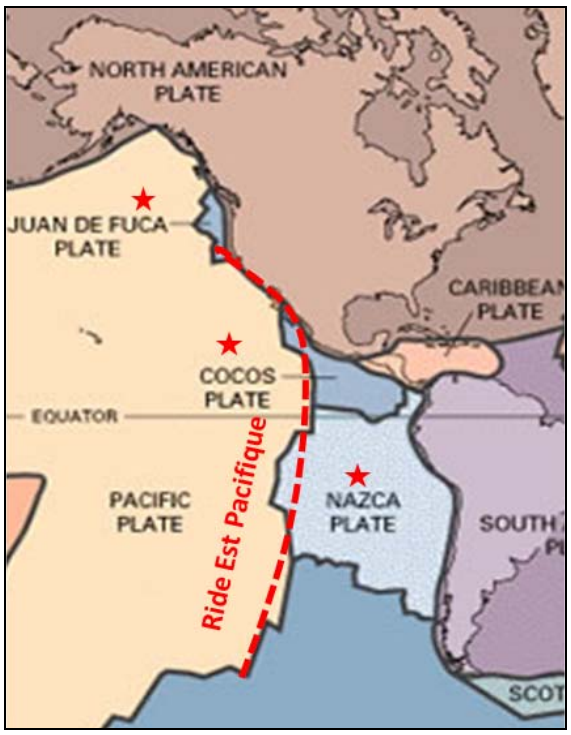


Figure 2. La plaque Farallon, issue de la dorsale rapide Est-Pacifique, a quasiment disparu sous l'Amérique du Nord (résidus : les plaques Juan de Fuca et Cocos) ; elle est en voie de disparition sous l'Amérique du Sud.

Au début du Miocène, il y a 27 Ma, la plaque Farallon avait déjà largement subducté sous les Amériques, notamment au nord. Actuellement (figure 2), elle subsiste sous forme de trois plaques secondaires :
- la plaque Juan de Fuca, en subduction sous le nord de la plaque Nord-américaine ;
- la plaque de Cocos, en subduction sous la plaque d'Amérique Centrale ;
- la plaque de Nazca, en subduction sous la plaque d'Amérique du Sud.

Sur le manteau lithosphérique reposent :
- 1, la croûte continentale de l'Amérique du Sud, qui est épaisse en moyenne de 50 à 70 km ;
- 2, la croûte océanique de Nazca qui est hydratée par l'océan ; elle est épaisse de 10 km environ.

Le manteau lithosphérique, avec sa croûte océanique, converge vers la plaque continentale à une vitesse très rapide d'environ 7 cm/an. Il y a, en conséquence, formation d'une fosse de subduction d'une largeur moyenne de 50 km, à 100 km de la côte. Cette fosse atteint par endroits une profondeur de plus de 8 000 mètres.

La dorsale océanique rapide Est-Pacifique produit donc une plaque jeune et peu dense, qui présente alors un faible pendage de son plan sismique de Wadati-Benioff (figure 3). Le pendage de ce plan le long du Chili s'établit normalement de 20° à 27°.

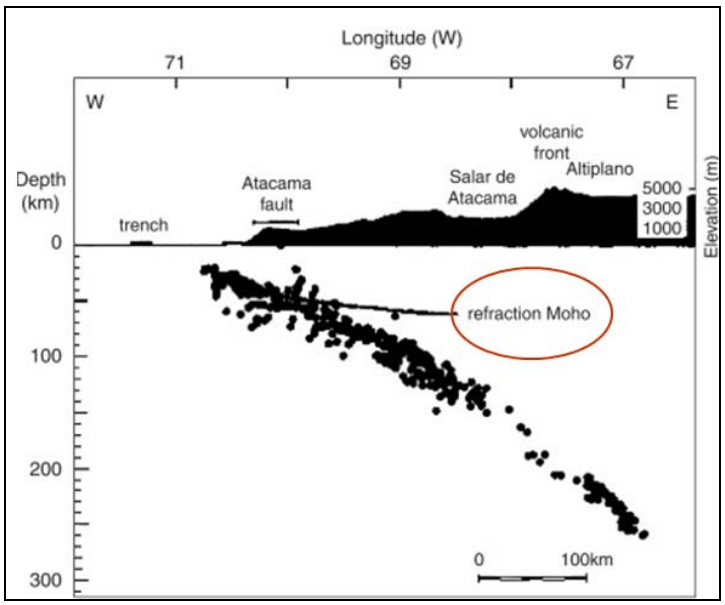


Figure 3. Plan sismique de Wadati-Benioff matérialisant le plan de friction de la plaque océanique sous la plaque continentale.

Le bilan titanesque de la convergence durant les derniers 27 Ma

Côté Pacifique : c'est en progressant d'environ 1 600 km, à raison de 7 cm/an, que le manteau lithosphérique, recouvert de la croûte océanique hydratée et épaisse d'environ 10 km, s'est englouti sous la plaque Sud-américaine.

Côté Atlantique : l'ouverture de la dorsale Atlantique a provoqué une avancée de 550 km de la plaque Sud-américaine vers la plaque Nazca. La conséquence en est une érosion par friction de la marge continentale Pacifique, érosion estimée à 284 km.

Ce télescopage a aussi produit un raccourcissement par compression tectonique d'environ 211 km de la plaque continentale épaisse de 70 km. Le bilan de ce raccourcissement total (érosion et compression) de la plaque Sud-américaine est d'environ 495 km ! Durant les 27 Ma de ce choc titanesque, la fosse de subduction s'est déplacée 55 km plus à l'ouest.

Effet isostatique

L'érosion de la marge continentale entraîne des lambeaux de croûte océanique qui s'accumulent sous la croûte continentale. Ce sous-placage par la plaque océanique crée une racine qui, par effet isostatique, élève d'environ 3 500 m la Cordillère Occidentale et l'Altiplano

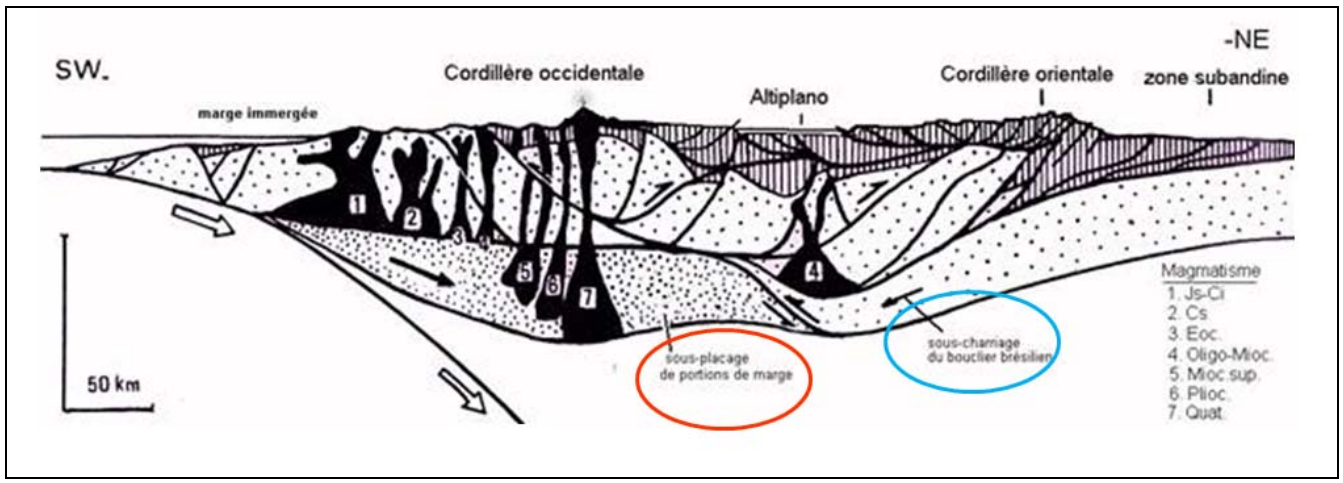


Figure 4. Compression et plissement entraînent la formation de la Cordillère Orientale, de type alpin, et de la Cordillère Occidentale volcanique, donc de type Andin.
Remarquer aussi :
1, le déplacement de la chaîne volcanique consécutif à l'érosion de la marge continentale ;
2, les sous-placages continentaux provenant de la plaque de Nazca et du bouclier brésilien.

Un effet similaire surélève la Cordillère Orientale. Le volcanisme n'est donc responsable que du complément d'élévation, soit environ 3 000 m.

Autre conséquence, l'Altiplano, qui reçoit les produits d'érosion des deux cordillères, ne présente pas de subsidence car le sous-placage compense les forces en créant une racine importante.

Origine du volcanisme calco-alcalin des Andes chiliennes

Lors de la subduction et vers 100 km de profondeur, le fluxage, par des volatiles libérés (H_2O notamment) du manteau lithosphérique continental chevauchant la plaque océanique, entraîne sa fusion partielle : un film liquide de magma se forme autour des grains de péridotite, puis ce magma naissant coalesce. Ce magma mafique, plus léger, s'élève. Lors du placage transitoire sous le Moho, les flots de magma de différentes provenances se mélangent et assimilent aussi des portions de la roche encaissante.

Pendant ce stockage *(MASH zone : melting, assimilation, storage and homogenization zone)*, il y a cristallisation fractionnée et homogénéisation par convection du liquide résultant.

Une part du magma ainsi évolué peut ensuite franchir le Moho, s'élever et évoluer dans la croûte felsique en formant des dykes et des plutons de magma intermédiaires, puis des chambres magmatiques dont certaines débouchent en un volcan, les autres formant des batholites granitiques.

L'évolution physique des laves intermédiaires dans la chambre volcanique conditionne les caractéristiques de son expulsion par éruption hors du cratère.

Les volcans andins, de type composite, sont des stratovolcans

Ils sont formés de couches alternées de laves denses et de matériaux pyroclastiques moins denses. Les couches de matériaux pyroclastiques sont généralement plus abondantes que les couches de lave (figure 5). La plus grande part des matériaux est de nature andésitique (série intermédiaire, ou calco-alcaline).

Une part réduite des matériaux émis est de nature basique/mafique (= basalte) et aussi acide/silicique (= rhyolite).

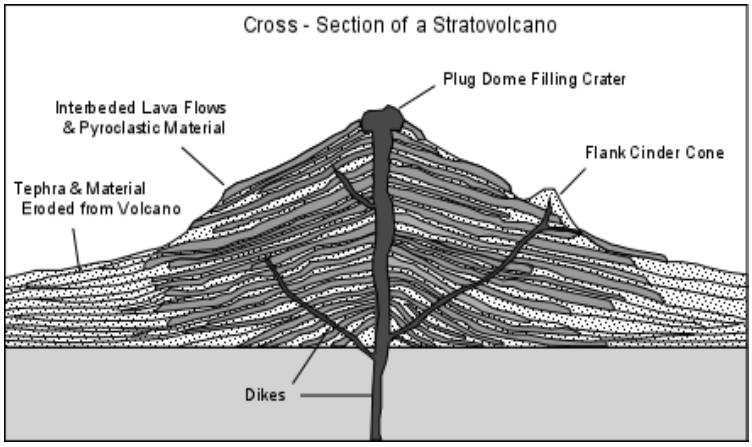


Figure 5. Schéma d'un stratovolcan : alternance de coulées de laves et de produits pyroclastiques.

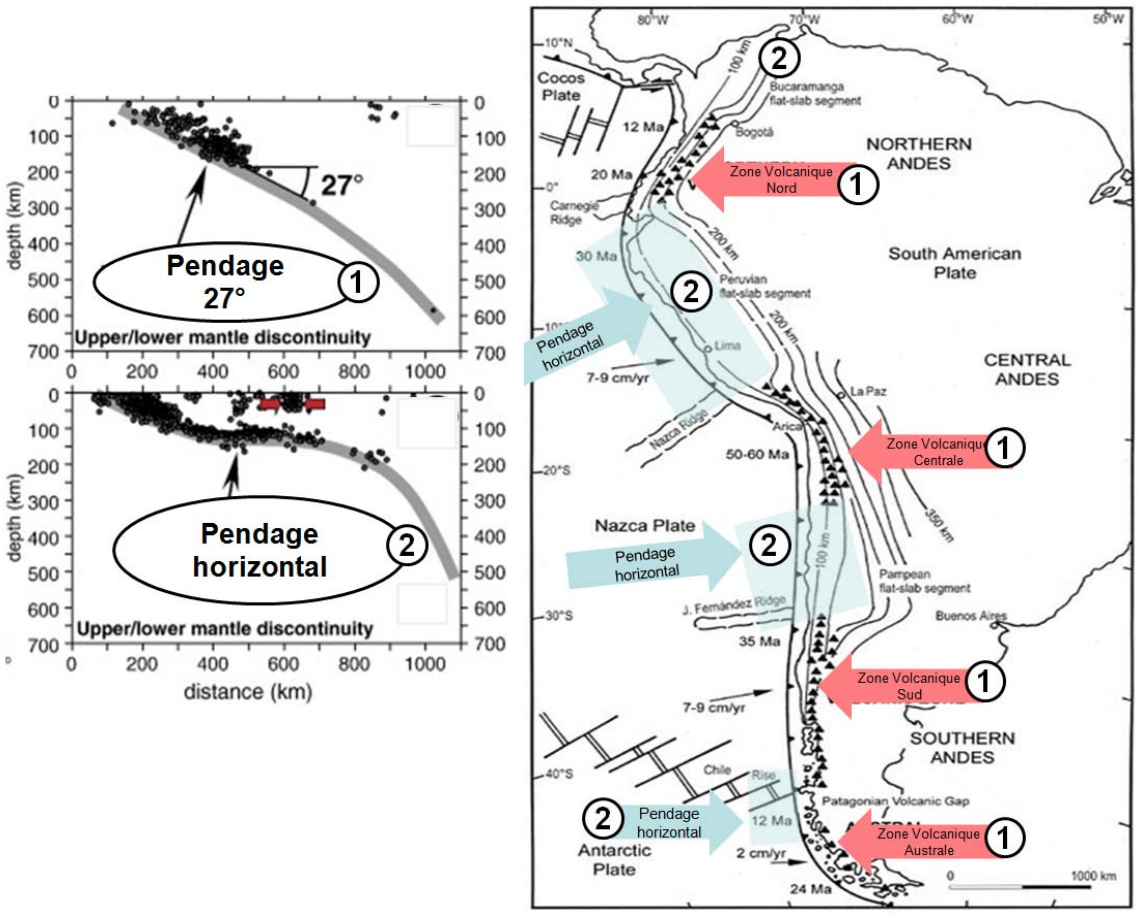


Figure 6. Segmentation de l'activité volcanique de la cordillère par des zones de pendage initial modifié et quasi horizontal.
*En repères **1 :** pendages normaux de 27°, générateurs d'activité volcanique forte.*
*En repères **2 :** pendages quasi horizontaux, entraînant un volcanisme réduit.*

La cordillère est segmentée en zones de plus faible activité volcanique

Si le pendage initial de la plaque Nazca subductante est quasi uniforme et d'environ 27°, à une profondeur de 90 à 100 km partout sous la côte sud-américaine, à plus grande profondeur et pour quatre zones, il devient subhorizontal, ou quasi horizontal. Ces quatre zones de progressions plates (figure 6, repères **1**, en bleu) sont :
1. bacaramanga, sous le nord de la Colombie (5°N) ;
2. péruvien (entre latitudes 5°S et 14°S) ;
3. pampean, sous le Chili central et l'Argentine (entre latitudes 27°et 33°S) ;
4. patagonien, sur la ride du Chili.

Les plutons (batholites) calco-alcalins forment une chaîne linéaire, notamment proche de la côte, en raison de l'érosion côtière, et sont plus abondants dans les segments subhorizontaux de pendage inférieur à 10°. Les plutons représentent un volume magmatique dix fois supérieur à celui des chambres magmatiques volcaniques ; ce sont aussi les racines des chaînes volcaniques anciennes et ils affleurent en raison des forces isostatiques et de l'érosion (figure 7).

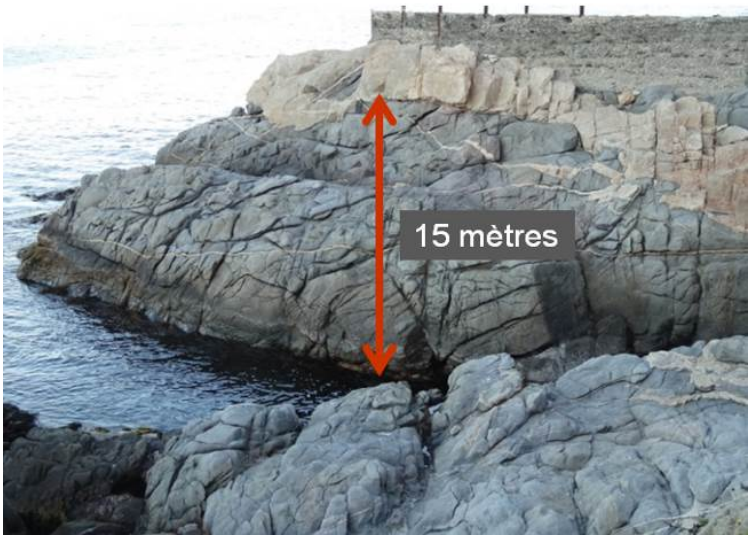


Figure 7. Affleurement d'un batholite d'âge jurassique dans le port de Valparaiso, la deuxième ville du Chili.

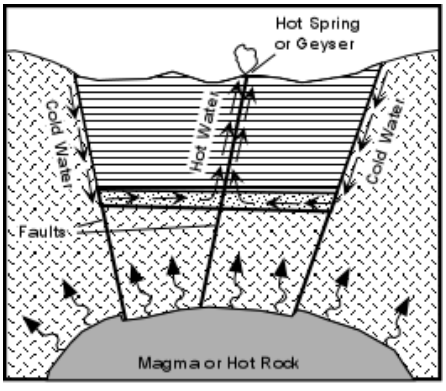
Quelques volcans du nord au sud

Figure 8. Volcan Putana, en Atacama (altitude : 5 890 m). Activité fumerollienne permanente.

Figure 9. Volcans Licancabur (altitude : 5 920 m) et Juriques (altitude : 5 704 m). Au premier plan, l'oasis de San Pedro Atacama (altitude : 2 407 m). Au pied des volcans, couverture de lave et ignimbrite de couleur rouge en raison de la présence d'oxydes de fer.

Figure 10. Éruption plinienne de 1993 du volcan Lascar, en Atacama ; il culmine à 5 450 m.
Il s'agit donc d'un édifice volcanique de 3 000 m de hauteur. Ascension d'un panache 25 km de haut, accompagné de grondements sourds et de nombreux éclairs qui zèbrent le soir les bords du panache. Activité volcanique : phréatomagmatisme, plinienne et strombolienne. Activité fumerollienne permanente.
Placés sur une faille, six cratères d'environ 200 mètres, disposés sur 1,6 km. En 150 ans, soixante épisodes éruptifs.

Figures 11a et 11b (ci-dessous). La zone géothermale El Tatio, en Atacama : elle est générée par une poche magmatique qui se situe vers 4 000 m de profondeur. Entre 800 et 1 000 m de profondeur, l'eau circulante, issue des précipitations et de la fonte des neiges à une vingtaine de kilomètres au sud-est d'El Tatio, est réchauffée et atteint 260 °C. Bien qu'aucune éruption ne soit connue durant l'Holocène, El Tatio a été classé, en raison de son activité géothermique, dans le catalogue mondial des volcans actifs (Casertano, 1963) avec ses 85 fumerolles et solfatares, 62 sources chaudes (l'eau est en ébullition en surface à 86 °C en raison de l'altitude, juste assez pour faire cuire les œufs durs…), 40 geysers et 5 volcans de boue.



After Williams and McBirney, 1985

Figure 12a. Volcan Villarica, au sud, dans la région des lacs (altitude : 2 847 m), avec deux caldeiras imbriquées, et de nombreux cônes adventifs. Activité quasi continue depuis cinq siècles. Éruptions stromboliennes ou pliniennes, et hydromagmatiques. Activité intense, explosions sommitales, coulées de lave, éboulements et lahars. L'éruption de 1984 a laissé une coulée AA de lave scoriacée basaltique sur 18 km de parcours.

Figure 12b. Visite d'un des tubes de lave dans le cône du Villarica, d'un diamètre jusqu'à 20 m et d'une longueur visitable de 200 m. (En insert : les séquences de formation d'un tube de lave).

Figure 13a (en bas, à gauche). Le complexe volcanique Puyehue-Cordon-Caulle, au sud de la région des fleuves, est installé le long d'une faille sur approximativement 9 km au nord-ouest du volcan Puyehue. Depuis le Pléistocène, des laves très différentes sont émises, de basaltiques à rhyolitiques. Ici, après cinquante années de calme, l'éruption de 2011 a pris place dans une brèche longue de 3 km environ, et le panache de tephras est monté à 10 km.

Figure 13b. Inspection du Rio Limay couvert des retombées de tephras rhyolitiques, par des plongeurs de la Prefectura Naval Argentina *: cendres et ponces (San Carlos de Bariloche, en Argentine).*

Le salar d'Atacama

La chaîne des Andes possède de nombreux salars (ou déserts de sel) dont le plus vaste est celui d'Uyuni, en Bolivie, voisine du Chili. Le plus grand salar du Chili, à 2 300 m d'altitude, est celui d'Atacama : 80 km de long sur 60 km de large. Le désert d'Atacama, sous le tropique du Capricorne, est le plus sec du monde.

Figure 14. Salar d'Atacama (altitude : 2 300 m) : au premier plan, excroissances efflorescentes en eau vadose, où se forment des cristallisations de gypse et d'anhydrite (gypse déshydraté), alimentées à partir de la zone de capillarité qui contient la saumure, visible au second plan et soumise également à une évaporation intensive.

Ce grand désert est hyperaride. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 0,5 à 0,6 mm pour les villes d'Arica et d'Iquique, alors que les capacités d'évaporation régionale sont de 1 700 mm/an !

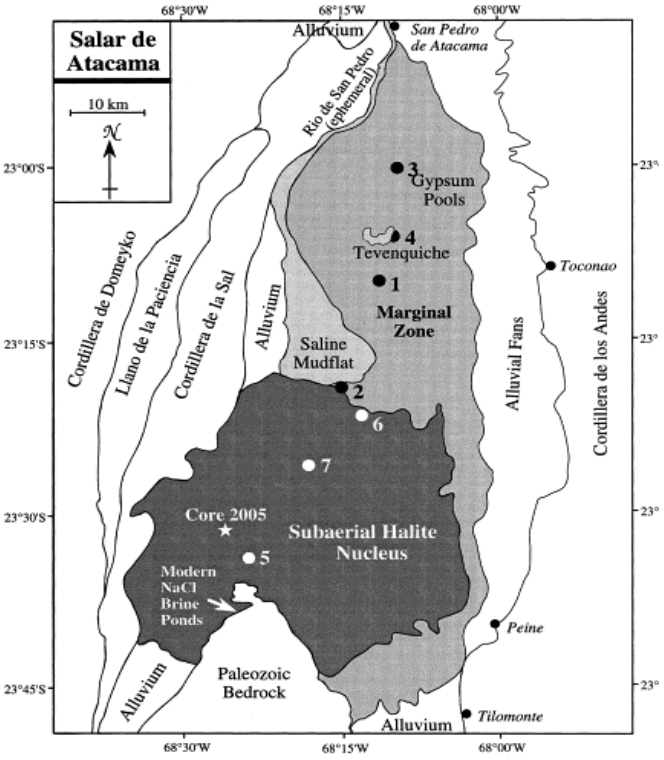


Figure 15. La salar d'Atacama : le « noyau » de halite compacte (en gris sombre) contient, en zone de capillarité, les saumures très concentrées, et la zone marginale (en gris clair) est le lieu de précipitation du gypse.

	Atacama	Uyuni
Cl	189,500	191,800
SO_4	15,900	13,200
HCO_3	230	592
B_2O_3	1,416	1,136
Li	1,570	700
Na	103,000	94,900
K	23,600	13,500
Mg	6,130	11,800
Ca	520	461
TDS	370,000	351,000

Figure 16. Concentrations typiques comparées des solutés des salars d'Atacama et d'Uyuni (en ppm).

Les précipitations et les rares sources sont notoirement insuffisantes pour alimenter le salar. L'alimentation du bassin endoréique est essentiellement souterraine. Les eaux souterraines de recharge proviennent du nord, de l'est et sud. Elles arrivent principalement après l'hiver bolivien pendant lequel l'Altiplano reçoit des précipitations provenant du bassin amazonien.

L'eau entrant par le sud et l'est est déjà saumâtre, elle perd par évaporation 96 % de son eau et alimente la zone centrale composée uniquement d'une masse compacte de halite (chlorure naturel de sodium) poreuse qui contient de ce fait, par capillarité, une saumure très concentrée en différents solutés (figures 15 et 16).

Les solutés ont été extraits des roches volcaniques des bassins versants par les eaux superficielles ou souterraines, ainsi que par la circulation hydrothermale qui apportent les minéraux aux bassins du salar.

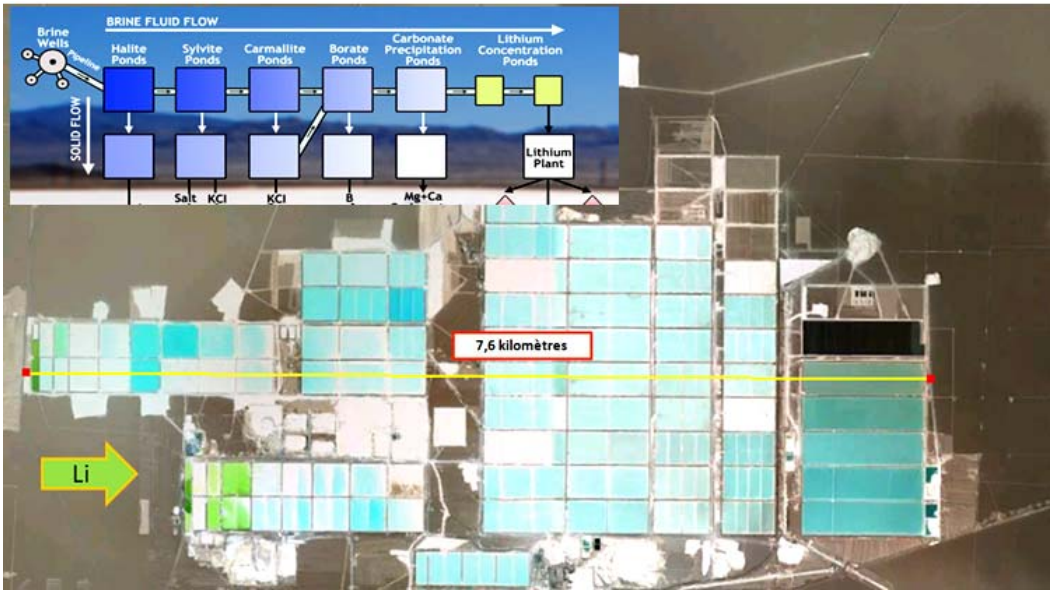


Figure 17. Photo aérienne d'une des trois exploitations actuelles, longue de près de 8 km. Les différentes couleurs naturelles correspondent à des concentrations particulières des solutés. Le diagramme (en haut, à gauche) indique l'ordre de précipitation des sels en fonction de leur concentration : d'abord halite (NaCl), puis sylvite (KCl), puis carnallite ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$), puis borate de sodium (ou borax) de formule $Na_2B_4O_5(OH)_4.8H_2O$, puis carbonates de sodium et de magnésium, puis le chlorure de lithium (LiCl).

Les solutés sont exploités à partir des saumures prélevées dans la zone de capillarité du noyau de halite d'une épaisseur de 360 m (1 000 m selon certaines sources). La croûte du noyau est très poreuse et capillaire jusqu'à une profondeur de 20 à 25 m. Plus en profondeur, la halite est complètement recristallisée en masse compacte, sur une épaisseur de plus de 360 m.

Exploitation des ressources minérales

L'élément le plus recherché est aujourd'hui le lithium, indispensable pour la fabrication des accumulateurs d'énergie modernes : piles au lithium et batteries au lithium. L'exploitation utilise uniquement l'énergie solaire pour concentrer par évaporation les saumures déjà très riches de la zone de capillarité.

À la surface dure du noyau de halite, les bassins d'évaporation sont creusés au bulldozer. Des pompages alimentent les bassins en saumure. La saumure progresse d'un bassin à l'autre en s'enrichissant par évaporation de l'eau (principe des marais salants). En vert clair, les derniers bassins de saumure riche en chlorure de lithium (figure 17).

Le salar d'Atacama, au Chili, constitue aujourd'hui la plus grande ressource mondiale de lithium, avec un potentiel voisin de 7 millions de tonnes, la seconde ressource étant les salars d'Uyuni, en Bolivie, avec 5,5 millions de tonnes. Ces deux salars contiennent environ la moitié des ressources mondiales de lithium, ce qui est pour le Chili et la Bolivie un enjeu économique majeur. En fonction des cours du lithium, d'autres réserves de ces salars pourraient être mobilisées.

En conclusion

La géologie ne doit pas faire oublier que les hommes ont lutté pour survivre dans ces conditions extrêmes. Alors, je vous offre le regard noble et déterminé… d'une femme que mon objectif a saisi en Atacama.

Salvador Dali
(1904-1989)
devin et… géologue ?

Gérard Boucher, membre de la SAGA.

Les visiteurs de l'exposition Dali, qui s'est déroulée jusqu'en mars 2103 au Centre Georges-Pompidou, pouvaient voir un tableau du maître intitulé « Enfant géopolitique observant la naissance de l'homme nouveau ».

Sur une Terre de forme ovoïde, il a clairement représenté la dorsale médio-atlantique ; on y voit même une coulée de lave rouge.

Enfant géopolitique observant la naissance de l'homme nouveau *(1943). Un tableau étonnant, peu connu, du peintre catalan Salvador Dali, une des figures majeures du surréalisme du XX^{e} siècle.*

Ce qui est troublant, c'est que ce tableau est daté de 1943, alors que c'est dans les années 50 que la cartographie des fonds marins a mis en évidence le relief de cette dorsale, ce qui a permis d'expliquer par la tectonique des plaques la dérive des continents.

Dali s'était autoproclamé génie,
il n'avait peut-être pas tort !