



# Fonctionnement d'une faille inverse liée à la subduction de la plaque Nazca sous la plaque sud américaine

François CORDELLIER, professeur au lycée Jean Perrin de Rezé

## Objectifs

Etude des mouvements d'Arequipa dans le référentiel terrestre

Les mouvement d'Arequipa par rapport à Kourou

Mouvement d'Arequipa par rapport l'ensemble du craton sud américain

Modélisation du mouvement

Pistes pédagogiques

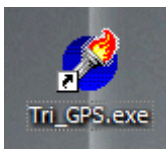
Téléchargement

## Objectifs

Le traitement des données GPS issues du réseau de l'IGS permet de calculer des séries temporelles qui sont le plus souvent utilisées pour décrire les mouvements des plaques lithosphériques. Certains de ces enregistrements montrent des ruptures brutales qui ont été mises en rapport avec des séismes identifiés. Un travail sur le tremblement de terre d'Arequipa est ici proposé. Il n'aurait pas été possible de le faire sans les conseils et les données de Jean-Claude Ruegg de l'Institut de Physique du Globe de Paris (CNRS). Qu'il en soit ici remercié.

[Retour](#)

## Etude des mouvements d'Arequipa dans le référentiel terrestre



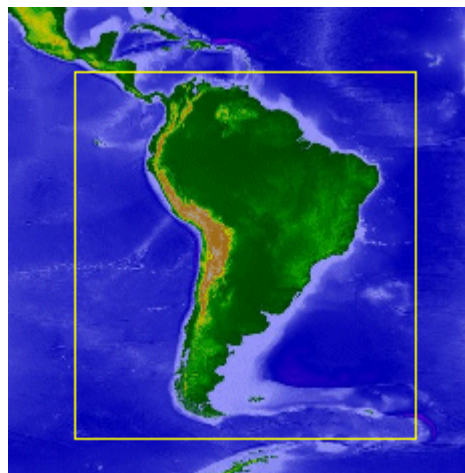
Tri\_GPS.exe

Carte

Le logiciel Tri\_GPS de Jean-François Madre exploite les séries temporelles de l'IGS au sein d'une interface facile à utiliser. On verra pour plus de précisions les [pages consacrées à ce logiciel sur ce serveur](#).

Pour définir la zone géographique où se trouve Arequipa, cliquer sur Carte.

Utiliser la souris pour encadrer l'Amérique du sud et cliquer sur "OK"



Trier

Revenu à l'écran principal , il faut cliquer sur "Trier" pour obtenir la liste des stations incluses dans le périmètre.

Les données d'Arequipa correspondent à la première ligne de la table

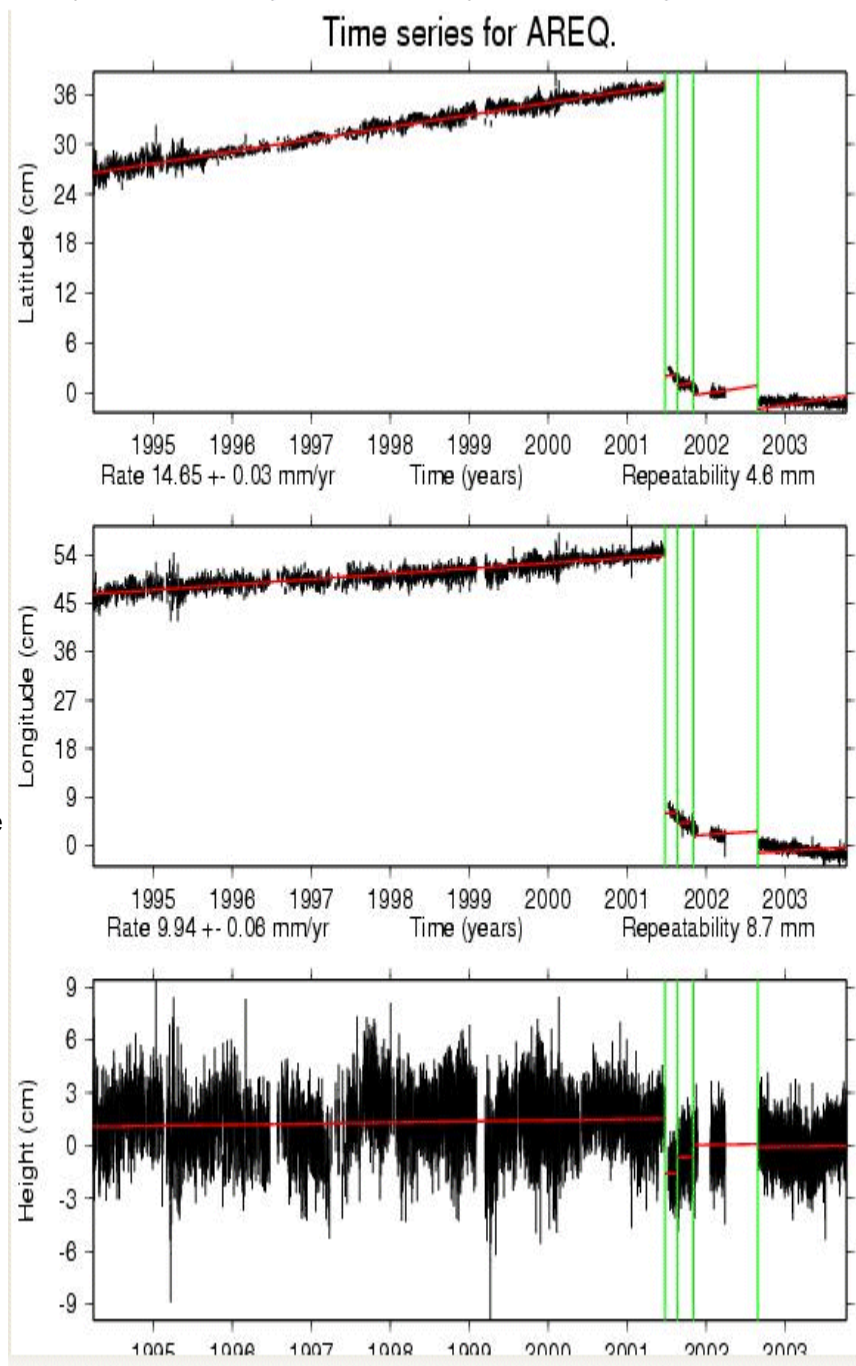
Station	V	Latitude	Longitude	Altitude	Vit. Lat.	Vit. Long	Vit. Alt.
		(degrés)	(degrés)	(mm)	(mm/an)	(mm/an)	(mm/an)
AREQ		-16,465516928	-71,492796297	2488929,7	14,64	9,96	0,63
		+/- 0,17 mm	+/- 0,37 mm	+/- 0,83	+/- 0,03	+/- 0,06	+/- 0,13

Un clic sur cette ligne affiche les représentations graphiques des séries temporelles de variations de latitude, de longitude et d'altitude.

On voit qu'avant 2001 la station dérive lentement vers le nord et vers l'est respectivement de 14,65 mm/an et de 9,94 mm/an. Ceci est conforme aux mouvements décrits pour l'ensemble de la plaque sud Américaine. Il faut noter que les vitesses affichées en dessous du graphique et celles portées sur la table du logiciel correspondent à ces vitesses et non à des vitesses moyennes calculées sur l'ensemble de la série.

Environ à la moitié de l'année 2001 la station subit un brutal mouvement vers le sud et vers l'ouest.

Le signal altimétrique subit lui aussi une perturbation mais sa mauvaise qualité, due au perturbations de la propagation des ondes dans la troposphère rend son utilisation difficile.



Pour définir plus précisément la date et l'amplitude des mouvements, nous allons utiliser les fichiers de données AREQlat.xls et AREQlon.xls fabriqués lors de l'[étape précédente](#). Sélectionner les colonnes A et B qui donne la date et l'écart à la position moyenne.

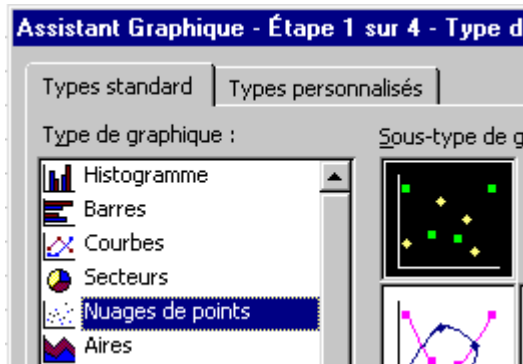
Utiliser le bouton de l'assistant graphique



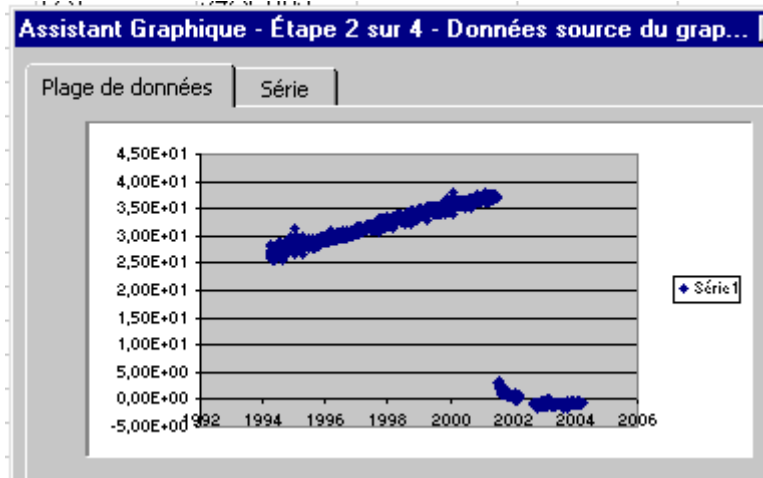
Ces fichiers sont aussi disponibles en [téléchargement](#)

	A	B
1	1994,2423	2,69E+01
2	1994,245	2,75E+01
3	1994,2478	2,79E+01
4	1994,2505	2,70E+01
5	1994,2533	2,67E+01
6	1994,256	2,59E+01
7	1994,2587	2,67E+01
8	1994,2615	2,72E+01
9	1994,2642	2,71E+01
10	1994,267	2,86E+01
11	1994,2697	2,82E+01
12	1994,2725	2,63E+01
13	1994,2751	2,71E+01
14	1994,2778	2,86E+01
15	1994,2806	2,66E+01
16	1994,2833	2,60E+01
17	1994,2888	2,72E+01
18	1994,2916	2,72E+01

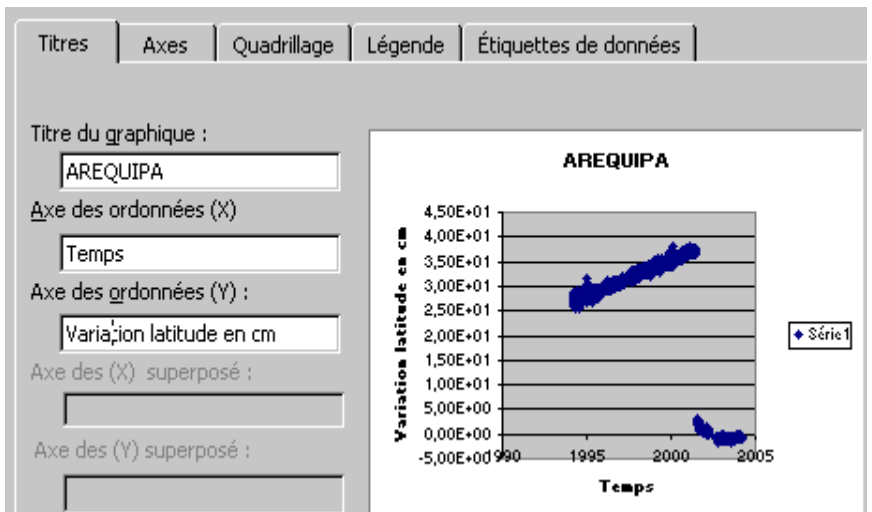
Choisir "Nuage de points"



Passer cet écran en cliquant sur suivant

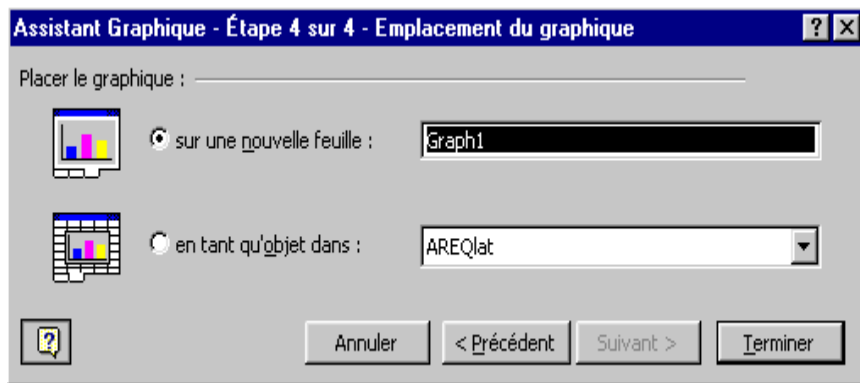


Préciser les titres du graphique et des axes

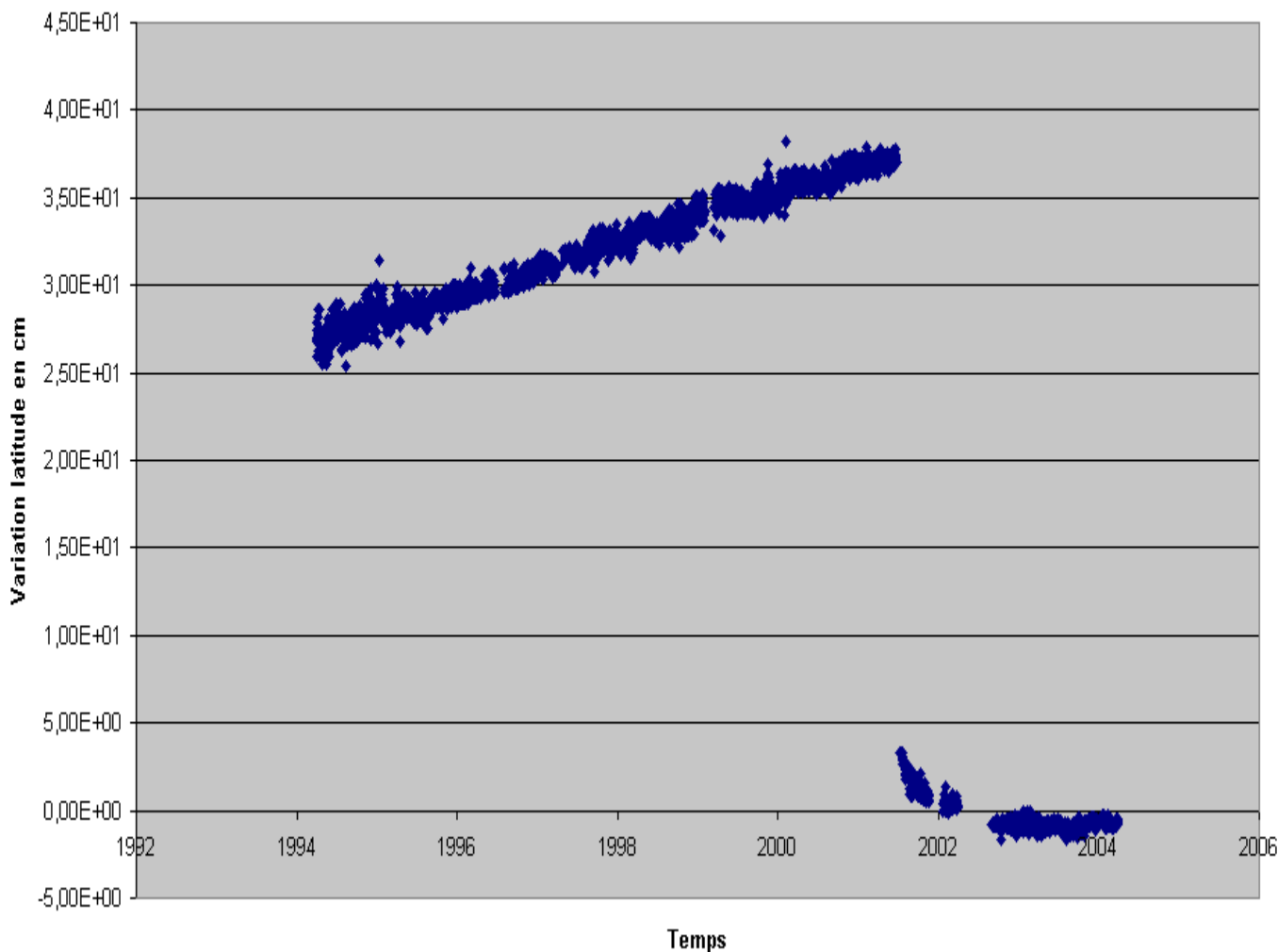


Afficher sur une nouvelle feuille.

Le résultat ci-dessous peut être utilisé en cliquant sur les points de mesure car les coordonnées du point s'affichent par cette action.



### AREQUIPA



Il est cependant plus pratique de revenir à la table pour repérer la date exacte et mesurer la différence de position.

La différence de position est égale la latitude finale moins la latitude initiale. Nous voyons qu'entre le 23 juin et le 10 juillet la variation de latitude a été de -33,7 centimètres soit 33,7 vers l'est.

37,456552	2,47E-01	AREQ	LAT	01-juin-22
36,9846976	2,70E-01	AREQ	LAT	01-juin-23
3,25424219	2,63E-01	AREQ	LAT	01-juil-10
3,26763371	2,73E-01	AREQ	LAT	01-juil-15

Le séisme d'Arequipa s'étant produit le 23 juin 2001 à 20 heures 33 minutes UTC, nous voyons qu'il est suivi d'une lacune de mesure de 17 jours.

55,2674642	5,50E-01	AREQ	LON	01-juin-21
55,0752466	5,34E-01	AREQ	LON	01-juin-22
55,060235	6,04E-01	AREQ	LON	01-juin-23
8,13266366	5,67E-01	AREQ	LON	01-juil-10
8,02753773	5,69E-01	AREQ	LON	01-juil-15
7,04005335	5,34E-01	AREQ	LON	01-juil-16

Pour la longitude le déplacement a été de 46,9 centimètres vers le sud.

$$c = \sqrt{b^2 + a^2}$$

En utilisant la relation de Pythagore, il est possible de calculer le module du vecteur déplacement, ce qui donne ici 57,75 centimètres vers le sud ouest donc dans le sens inverse du mouvement général de la plaque.

La manipulation des données avec les élèves peut trouver son terme ici, cependant ce déplacement dans le référentiel terrestre ne permet pas de rendre compte des mouvements d'Arequipa relativement au reste de la plaque sud-Américaine

[Retour](#)

## Les mouvements d'Arequipa par rapport à Kourou

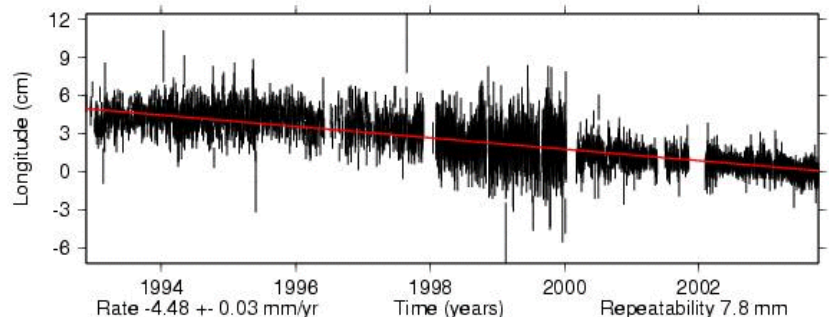
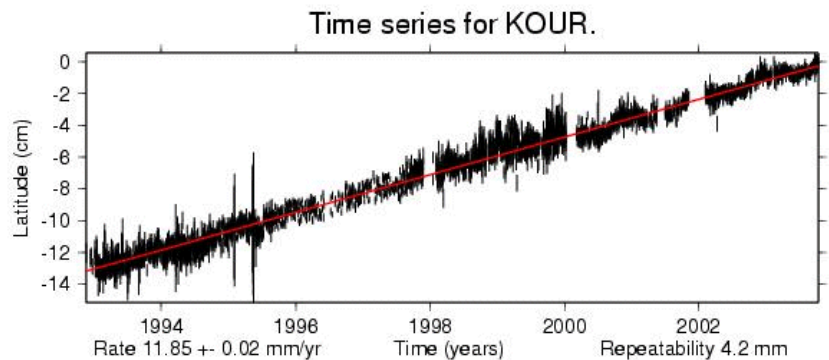
L'objectif est de savoir comment Arequipa s'est déplacé avant, pendant et après le séisme par rapport à un autre point de l'Amérique du sud. Il s'agit donc de mesurer les déformations de la plaque sud-américaine. Pour cela il faut mesurer la variation de distance entre Arequipa et une station de référence située sur la partie la plus stable de la plaque c'est à dire le craton brésilien.

Une rapide consultation des différentes séries temporelles disponibles sur cette zone montre que la station de Kourou (KOUR) possède des enregistrements assez continus sans marques de mouvements brutaux. Nous allons donc télécharger les fichiers kour.lat, kour.lon sur le serveur de la Nasa et les convertir en fichier excel KOURlat.xls et KOURlon.xls.

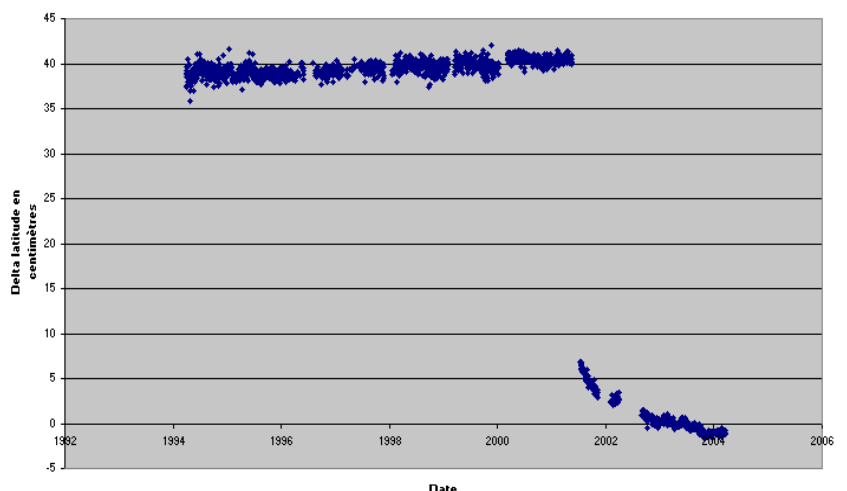
L'ensemble de ces manoeuvres est expliqué dans la [fiche technique correspondante](#)

Ces données sont aussi disponibles en [téléchargement](#).

Les fichiers et les courbes AREQ-KOURlat.xls et AREQ-KOURlon.xls permettront de tracer les courbes représentant les variations de latitude et de longitude entre les deux points. On voit que la station d'Arequipa décroche brutalement vers le sud d'environ 32 centimètres au moment du séisme.



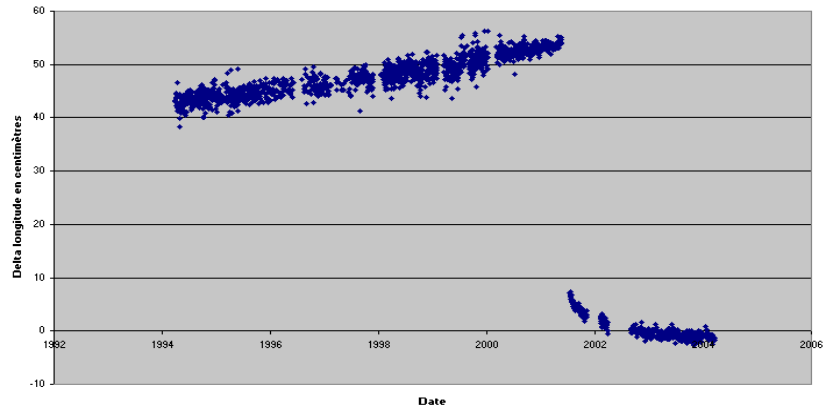
DELTA LATITUDE AREQ - KOUR



La consultation de la table permet d'être plus précis puisque l'augmentation de la différence de latitude mesurée est de 33,1 cm vers le sud.

	A	B	C	D
1	date	AREQlat	KOURlat	delta lat
4387	2001,3717	36,9426811		40,0771804
4389	2001,3744	36,7271484		40,1429299
4391	2001,3772	37,2192558		39,8851407
4438	2001,5222	3,25424219		6,77385192
4444	2001,5359	3,26763371		6,8359931
4446	2001,5387	3,18189555		6,57671263

DELTA LONGITUDE AREQ - KOUR



En ce qui concerne la longitude la variation est aussi négative. Il s'agit donc d'un mouvement relatif vers l'ouest.

	A	B	C	D
1	date	AREQlon	KOURlon	delta lon
4387	2001,3717	54,88460187		55,1202371
4389	2001,3744	54,91562669		53,9535532
4391	2001,3772	55,21955138		54,7629903
4438	2001,5222	8,132663658		7,11199364
4444	2001,5359	8,027537726		7,20768229
4446	2001,5387	7,040053349		6,48871561
4448	2001,5414	8,463764312		7,44612067

L'augmentation de la différence de longitude mesurée est ici de 47,6 cm

$$c = \sqrt{b^2 + a^2}$$

L'utilisation du théorème de Pythagore permet de calculer le module du vecteur déplacement soit ici 58,01 cm. La distance totale de Kourou à Arequipa a donc augmenté de 58 cm lors de la période considérée

[Retour](#)

## Mouvement d'Arequipa par rapport à l'ensemble du craton sud américain

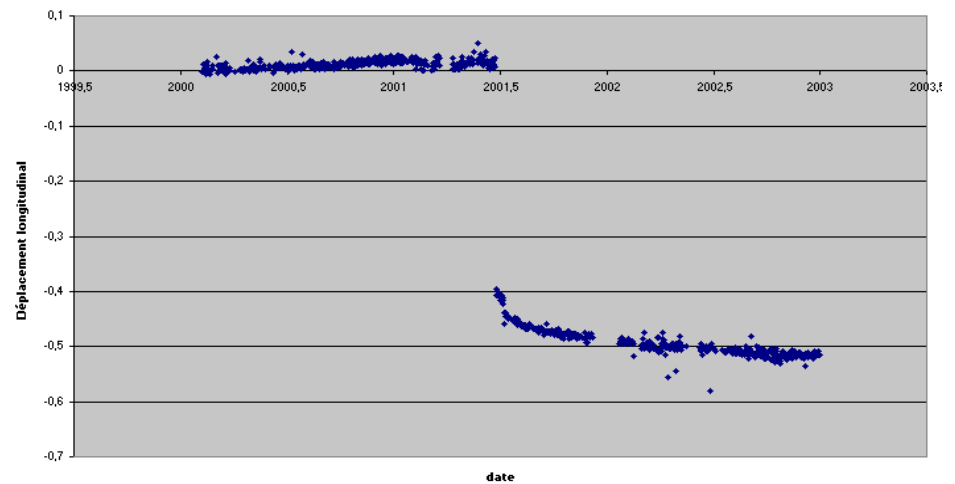
Dans un article paru en 2002 Jean-Claude RUEGG et al publient les résultats de mesures effectuées en 2000, 2001 et 2002 dans la zone qui a subi un séisme de magnitude 8.4 le 23 juin 2001 à 20 heures 33. Des traitements plus sophistiqués que ceux que nous pouvons entreprendre en classe ont abouti à des séries de données temporelles qui ne sont pas actuellement disponibles sur Internet. On trouvera dans la section "[téléchargement](#)" les fichiers correspondant aux différentes figures.

Le principe de la mesure est quasiment le même que celui mis en oeuvre plus haut. Le déplacement d'Arequipa relativement à l'ensemble de l'Amérique du sud a été calculé.

dE correspond au mouvement relatif vers l'est, sE à son incertitude calculée, dN au mouvement vers le nord sN à son incertitude calculée, vec au module du vecteur déplacement, t sV à son incertitude et Azim à son azimuth (positif vers l'est négatif vers l'ouest). Toutes ces données sont en mètre sauf les angles qui sont en degrés.

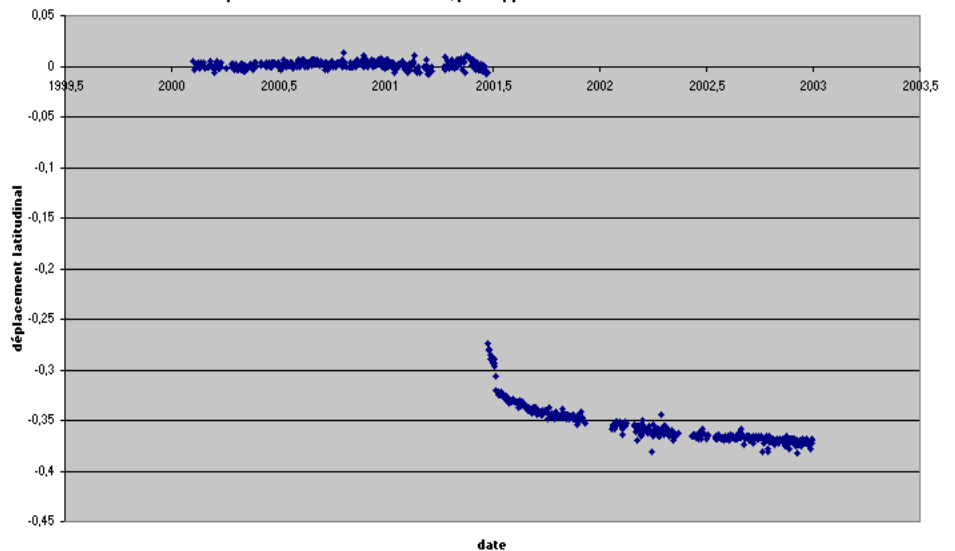
Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?											
H5 = 0,006											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	Variations de la position absolue de la station AREQ/craton Sud Amérique										
2	#	date		dE	sE	dN	sN	Vect	dV	Azimut	
377	2001,474	AREQ	Soam	0,008	0,0036	-0,008	0,0013	0,011	0,0038	134,72	
378	2001,4767	AREQ	Soam	0,023	0,0054	-0,007	0,0017	0,024	0,0057	106,69	
379	2001,4795	AREQ	Soam	-0,408	0,0017	-0,274	0,0009	0,491	0,0019	-123,89	
380	2001,4822	AREQ	Soam	-0,395	0,0022	-0,279	0,0009	0,483	0,0024	-125,24	
381	2001,4849	AREQ	Soam	-0,4	0,0023	-0,281	0,0009	0,488	0,0025	-125,1	
382	2001,4877	AREQ	Soam	-0,4	0,0023	-0,285	0,0008	0,491	0,0024	-125,48	
383	2001,4904	AREQ	Soam	-0,405	0,0028	-0,289	0,0009	0,497	0,0029	-125,53	
384	2001,4932	AREQ	Soam	-0,405	0,003	-0,285	0,0014	0,495	0,0033	-125,09	

Déplacement longitudinale de AREQ par rapport au craton sud Américain



Le déplacement brutal vers l'ouest d'Aréquiqa au moment du séisme est clairement mis en évidence. On remarque qu'une légère perturbation précède le séisme et surtout que la période des répliques est marquée par un glissement assez rapide mais asismique qui se traduit par une prolongation du mouvement initié lors du séisme.

déplacement latitudinal de AREQ par rapport au craton Sud Américain



Pour le déplacement vers le sud les mêmes éléments apparaissent.

Contrairement aux fichiers du site de la Nasa, la série est presque complète et permet de voir ce qui s'est passé juste après le séisme.

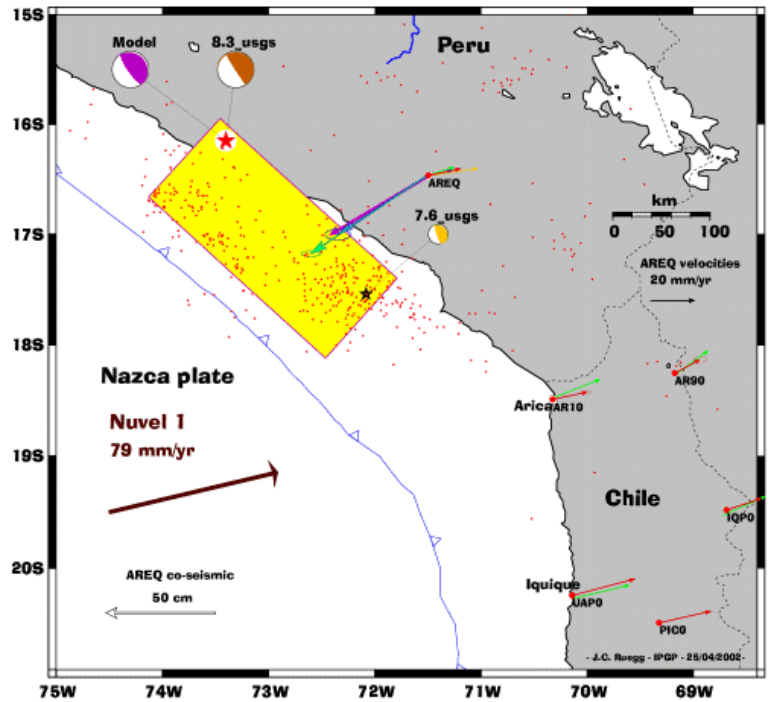
Dans leur analyse des données, les auteurs associent le séisme à la subduction de la plaque Nazca sous le plaque sud Américaine. Le mouvement observé correspond à un déplacement de l'ordre de 50 cm sur une surface de 240 sur 100 km le long d'une faille inverse. La station d'Arequiqa se déplace brutalement vers l'ouest-sud-ouest lors de la relaxation de contrainte. Le séisme lui-même est précédé d'une phase de glissement asismique très légère et les nombreuses répliques sont accompagnées d'un déplacement asismique important dans le même sens que le mouvement co-sismique. Cela permet de montrer aux élèves qu'un séisme de ce type s'inscrit dans un contexte général de mise en contrainte des plaques tectoniques. Le séisme apparaît comme le moment où ces contraintes sont brutalement relaxées.

[J.C. Ruegg, M. Olcay, R. Armijo, J.B. de Chabaliere and D. Lazo, Coseismic and aseismic slip observed from continuous GPS measurements for the 2001 Southern Peru earthquake \(Mw = 8.4\). Symposium ISAG, Toulouse, Sept. 2002.](#)

## Modélisation du mouvement

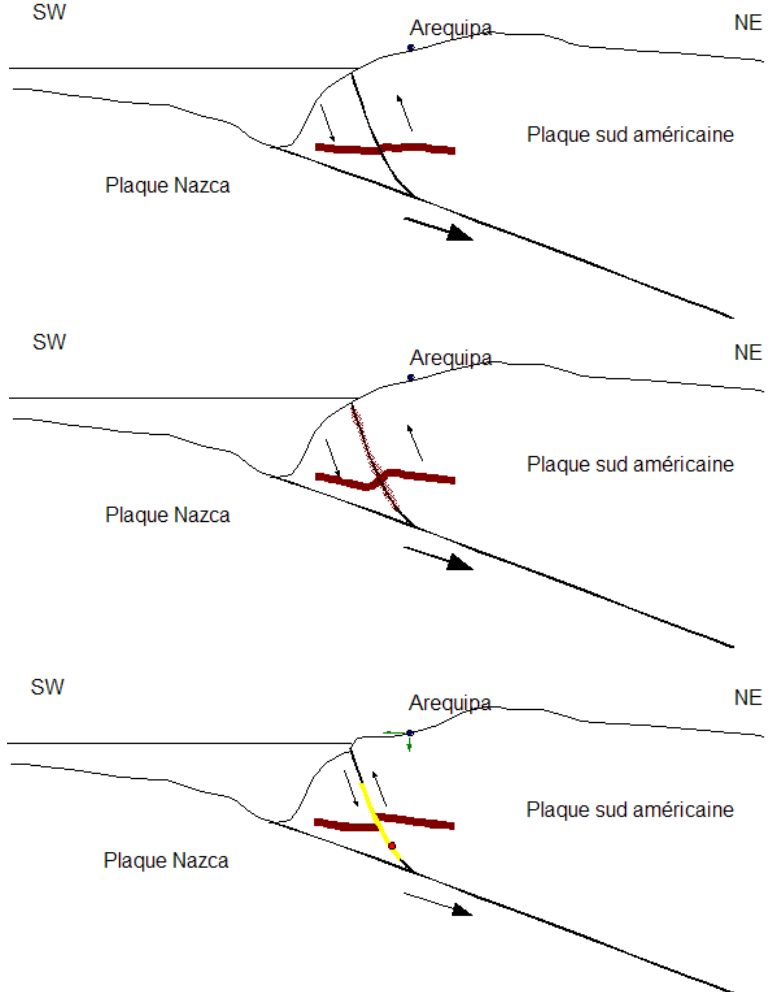
Dans la note citée en référence, [Ruegg et Al](#) fournissent une carte qui est reproduite ci-contre avec autorisation de l'auteur.

L'étoile rouge sur fond blanc correspond à l'épicentre du séisme principal (M=8.4), l'étoile noire à la principale réplique (M=7.6) et les points rouges représentent les épicentres des autres répliques. La flèche bleue représente le vecteur déplacement mesuré lors du séisme, la flèche rose le déplacement cosismique calculé, la flèche verte correspond à la somme des déplacements mesurés (cosismiques et aismiques) associés au séisme du 23 juin 2001. Les petites flèches vertes, rouges et jaunes représentent les vitesses de déplacement mesurées par les stations GPS régionales avant la crise sismique. Le rectangle jaune correspond à la surface de rupture lors du séisme. Elle se trouve à l'est de la trace du plan de subduction de la plaque Nazca sous la plaque Sud-américaine. Cette zone n'avait pas connu de séisme important depuis 1868.



Fig\_1

Pour les auteurs de l'article, le déplacement horizontal de 50 centimètres environ correspond au fonctionnement d'une faille inverse possédant un pendage de 76° vers l'est-nord-est. Le rejet de la faille aurait augmenté brusquement de deux mètres. Le schéma ci-contre représente l'état de la région après le séisme de 1868. Un marqueur horizontal rouge recoupé par la faille a été placé pour servir de point de repère.



La subduction de la plaque Nazca sous la plaque sud américaine place la plaque sud américaine en compression. Elle réagit en se déformant de façon élastique, plastique ou cassante. De 1868 à 2001 la faille est restée bloquée et la déformation élastique de la croûte a été le phénomène principal.

Au cours d'une crise sismique comme celle d'Arequipa, le blocage de la faille pendant un temps important occasionne l'accumulation de contraintes dans les deux compartiments. La relaxation de ces contraintes est d'abord très faible pendant les semaines qui précèdent le séisme. La déformation cassante correspond à un glissement brutal qui déplace la station d'Arequipa de 50 cm environ dans le plan horizontal. Après le séisme, les répliques et le glissement assismique prolongent la période de relaxation de plusieurs mois.

[Retour](#)



## **Pistes pédagogiques**

Dans les programmes actuels les phénomènes sismiques propres aux zones de convergence sont étudiés essentiellement en Quatrième et en Terminale S.

En Quatrième, il ne peut être question d'exposer les techniques de positionnement GPS mais l'utilisation des séries temporelles sans en expliquer la source est envisageable. Cette utilisation peut prendre plusieurs formes.

- utilisation d'une représentation graphique que l'on exploite manuellement en utilisant les notions de mathématiques (repère cartésien). C'est l'existence de mouvements brusques du sous-sol le long de zones particulières qui est l'objectif de l'étude.

- utilisation d'Excel pour mettre en évidence graphiquement ces mouvements. C'est une des compétences validables du B2I niveau 2. On peut ainsi faire une évaluation formative de la réalisation du graphique concernant les latitudes et demander aux élèves de mettre en oeuvre leurs compétences pour tracer le graphique concernant les longitudes.

En Terminale S, les élèves ont déjà été familiarisés avec l'utilisation de séries temporelles pour quantifier le déplacement des plaques en Première S. On peut donc d'emblée proposer des activités sur les mouvements relatifs en utilisant leur bagage informatique sur Excel et leurs notions mathématiques et physiques sur les sommes vectorielles.

La modélisation du mouvement lui-même demande un bagage géologique important et peut difficilement faire l'objet d'une activité pratique mais cette modélisation peut intervenir au moment du bilan.

[Retour](#)

## **Téléchargement**

La présente page est téléchargeable au format pdf