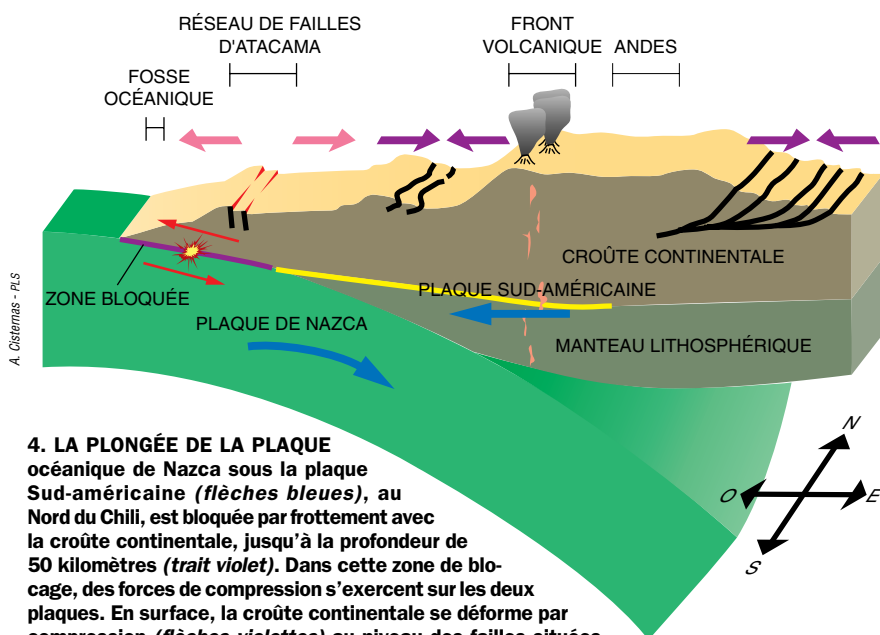




4. LA PLONGÉE DE LA PLAQUE océanique de Nazca sous la plaque Sud-américaine (*flèches bleues*), au Nord du Chili, est bloquée par frottement avec la croûte continentale, jusqu'à la profondeur de 50 kilomètres (*trait violet*). Dans cette zone de blocage, des forces de compression s'exercent sur les deux plaques. En surface, la croûte continentale se déforme par compression (*flèches violettes*) au niveau des failles situées en aval du front volcanique et de celles situées à l'Est du massif andin. Lors d'un séisme (*étoile*), un glissement se produit à l'interface entre les plaques (*flèches rouges*). En surface, la croûte terrestre est alors brusquement étirée, dans la région des failles du réseau d'Atacama (*flèches roses*) : la partie de la plaque continentale située à l'Ouest de la faille avance vers l'Ouest, tandis que la partie Est reste bloquée. Aux profondeurs supérieures à 50 kilomètres, la plaque océanique, en contact avec le manteau lithosphérique, plonge librement. Vers 150 kilomètres de profondeur, les roches se liquéfient partiellement, les matériaux les plus légers remontent à travers la plaque continentale et ils sont éjectés par des volcans.

Le dernier maillon

Le 30 juillet 1995, un séisme de magnitude huit s'est produit sous notre réseau. Sa puissance le distingue de la sismicité ambiante. La rupture, sur 180 kilomètres de long, a rempli une «lacune de sismicité» au Sud de celle de 1877. La zone qui a rompu était le dernier élément qui empêchait la plaque océanique d'avancer du côté Sud de la lacune de 1877.

L'épicentre du séisme a été localisé au Nord de la zone de rupture. Un séisme de magnitude 7,3 s'était produit en 1987 au Sud de cette zone de rupture, réduisant les contraintes accumulées de ce côté. Un précurseur direct du tremblement de terre de 1995 a été le séisme de magnitude 6,2 du 10 décembre 1994, qui avait exactement le même épicentre. Ce précurseur a été suivi d'une période de calme autour de l'épicentre, interrompue seulement par trois petits événements de magnitude inférieure à quatre dans les trois jours qui ont précédé le séisme de juillet 1995. Ces observations illustrent la complexité du phénomène sismique : on sait reconstituer *a posteriori* la genèse des ruptures, mais il est autrement plus difficile de prédire le comportement futur d'une faille à partir des observations passées.

En utilisant les enregistrements du réseau sismologique mondial, nous avons retrouvé le sens de la propagation de la rupture au cours du temps. Nous utilisons pour cela l'effet Doppler : comme la sirène d'une ambulance, dont la fréquence semble plus aiguë lorsqu'elle s'approche de nous que lorsqu'elle s'éloigne, la fréquence des ondes sismiques dépend de leur direction de propagation par rapport à celle de la rupture. La propagation des ondes élastiques est plus complexe que la propagation du son, puisqu'il y a deux types d'ondes au lieu d'un seul, mais le principe reste le même. Dans notre cas, les stations qui sont au Nord du foyer enregistrent une onde de plus basse fréquence que celles qui sont au Sud : la rupture s'est donc propagée du Nord vers le Sud.

De manière plus détaillée, nous avons modélisé cette propagation de la rupture, validant le modèle par la comparaison des sismogrammes calculés avec ceux observés par le réseau mondial. Le modèle le plus satisfaisant consiste en une série de ruptures de tailles différentes, réparties sur 180 kilomètres le long de la faille qui a rompu, et qui démarrent à des instants différents, la durée totale étant de 70 secondes.

Nous avons aussi enregistré la succession des répliques pendant les 24 heures qui ont suivi le séisme principal. La bordure Nord de cette distribution est remarquablement nette et elle passe par le centre de la péninsule de Mejillones, dépression de 20 kilomètres de large qui rompt la continuité de la ligne de côte au Nord d'Antofagasta. Cette péninsule marque une barrière géologique qui a empêché la rupture de se propager vers le Nord. Plus précisément, la péninsule de Mejillones est l'expression en surface de la barrière existant en profondeur, à l'interface de subduction, et dont nous ignorons la nature exacte. Cette barrière avait aussi, en 1877, empêché la propagation vers le Sud de la rupture associée au séisme de magnitude neuf. À l'extrémité Sud de la rupture de 1995, la magnitude des répliques est moins grande : nous avons vu que le séisme de 1987 avait réduit la déformation cumulée dans cette zone, et donc l'énergie élastique accumulée localement dans les plaques.

La distribution en profondeur des hypocentres des répliques dépeint clairement la zone rompue : elle suit la surface de subduction déduite de l'observation de la sismicité ambiante, jusqu'à la profondeur de 50 kilomètres, où elle s'arrête (*voir la figure 7*). La rupture associée au séisme de 1995 s'est donc produite exactement le long de la partie de l'interface qui était bloquée avant le séisme, c'est-à-dire celle située entre la surface et le bord inférieur de la croûte continentale. Ce résultat confirme que nous pouvons, en calculant la variation des contraintes en profondeur après chaque séisme, avec des modèles de rupture, mettre en évidence l'existence, la taille et la nature des régions prêtes à rompre.

Nous avons vérifié d'une autre façon, indépendante, la validité de notre modèle de propagation de la rupture principale : nous avons observé des déformations du terrain proches de celles calculées à partir du modèle. Nous avons mesuré ces mouvements de terrain par les changements du niveau de la mer dans la région côtière ou directement par des mesures de positionnement par satellite.

Ainsi, le calcul montre que le séisme de 1995 a soulevé une région ovale entre la côte et la fosse océanique, avec une valeur maximale de 1,2 mètre. Sur la bordure côtière, ce soulèvement atteint 10 à 15 centimètres, ce que nous avons observé. Entre la côte à Antofa-

gasta et la région stable à l'intérieur du continent, nos calculs indiquent un déplacement horizontal de 70 centimètres, en accord avec les données de positionnement par satellite.

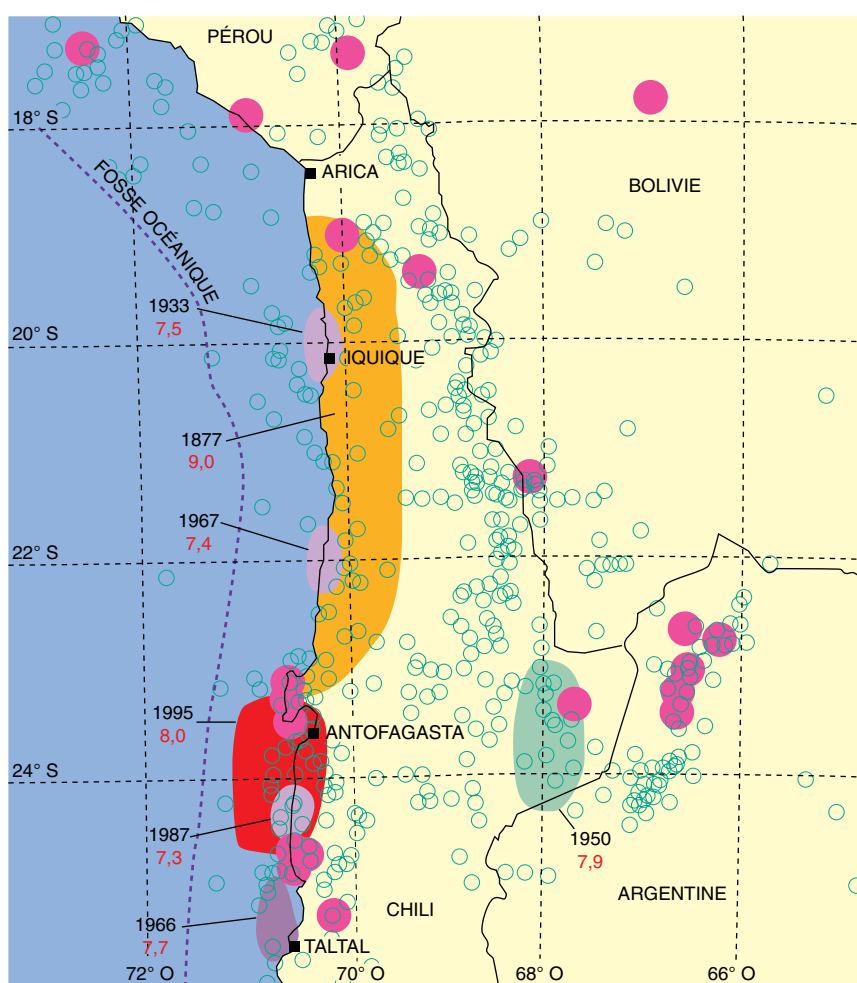
Toujours selon notre modèle, le déplacement horizontal, d'orientation dominante Est-Ouest, augmente lorsqu'on s'approche de la fosse océanique, ce qui implique que la croûte terrestre de la surface libre est étirée. Nous comprenons alors les caractéristiques tectoniques de la faille d'Atacama et des failles associées : à l'occasion de chaque séisme de subduction, la zone de la faille d'Atacama est soumise à des contraintes extensives. Il est donc naturel qu'elle soit activée à l'occasion. Ce fut le cas pour le séisme de 1995. Les ruptures de surface n'étaient pas de grande ampleur, mais clairement observables, en particulier dans le secteur de la Sierra Remien-dos, environ 70 kilomètres au Sud Sud-Est d'Antofagasta. À cet endroit, les ruptures maximales ne dépassent pas 20 centimètres en extension et nous avons repéré les traces des failles acti-vées sur quelques centaines de mètres.

La lacune encadrée

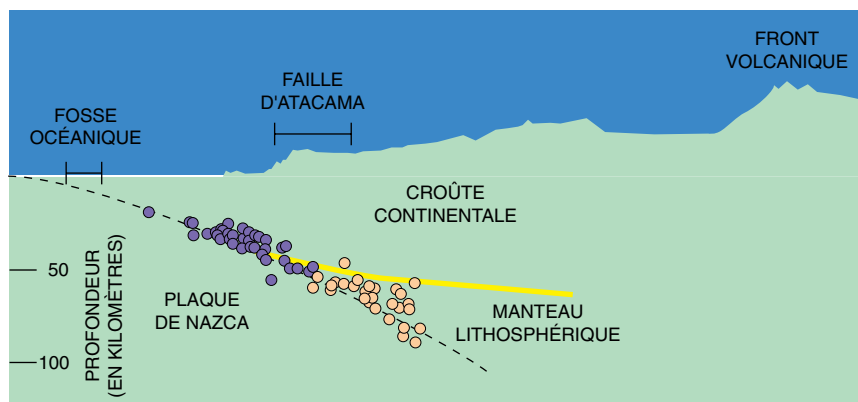
Le 12 novembre 1996, un séisme de magnitude 7,7 a frappé la région de Nazca, au Nord de la lacune sismique de 1868 au Pérou, entraînant des dégâts et des morts. La similarité avec le séisme de 1995 est frappante : ces deux séismes se situent aux extrémités de deux grandes lacunes de sismicité où se produiront des tremblements de terre de magnitude voisine de neuf d'ici à quelques années. Ils indiquent que la convergence des plaques de Nazca et d'Amérique du Sud n'est arrêtée maintenant que par les régions qui ont cassé en 1868 et 1877. Tout est donc en place pour la répétition de ces événements dans un délai de quelques années.

Où et quand cela se produira-t-il ? L'une des conséquences du séisme de 1995 est l'augmentation de trois bars de la contrainte sur la partie Sud de la lacune de 1877 : la probabilité que le grand séisme attendu parte du Sud de la lacune a augmenté corrélativement. Le réseau permanent d'Arica et les études qui se développent actuellement dans cette région permettront la surveillance et la modélisation du processus de rupture à l'extrémité Nord de la lacune.

Reste la partie péruvienne : nous avons été malheureusement empêchés



5. LA PORTION DE LA CÔTE CHILIENNE touchée par un séisme de magnitude neuf en 1877 (zone orange) n'a pas connu d'événement aussi violent depuis. En revanche, de nombreux séismes plus petits se produisent (les cercles verts sont les épicentres des séismes de magnitude comprise entre cinq et six, et les disques roses ceux des séismes de magnitude comprise entre six et sept enregistrés depuis 1980). Les épicentres des séismes de magnitude sept forment une auréole autour de la zone de calme relatif : les contraintes s'accroissent sur cette zone, ce qui annonce une prochaine rupture. Le séisme de magnitude huit (zone rouge) qui s'est produit au Sud en 1995 a aussi augmenté, de trois bars, les contraintes en profondeur. Il est associé à la rupture de la dernière zone qui empêchait le glissement de ce côté.



6. LES POSITIONS EN PROFONDEUR des épicentres des séismes enregistrés entre 1990 et 1995 dans la lacune de sismicité du Nord du Chili de 1877 tracent la surface de contact entre les deux plaques tectoniques (pointillé). En outre, au-dessus de 50 kilomètres de profondeur, les séismes correspondent à des mouvements de compression des plaques (disques violets), tandis qu'aux profondeurs supérieures, ils sont la conséquence de mouvements d'extension (disques roses). La zone bloquée par le frottement entre les deux plaques, et qui rompra lors de la répétition du séisme de 1877, est comprise entre la surface et 50 kilomètres de profondeur : c'est la surface de contact de la plaque de Nazca avec la croûte continentale (le trait jaune marque le bord inférieur de la croûte).