

# **Géodésie, géodynamique et cycle sismique en Equateur**

**J. M. Nocquet**

Géosciences Azur,

Université de Nice – Sophia Antipolis, CNRS, IRD, OCA.

250, rue A. Einstein – Valbonne, France

**Patricia Mothes**

Instituto Geofísico/Departamento de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional

calle Ladrón de Guevara

Quito, Ecuador

Corresponding author: nocquet@geoazur.unice.fr

## **Abstract**

Spatial geodesy now enables us to monitor the Earth's surface motion at the millimeter level in a global reference and provides new constraints on the process controlling the present-day crustal deformation. We review previously published GPS based works in the northern Andes and present preliminary results from a continuous GPS network along the Ecuadorian coast. At the plate scale, geodetic estimates indicate that the Nazca plate is converging towards South America at 58 mm/yr in a N83°E direction, along the Ecuadorian margin. This rapid oblique subduction causes two distinct effects that contribute to the observed GPS velocity field in Ecuador : (1) locking along the subduction causes elastic stress to accumulate along the plates interface and induces shortening of the overriding plate. This elastic stress will be released in future earthquakes (2) long-term motion of the Northern Andean Block towards NNE with respect to the South America plate. In order to separate the two effects, we use recently published quaternary slip rates along major faults and estimate the motion of the Northern Andean block to be 8.7 mm/yr in a N35°E direction with respect to South America. The part of the oblique convergence accommodated by the Northern Andean block motion is only 30% and reflects a partial partitioning of the oblique Nazca/South America convergence. Residual velocities in a northern Andean block reference frame are then interpreted in term of locking along the subduction. The average coupling coefficient is found to be ~40% in the rupture area of the great 1906 Mw=8.8 earthquake. It decreases to ~20% further south where

the Carnegie ridge is subducting beneath South America. This result suggests that the Carnegie ridge, by change the nature of the interplate contact, defines the southern limit of extension for large subduction earthquake.

## **Introduction**

Aujourd'hui, les systèmes de géodésie spatiale et en particulier le Global Positioning System (GPS), en offrant la possibilité de déterminer la position de points avec une précision millimétrique permet de quantifier les mouvements de la surface terrestre et apporte des informations essentielles permettant de modéliser les processus responsables de la déformation crustale. En Equateur, les premières campagnes de mesures GPS réalisées en 1994 et 1996 (Trenkamp et al., 2002, White et al., 2003) ont permis de contraindre au premier ordre l'accumulation des contraintes le long de l'interface de subduction. Nous présentons les résultats préliminaires d'un réseau GPS permanent initié en 2007. Bien que préliminaires, les premières vitesses estimées montrent que la déformation actuelle provient de la contribution de deux phénomènes distincts : (1) la déformation élastique associé au blocage partiel de l'interface de subduction le long de la marge équatorienne (2) le mouvement long terme du bloc nord-andin par rapport à la plaque Amérique du Sud. Séparer ces deux contributions reste un problème difficile. Cependant, les informations indépendantes fournies par les études tectoniques permettent de proposer la première estimation de la cinématique du bloc nord-andin et de ré-évaluer les modalités de l'accumulation des contraintes élastiques induites par la subduction de la plaque Nazca sous le bloc nord-andin.

### **1. Le système GPS : principe**

Au début des années 1970, le département de la défense Américain décidait de mettre en place un système satellitaire de navigation temps réel permettant d'obtenir sa position sur n'importe quel endroit de la Terre avec une précision de quelques mètres. D'abord conçu pour des applications militaires, le système s'est ensuite ouvert aux applications civiles et en particulier scientifiques.

Les 24 satellites NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging) sont répartis sur 6 plans orbitaux (4 par plan) dont l'inclinaison est de  $55^\circ$  par rapport au plan équatorial. Ils

orbitent à une altitude de 20 000 km au-dessus de la surface terrestre (soit 3 fois le rayon de la Terre) avec une période de révolution d'environ 12 heures. Le principe du positionnement par GPS repose sur la mesure du temps de parcours d'une onde électromagnétique entre un satellite et un récepteur. Si l'on connaît la position d'un satellite, la date à laquelle un signal a été émis et la date à laquelle on le reçoit, on peut alors en déduire que l'on se situe sur une sphère centrée sur le satellite et de rayon  $c \cdot \Delta t$ , où  $c$  est la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique ( $c \sim 300\,000$  km/s) et  $\Delta t$  le temps de propagation de l'onde entre le satellite et le récepteur. Lorsque l'on reçoit le signal de 3 satellites, on peut ainsi déterminer sa position qui est l'intersection des 3 sphères centrées sur les satellites. En pratique, l'horloge du récepteur présente une dérive, qui induit des erreurs de positionnement de plusieurs dizaines de kilomètres. Pour corriger de cet effet, on a besoin d'un quatrième satellite pour estimer simultanément la position et le décalage de l'horloge du récepteur. C'est pourquoi quatre satellites vus simultanément sont nécessaires pour déterminer une position.

Les géodésiens ont développé plusieurs méthodes pour obtenir une précision millimétrique à partir des signaux des satellites GPS : en observant le même point pendant plusieurs heures ou plusieurs jours, des milliers d'observations sont utilisables pour le calcul d'une position. Les récepteurs géodésiques sont de plus capables de mesurer non seulement le message envoyé par les satellites GPS mais aussi la phase de l'onde électromagnétique qui porte le message GPS, et cela avec une précision de l'ordre du millimètre. Les géodésiens recalculent de plus l'orbite de chaque satellite avec une précision de quelques centimètres ( $< 5$  cm). Pour ce calcul, la communauté géodésique a décidé de mettre en commun les données des stations GPS permanentes et de créer un service scientifique dédié à cette tâche. Il s'agit de l'IGS (International GNSS Service for Geodynamics, <http://igsb.jpl.nasa.gov>) qui centralise aujourd'hui les données d'environ 350 stations dans le monde. Les stations GPS des îles Galapagos et de Riobamba participent à ce réseau international. Enfin, l'obtention d'une précision millimétrique nécessite de corriger très finement le retard subi par l'onde GPS lors de sa traversée de l'atmosphère. Entre 60 et 800 km d'altitude, l'onde traverse des couches de gaz fortement ionisé ou le retard de l'onde est proportionnel à la fréquence de l'onde électromagnétique. Les satellites GPS en utilisant deux longueurs d'onde différentes (19 et 21 cm) permettent de s'affranchir de cet effet. Dans les couches basses de l'atmosphère, l'onde est réfractée. Si la partie hydrostatique de ce retard est bien modélisée, les effets de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère restent un facteur limitant encore la précision de la composante verticale à environ 1 cm.

Les résultats présentés dans cette étude proviennent d'un calcul réalisé avec le logiciel GAMIT/GLOBK (Herring et al, 2008) incluant, en plus des sites équatoriens, des données de stations permanentes sur la plaque Nazca et Amérique du Sud. La figure 1 montre l'évolution de la position du point ESMR (Esmeraldas, Equateur) par rapport à BOGT (Bogota, Colombie). Nous voyons que la dispersion des mesures est très faible, de l'ordre de 2-4 mm. Même si la série temporelle comporte un peu moins d'un an de mesure, le raccourcissement de 12.1 mm/an entre les deux points est déjà significatif et la précision de sa détermination est de l'ordre de 2-3 mm/an, une précision déjà comparable aux incertitudes des résultats publiés à partir de mesures de campagne (Trenkamp et al., 2002). La solution obtenue a de plus été combinée avec une solution globale IGS pour améliorer la précision du référentiel Amérique du Sud. Ce référentiel sera utilisé pour représenter les vitesses.

Notre solution montre une rotation dans le sens direct des vecteurs vitesse d'environ 30° par rapport à la solution proposée par Trenkamp et al. (2002). Nous attribuons cette différence à une réalisation différente du référentiel de la plaque Amérique du Sud. Avec des séries temporelles plus longues et plus nombreuses pour les sites localisés sur la partie stable de la plaque Amérique du Sud, notre estimation est plus robuste. La composante nord, plus forte dans notre solution contient clairement le mouvement vers le nord-est du bloc nord-andin dont la détermination est présentée dans le paragraphe 3.

## **2. Cinématique des plaques en Amérique du sud**

L'Equateur est situé sur la zone de frontière de plaque qui accommode le mouvement de convergence de la plaque océanique Nazca vers le continent sud-Américain. Quantifier la cinématique actuelle de la plaque Nazca est un exercice difficile car la plaque Nazca, exclusivement océanique, ne présente que quelques îles et archipels où des mesures de géodésie spatiale sont possibles. Aujourd'hui, deux sites bénéficient de mesures continues : l'île de Pâques et l'archipel des Galapagos. Des mesures de campagnes ont de plus été réalisées sur les îles Robinson Crusoe et San Felix au large du Chili et sur l'île de Malpelo au large de la Colombie (Angermann et al., 1999, Kendrick et al., 2003, Trenkamp et al., 2002). La théorie de la tectonique des plaques postule que puisque les plaques sont rigides, leur

cinématique est parfaitement décrite par un vecteur taux de rotation  $\underline{\omega}_p$  et que la vitesse d'un point  $M$  appartenant à la plaque  $p$  est donnée par la relation:

$$\underline{v}(M) = \underline{\omega}_p \times \underline{OM}$$

où  $\underline{v}(M)$  désigne le vecteur vitesse horizontale d'un point  $M$  à la surface de la Terre appartenant à la plaque  $p$ , et  $\underline{OM}$  est le vecteur joignant le centre de la Terre au point  $M$ . Au minimum, deux points sont nécessaires pour déterminer  $\underline{\omega}_p$ , mais la précision de la détermination de  $\underline{\omega}_p$  dépend du nombre de points, de leur repartition géographique au sein de la plaque, de la précision avec laquelle est déterminée  $\underline{v}(M)$  et du niveau de déformation interne de la plaque.

La meilleure estimation disponible aujourd'hui est fournie par Kendrick et al. (2003) qui utilisent des mesures GPS permanentes aux Galapagos, et des mesures de campagnes sur l'archipel de Robinson Crusoe et l'île de San Felix au large du Chili. En utilisant ces sites, l'estimation d'un vecteur taux de rotation indique des vitesses résiduelles au dessous du millimètre par an. L'île de Pâque possède une station GPS permanente du réseau globale IGS. Cependant, sa vitesse résiduelle estimée par rapport au mouvement d'ensemble de la plaque Nazca est de l'ordre de 5-6 mm/an. Comme l'indiquent Kendrick et al. (2003), ce résultat suggère l'existence de déformation autour de cette île et elle ne peut pas être incluse dans la détermination du mouvement de la plaque Nazca. Un site a été mesuré par GPS de campagne sur l'île de Malpelo (Trenkamp et al., 2002, MALS) au large de la Colombie. Il présente une vitesse résiduelle de 5 mm/an vers le sud par rapport au pôle fourni par Kendrick et al. (2003). Une correction moyenne de  $\sim 5$  mm/an vers le nord de la solution de Trenkamp et al. (2002) permet de résoudre le problème apparent et permet de rendre cohérents les résultats de Trenkamp et al. (2002) et les nôtres.

Pour estimer le mouvement de la plaque Amérique du Sud, nous pouvons utiliser les sites du réseau de suivi mondial IGS (<http://igs.cb.jpl.nasa.gov>). La figure 2 montre les vitesses résiduelles des sites une fois retiré le mouvement de la plaque Amérique du Sud. Pour les sites localisés sur la partie stable du continent, nous voyons que ces vitesses résiduelles sont inférieures à 1 mm/an (rms=0.4 mm/an). Avec une douzaine de sites géodésiques bien répartis, un excellent accord entre le mouvement des sites et le mouvement global de la

plaque, la cinématique de l'Amérique du Sud est bien déterminée et définit un référentiel robuste dans lequel nous pouvons représenter les mouvements mesurés en Equateur.

Le long de la marge Equatorienne, le vecteur rotation estimé par Kendrick et al. (2003) prédit une vitesse de convergence qui décroît de 58 mm/an à la latitude 5°S à 55 mm/an à 2°N dans un azimuth quasi-constant de 83°E (figure 3). L'incertitude sur cette détermination est très faible, inférieure au millimètre par an et au degré en direction.

Si les mesures géodésiques permettent de quantifier les mouvements actuels (i.e. à l'échelle de quelques années) des plaques, une information sur leur mouvement passé peut être obtenu à partir de l'histoire des anomalies magnétiques le long des dorsales océaniques et des directions des failles transformantes. A partir de ces informations, le modèle NUVEL-1A (DeMets et al., 1990, DeMets et al., 1994) propose un modèle cinématique qui moyenne les mouvements sur 3.16 Ma. Dans ce modèle, la vitesse de convergence prédite le long de la marge Equatorienne est de 67 mm/an soit 20% plus rapide que l'estimation géodésique. La vitesse d'ouverture le long de la frontière Nazca-Pacifique semble donc diminuer au cours du temps (Norabuena et al., 1999), ainsi que celle entre l'Amérique du Sud et l'Afrique (Cande et Kent, 1992, Nocquet et al., 2006). Certains auteurs proposent que ce ralentissement soit lié à la croissance des Andes qui augmente la résistance à l'enfoncement du slab sous les Andes (Iaffado et al., 2006).

### **3. Le mouvement du bloc Nord-Andin**

En Equateur, entre l'intérieur stable de la plaque Amérique du Sud et la fosse de subduction s'étend une zone de déformation, qui comprend la Cordillère et la plaine côtière. La figure 3 représente les vitesses de sites géodésiques exprimées dans un référentiel Amérique du Sud défini précédemment. Malheureusement, il n'existe pas de mesures disponibles dans la plaine côtière et en Amazonie et peu de mesures dans la cordillère. Les vitesses observées indiquent clairement deux comportements différents : (1) les sites de la côte ont une direction de N56-60°E avec une vitesse allant de 14 mm/an (CHIS) à 20 mm/an (ESMR) (2) les sites dans la cordillère indiquent un mouvement vers l'est d'environ 5 mm/an pour RIOP (Riobamba), un site bien déterminé dans notre solution. Les vitesses des sites sur la côte ne peuvent pas être expliquées par la convergence oblique Nazca-Amérique du Sud, car leur direction par rapport à l'Amérique du Sud stable est beaucoup plus oblique que la direction de convergence

Nazca/Amérique du Sud. Pour interpréter ce résultat, nous sommes donc obligés de faire quelques hypothèses que nous appuyons sur des observations tectoniques.

Des études tectoniques ont montré que la zone comprise entre la cordillère et la côte, appelé bloc nord-andin, est en translation dans une direction approximativement NNE par rapport à l'Amérique du Sud stable et que ce mouvement se poursuit en Colombie et jusqu'au Venezuela (Pennington, 1981, Kellog et Bonini, 1982). Nous faisons donc l'hypothèse que le bloc nord-andin présente peu de déformation interne en Equateur et que sa cinématique peut être modélisée par une rotation rigide à la surface de la sphère. Pour contraindre sa cinématique, trois types d'observations peuvent être utilisées : les vitesses de glissement quaternaires le long de failles majeures, les vecteurs glissement des séismes de subduction et les mesures géodésiques. Cependant, les deux derniers types d'observations ne suffisent pas à déterminer de manière unique la cinématique du bloc nord-andin. Notre approche consiste donc à utiliser les données tectoniques seules pour déterminer la cinématique du bloc nord-andin et à vérifier la validité du résultat obtenu sur les deux autres types d'observation.

En allant du sud au nord, les estimations des vitesses de glissement sur les failles sont : (1) sur le système de failles décrochantes dextres de Zampabala dans le golf de Guayaquil, Dumont et al. (2006) ont analysé les décalages systématiques du réseau de drainage. Dumont et al. (2006) concluent à une vitesse de glissement comprise entre 5.8 et 8 mm/an sur une structure orientée N40°E ; (2) Au nord-est du golf de Guyaquil, Winter et al. (1993) proposent une vitesse de glissement dextre de 2.6-4.6 mm/an le long de la faille de Pallatanga de direction N30°E ; (3) Ego et al. (1996) proposent une vitesse de glissement sur la faille de Chingual-La Sofia de  $7\pm 3$  mm/an dans une direction N35°E, sur la base du décalage observé sur une coulée pyroclastique datée de 8600 ans. Dans la même zone, Tibaldi et al., (2007) à partir d'une datation basée sur une chronologie climatique et des décalages observées sur des photos aériennes et sur le terrain proposent des vitesses holocènes de 8.5-11.4 mm/an.

Ces résultats sont résumés dans la table 2 et représentés dans la figure 3. Nous faisons dans un premier temps, l'hypothèse que le bloc situé à l'est de ces failles peut-être assimilé cinématiquement à la partie stable de l'Amérique du Sud. Cette hypothèse est sans aucun doute fautive, comme l'indique l'activité sismique sur des chevauchements au pied de la cordillère orientale ou le chevauchement sub-andin (figure 3). Cependant, comme nous le

verrons, nous discuterons sur la base des prédictions du modèle obtenu la validité de cette hypothèse.

Avec ces observations, nous pouvons réaliser l'estimation du vecteur rotation du bloc nord-andin par rapport à l'Amérique du Sud stable. Une première estimation incluant l'ensemble des résultats prédit en Equateur un mouvement du bloc nord-andin de 7.3 mm/an dans une direction N36°E. Cependant, l'estimation indique un désaccord entre la vitesse de glissement proposée par Winter et al. (1993) sur le segment de Pallatanga et les autres estimations de vitesses quaternaires. Cette différence peut refléter un partitionnement du mouvement sur plusieurs structures parallèles dans cette zone et donc une sous-estimation du mouvement du bloc nord-andin par ces auteurs. Nous avons donc choisi de dépendre cette observation. Les résultats de l'estimation du pôle du bloc nord-andin sont données dans la table 2 et prédisent un mouvement moyen du bloc nord-andin en Equateur de 8.7 mm/an dans une direction N35°E.

Deux vitesses géodésiques de notre solution sont utilisables pour vérifier la vraisemblance de ce pôle. La station GPS de Riobamba possède des observations GPS depuis une dizaine d'années et est située à l'est du système de faille de Pallatanga-La Sofia. Sa vitesse résiduelle dans le référentiel bloc nord-andin est de  $1.5 \pm 0.9$  mm/an vers l'est et  $11.0 \pm 2.2$  mm/an vers le sud. Cette vitesse est compatible avec un jeu dextre sur les failles de Pallatanga-la Sofia et avec un mouvement du bloc nord-andin de  $\sim 9$  mm/an vers le NNE. Deuxièmement, dans notre solution, la station de Bogota en Colombie présente une vitesse résiduelle de  $4.4 \pm 0.9$  et  $7.1 \pm 2.1$  mm/an vers l'est et le nord respectivement, par rapport à l'Amérique du Sud stable. Notre prédiction de la vitesse du bloc nord-andin pour Bogota est de 5.0 mm/an (Est) 7.2 mm/an (Nord). Ces deux vérifications suggèrent que notre estimation de la cinématique du bloc nord-andin est, au premier ordre, correcte et que le raccourcissement accommodé sur le front sub-andin est faible (*i.e.*  $< 10$  mm/an).

Les vecteurs glissement des séismes de subduction reflètent le mouvement long-terme entre la plaque Nazca et le bloc nord-andin. La figure 3 présente les mécanismes au foyer des séismes de subduction de profondeur  $< 70$  km et la projection sur un plan horizontal du vecteur glissement associés à chaque séisme. Ces vecteurs glissement indiquent une direction de convergence dans un azimuth moyen de N88°E avec un écart-type de 4°. La direction de convergence Nazca/Amérique du Sud est N83°E, avec une incertitude inférieure au degré

(Kendrick et al., 2003). Nous pouvons donc former un triangle cinématique et résoudre le mouvement du bloc nord-andin (figure 4). Pour résoudre complètement ce triangle, nous devons imposer une direction de mouvement du bloc nord-andin. Avec une direction de mouvement comprise entre  $N30^\circ$  et  $N40^\circ$ , nous obtenons une vitesse du bloc nord andin de  $6.7 \pm 4.9$  mm/an, compatible avec notre proposition du mouvement du bloc nord-andin.

Malgré le petit nombre d'information quantitative disponible pour évaluer le mouvement du bloc nord-andin, la cohérence des résultats obtenus suggère une bonne détermination au premier ordre de sa cinématique.

#### **4. Déformation intersismique sur la subduction équatorienne**

Lorsque la plaque Nazca subduit sous la marge Equatorienne, une partie de l'interface entre la plaque Nazca et la marge Equatorienne reste bloquée. Cette zone accumule alors des contraintes cisailantes qui augmentent avec le temps. C'est le régime inter-sismique. Lorsque ces contraintes dépassent un certain seuil, un glissement est initié et un séisme a lieu. La phase intersismique peut être modélisée en tirant profit de la linéarité des équations de l'élasticité. En superposant un état où l'ensemble de l'interface entre les plaques est en glissement libre (donc sans déformation) et un état en glissement dans le sens normal, on peut reproduire la déformation intersismique observée en surface. C'est le modèle de « back-slip » introduit par Savage en 1983 qui permet de relier la déformation à la surface de la plaque chevauchante mesurée par GPS avec le blocage le long de l'interface de subduction. Plus précisément, le blocage sur l'interface de subduction induit un raccourcissement de la plaque chevauchante. Les gradients de vitesses horizontales sont fonction de la vitesse de convergence, du pendage de la zone bloquée et de son étendue spatiale.

Nous étudions le couplage mécanique le long de l'interface de subduction et proposons une estimation de ce couplage capable de reproduire les observations de trois sites permanents installés depuis 2007 sur la côte Equatorienne (CHIS, Chispas près de Manta), PPRT (Punta Prieta entre Bahia de Cadaques et Pedernales) et ESMR (Esmeraldas).

Pour cela, nous utilisons la géométrie de l'interface de subduction proposée par Pontoise et Monfret (2004). Leur étude est basée sur un réseau sismologique temporaire incluant 10 stations à terre et 13 sismomètres de fond de mer (OBS) déployés pendant une période de

trois semaines dans une région allant du nord de Manta à la frontière Equateur-Colombie. Les observations acquises lors de cette campagne ont permis la détermination d'un modèle de vitesse sismique et une localisation précise des hypocentres. Ces auteurs ont conclu à une géométrie du contact interplaque en deux plans : de la fosse à environ 120 km, l'interface présente un pendage faible de  $10^\circ$ . Plus à l'est, le pendage s'accroît et devient de l'ordre de  $35^\circ$ . Les points géodésiques que nous avons déterminés sont localisés sur la côte Equatorienne. Ils n'ont pas de sensibilité au couplage le long de la partie plus pentue de l'interface. Etant donnée la très faible densité de points, nous avons choisi de tester un modèle extrêmement simple. Nous modélisons l'interface de subduction par deux plans de pendage  $10^\circ$  et de largeur 120 km. De la latitude  $-2^\circ\text{S}$  à  $-0.5^\circ\text{N}$ , l'azimut moyen de la fosse est de  $\text{N}13^\circ\text{E}$ . Au nord, nous prenons un azimut de  $\text{N}27^\circ\text{E}$ . Nous imposons la direction de convergence plaque Nazca/bloc nord andin déterminée à partir de notre pôle pour le bloc nord andin et du modèle CAP10 de Kendrick et al. (2003) pour la plaque Nazca. Nous utilisons le formalisme de back-slip décrit précédemment pour reproduire les vitesses géodésiques observées. Dans ce calcul, la vitesse de convergence apparente plaque Nazca/ bloc nord andin est laissée libre. Le rapport entre la vitesse de convergence apparente et la vitesse réelle fournit le coefficient de couplage mécanique entre les deux plaques. Un coefficient de 100% indique que l'ensemble de l'interface est bloqué, un coefficient de 0% indique que les plaques glissent librement l'une par rapport à l'autre.

Les vitesses GPS observées à ESMR et PPRT imposent un coefficient de couplage de 40%. Des valeurs similaires de couplage ont été proposées par Norabuena et al. (1998) pour le coude d'Arica, une zone où des grands séismes de subduction ont eu lieu par le passé. Cette valeur reflète probablement le fait que des aspérités sont localement bloquées (donc un coefficient de couplage local de 100%) tandis que les zones autour glissent librement. Cette valeur de 40% reflète donc une moyenne de taux d'accumulation des contraintes sur l'interface.

Pour la zone de Manta, nous obtenons un coefficient de couplage de 20%, deux fois moins élevée que pour le segment nord. La péninsule de Manta est située au sud de l'extension de la rupture du séisme de 1906, et où il n'existe pas de preuve d'occurrence de grands séismes de subduction. Au contraire, cette zone est le siège de séismes récurrents de magnitude  $\sim 6$ . Cette différence de comportement en terme de sismogénèse correspondrait à une interface où de fortes contraintes ont du mal à s'accumuler. Cela peut refléter une nature différente du contact

interplaque dans cette zone où la plaque Nazca porte la ride de Carnégie qui subduit sous le bloc nord andin.

## 5. Discussion

L'ensemble de ces résultats permet de proposer un cadre de réflexion sur la manière dont la convergence oblique Nazca/Amérique du Sud a lieu dans les Andes du Nord. Dans un modèle de partitionnement total, l'interface de subduction accommode la totalité du mouvement perpendiculaire à la fosse tandis que des structures intraplaques accommodent la totalité de la composante parallèle à la fosse. Le cas de la marge Equatorienne semble présenter un cas intermédiaire. Dans le cas du segment nord de direction N27°E, la convergence théorique est de 28 mm/an sur la composante parallèle à la fosse et 41 mm/an sur la composante normale. Le système de faille Pallatanga-La Sofia-Chingual absorbe environ 8 mm/an du mouvement parallèle à la fosse et donc seulement 25-30% de l'obliquité de la subduction.

Dans l'ensemble de cette discussion, nous avons négligé le raccourcissement accommodé dans la cordillère orientale et le chevauchement subandin. Avec les données actuelles, nous ne pouvons pas estimer ce mouvement, mais seulement donner des bornes possibles à ce mouvement. Une borne supérieure est fournie en annulant le vecteur vitesse de CHIS, ce qui revient à supposer que le coefficient de couplage est 0 sur l'interface de subduction. Cela donne une borne supérieure de 11 mm/an dans la direction Est. En supposant que RIOP est entièrement situé sur la zone comprise entre le bloc Nord-Andin et l'Amérique du Sud stable, nous obtenons une valeur de 5.2 mm/an dans une direction SE. Enfin, pour le point S061 situé à Quito, sa vitesse résiduelle dans le référentiel Amérique du sud est de 9 mm/an vers l'Est. Ce point est dans une zone de déformation, mais si nous admettons qu'une partie est absorbée sur des structures correspondant au mouvement du bloc nord andin ce point suggère un raccourcissement de 4.7 mm/an vers l'est. Les incertitudes associées sont fortes. Cependant, si ce raccourcissement est de l'ordre de 5 mm/an, le couplage le long de la subduction passe de 20% à 10% pour la zone de Manta et de 40 à 30% sur le segment nord.

Les données actuelles ne permettent pas encore de parfaitement contraindre l'accumulation des déformations associées au processus de subduction. Les projets actuels, en densifiant les mesures géodésiques permanentes depuis la côte jusqu'au pied de la cordillère, en réalisant

des mesures de campagne et de tectonique active sur la Cordillère et à l'est de celle-ci jusqu'à la partie Amazonienne devraient apporter des réponses quantitatives à ces questions.

## **Bibliographie**

- Angermann D., J. Klotz and C. Reigber, (1999), Space-geodetic estimation of the Nazca–South America Euler vector, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 171, Issue 3, pages 329-334
- Cande, S. C., D. V. Kent, (1992), A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous Cenozoic, *J. Geophys. Res.*, 97(B10):13917-13951, DOI: 10.1029/92JB01202
- DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1990) Current plate motions. *Geophys J Int* 101(2):425-478.
- DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time-scale on estimates of current plate motions. *Geophys Res Lett* 21(20):2191-2194, DOI: 10.1029/94GL02118.
- Dumont, J.F., E. Santana, F. Valdez, J.P. Tihay, P. Usselman, D. Iturralde, E. Navarette, (2006), Fan beheading and drainage diversion as evidence of a 3200-2800 BP earthquake event in the Esmeraldas-Tumaco seismic, *Geomorphology*, 74 (1), p.100-123.
- Ego F., M. Sébrier, A. Lavenue, H. Yepes & A. Egues, (1996), Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes, *Tectonophysics*, Volume 259, Issues 1-3, Pages 101-116.
- Ferland R, Kouba J, Hutchison D (2000), Analysis methodology and recent results of the IGS network combination. *Earth Planets Space* 52(11):953-957.
- Herring T. A., R. W. King and S. C. McClusky, (2008), *GAMIT/GLOBK Reference Manual*, Release 10.33, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Iaffaldano G., Bunge H. P., et T. H. Dixon, (2006), Feedback between mountain belt growth and plate convergence, *Geology*, Volume 34, Issue 10 (October 2006) pp. 893–896, DOI: 10.1130/G22661.1
- Kellogg J. N. et W. E. BONINI (1982), Subduction of the Caribbean Plate and Basement, Uplifts in the overriding South American Plate. *Tectonics*, 1, 3, 251-276.

- Kendrick E., M. Bevis, R. Smalley Jr., B. Brooks, R. B. Vargas, E. Lauria, L. P. Souto Fortes, (2003), The Nazca-South America Euler vector and its rate of change, *Journal of South American Earth Sciences* Volume 16, Issue 2, Pages 125-131. doi:10.1016/S0895-9811(03)00028-2
- Nocquet, J.-M., P. Willis et S. Garcia, (2006), Plate Kinematics of Nubia-Somalia of using a combined DORIS and GPS solution, *Journal of Geodesy*, 80, 591-607, DOI : 10.1007/s00190-006-0078-0.
- Norabuena, E., L. Leffler-Griffin, A. Mao, T. Dixon, S. Stein, I. Sacks, L. Ocala & M. Ellis, (1998), Space geodetic observation of Nazca-South America convergence across the Central Andes. *Science* 279 (1998), pp. 358-362.
- Norabuena, E., T. Dixon, S. Stein, and C. Harrison (1999), Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific Plate Motions, *Geophys. Res. Lett.*, 26(22), 3405-3408.
- Pennington, W.D., (1981), Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of North Western South America. *J. Geophys. Res.* 86, 10753-10770.
- Pontoise, B., and T. Monfret (2004), Shallow seismogenic zone detected from an offshore-onshore temporary seismic network in the Esmeraldas area (northern Ecuador), *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, Q02009, doi:10.1029/2003GC000561.
- Savage, J.C., (1983). A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone, *J. geophys. Res.*, 88, 4984-4996.
- Tibaldi A., A. Rovida, C. Corazzato, (2007), Late Quaternary kinematics, slip-rate and segmentation of a major Cordillera-parallel transcurrent fault: The Cayambe-Afiladores-Sibundoy system, NW South America, *Journal of Structural Geology*, Volume 29, Issue 4, Pages 664-680.
- Trenkamp R., J.N. Kellogg, J. Freymueller and H. Mora, (2002), Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *J. S AM. Earth Sci.* 15, pp. 157-171.
- White S.M., Trenkamp R., Kellogg J, (2003), Recent crustal deformation and the earthquake cycle along the Ecuador-Colombia subduction zone, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 216, Number 3, pp. 231-242(12), DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00535-1
- Winter Th., Avouac J.P. & Lavenu A., (1993). Late Quaternary kinematics of the Pallatanga strike-slip fault (Central Ecuador) from topographic measurements of displaced morphologic features. *Geophys. J. Int.*, 115, 905-920.



Long.	Lat.	Ve	Vn	$\sigma_{Ve}$	$\sigma_{Vn}$	$\sigma_{Ven}$	Site
-------	------	----	----	---------------	---------------	----------------	------

Sites utilisés pour définir le référentiel Amérique du Sud

-14.41	-7.95	-0.66	-0.04	0.64	1.44	-0.40	ASC1
-47.88	-15.95	-0.40	0.26	0.63	1.45	-0.32	BRAZ
-44.99	-22.69	0.02	-0.26	0.63	1.41	-0.33	CHPI
-64.47	-31.53	0.86	0.98	0.60	1.38	-0.25	CORD
-38.43	-3.88	-0.16	0.14	0.64	1.46	-0.35	FORT
-52.81	5.25	0.79	0.04	0.62	1.43	-0.29	KOU1
-52.81	5.25	-0.32	0.55	0.62	1.43	-0.30	KOUR
-65.60	-38.00	-3.21	-0.50	0.77	1.41	-0.17	LHCL
-57.93	-34.91	0.41	-0.51	0.61	1.34	-0.28	LPGS
-58.52	-34.57	0.55	-0.26	0.61	1.35	-0.27	S031

Autres sites Amérique du sud

-71.49	-16.47	-3.70	-7.40	0.59	1.46	-0.20	AREQ
-71.53	-37.34	14.59	-1.14	0.62	1.35	-0.20	ANTC
-38.43	-3.88	0.51	1.78	1.52	1.85	-0.09	BRFT
-68.23	-31.60	6.68	0.08	0.61	1.39	-0.22	CFAG
-73.03	-36.84	31.62	9.89	0.59	1.35	-0.20	CONZ
-73.03	-36.84	31.10	10.24	0.59	1.35	-0.20	CONZ
-70.34	-27.38	20.92	5.80	0.67	1.44	-0.19	COPO
-70.88	-53.14	1.84	1.18	0.61	1.16	-0.21	PARC
-67.75	-53.79	1.58	0.85	0.60	1.13	-0.23	RIOG
-70.67	-33.15	21.12	5.48	0.59	1.37	-0.21	SANT
-65.23	-26.84	0.57	1.47	0.73	1.46	-0.19	TUCU
-65.41	-24.73	6.89	0.07	0.60	1.43	-0.24	UNSA

Site Equateur-Colombie

-74.08	4.64	4.39	7.11	0.59	1.43	-0.18	BOGT
-80.73	-1.05	12.07	7.26	0.70	1.49	-0.11	CHIS
-79.72	0.93	16.49	10.95	0.74	1.49	-0.11	ESMR
-80.22	-0.13	15.71	9.37	1.02	1.63	-0.07	PPRT
-78.65	-1.65	3.56	-3.76	0.60	1.46	-0.15	RIOP
-78.49	-0.22	9.68	1.09	0.58	1.45	-0.15	S061

Sites plaque Nazca

-90.30	-0.74	54.34	1.66	0.57	1.45	-0.07	GLPS
-90.30	-0.74	55.53	1.70	0.58	1.46	-0.06	GALA

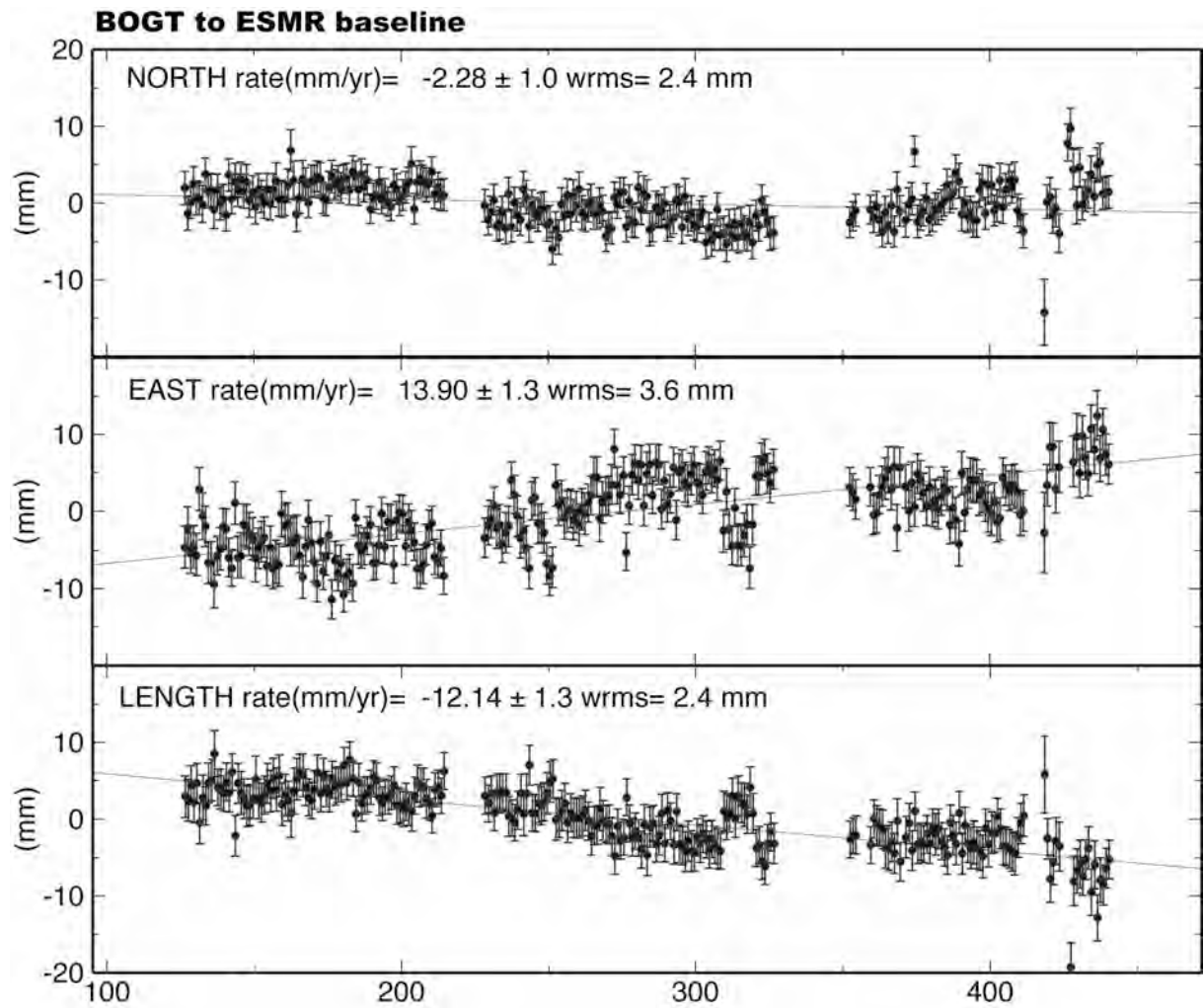
**Table 1** : vitesses de sites GPS permanents exprimés dans un référentiel Amérique du Sud fixe. Long/Lat.. : longitude et latitude en degrés décimaux.  $V_e$ ,  $V_n$  : vitesses vers l'Est et le Nord en mm/an.  $\sigma_{V_e}$ ,  $\sigma_{V_n}$ ,  $\sigma_{V_{en}}$ , écart-types sur les composantes east et nord de la vitesse et coefficient de corrélation entre les composante.

Référence	V	$\sigma$	Az.	Ve	Vn	$\sigma_{Ve}$	$\sigma_{Vn}$	$R_{Ve}$	$R_{Vn}$
Dumont et. al (2005)	6.9	1.1	45	4.9	4.9	0.8	0.8	0.8	1.8
Winter et al. (1993)	3.6	1.0	40	2.3	2.8	0.6	0.8	2.7	4.4
Ego et al. (1996)	7.0	3.0	35	4.0	5.7	1.7	2.5	1.0	1.5
Tibaldi et al. (2007)	10.4	1.0	32	5.5	8.8	0.5	0.8	-0.5	-1.5

Wx	Wy	Wz	W	W_long	W_lat
-0.109E-08	-0.310E-09	0.783E-09	0.079	-164.1	34.6

X	Y	Z
0.179E-18	-0.845E-18	-0.869E-20
	0.418E-17	0.429E-19
		0.429E-20

**Table 2** : estimation du vecteur taux de rotation Bloc Nord-Andin / Amérique du Sud. V :vitesse de glissement quaternaire,  $\sigma$  : erreur sur V, Az. Azimut de la faille, Ve, Vn : vitesse sur les composantes nord et est,  $\sigma_{Ve}$  ,  $\sigma_{Vn}$  erreur sur les composante de la vitesse,  $R_{Ve}$ ,  $R_{Vn}$ : résidus lors de l'estimation du bloc nord-andin. Les données de Winter et al. (1993) ont été dépondérées dans l'estimation du vecteur taux de rotation. Wx, Wy, Wz : composantes du vecteur taux de rotation en repère géocentrique (rad/an). W : vitesse angulaire en degrés par millions d'années. W\_long, W\_lat, position du pôle d'Euler associé. X, Y, Z sont les composantes de la matrice variance-covariance du vecteur taux de rotation. L'estimation indique un wrms de 1.4 mm/an et un facteur de variance a posteriori de 1.9.



**Figure 1 :** Séries temporelles GPS pour le vecteur joignant BOGT (Bogota, Colombie) à ESMR (Esmeraldas, nord Equateur). La distance entre les deux points est de 750 km. L'axe des abscisses indique le numéro de jour depuis le 1<sup>er</sup> Janvier 2007.

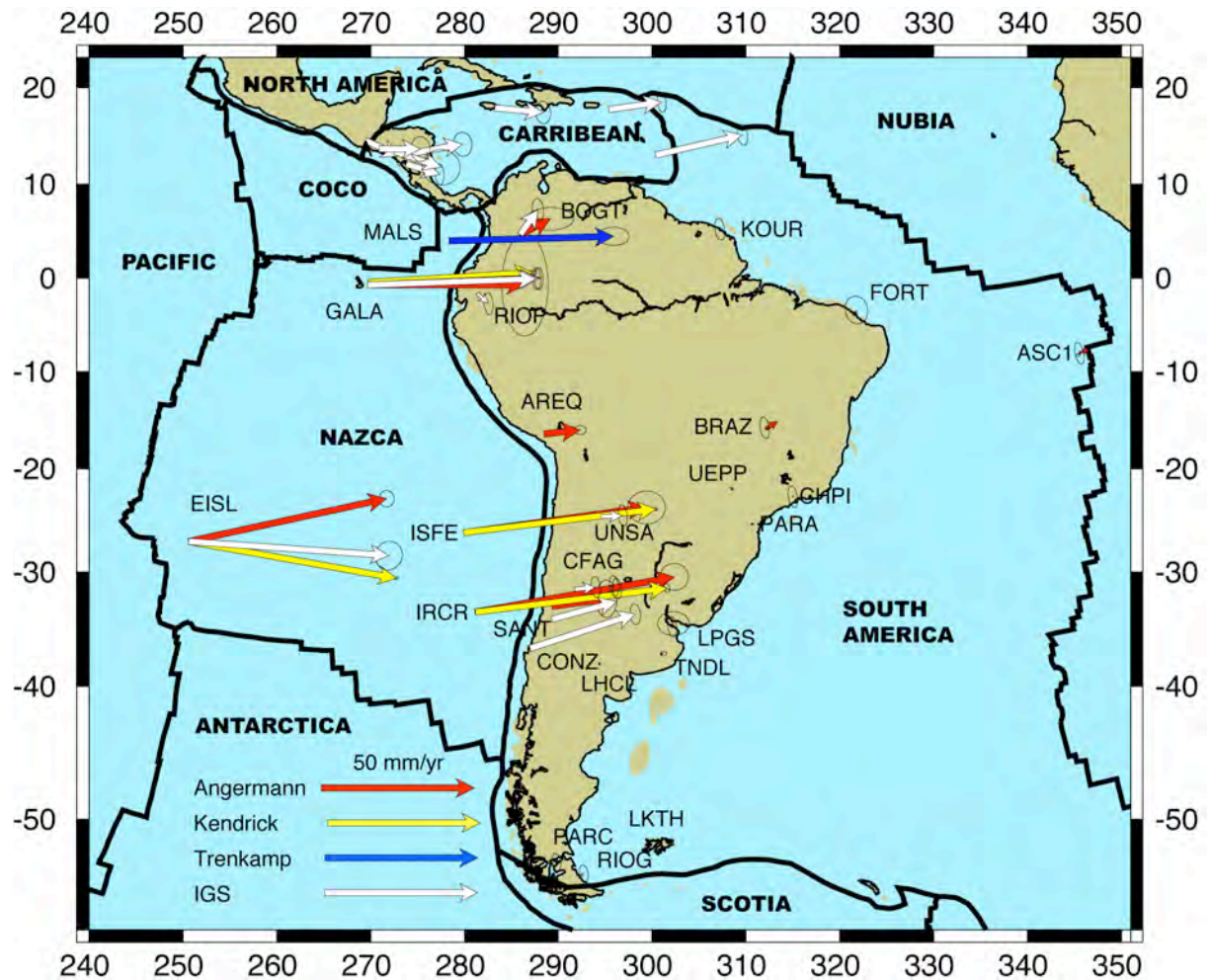
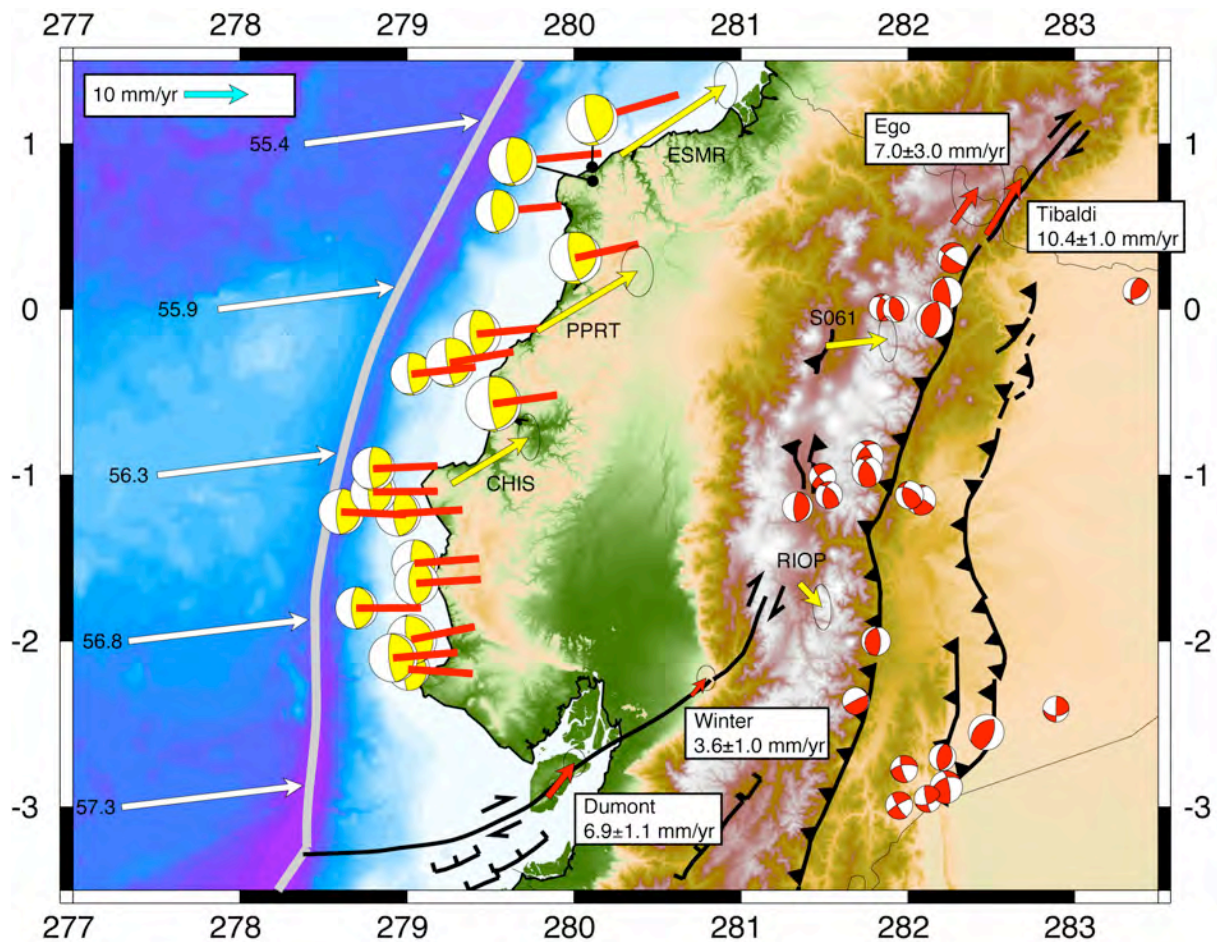
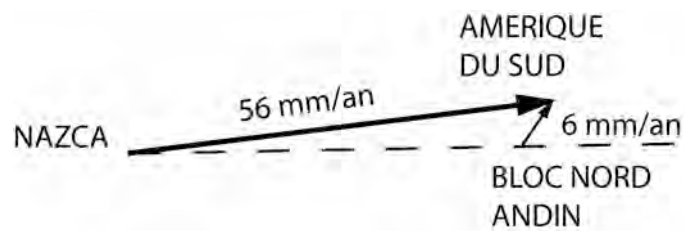


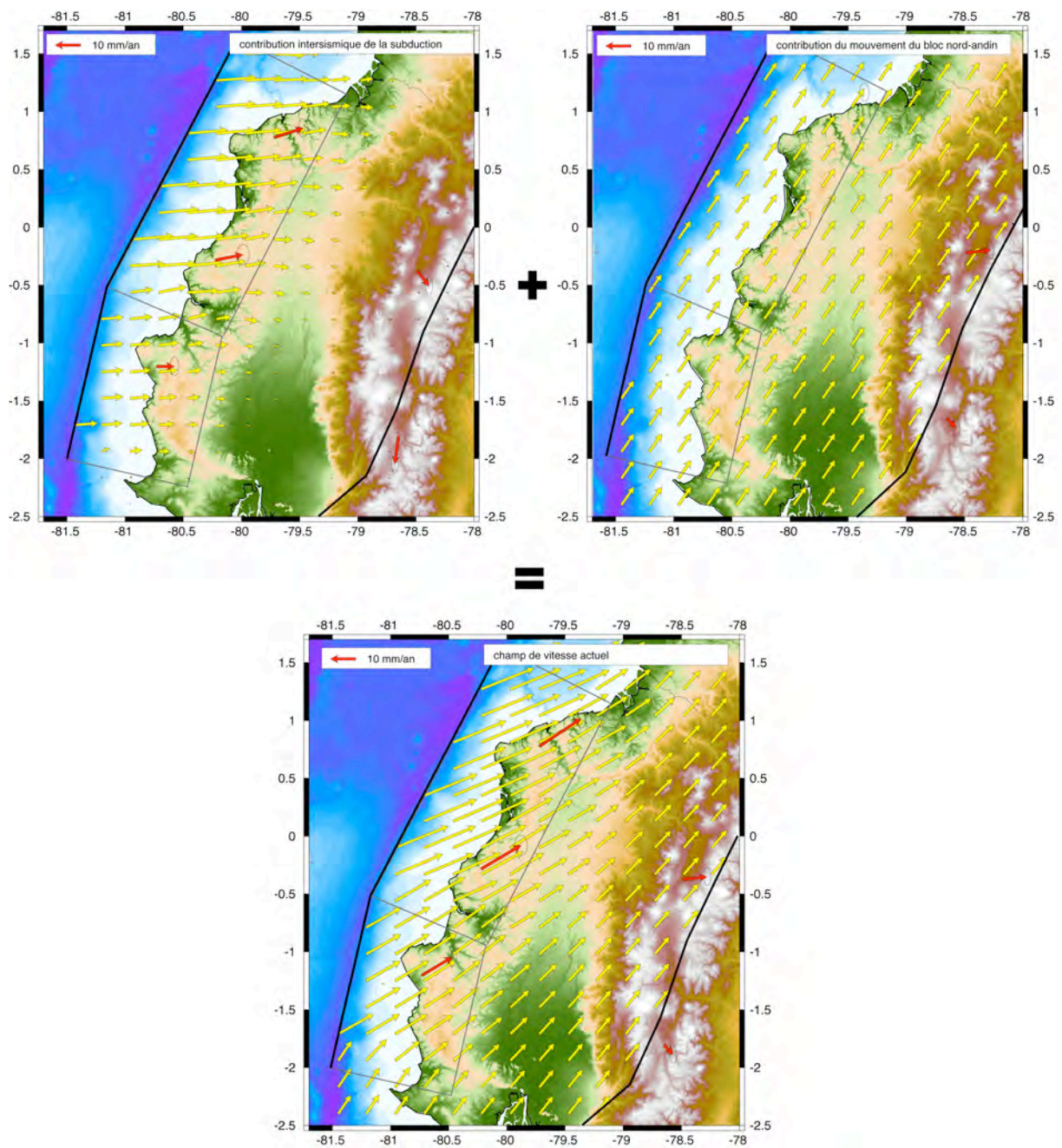
Figure 2 : Cinématique des plaques en Amérique du Sud. Les vitesses sont toutes exprimées dans un référentiel Amérique du sud fixe. Les différentes solutions proviennent de Angermann et al. (1999), Kendrick et al. (2003), Kentramp et al. (2002) et de la solution IGS (Ferland et al., 2000) cumulée au 23 janvier 2008.



**Figure 3** : Données disponibles pour la détermination de la cinématique du bloc nord andin. Les flèches blanches indiquent la vitesse de convergence Nazca/Amérique du Sud prédite par le modèle CAP10 de Kendrick et al. (2003). Les flèches jaunes représentent notre solution géodésique exprimée dans un référentiel Amérique du Sud fixe. Les flèches rouges indiquent les vecteurs glissements sur les failles délimitant la bordure est du bloc nord-andin et utilisée dans la détermination du vecteur taux de rotation (Table 2). Les mécanismes au foyer jaunes représentent les séismes de subduction de magnitude supérieure à 5 avec en rouge la projection horizontale du vecteur glissement. Les mécanismes au foyer rouge représentent les séismes crustaux. Les données de séismes proviennent du catalogue CMT harvard (<http://www.globalcmt.org>) et couvrent la période 1976-2007.



**Figure 4 :** Triangle cinématique entre les plaques Nazca, Amérique du Sud et le bloc nord andin. La flèche Nazca/Amérique du Sud provient de Kendrick et al. (2003). La ligne pointillée indique la direction moyenne du mouvement relatif entre le bloc nord-andin et la plaque Nazca, déterminée à partir des vecteurs glissement des séismes de subduction. La résolution du triangle est faite en imposant une direction du mouvement du bloc nord-andin de  $25^\circ$  par rapport à l'Amérique du sud.



**Figure 5** : Modélisation du champ de vitesse en Equateur : cinématique du bloc nord andin, effet de la subduction, modèle final.