

Les bassins sédimentaires : témoins de la naissance des andes

Cordillère des Andes au Pérou. Les sédiments marins du bassin d'arrière-arc Crétacé ont été portés à des altitudes dépassant parfois 5 000 mètres lors de la formation des Andes. Photo : Étienne Jaillard

Les Andes résultent de l'enfoncement de la plaque océanique Pacifique sous la plaque continentale sud-américaine (craton). Ce contexte géodynamique est différent de celui d'autres grands systèmes montagneux, comme les Alpes ou l'Himalaya, qui sont dus à la collision de plaques continentales. Les géologues et géophysiciens de l'Orstom s'attachent depuis 25 ans à comprendre les mécanismes de la naissance des Andes. Pour cela, ils en ont exploré la constitution géologique, étudié les déformations tectoniques, ils ont analysé la composition des roches issues des profondeurs de la chaîne, ou visualisé sa racine au moyen des ondes sismiques. L'étude de la sédimentation ancienne constitue une des méthodes pour reconstituer la formation des Andes.



Photo : Emeric Jauffret

Les Andes occidentales du Pérou sont le plus souvent formées de sédiments, mais ce sont fréquemment des granites qui constituent les sommets les plus hauts (nevados).

Un bassin sédimentaire est une dépression à la surface d'une plaque, remplie de couches sédimentaires superposées qui représente, chacune, une époque géologique. L'analyse des sédiments permet de caractériser l'environnement de dépôt et ses changements dans le temps et l'espace. Le comportement du bassin sédimentaire dépend de celui de la plaque sur laquelle il s'est formé. Son étude à grande échelle permet de reconstituer l'histoire de la plaque elle-même. Un bassin sédimentaire est donc à la fois une machine à remonter le temps, une bande d'enregistrement et un stéthoscope posé sur la croûte terrestre.

UNE MACHINE À REMONTER LE TEMPS

Le géologue sédimentaire doit, en premier lieu, établir la stratigraphie des sédiments remplissant le bassin, c'est-à-dire qu'il doit dater les différentes couches de roches. Deux principales méthodes de datation lui sont offertes : les méthodes paléontologiques et les méthodes physiques. Les êtres vivants, grâce à leur faculté d'évolution, changent avec le temps. Le paléontologue pourra attribuer un âge à telle ou telle forme de fossile et dater la couche qui la contient. Les fossiles utilisés pour établir la stratigraphie des séries sédimentaires sont variés, puisqu'ils vont du dinosaure aux pollens, en passant par les micro-organismes du plancton, les graines végétales, les poissons ou les ammonites. Parmi les méthodes physiques, l'une des plus couramment utilisées est la radiochronologie qui s'applique surtout aux roches magmatiques. Elle utilise la transformation atomique



d'éléments chimiques instables (radioactifs, par ex.) contenus dans les roches. Connaissant la vitesse de transformation de l'élément et mesurant sa composition finale (actuelle), on en déduit le temps écoulé depuis son état initial, c'est-à-dire depuis la formation de la roche qui le contient.

Une fois établie la stratigraphie du bassin sédimentaire, le géologue procède à l'étude sédimentologique des dépôts, qui lui permet de reconstituer le paysage (paléogéographie) de la zone à l'époque considérée. La nature même du sédiment renseigne sur les circonstances de son dépôt. Par exemple, un calcaire indique des eaux peu profondes, claires et chaudes favorisant le développement d'organismes à coquilles carbonatées. En revanche, des eaux chargées en particules détritiques gênent la pénétration de la lumière, empêchent la photosynthèse qui permet la vie des organismes calcaires, et seules se déposent les particules détritiques. La présence de tels sédiments détritiques indique que l'érosion était en cours autour du bassin ; l'étude des particules qui le composent informe sur la taille, la nature et la localisation des reliefs en cours d'érosion.



Photo : Emeric Jauffret

Vertèbres de dinosaures (Crétacé terminal, Nord du Pérou).

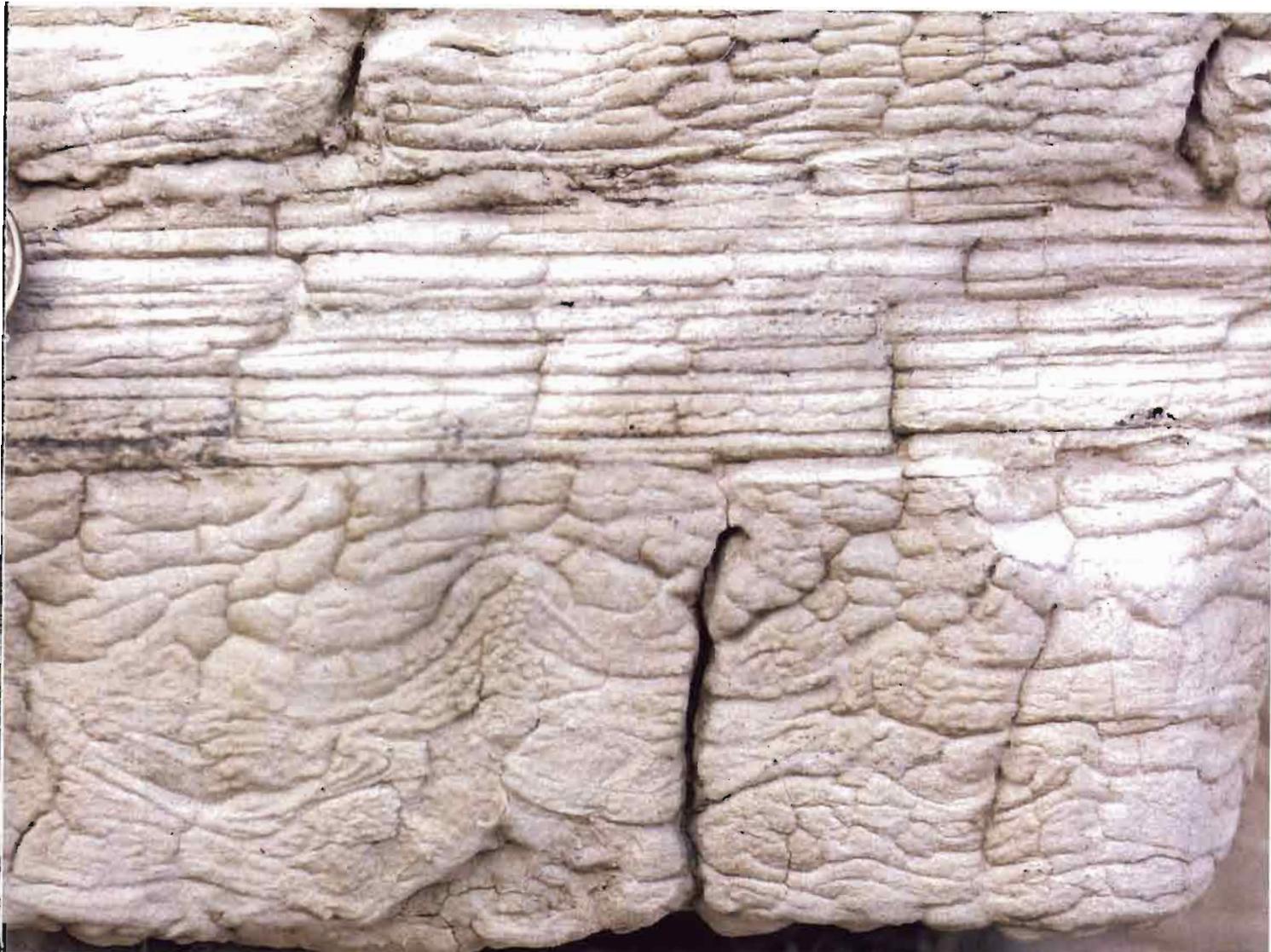


Photo: Florence Audoubert

Toutes les roches sédimentaires présentent des structures particulières dues à leur mode de dépôt. Les figures sédimentaires d'origine mécanique renseignent sur la nature, l'intensité et la direction des courants (marins ou fluviaux) et sur la présence de pentes ou de mouvements. D'autres figures résultent de phénomènes de dessiccation, cristallisation, dissolution ou de circulations de fluides, qui dépendent de la profondeur de dépôt, du taux d'accumulation, du climat, etc. Enfin, les figures d'origine organique (traces ou terriers d'animaux, constructions coralliennes ou algaires) reflètent l'activité biologique de l'époque, elle-même contrôlée par le climat, la profondeur de dépôt, le taux de sédimentation, la salinité de l'eau.

UNE BANDE D'ENREGISTREMENT

Les sédiments enregistrent aussi les variations des phénomènes qui contrôlent le remplissage du bassin. Ces variations, si elles sont bien datées, permettent de reconstituer l'évolution du paysage dans le temps. Le niveau marin a varié au cours du temps. Après avoir monté par à-coups entre 130 et 90 millions d'années

(Ma), la mer a baissé de la même façon depuis environ 90 Ma. Les bassins sédimentaires ont donc enregistré l'invasion progressive de la mer (transgression) entre 130 et 90 Ma, puis son retrait progressif (régression) jusqu'à nos jours. Mais ces variations interfèrent avec d'autres phénomènes, principalement d'origine tectonique ou climatique.

Les événements et les contraintes tectoniques peuvent être perçus par l'analyse des déformations affectant le sédiment pendant son dépôt. Par exemple, une faille normale, qui tend à augmenter la surface de la couche sédimentaire qu'elle affecte, indique une tectonique en extension, tandis qu'une faille inverse, qui tend à en réduire la surface, indique une compression ; ou encore un pli naît généralement avec un axe perpendiculaire à la direction de la compression.

Des données sur le climat sont fournies par la faune et la végétation (pollens, plantes) trouvées dans le sédiment, par certaines figures sédimentaires caractéristiques de climats glaciaires, humides ou chauds, ou par la nature même de la roche. Par exemple, la présence d'évaporites ou de sables de dunes éoliennes indique un climat chaud et désertique.

Déformation d'un sédiment lacustre intervenant lors de son dépôt, comme le démontrent les couches horizontales sus-jacentes (Miocène, Nord du Pérou).

ETAGES		AGE	Millions d'années	GRANDS EVENEMENTS TECTONIQUES ET SEDIMENTAIRES
QUATERNAIRE			0	Prédominance de l'érosion
	TERTIAIRE	PLIOCENE		Déformation de l'Amazonie et surrection rapide des Andes
		MIOCENE	10	Sédimentation détritique sur la côte et en Amazonie
		OLIGOCENE	20	Absence de sédimentation
		EOCENE	30	Importantes déformations dans les Andes
SECONDAIRE		PALEOCENE	40	Sédimentation détritique grossière
			50	Importantes déformations dans la zone côtière et les Andes
			60	Sédimentation de grain moyen
		CRETACE supérieur	70	Emersion des Andes actuelles
			80	Sédimentation détritique fine
		CRETACE "moyen"	90	Emersion de la zone côtière
		100	Extension maximale de la mer	
			110	Premières déformations en compression
	CRETACE inférieur		120	Grande transgression marine
			130	Sédimentation marine limitée à la zone côtière.
	JURASSIQUE			Absence de déformations

Chronologie des principaux événements tectoniques et sédimentaires enregistrés par les bassins sédimentaires andins.

UN STÉTHOSCOPE POSÉ SUR LA CROUTE TERRESTRE

L'étude des mouvements verticaux affectant un bassin, c'est-à-dire de la subsidence, renseigne sur le comportement thermique, mécanique et tectonique de la plaque qui le supporte. La partie externe de la terre est constituée par une couche chaude (≈ 1250°C), dense et visqueuse (asthénosphère), sur laquelle flotte une croûte froide, légère et rigide (lithosphère) qui constitue les plaques mobiles d'environ 100 km d'épaisseur. Différents phénomènes affectant une plaque peuvent donner naissance à un bassin sédimentaire.

La subsidence peut être due à une surcharge. En effet, les plaques obéissent au principe d'Archimède. Quand des sédiments s'accumulent, la plaque s'enfoncé comme un bateau qu'on charge, permettant l'accumulation de sédiments supplémentaires.

Si la plaque est amincie, une dépression se forme en surface (subsidence par amincissement lithosphérique), partiellement compensée par une remontée de l'asthénosphère. Cette dépression constitue un bassin sédimentaire. L'amincissement est généralement dû à une extension tectonique, mais peut aussi être lié à l'érosion de la partie inférieure de la plaque par friction le long d'une zone de subduction. La subsidence thermique est provoquée par la contraction d'une plaque lors de son refroidissement. Quand un bassin sédimentaire se forme par étirement de la lithosphère, la proximité de l'asthénosphère réchauffe d'abord la plaque, qui se refroidit ensuite avec le temps, entraînant sa contraction et la subsidence thermique lente du bassin.



Concrétions calcaires jaunes typiques d'un paléosol (Crétacé "moyen", Sud du Pérou).

La subsidence par flexion est généralement due à l'enfoncement de la bordure d'une plaque sous la surcharge d'une chaîne de montagne en cours de formation. Cette flexion donne naissance à de profondes dépressions allongées et asymétriques, situées au front de la chaîne (bassins d'avant-chaîne). Il existe aussi des flexions moins prononcées mais à plus grande échelle, dues à des déséquilibres thermiques dans l'asthénosphère aux abords des zones de subduction.

Enfin, la surrection ou la déformation d'un bassin sont généralement dues à une tectonique en compression qui donne lieu à des plis, des failles, des érosions et des dépôts détritiques. L'âge maximum de la tectonique est donné par celui des couches les plus jeunes qu'elle affecte, et sa nature peut être déterminée par l'analyse géométrique des déformations et des sédiments associés.



Argiles bigarrées et calcaires clairs lacustres (Crétacé terminal, Bolivie).

Photo: Christiane Jabbard

Depuis 130 Ma, les Andes ont vu se succéder plusieurs sortes de bassins sédimentaires qui ont parfois évolué d'un type à un autre, ou ont été déformés et soumis à l'érosion.

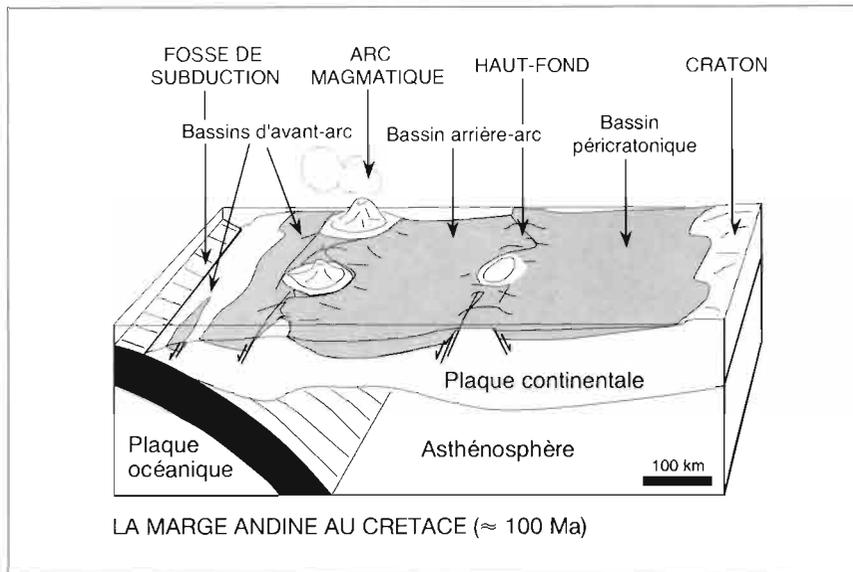
LES BASSINS SÉDIMENTAIRES ANDINS

La formation des Andes a commencé il y a quelque 100 Ma (Crétacé moyen), mais la chaîne andine n'a émergé définitivement qu'il y a environ 65 Ma (fin du Crétacé). Les géologues de l'Orstom se sont donc attachés principalement à l'étude des bassins sédimentaires crétacés ou plus jeunes. Avant 65 Ma, la mer occupait la plus grande partie du bord occidental de la plaque sud-américaine, et les déformations tectoniques compressives, qui donneront naissance à la chaîne des Andes, ne se manifestent

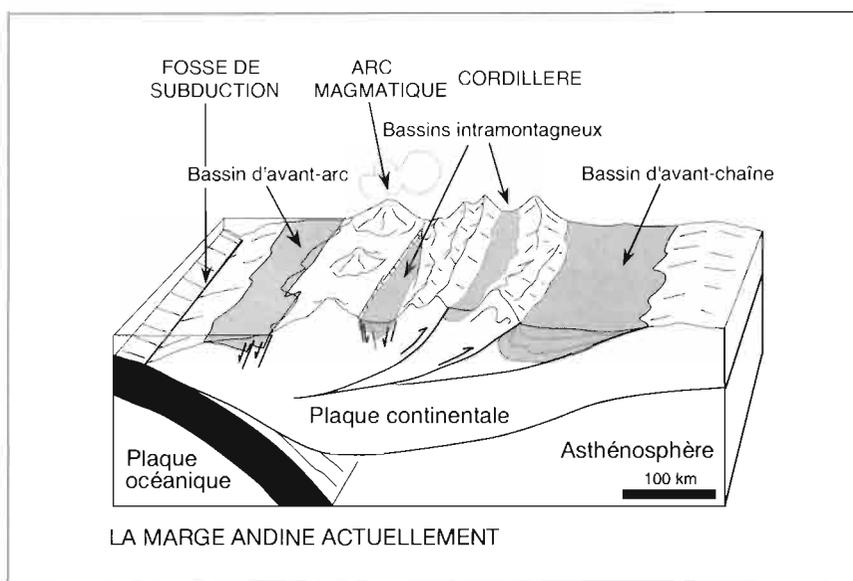
The origin of the Andes : sedimentary basins tell their story

The Andes of Bolivia, Peru and Ecuador are a typical example of a mountain belt created by the subduction of an oceanic plate beneath a continental plate (in this case the Pacific Ocean plate subducting beneath South America). For the past ten to fifteen years, Orstom geologists have been studying the sedimentary basins of the Andean belt so as to establish how and when the belt was formed. From this research they have been able to date the main sedimentary and tectonic events that have affected the Andes over the past 100 million years and so disclose the successive geographical patterns of the belt in the process of uplifting. Further, analysis of sedimentary basins is yielding impor-

tant information about the behaviour of the lithospheric plates involved in the subduction process. Such analysis is therefore a useful tool for determining the relationship between the subduction processes and tectonic events responsible for the formation of Andean-type mountain belts. The sedimentary basins of the coastal and off-shore zones and the eastern, Amazonian basins contain major fossil fuel reserves and are being studied in close liaison with the national oil companies of Ecuador, Peru and Bolivia. The intermontane basins of the Andes, which are of more purely scientific interest, are being studied in cooperation with Peruvian and Ecuadorian universities.



LA MARGE ANDINE AU CRÉTACÉ (≈ 100 Ma)



LA MARGE ANDINE ACTUELLEMENT

Coupes schématiques de la marge andine (Pérou) au Crétacé (= 100 Ma) et actuellement.

.....

alors que localement. Ce grand bassin marin a enregistré à la fois les phénomènes globaux comme les grands cycles eustatiques ou les changements climatiques, et les phénomènes géodynamiques liés à l'évolution de la marge andine : changements dans la vitesse ou la direction de la convergence entre plaques océanique et continentale, arrivées d'arcs volcaniques océaniques dans la subduction, etc.

A partir de 65 Ma, les déformations en compression se généralisent et fragmentent le grand bassin sédimentaire marin en bassins plus petits dont l'évolution est directement contrôlée par la tectonique et ses conséquences (reliefs, érosion) locales ou régionales, les phénomènes géodynamiques globaux n'y ayant que peu ou pas d'influence. Les Andes en cours de surrection séparent des bassins côtiers essentiellement marins, situés en bordure de la plaque sud-américaine (bassin d'avant-arc), d'un grand bassin plus vaste, surtout continental, s'étendant sous l'actuelle forêt amazonienne (bassin d'avant-chaîne).

Les bassins d'avant-arc, de par leur situation, enregistrent les événements liés au processus même de subduction. On y "voit" par exemple les mouvements latéraux (décrochements) provoqués par une subduction oblique, la subsidence liée à l'érosion de la base de la croûte continentale le long du plan de subduction, ou encore l'arrivée d'obstacles portés par la plaque océanique dans la zone de subduction.

Le bassin d'avant-chaîne, situé au pied oriental des Andes, est rempli de sédiments détritiques issus de l'érosion des reliefs situés à l'Ouest. Sa série sédimentaire enregistre la flexion de la plaque sud-américaine sous le poids des Andes en cours de formation, et les étapes de l'avancée vers l'Est du chevauchement de la chaîne andine sur l'ancien bassin marin maintenant émergé.

D'autres bassins sédimentaires, actuellement perchés dans les Andes, sont nés au sein même des reliefs en cours de formation (bassins intramontagneux) et sont directement contrôlés par la tectonique andine au Tertiaire. Leur remplissage enregistre les déformations dues aux contraintes tectoniques à l'origine de la chaîne, la surrection saccadée des reliefs qui les entourent, ainsi que les changements paléogéographiques et les événements magmatiques qui affectent les bassins et leurs zones d'apports sédimentaires.

UN PARTENARIAT INDUSTRIEL ET UNIVERSITAIRE

Ces recherches sur les bassins sédimentaires andins sont réalisées en partenariat avec des institutions boliviennes, péruviennes et équatoriennes. L'étude par l'Orstom des bassins anciens est menée en collaboration avec les universités nationales, intéressées par les implications théoriques et pédagogiques de ces travaux. Mais les principaux partenaires de ces programmes sont les compagnies pétrolières nationales des pays andins (Equateur, Pérou et Bolivie), puisque la matière organique qui a évolué, après maturation, en pétrole brut s'est déposée dans ces bassins, principalement entre 105 et 85 Ma.

L'étude du bassin d'avant-chaîne andin s'effectue également en relation étroite avec les compagnies pétrolières. En effet, le pétrole piégé dans les structures de ce bassin constitue une ressource essentielle de l'économie des pays andins. De plus, la forêt amazonienne empêche pratiquement toute observation directe des sédiments anciens, et les seules informations sont fournies par les puits forés pour l'exploration ou l'exploitation pétrolières. Les bassins côtiers sont également étudiés en relation avec les compagnies pétrolières, puisque plusieurs d'entre eux contiennent aussi du pétrole, et que leur partie immergée n'est connue que par la prospection sismique effectuée par ces compagnies.



Photo: Encarnación Jaramilla

Déformations de sédiments par glissements gravitaires (slumps) (Crétacé terminal ou Paléocène, Sud de l'Equateur).

.....

Pour en savoir plus

Barragán R., Baudino R., Marocco R., 1995. Geodynamic evolution of the intermontane Chota basin, Northern Ecuador. *J. South Am. Earth Sci.*, sous presse.

Jaillard E., 1994. Kimmeridgian to Paleocene tectonic and geodynamic evolution of the Peruvian (and Ecuadorian) margin. *In* : Cretaceous tectonics in the Andes, J.A. Salfity, ed., 101-167, Earth Evolution Sciences, Vieweg & Sohn Publ., Braunschweig/Wiesbaden.

Jaillard E., Ordoñez M., Benitez S., Berrones G., Jiménez N., Montenegro G., Zambrano I., 1995. Basin development in an accretionary, oceanic-

floored forearc setting : Southern coastal Ecuador during late Cretaceous to late Eocene times. *In* : Petroleum Basins of South America, A.J. Tankard, R. Suárez, H.J. Welsink, eds., Am. Ass. Petrol. Geol. Mem. 62, 615-631.

Jaillard E., Soler P., 1995. The Cretaceous to Early Paleogene tectonic evolution of the northern Central Andes and its relations to geodynamics. Tectonophysics, sous presse.

Lavenu A., Marocco R., 1984. Sédimentation continentale et tectonique d'une chaîne liée à une zone de subduction: l'exemple des Andes centrales (Pérou-Bolivie) pendant le Tertiaire. Bull.

Centres Rech. Expl.-Prod. Elf-Aquitaine, 8, 57-70.

Lavenu A., Noblet C., Winter T., 1995. Neogene ongoing tectonics in the southern Ecuadorian Andes. Analysis of the evolution of the stress field. *J. Struct. Geol.*, 17, 47-58.

Marocco R., Baudino R., Lavenu A., 1995. The intermontane Neogene continental Basins of the Central Andes of Ecuador and Peru : Sedimentologic, tectonic and geodynamic implications. *In* : Petroleum basins of South America, A.J. Tankard, R. Suárez, H.J. Welsink, eds., Am. Ass. Petrol. Geol. Memoir, 62, 597-613.

Noblet C., Lavenu A., Schneider F., 1988.

Étude géodynamique d'un bassin intramontagneux tertiaire sur décrochements dans les Andes du Sud de l'Équateur : l'exemple du bassin de Cuenca. *Géodynamique*, 3, 117-138.

Noblet C., Lavenu A., Marocco R., 1995. Tectonics of the Andes : a notion of continuum. Tectonophysics, sous presse.

Sempere T., 1994. Kimmeridgian (?) to Paleocene tectonic evolution of Bolivia. *In* : Cretaceous tectonics in the Andes, Salfity J.A., ed., 168-212, Earth Evolution Sciences, Vieweg & Sohn Publ., Braunschweig/Wiesbaden.



Photo: Encarnación Jaramilla

Les sédiments sont le plus souvent étudiés le long de gorges ou de vallées formant des coupes naturelles empruntées par des routes.

Trace de dinosaures à la surface d'un banc de grès (Crétacé terminal, Bolivie).



Troncs silicifiés (Crétacé "moyen", Sud de l'Equateur).

Las cuencas sedimentarias : testimonio del nacimiento de los Andes

Los andes de Bolivia, Perú y Ecuador son un ejemplo típico de región montañosa, resultado de la subducción de una placa oceánica por debajo de una placa continental (en este caso, la placa del océano Pacífico que se desliza bajo la del continente Sudamericano). Desde hace 10 o 15 años, un equipo de geólogos de Orstom ha venido estudiando cómo y cuándo se formaron las cuencas sedimentarias de la región andina. Dichos estudios han permitido estimar cuándo ocurrieron los principales fenómenos sedimentarios y tectónicos que afectan la cordillera andina desde hace unos 100 millones de años, e identificar los sucesivos patrones geográficos de la región en el transcurso de su formación. Además, el análisis de las cuencas sedimentarias ha arrojado datos impor-

tantes sobre el comportamiento de las placas litosféricas implicadas en el proceso de subducción. Dicho análisis es, por lo tanto, una herramienta útil para determinar la relación existente entre los procesos de subducción y los fenómenos tectónicos que han dado origen a las cordilleras de tipo andino. En las cuencas sedimentarias de la zona costera y de mar adentro, así como en las cuencas orientales del Amazonas, existen yacimientos petrolíferos importantes, que actualmente son objeto de estudios por parte de las compañías petroleras nacionales de Perú, Ecuador y Bolivia. Las cuencas intra-montañas de los Andes, de interés puramente científico, están siendo estudiadas en cooperación con universidades peruanas y ecuatorianas.

L'étude des bassins intra-montagneux, dont les applications sont plus théoriques, est effectuée principalement en relation avec les universités d'Equateur et du Pérou. Etant souvent situés à des altitudes importantes et recoupés par de profondes vallées, ils présentent d'excellentes conditions d'affleurement et d'observations, qui en font des lieux privilégiés pour la formation des étudiants à la géologie de terrain ■

Etienne Jaillard, Alain Lavenu et René Marocco
Département "Terre, Océan, Atmosphère"
UR "Histoire et structure de la lithosphère"

Jaillard Etienne, Lavenu Alain, Marocco René

Les bassins sédimentaires : témoins de la naissance des Andes

ORSTOM Actualités, 1996, (49), p. 23-30. ISSN 0758-833X