



Apport de l'isotope cosmogénique ^{10}Be à la chronologie de la géomorphologie alluviale et glaciaire Quaternaire. Cinématique des décrochements.

Jérôme Van Der Woerd

► To cite this version:

Jérôme Van Der Woerd. Apport de l'isotope cosmogénique ^{10}Be à la chronologie de la géomorphologie alluviale et glaciaire Quaternaire. Cinématique des décrochements.. Tectonique. Université de Strasbourg, 2014. <tel-01271567>

HAL Id: tel-01271567

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01271567>

Submitted on 9 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École et Observatoire des Sciences de la Terre Université de Strasbourg

Mémoire
présenté par

Jérôme van der Woerd

Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre
Institut de Physique du Globe de Strasbourg

pour obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches
de l'Université de Strasbourg
Spécialité : Géophysique Interne

**Apport de l'isotope cosmogénique ^{10}Be à la chronologie de la
géomorphologie alluviale et glaciaire Quaternaire.
Cinématique des décrochements.**

PARTIE 1

Le 15 juillet 2014, devant le jury composé de :

Didier BOURLES	.....	Rapporteur externe
Michel CARA	.....	Rapporteur interne
François CHABAUX	.....	Examinateur
Luis RIVERA	.....	Examinateur
Rick RYERSON	.....	Examinateur
Paul TAPPONNIER	.....	Examinateur
Christophe VIGNY	.....	Rapporteur externe

PARTIE 1

I Introduction	5
II Cinématique des failles	9
II.1 Du décalage géomorphologique à la vitesse d'une faille	10
II.1.1 Les bords de terrasses pour la détermination des vitesses moyennes des failles	11
II.1.2 Du séisme au décalage cumulé : cas de la faille du Kunlun et du séisme du Kokoxili	21
II.2 Limites des datations des terrasses par les cosmonucléides : érosion et héritage	24
II.2.1 Héritage aléatoire : le site de Louzhaowan, faille de l'Altyn Tagh	24
II.2.2 Stabilité et érosion de surfaces alluviales : le site d'Indio, faille de San Andreas	26
III Datation des moraines et paléoclimats	33
III.1 Le cas de la datation des moraines : érosion mais pas d'héritage ?	33
III.2 Datation de polis glaciaires	36
III.3 Glaciations synchrones ou asynchrones des variations de températures	38
III.3.1 Interprétation des distributions d'âges	38
III.3.2 Stratégie de datations des moraines	40
IV Contraintes sur l'incision des fleuves et l'évolution des marges du Tibet	42
IV.1 Utilisation conjointe du ^{10}Be et ^{26}Al : incision du Fleuve Jaune	42
IV.2 Incision du Yangtse à travers l'anticlinal du Yulong Shan (Yunnan, Chine)	44
IV.3 Surrection de l'Ama Drime et capture de bassin lacustre aux sources de l'Arun	47
V Perspectives et projets	53
VI Références	62
VII Annexe :	
Le laboratoire de géochronologie nucléides cosmogéniques	
^{10}Be et ^{26}Al de Strasbourg	71
VIII Renseignements administratifs	74
4.1 Curriculum vitae	
4.2 Publications	
4.3 Encadrement	
4.4 Participation à des jurys de thèse	
4.5 Contrats de recherche obtenus	
4.6 Animation de la recherche, responsabilités collectives	
4.7 Coopérations Scientifiques extérieures à l'IPG Strasbourg	
4.8 Expérience de terrain	

PARTIE 2

I Sélection d'articles publiés

II Résumés des articles publiés

I Introduction

Il y a deux fils conducteurs qui guident mon activité de recherche. Le premier concerne la « vitesse des failles », le second « l'âge des paysages », l'un a pour objectif de caractériser une faille par un nombre, l'autre, de mettre un nombre sur une formation géomorphologique. Ces deux aspects de mon travail, bien que liés (sans âges sur les marqueurs décalés par les failles, on ne peut savoir en combien de temps les décalages se sont formés), correspondent à des démarches indépendantes aux domaines scientifiques associés très différents. Dans le premier, on aborde les domaines de la rupture sismique, du rythme des séismes, des variations de vitesses temporelles et spatiales des failles, etc... dans le deuxième, on aborde les variations climatiques passées, le rythme des glaciations, la formation de terrasses alluviales, l'érosion des chaînes de montagnes, l'altération des sols, la dynamique des rivières, etc... Inévitablement, ces deux approches se reflètent dans mon activité de recherche et mes travaux.

Depuis 20 ans, les problèmes et questions soulevés par le fonctionnement des failles ont évolué, en partie grâce à des techniques nouvelles, en partie, en raison de l'accumulation de données nouvelles. On peut illustrer cela de différentes façons. Il y a 20 ans, les vitesses des 6 grands décrochements que compte le Tibet sur les 21 décrochements continentaux d'au moins 1000 km de long (Altyn Tagh, Kunlun, Karakorum, Xianshuihe, Fleuve Rouge, Haiyuan au Tibet ; Sagain, Shaman, Sumatra, Philippines, San Andreas, Denali, Nord Anatolienne, Est Anatolienne, Levant, Alpine, Main Recent Fault, Bocono-El Pilar dans le reste du monde ; Figure 1 ; Table 1) n'avaient pas été déterminées par des méthodes de datations radiométriques (à quelques exceptions près). C'est maintenant chose faite, un résultat en grande partie dû au Laboratoire de Tectonique de l'IPGP, dont je co-signe dans ce domaine de nombreuses études cinématiques sur 4 de ces décrochements (Van der Woerd et al., 1998, 2000, 2002b ; Lasserre et al., 1999 ; Mériaux et al., 2004, 2005, 2012 ; Chevalier, 2005a, 2005b, 2011, 2012 ; Tapponnier et al., 2001a ; Li et al., 2005, 2012 ; Ryerson et al., 2006 ; Li et al., AGU, 2006). On ne discute plus exactement de la même chose qu'il y a 10 ou 20 ans.

Alors que certaines failles n'avaient jamais été étudiées et leurs vitesses mal connues, aujourd'hui, la question s'est déplacée de : « Quelle est la vitesse de cette faille ? » vers : « Cette vitesse est-elle constante dans le temps ? Varie t-elle au cours du cycle sismique ou de plusieurs cycles ? Comment comparer une vitesse issue de la géodésie à une vitesse géologique ? Enfin, quelle est l'origine mécanique/physique de ces variations ? ». Ceci est essentiellement un résultat de l'accumulation de données de vitesses obtenues avec des méthodes variées à la fois de géochronologie (datations par isotopes cosmogéniques $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}/^{36}\text{Cl}/^{21}\text{Ne}$ et par le ^{14}C , datations des

carbonates pédogéniques, etc), de paléosismologie, et de géodésie (GPS, InSAR) en de nombreux sites le long de failles à différents stades de leur cycle sismique (Figure 2). Il faut également souligner ces dernières années l'apport considérable que représente l'imagerie Très Haute Résolution (issue des satellites Ikonos – 1m, Quickbird- 0.60m, SPOT5- 2.5m, etc...) ou la topographie radar à haute résolution (Lidar au sol ou aéroporté ; e.g., programme Earthscope Lidar de la NSF aux Etats-Unis <http://www.opentopography.org/>; Zielke et al., Science, 2010) qui sont devenues incontournables pour les études de géomorphologie détaillées le long des failles.

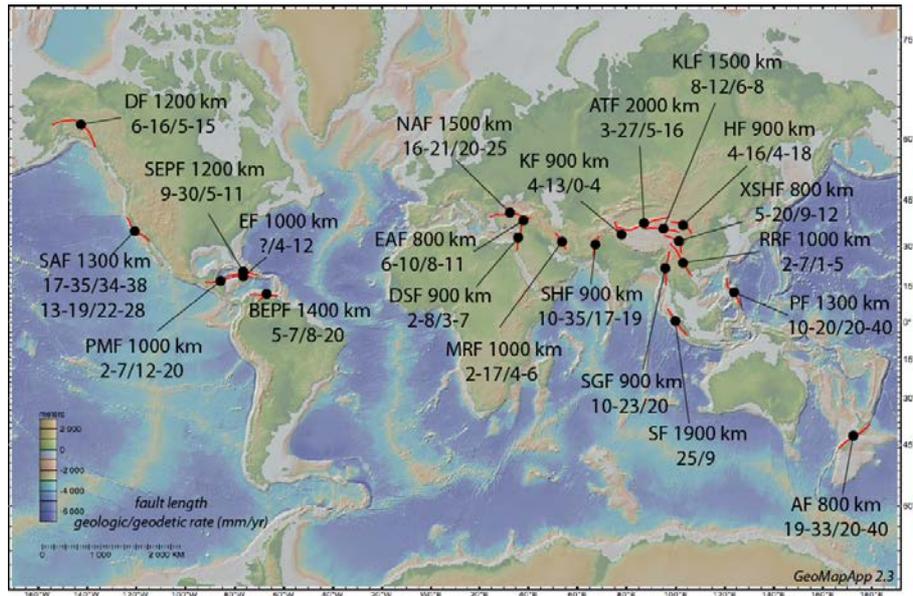


Figure 1. Répartition à la surface de la Terre des décrochements continentaux actifs d'au moins 1000 km de long, avec longueur et bornes des vitesses géologiques/géodésiques d'après la littérature (Table 1).

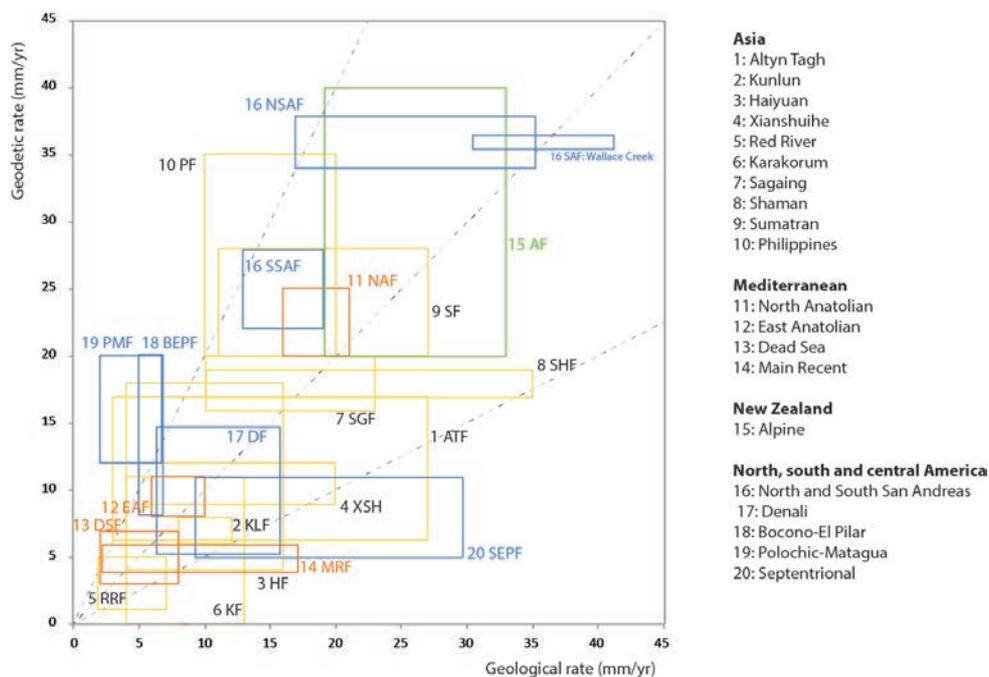


Figure 2. Rapport vitesses géologiques et géodésiques pour les grands décrochements (Table 1).

C'est dans ce cadre que mon activité de recherche s'est inscrite avec un stage post-doctoral de 3 ans au Lawrence Livermore National Laboratory (USA) pour développer et appliquer la méthode de datation par les isotopes cosmogéniques $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$. Les principaux chantiers d'étude se situent au Tibet, mais la méthode a également été appliquée pour la première fois sur la partie sud de la faille de San Andreas (Van der Woerd et al., 2006).

Suite à mon recrutement à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516) en 2001, j'ai installé un laboratoire d'analyse pour l'extraction du ^{10}Be et du ^{26}Al en collaboration avec le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de la Surface (UMR 7517).

J'ai continué le travail sur les décrochements et les grands séismes en Asie, en particulier le séisme de Mw 7.9 en 2001 sur la faille du Kunlun qui a suscité des travaux et questions nouvelles à la fois sur la dynamique de la rupture, l'expression en surface de la rupture, le lien entre déplacements co-sismiques et cumulés (Van der Woerd et al., 2002a ; Klinger et al., 2005 ; Xu et al., 2006 ; Lasserre et al., 2005 ; Li et al., 2005 ; Tocheport et al., 2006), le séisme de Mw 8.0 dans les Longmen Shan au Sichuan sur des chevauchements à la bordure Est du Tibet (Liu-Zeng et al., 2009 ; DeMichele et al., 2010 ; Li et al., 2009), sur la faille de Fuyun et les traces du séismes de M8 de 1931, et sur la faille du Karakorum dans le cadre de la thèse de Marie-Luce Chevalier (Chevalier et al., 2005a ; 2005b; 2011; 2012).

Je me suis intéressé à la géomorphologie des bordures NE et SE du plateau du Tibet, ainsi qu'à la dynamique fluviale associée dans le cadre de la thèse d'Aude Perrineau (Perrineau, 2010 ; Perrineau et al., 2011). La quantification de l'extension au sud Tibet à différentes échelles de temps géologiques, et la comparaison avec les vitesses géodésiques, a été l'objet de la thèse d'Elise Kali (Kali, 2010 ; Kali et al., 2010).

En même temps, mais de manière plus ponctuelle, je me suis intéressé à des événements sismiques plus petits et à des régions et failles caractérisées par des vitesses lentes : séisme de Rambervillers, Vosges (Ml=5.4, 22/02/2003) ; faille de la Remuaz, Chamonix (séismes historiques de 1905) ; séisme d'Al Hoceima, Maroc, (Mw=6.4, 24/02/2004)(van der Woerd et al., 2014) ; installation de stations GPS permanentes dans le Fossé Rhéna (2004-2007); séisme de l'Altaï, Chuya, (Mw=7.3, 27/09/2003 ; Dorbath et al., 2008).

II Cinématique des failles

Remarque préalable : définitions de vitesse court- et long-terme le long d'une faille, et distinction entre une vitesse géologique et une vitesse géodésique. Les vitesses de rupture co-sismique ne sont pas abordées ici. La vitesse court-terme est la vitesse d'une faille que l'on obtient sur un intervalle de temps court, à savoir, typiquement quelques années. Cette vitesse est généralement le résultat de mesures géodésiques (GPS, InSAR, triangulation, etc). La vitesse long-terme est celle que l'on obtient sur un intervalle de temps long, typiquement plusieurs milliers d'années. Cette vitesse est obtenue par des études géologiques ou géomorphologiques faisant appel à des méthodes géochronologiques variées. A l'extrême, les vitesses obtenues sur des périodes géologiques de plusieurs millions d'années seront désignées par vitesse très long-terme. Enfin, une vitesse géologique est une vitesse obtenue par des méthodes géochronologiques appliquées à des objets géologiques (ou géomorphologiques) et une vitesse géodésique est une vitesse issue de mesures géodésiques. Ces définitions sont indépendantes de toute connaissance du rythme du cycle sismique des failles, et les vitesses long-terme ne moyennent pas forcément le cycle sismique et les vitesses court-terme peuvent échantillonner plus qu'une fraction du cycle sismique. Parler de vitesse long-terme ou de vitesse géologique pour des vitesses issues de profils GPS pour la raison que le résultat obtenu serait celui du mouvement relatif des blocs loin de la faille, et donc *équivalent* à une vitesse géologique long-terme, ne me semble pas correct. Bien que ces vitesses aient dans de nombreux cas la même valeur, leur signification respective, et en dernier ressort leur comparaison, nécessite le passage par un modèle de déformation de la lithosphère aux abords des failles pour lequel il n'y a pas de consensus à ce jour. Enfin, il y a des cas où ces vitesses ne s'accordent pas et des cas où les vitesses géologiques sont loin de moyenner le cycle sismique (en particulier quand les périodes de récurrences de séismes sont très longues, ou lorsque le cycle sismique est modulé par des crises périodiques d'une durée plus ou moins longues (clusters)).

II.1 Du décalage géomorphologique à la vitesse d'une faille

II.1.1 L'utilisation des bords de terrasses alluviales (risers) pour la détermination des vitesses moyennes des failles

L'idée que l'on puisse faire une mesure quantitativement significative de certaines propriétés des séismes et des failles à partir de ruptures de surface est née de l'observation des déformations suite à certain grands séismes, notamment le séisme de San Andreas du 18 avril 1906 (Lawson, 1908 ; Reid, 1910 ; Zoback, 2006). Non seulement il a été possible de mesurer une longueur de faille (rupture), mais également de caractériser la distribution du glissement co-sismique le long de la rupture et de quantifier la déformation des blocs séparés par la faille.

Bien que certains segments aient été cartographiés au préalable, il a fallu le séisme de 1906 pour faire la démonstration de la continuité de la faille de San Andreas sur des centaines de kilomètres. Un autre aspect clairement révélé par la juxtaposition de la rupture récente avec des morphologies héritées de déformations antérieures établissait le caractère récurrent des grands événements sismiques. Ces conclusions confortaient des observations déjà faites le long de la faille normale de Wasatch (Utah) sur le décalage répété de lignes de rivages du lac de Bonneville par Gilbert (1884). C'est l'observation des déformations à la fois le long de la faille et perpendiculairement à la faille qui conduit Reid à proposer la théorie du rebond élastique (Reid, 1910). Celle-ci préconise que le mouvement continu des plaques loin de la faille conduit à un cisaillement élastique des plaques bloquées au niveau de la faille, blocage interrompu lors de ruptures sismiques permettant le coulissage des plaques et la relâche des contraintes élastiques accumulées entre deux séismes. L'idée de cycle sismique se met en place.

Un exemple classique de marqueurs décalés est représenté par le site de Wallace Creek le long de la faille de San Andreas (Figure 3)(Sieh and Wallace, 1987 ; Sieh and Jahns, 1984). A ce site situé dans la plaine relativement aride de Carrizzo, une rivière intermittente, le Wallace Creek, prend sa source dans les montagnes de Temblor au nord-est. Il incise le piedmont en traversant la faille de San Andreas formant un chenal de plusieurs mètres de profondeurs.

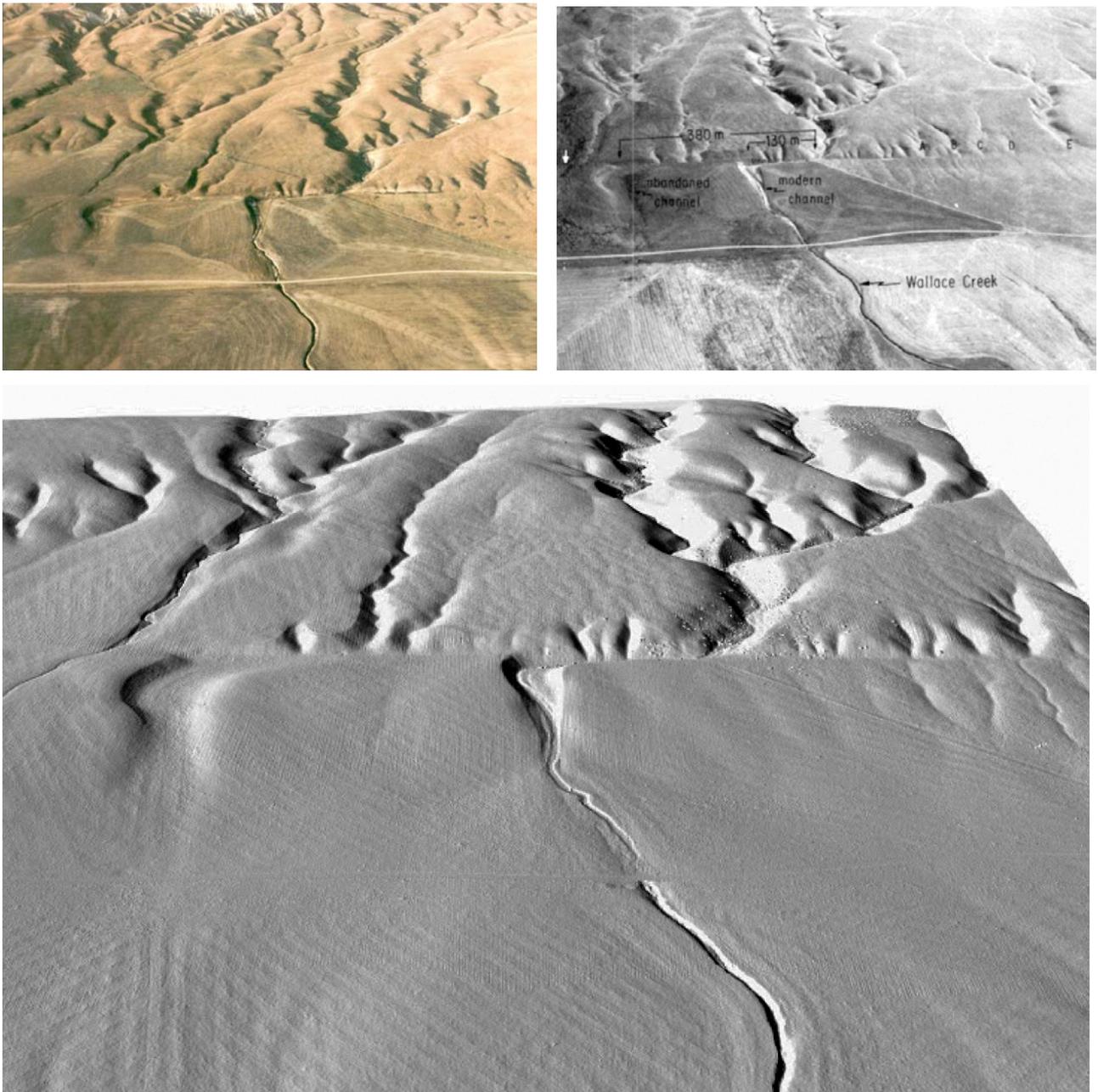


Figure 3. a) photo aérienne du site de Wallace Creek. b) vue oblique d'un modèle numérique de terrain à partir de Lidar aérien (OpenTopography) révélant tous les détails du relief (données B4 25cm de résolution). On reconnaît très nettement la trace de la faille de San Andreas au pied d'un escarpement topographique sur lequel naissent des petits chenaux régressifs. Wallace Creek, le chenal le plus large et profond en amont est décalé de manière dextre au passage de la faille. En aval et au nord-ouest (sur la gauche), un ancien chenal abandonné, plus large et aux bords plus émoussés représente la position antérieure de Wallace Creek.

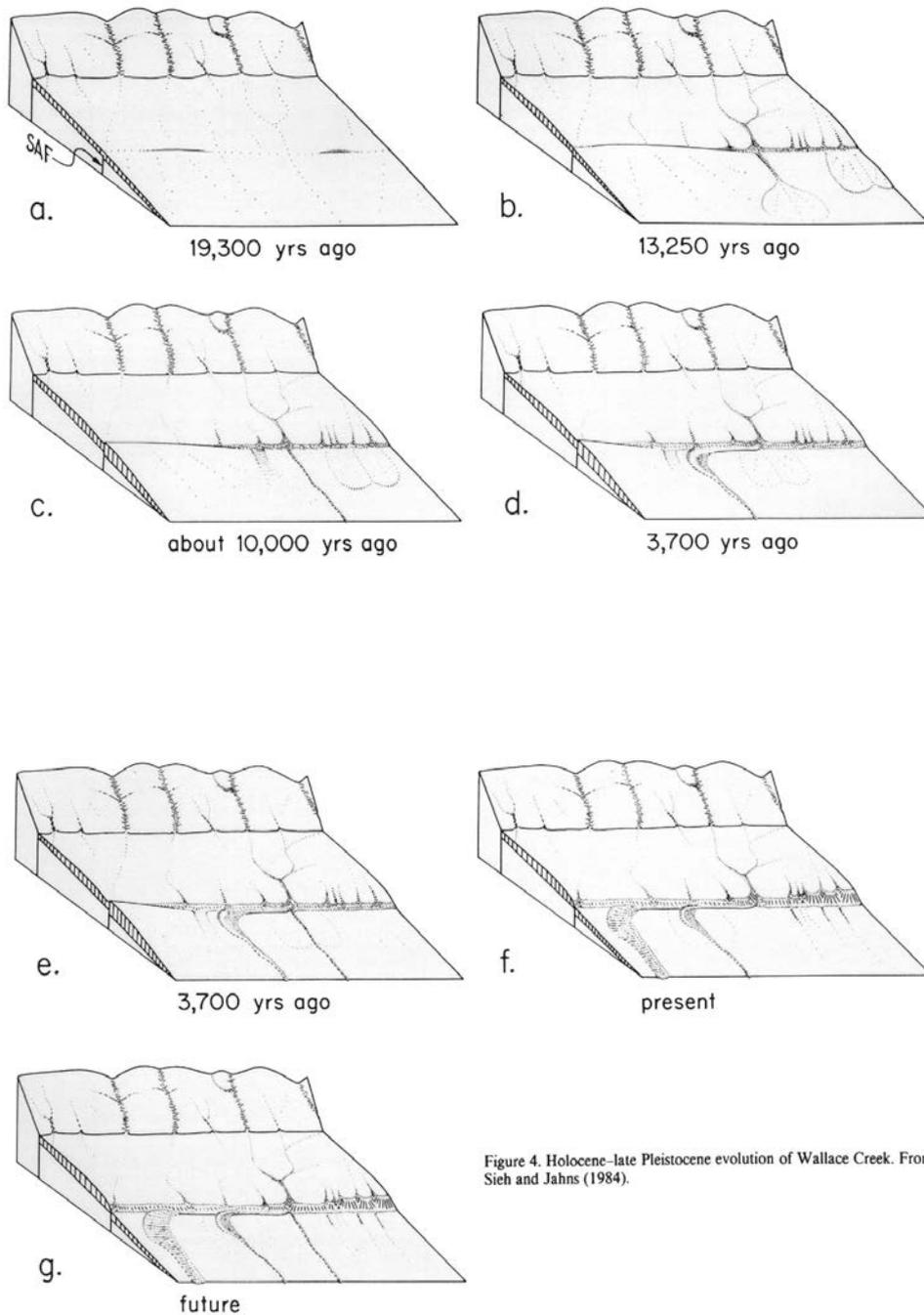


Figure 4. Holocene-late Pleistocene evolution of Wallace Creek. From Sieh and Jahns (1984).

Figure 4. Représentation schématique progressive de l'évolution du site de Wallace Creek depuis la mise en place des dépôts colluviaux de piedmont (bajada), l'incision du chenal de Wallace Creek et les phases d'accumulation de décalages et de ré-incision de la rivière intermittente. Les contraintes temporelles sont issues de datations au Carbone-14 des sédiments abandonnés dans les chenaux (Sieh and Jahns, 1984).

La vitesse moyenne de mouvement de la faille de San Andreas à ce site est contrainte à 33.9 ± 2.9 mm/an pour les derniers 3700 ans et 35.8 ± 5.4 mm/an pour les derniers 13250 ans, en bon accord avec des mesures de géodésies de nivellement et en bon accord avec des mesures de géodésie spatiale GPS (35.9 ± 0.5 mm/an ; Meade and Hager, 2005 ; Figure 2 ; Table 1).

Dans la suite nous nous focalisons sur les **bords de terrasses** comme marqueurs de la déformation le long des décrochements. En effet, ce sont des marqueurs très répandus et relativement nombreux le long des décrochements. Dans de nombreuses régions de tectonique active en convergence oblique la déformation se partitionne entre décrochement et chevauchement sur des failles distinctes, le décrochement longeant une chaîne de montagne. Cette géométrie des structures entraîne presque automatiquement la formation d'un drainage perpendiculaire à la direction du décrochement et c'est dans ces environnements que l'on peut espérer trouver de nombreux marqueurs morphologiques décalés (Figure 4).

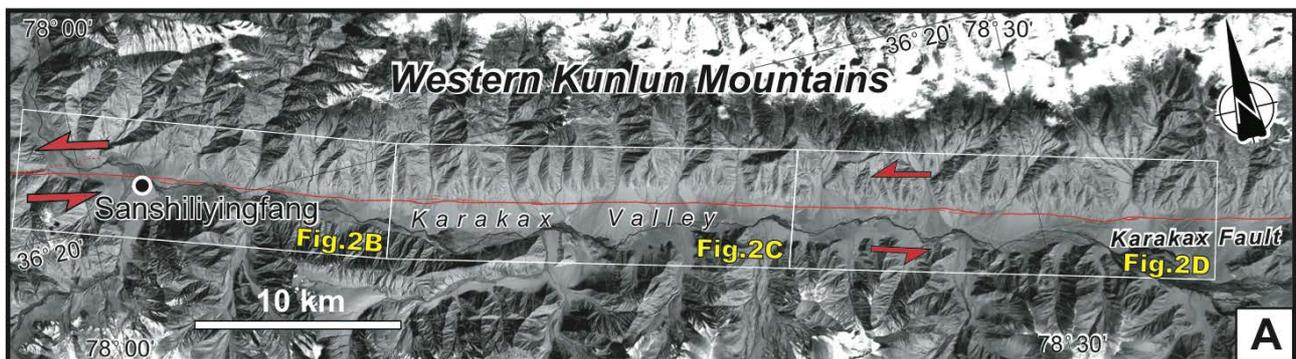


Figure 4. Exemple de drainage perpendiculaire au décrochement. Ici, la faille de la Karakax, segment occidental du décrochement de l'Altyn Tagh.

Ces environnements sont idéaux pour quantifier les déplacements récents le long des décrochements pour plusieurs raisons :

- le drainage perpendiculaire (ou quasi) permet de reconstruire avec une bonne précision les marqueurs décalés
- ces marqueurs sont associés au dépôt de sédiments et sont donc potentiellement datables
- les phases d'incision et de déposition des rivières entraînent la formation de marqueurs d'âges variés
- la longueur des chaînes de montagne et des failles décrochantes (quelques centaines au millier de kilomètres) augmentent d'autant le nombre d'observations possibles

Ces caractéristiques sont les points clés de l'approche morphotectonique (tectonic geomorphology): mesure du décalage, datation du décalage, représentativité temporelle et spatiale des mesures.



Figure 5. Site de Sangedun le long de la faille de Haiyuan (Gaudemer et al., 1995 ; photo : F. Métivier). 3 niveaux de terrasses sont abandonnés par la rivière au lit actif dépourvu de végétation. Les décalages cumulés sont d'autant plus importants que la terrasse est ancienne et haute par rapport au lit de la rivière. On notera également que la terrasse abandonnée la plus jeune ne montre pas de décalage sénestre de son bord jouxtant le lit de rivière actif (Tapponnier et al., 2001).

L'exemple typique est représenté par le site de Sangedun le long de la faille de Haiyuan (Gaudemer et al., 1995)(Figure 5). La transition glaciaire-post-glaciaire (20-12 ka) se traduit par un retour de conditions humides entraînant la mise en place de dépôts alluviaux (cônes) massifs au travers des piedmonts. Ces surfaces représentent le niveau supérieur des alluvions qui se font ensuite inciser par les rivières lorsque celles-ci réduisent la largeur de leur lit suite soit à une variation de leur charge sédimentaire ou à un changement du régime de précipitations. Cette incision est phasée et marquée par des périodes de stabilité du lit à différentes périodes et conduit à la formation de terrasses étagées d'âges différents. L'observation que le bord de terrasse jouxtant le lit actif de la rivière n'enregistre pas de décalages en raison de l'érosion active de ce bord implique que les bords de terrasses formés ainsi successivement ne deviennent des marqueurs passifs du mouvement de la faille seulement lorsque le niveau inférieur de la terrasse est lui-même abandonné. L'âge des décalages cumulés des bords de terrasse est donc associé à l'âge d'abandon de la terrasse inférieure.

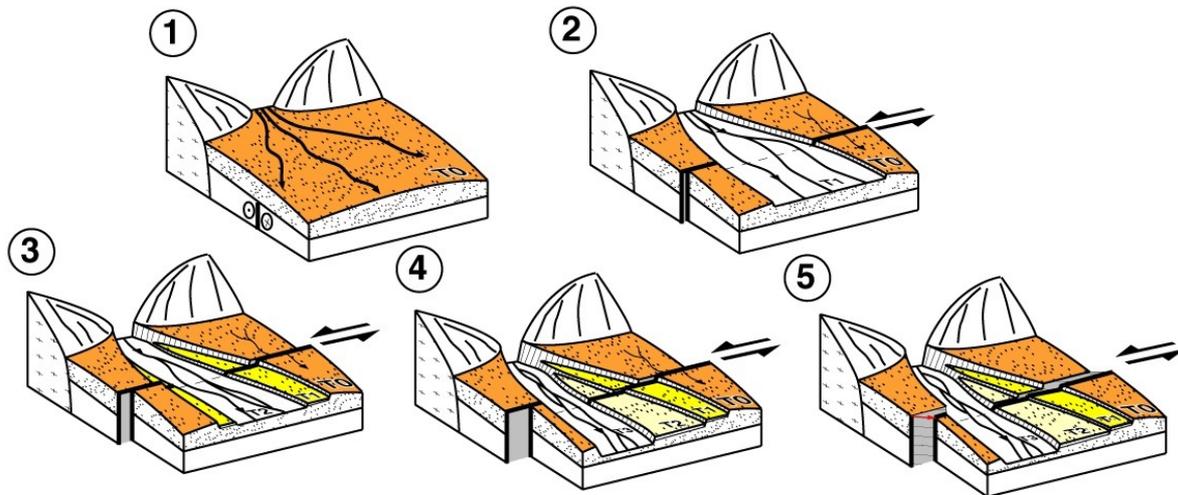


Figure 6. Blocs diagrammes montrant une séquence de formation de terrasses alluviales recoupées par une faille décrochante. 1. Mise en place d'un cône alluvial T0 lors d'une décharge sédimentaire importante. La faille est enfouie. 2. La rivière creuse un lit T1. La surface T0 est abandonnée et commence à enregistrer les mouvements sur la faille, mais son bord est constamment rafraîchi par érosion latérale. 3. Durant une nouvelle phase d'incision, T1 est abandonnée et le bord de terrasse T0/T1, devenu marqueur passif, commence à enregistrer les déplacements horizontaux. L'âge de l'abandon de T1 date le décalage du bord de terrasse. 4. Des épisodes successifs de dépôts de terrasses et d'incision conduisent à la formation de terrasses dont les bords sont décalés différemment. 5. Situation similaire, mais avec une composante de mouvement vertical. Le décalage vertical ne s'accumule qu'au moment de l'abandon de la surface. Ainsi, le décalage vertical de T1 (ou T2) est corrélé avec le décalage horizontal de T0/T1 (ou T1/T2) et avec l'âge de T1 (ou T2) (van der Woerd et al., 2002b).

Cette relation est également montrée dans la figure 6 qui montre schématiquement la formation d'une séquence de terrasses concomitante du déplacement le long du décrochement inspiré de situations rencontrées le long du segment de Xidatan de la faille du Kunlun (van der Woerd et al., 1998, 2002b ; Tapponnier et al., 2001a ; Ryerson et al., 2006).

La précision de la mesure des décalages horizontaux des bords de terrasses et les relations temporelles entre l'incision et l'abandon des différentes terrasses nécessitent de reconstituer la mise en place des différents dépôts et phase d'incisions. Ceci se fait par une approche en 3D à partir de données topographiques de précision. En effet, selon les sites, il faut s'assurer que cette relation bord de terrasse/âge de la terrasse inférieure est bien vérifiée. Ceci est rendu difficile lorsque certains niveaux de terrasses ne sont pas présents de part et d'autre de la faille, ou que les phases d'incision ne sont pas équivalentes, etc...

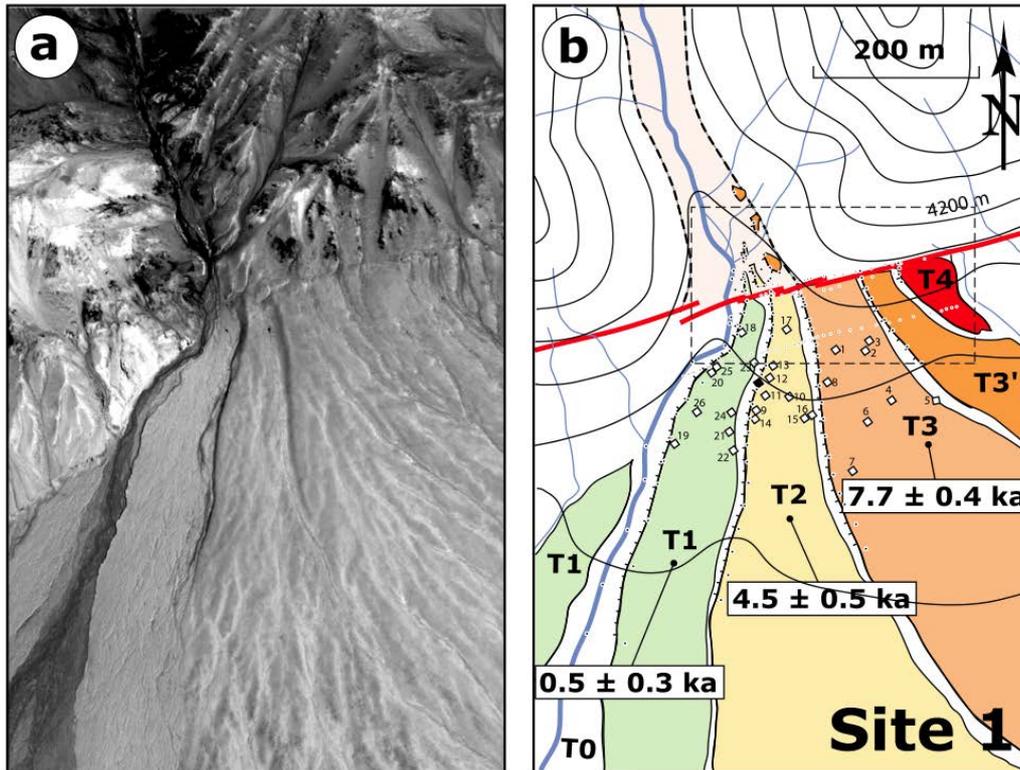


Figure 7. Image Quickbird et interprétation géomorphologique du site 1 le long de la faille de l’Altyn Tagh au Pingding Shan (Mériaux et al., 2012).

Dans l’exemple du site 1 du Pingding Shan le long de la faille de l’Altyn Tagh, certaines terrasses se sont fait érodées complètement en amont de la faille (Figure 6), la géométrie des terrasses change drastiquement entre l’amont et l’aval de la faille et enfin, certaines phases d’incision sont importantes ($> 5\text{m}$). La reconstruction 3D de la mise en place des dépôts et du mouvement sénestre sur la faille (Figure 8) permet de documenter les caractéristiques des phases d’incision de la rivière et rend compte de la variation au cours du temps du comportement de la rivière (Figure 9). En particulier, la largeur du lit actif de la rivière change de 120 m à moins de 20 m au cours de l’Holocène en s’incisant de plus de 15 m.

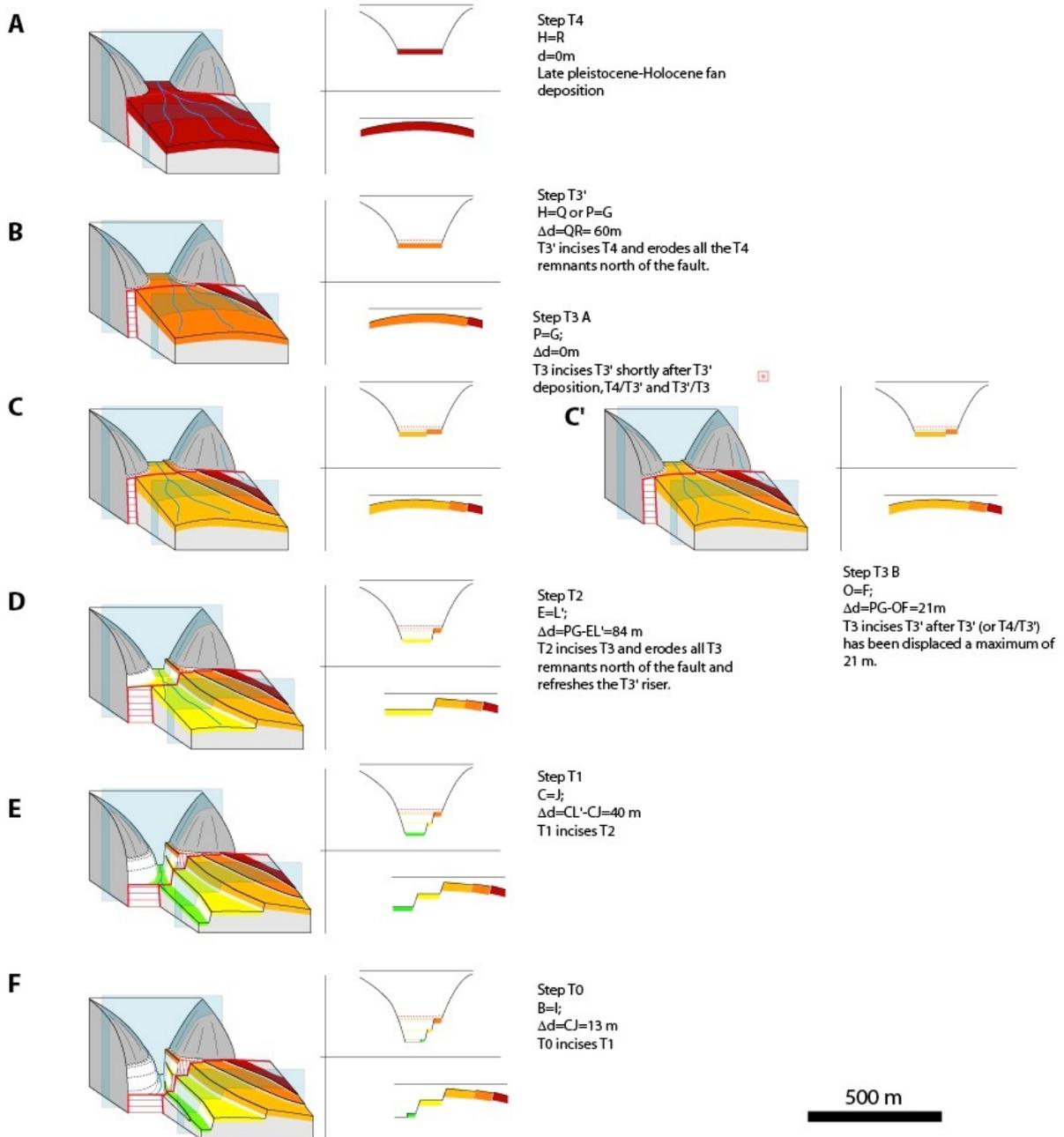


Figure 8. Site 1 – faille de l’Altyn Tagh – Pinding Shan. Evolution complexe irrégulière de l’interaction tectonique (ici déplacement horizontaux) et dynamique de rivière, à la fois incision et ajustement de la largeur du lit. Le nombre de terrasses en fonction du temps, ici 4 terrasses majeures en 14 000 ans, favorise une origine climatique à leur formation (Mériaux et al., 2012).

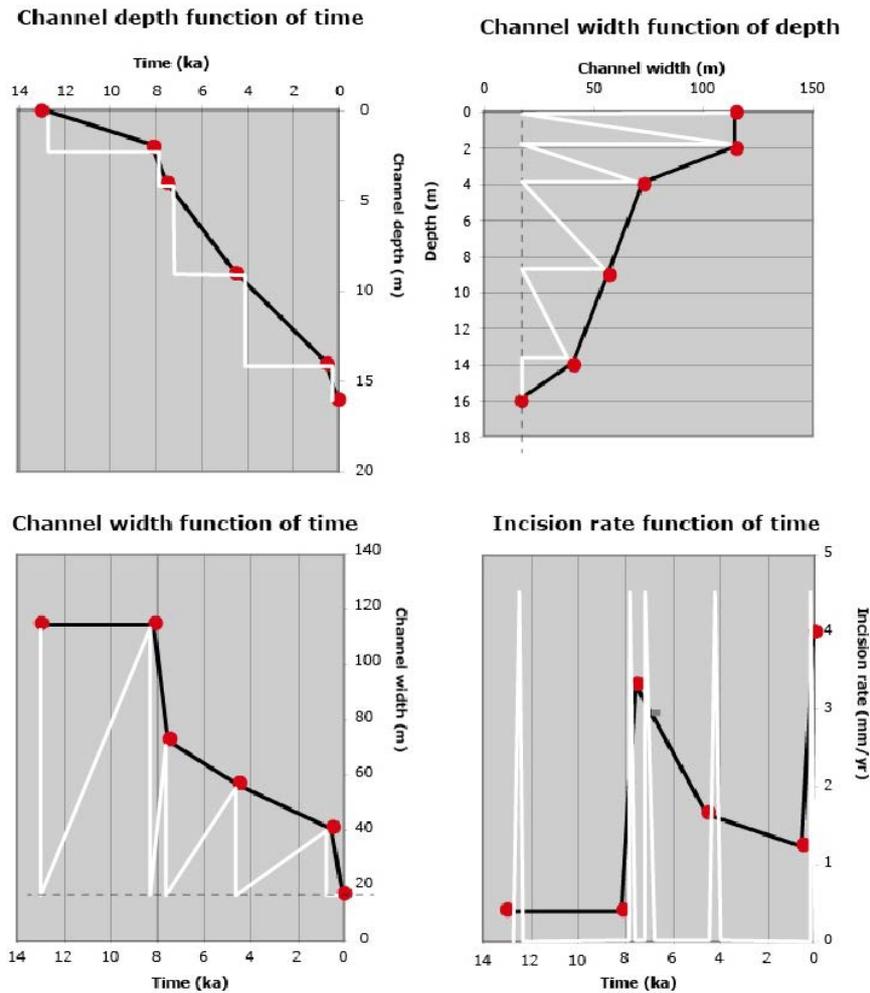


Figure 9. Illustration de l'irrégularité de l'incision de la rivière par la mesure de grandeurs caractéristiques à la sortie du bassin versant au pied de la chaîne, comme la profondeur de l'incision et la largeur du lit, contraints temporairement par la datation des surfaces alluviales abandonnées. La mise en évidence de cette évolution complexe, irrégulière, permet de reconstruire l'évolution du lit de la rivière et des phases durant lesquelles vont s'accumuler les décalages tectoniques. Trait noir, comportement moyen. Trait blanc, comportement possible de la rivière en considérant que les âges obtenus sont strictement des âges d'abandon et que les phases d'incision sont quasi instantanées.

Dans le cas du site du Pingding Shan nous avons alors considéré les bornes du décalage du chenal pour estimer la vitesse de mouvement sénestre plutôt que les bords de terrasses dont l'âge est moins bien contraint (Figure 10).

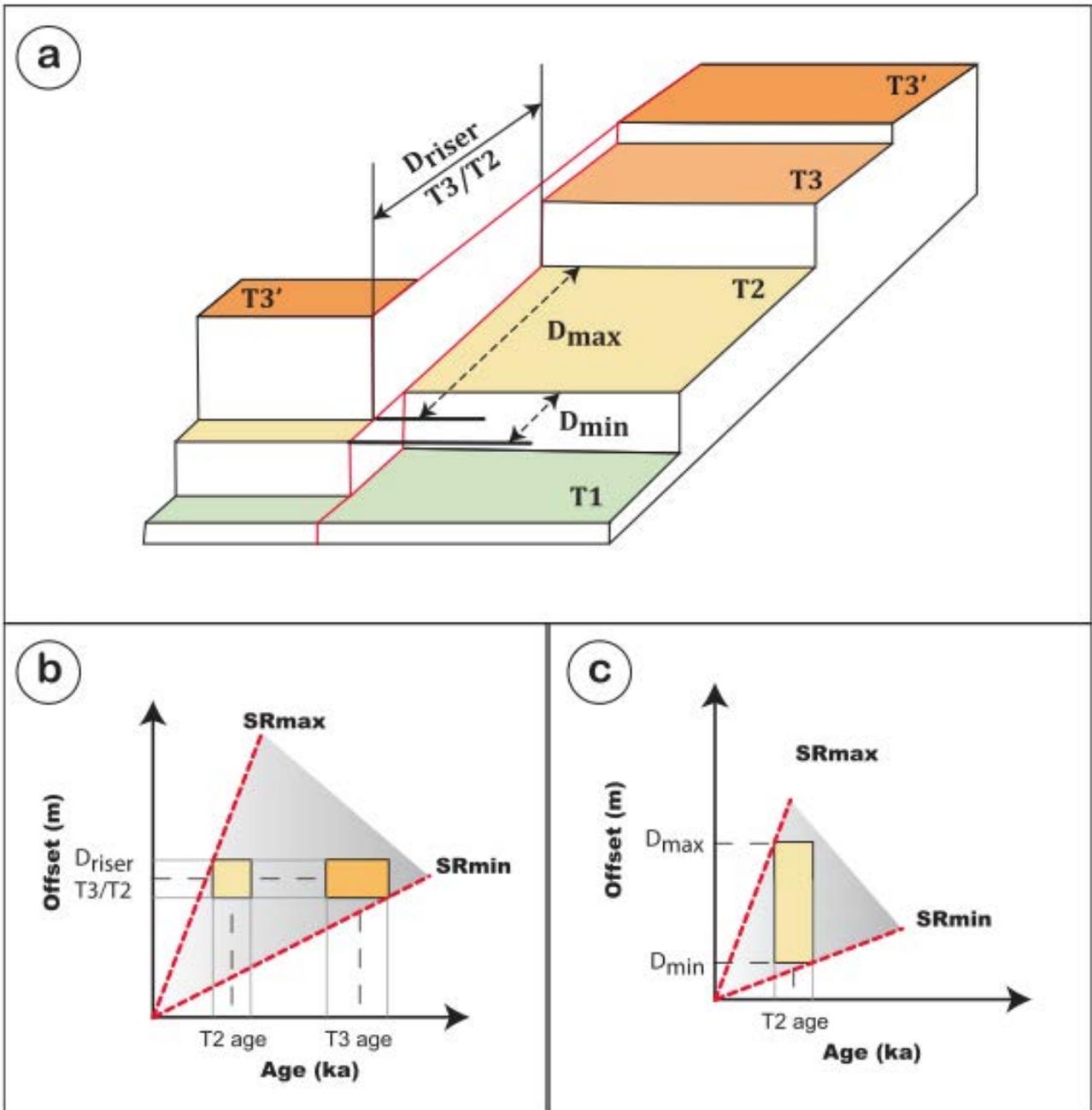


Figure 10. a) Représentation schématique de la disposition des terrasses du site 1 au Pingding Shan. On considère ici le décalage de la terrasse T2. b) Détermination de la vitesse en considérant l'incertitude sur l'âge du bord de terrasse T3/T2. c) Détermination de la vitesse en considérant les bornes du décalage d'un niveau de terrasse d'âge déterminé (Mériaux et al., 2012).

La relation simple exposée plus haut entre âge du bord de terrasse et terrasse inférieure n'est sans doute pas vérifiée partout et en tout temps. Des études contradictoires (par exemple le long de l'Altyn Tagh, Mériaux et al., 2004 versus Cowgill, 2007) ont conduit à discuter la part d'interprétation dans les incertitudes liées aux déterminations de vitesse long-terme (epistemic uncertainty ; Hanks and Thatcher, 2006). Il est clair que considérer le décalage de bords de terrasses sans pouvoir le dater directement est une source potentielle d'erreur. En particulier, la possibilité qu'un bord de terrasse, bien que séparant des terrasses de même âge puisse avoir un âge différent de part et d'autre de la faille a été considérée comme une limite à l'utilisation des bords de terrasse pour caractériser un décalage tectonique (Lensen, 1964, 1968 ; Suggate, 1960), la préférence étant mis sur le décalage de chenaux incisés à l'intérieur des terrasses. La combinaison de datations ¹⁴C et cosmonucléides conduit à proposer des scénarios variés sur la nature des terrasses et leur mode d'emplacement et d'abandon pour fixer les limites possibles à l'âge des décalages (Mériaux et al., 2005). Pour contourner le problème, et par soucis d'objectivité, il a été suggéré de borner l'âge du bord de terrasse par l'âge de la terrasse supérieure et l'âge de la terrasse inférieure, ou encore de ne considérer que l'âge maximum possible, c'est-à-dire l'âge de la terrasse supérieure conduisant à n'estimer que des vitesses minimales (Cowgill, 2007).

Pour contourner la problématique du « bornage » inférieur et supérieur du bord de terrasse par les âges des terrasses inférieures et supérieures, Gold et al. (2009) et Cowgill et al. (2009) ont tentés de dater plus directement le bord de terrasse lui-même. En fait, la datation de la formation du bord de terrasse, c'est-à-dire du moment de l'incision, est toujours indirecte, mais le but est de réduire l'incertitude de l'âge en échantillonnant de la matière organique pour des datations ¹⁴C dans l'empilement des colluvions au pied du bord de terrasse. Le but essentiel étant de déterminer si le bord de terrasse est ou non rajeunit par la formation de la terrasse inférieure, ou autrement dit, si celle-ci pouvait montrer un diachronisme d'un bord à l'autre. La démarche implique des hypothèses sur le mode de formation et de dépôt des colluvions au pied des bords de terrasse, et l'absence de remaniements de la terrasse supérieure. Au final, l'incertitude n'est pas forcément réduite, les possibilités de dater précisément les colluvions n'étant pas obligatoirement réunies.

Dans les parties qui suivent sont abordés quelques problèmes d'interprétation géomorphologique et d'incertitude liés aux datations par les isotopes cosmogéniques.

II.1.2 Du séisme au décalage cumulé : cas de la faille du Kunlun et séisme de Kokoxili

Le tremblement de terre de Kokoxili (Mw 7.9, 14 Novembre 2001) est le plus important séisme jamais enregistré sur une faille décrochante au Tibet. Il a fait l'objet de plusieurs missions pluri-disciplinaires depuis une dizaine d'années (Van der Woerd et al., 2002a, 2004 ; Klinger et al., 2005 ; Xu et al., 2006 ; Lasserre et al., 2005 ; Tocheport et al., 2006 ; Li et al., 2005).

On met en évidence la variation rapide et grande (facteur 2 à 4) du glissement cosismique lors de la rupture (Figure 11).. Comment réconcilier ces observations avec la détermination du glissement moyen en 1 site ?

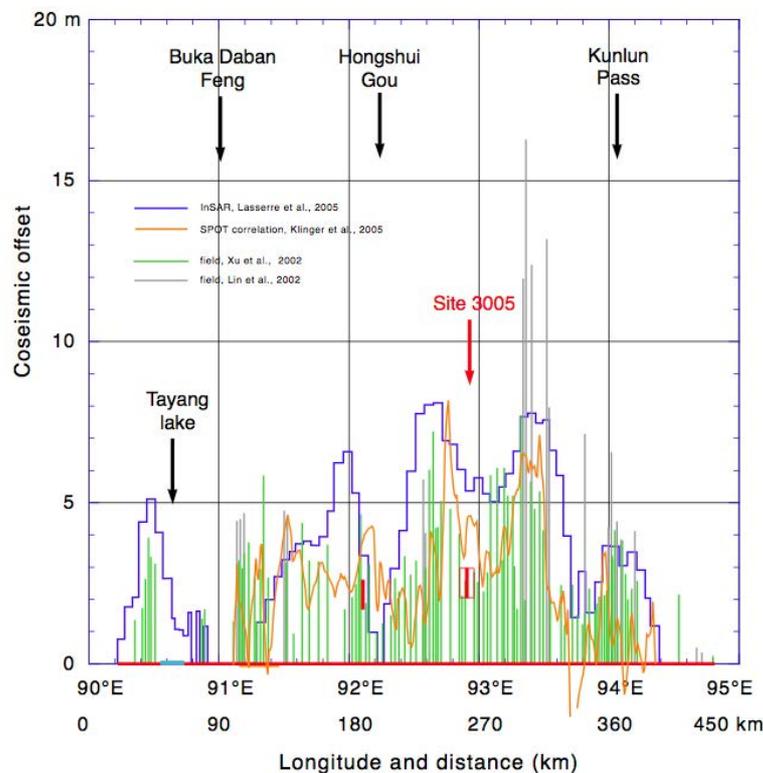


Figure 11. Glissement cosismique lors du séisme du 14 novembre 2001 le long de la faille du Kunlun déterminé par différentes méthodes. La position du site 3005 est indiquée dans la partie centrale, entre 2 lobes de glissement maximum.

Quel que soit le modèle de comportement sismique d'une faille (characteristic slip, time predictable, etc...) il est généralement admis que le déplacement des blocs loin de la faille finit par se traduire par la même quantité de déplacement sur la faille. Alors que la détermination de la vitesse long-terme sur des périodes de temps largement supérieures au temps de retour des séismes (plusieurs milliers d'années) montre une relative constance sur des sites distants de plus de 800 km le long de la faille du Kunlun, on peut donc supposer que la faille accumule le même déplacement en n'importe quel point de la faille. Si cela est vrai pour les déplacements cumulés, il semble que cela ne soit plus vrai pour des mesures de décalages et temporelles qui se rapprochent des valeurs du

déplacement co-sismique et du temps de récurrence des séismes : il y aurait donc un lissage des disparités de glissement au cours du temps et au cours des séismes successifs, en même temps qu'une variation temporelle de la vitesse de glissement au cours d'un ou plusieurs cycles sismiques (Weldon et al., 2004).

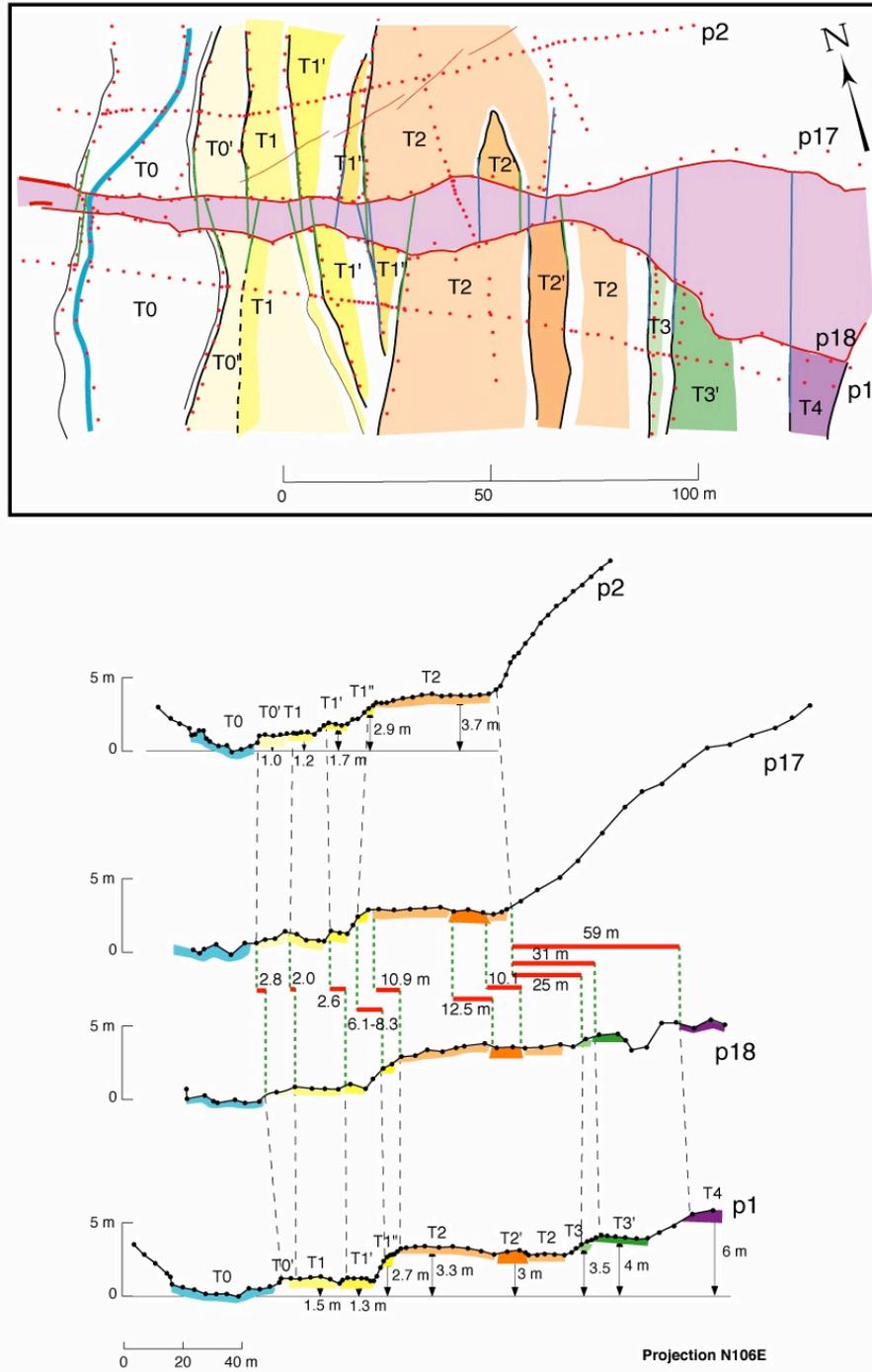


Figure 12. Carte géomorphologique et tectonique de la rupture du séisme de Kokoxili au site 3005 à partir d'observations de terrain, d'analyse d'images satellitaires de haute précision et de levés topographiques de terrain. En bas, projections de profils topographiques levés parallèlement à la direction de la faille, avec indication de la hauteur des terrasses et de leur décalage sénestre, co-sismique pour les plus jeunes, et cumulé pour les plus anciennes.

La rupture de Kokoxili, exceptionnelle par sa longueur de 400 km, nous permet d'aborder ce problème de la répétition des séismes en un site donné (site 3005) dans la partie centrale de la

rupture (Figure 11) où le déplacement co-sismique correspond à un minimum du déplacement moyen, environ 2.5 m. De part et d'autre du site 3005, la rupture a atteint ses maximums de glissement d'environ 8-10 m (Klinger et al., 2005 ; Xu et al., 2005). Un ensemble d'une dizaine de mesures de décalages contraint par des mesures de micro-topographie au théodolite rend compte de la variation de glissement co-sismique pour 4 ou 5 événements de 1 à 5 m, avec la possibilité que les déplacements de 5 m soient le résultat de deux séismes avec des déplacements moyens de 2.5 m (Figures 12 et 13).

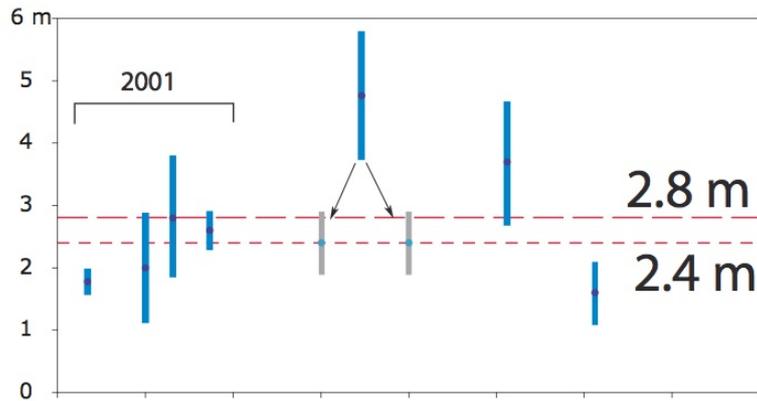


Figure 13. Compilation des mesures de décalages géomorphologiques les plus petits au site 3005 ; recherche d'un glissement co-sismique moyen.

Les datations par les isotopes cosmogéniques de certaines des terrasses décalées permettent de proposer un scénario de glissement sur les derniers 5000 ans (Figure 14) qui impliquent, compte tenu des mesures variables des décalages cosismiques et cumulés, une variation de la vitesse de glissement au cours du temps (Weldon et al., 2004).

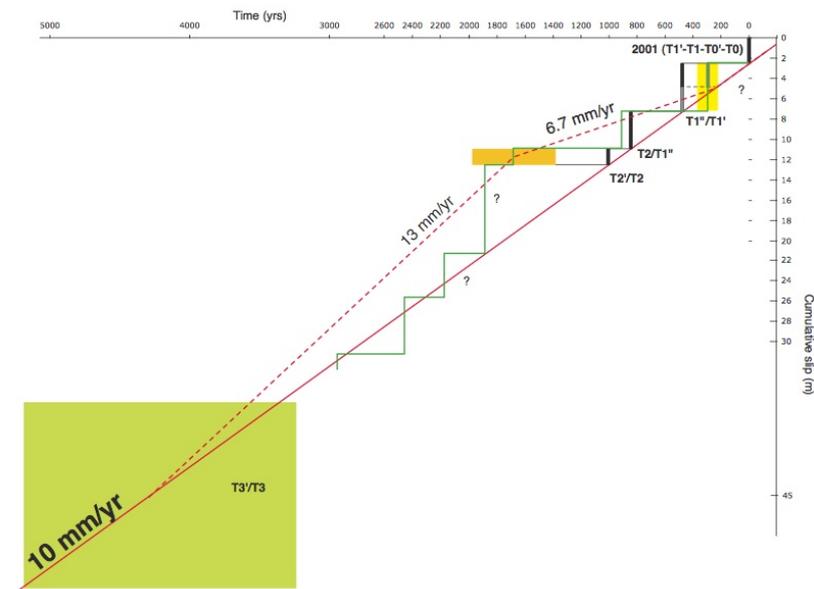


Figure 14. Tentative de reconstruction du glissement au cours du temps au site 3005 à partir des décalages des terrasses et de leur datation aux isotopes cosmogéniques.

II.2 Limites des datations des terrasses alluviales par les isotopes cosmogéniques : érosion et héritage

Dans la formulation la plus simple qui exprime l'accumulation de nucléides en fonction du temps et si on se place loin de l'équilibre séculaire, la limitation à la datation de matériaux transportés puis déposés et abandonnés se résume à deux inconnues : l'érosion in-situ subie par le matériel échantillonné ou son environnement proche et la part de nucléides déjà contenue dans l'échantillon au moment de son dépôt (héritage).

En deux exemples, le site de Indio le long du segment de Coachella de la partie sud de la faille de San Andreas (Van der Woerd et al., 2006) et le site de Louzhaowan le long de la faille de l'Altyn Tagh (Van der Woerd, 1998), j'illustre l'impact de l'érosion d'une part et de l'héritage d'autre part. Dans les deux cas, les processus qui affectent la concentration en nucléides cosmogéniques sont contraints par des datations croisées par d'autres méthodes.

II.2.1 Héritage aléatoire : le site de Louzhaowan, faille de l'Altyn Tagh

Les terrasses de Louzhaowan se situent le long de la rivière Tanghe qui prend sa source dans le massif du Tanghenan Shan, l'un des chaînons des Qilian Shan à la bordure nord du Tibet (Taponnier et al., 2001 ; Meyer et al., 1998). Les chaînes de montagnes des Qilian Shan se branchent sur le décrochement de l'Altyn Tagh à l'endroit de jonctions triples décrochevauchantes (Meyer et al., 1998 ; van der Woerd et al., 2001) qui accommodent la diminution de vitesse du décrochement de l'Altyn Tagh vers le nord-est (Meyer et al., 1996 ; Mériaux et al., 2005 ; Xu et al., 2005).

Au site de Louzhaowan, les terrasses de la Tanghe sont coupées et décalées par la faille de l'Altyn Tagh (Figure 15). Le décalage moyen du niveau supérieur des terrasses (niveau T3) est de 140 m (van der Woerd, 1998). Des datations par les nucléides cosmogéniques de surface et de subsurface dans deux terrasses T1 et T3, ainsi que des datations Carbone-14 d'un niveau de subsurface syn-conglomérat permettent de contraindre les âges maximums des terrasses alluviales (Figure 15b). Ainsi, l'âge de T3 est inférieur à 14.7 ka (^{14}C) et daté à 12.5 ± 1.4 ka (^{10}Be), et l'âge maximum de T1 est de 10.2 ± 0.7 ka.

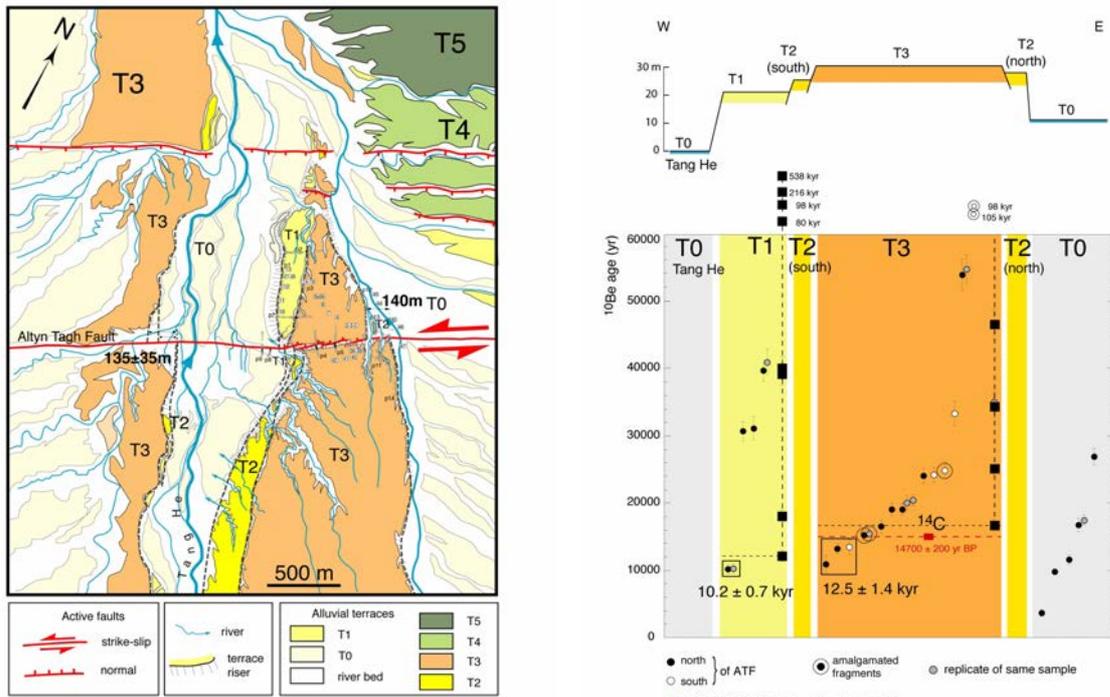


Figure 3b

Figure 12

Figure 15. a) Interprétation géomorphologique du site de Louzhaowan. Un ensemble de terrasses alluviales déposé par la Tanghe sont recoupés par la faille de l'Altyn Tagh. Trois niveaux majeurs de terrasses sont identifiés. Le décalage du niveau supérieur T3 est de 140 m (140 ± 30 m). b) Ensemble des datations par les nucléides cosmogéniques (^{10}Be) de galets de surface et sub-surface sur T0, T1 et T3, ainsi que de datations Carbone 14 d'un niveau interstratifié dans le conglomérat de T3. Les âges de T3 et de T1 sont de 12.5 et 10.2 ka. Noter la dispersion des âges sur l'ensemble des niveaux T0, T1 et T3, à la fois en surface et en sub-surface qui indique une composante héritée aléatoire importante.

L'âge de T3 ainsi que son décalage de 140 m détermine une vitesse moyenne de 11.2 mm/an pour la faille de l'Altyn Tagh. Une borne minimale de la vitesse peut être déterminée avec l'estimation minimale du rejet sénestre (90 m) et l'âge maximum de T3 (14.7 ka), c'est-à-dire, 6.1 mm/an. La borne maximale serait de 16 mm/an (170 m en 11 ka, âge minimum de T3). Ces estimations de vitesses sont compatibles avec le décalage et l'âge maximum de T1 (71 ± 30 m en 10.2 ± 0.7 ka) qui permettent de déterminer une borne minimale de la vitesse de 6.9 ± 3.5 mm/an.

Les datations au carbone-14, ainsi que la concentration en ^{10}Be de galets de la sub-surface dans les conglomérats des terrasses de T3 et T1 permettent de déterminer des âges maximum possibles pour les terrasses. Ceci permet d'identifier les galets qui comportent une exposition héritée (Figures 15b et 16)(e.g., Anderson et al., 1996 ; LeDortz et al., 2012).

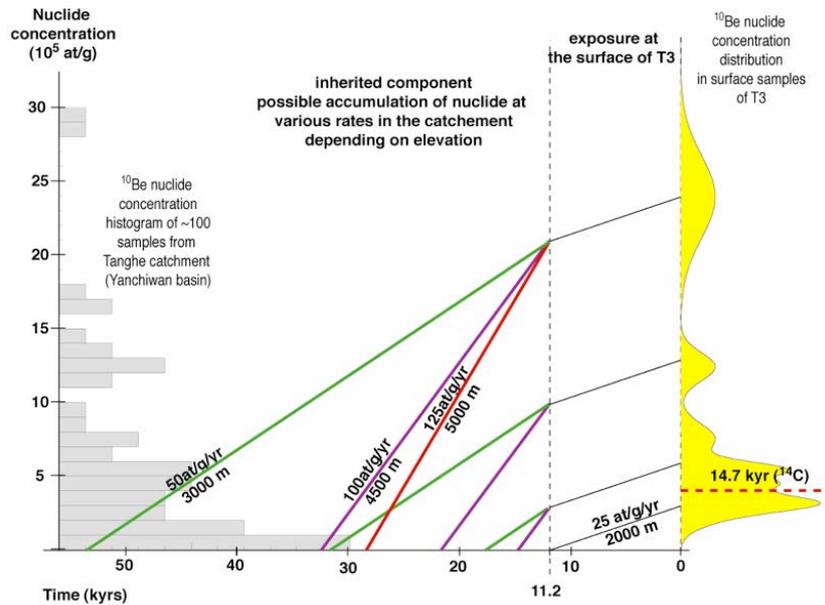


Figure 16. A droite, distribution des concentrations en ^{10}Be des échantillons du conglomérat de la terrasse T3 et au centre, reconstitutions de scénarios d'expositions selon l'altitude possible des sources (e.g., Anderson et al, 1996). A gauche, pour indication, un histogramme des concentrations rencontrées dans des échantillons situés dans le bassin versant source de la rivière Tanghe, le bassin de Yanchiwan (données non publiées).

On constate que l'ensemble des terrasses datées montre la même caractéristique, à savoir, un étalement de concentrations en ^{10}Be à la fois en surface qu'en sub-surface, qui implique que la Tanghe transporte du matériel remanié de dépôts anciens de son bassin versant (Figure 16). Cette interprétation n'est possible que grâce à la datation complémentaire par le Carbone-14 et par la datation de galets de sub-surface dans des profils en profondeur. L'étalement des concentrations en ^{10}Be ne résulte donc pas de la dégradation par érosion de la surface, mais du remaniement de matériels issus de dépôts alluviaux ou glaciaires du bassin versant. Cette constatation est confortée par le fait que la longueur du bassin versant en amont du site d'échantillonnage est de 300 km, comportant des bassins sédimentaires intermédiaires à plus haute altitude (3000-4000 m a.s.l.).

II.2.2 Stabilité et érosion de surfaces alluviales : le site d'Indio, faille de San Andreas

Suite à nos travaux publiés en 2006 (van der Woerd et al., 2006), le SCEC (Southern California Earthquake Center) a repris l'étude du cône alluvial décalé (Figure 17) dans le but d'en faire un « site école » pour la détermination de protocoles de 1) datation par les nucléides cosmogéniques 2) détermination des incertitudes d'interprétations (systemic uncertainties, e.g., Hanks and Thatcher, 2006) pour la mesure des décalages tectoniques (SCEC field notebook, 2007). Le travail de réinterprétation du site sur la base d'observations de terrain jointes à l'analyse de photos aériennes (celles de 1963 et une nouvelle acquisition en 2003) (Figure 18) et l'analyse de 26 échantillons sur

6 surfaces alluviales, nous avait amener à conclure que la surface T2 daté à 35 ± 2.5 ka, décalé de 565 ± 80 m (550 à 700 m), déterminait une vitesse moyenne de 15.9 ± 3.4 mm/an. Ce travail révisait à la baisse la vitesse de 25 mm/an proposée par Keller et al. (1982) sur la base d'un décalage de la même surface de 700 m daté à 28 ka par une méthode indirecte d'analyse de profils de sol.

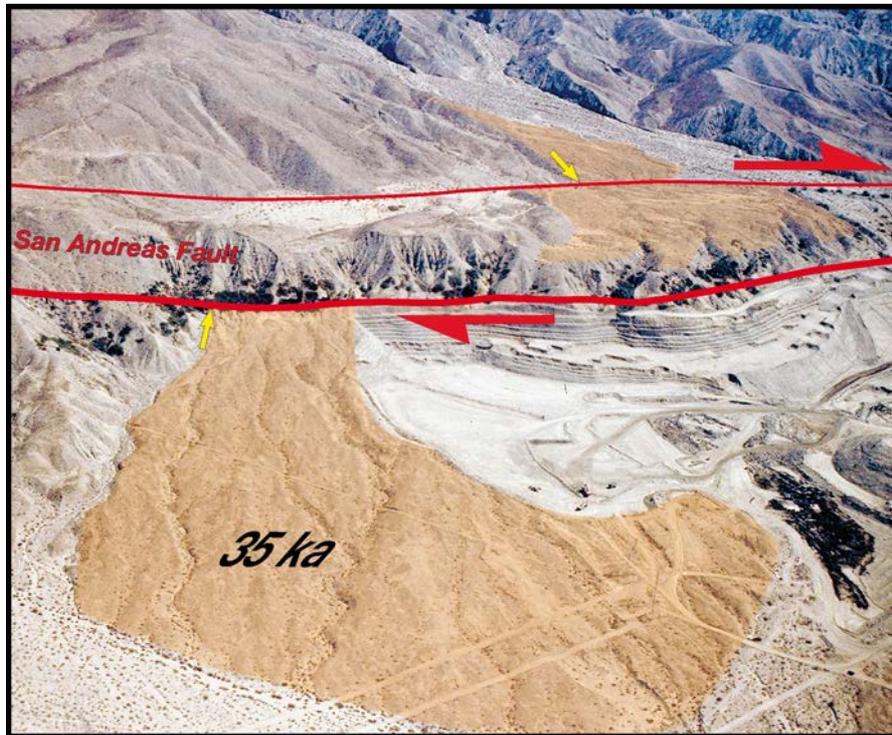


Figure 17. Vue aérienne oblique vers le nord-est du cône alluvial du site d'Indio. La trace double de la faille de San Andreas est surlignée en rouge. Le ton orangé couvre la surface alluviale T2 dont les âges cosmogéniques (sans corrections ni d'héritage, ni d'érosion) de blocs de la surface permettent d'estimer un âge de 35 ka (Van der Woerd et al., 2006). Les flèches jaunes, de part et d'autre de la zone faillée, indiquent les points de raccord extrême (piercing points) de la surface T2 avant décalage tectonique, espacés de 500 à 700 m selon les interprétations.

Dans le cadre du SCEC, une ré-analyse du site a été effectuée (Behr et al., 2010 ; Fletcher et al., 2010), pour mieux contraindre l'âge de la surface T2 à partir de nouvelles datations par les nucléides cosmogéniques de blocs de surface et par la datation d'horizon calcique de sub-surface par les séries de désintégration de l'Uranium, et mieux estimer le décalage cumulé du cône alluvial daté.

L'ensemble des datations par les séries de l'Uranium d'horizons calciques de T2 au site d'Indio (Fletcher et al., 2010) montre des âges qui s'étalent de 30 à 45-50 ka, impliquant donc un âge probable de formation de la surface T2 vers 45-50 ka (Figure 18). L'hypothèse à la base de ces datations est que les concrétions calciques du sol ou à la base de blocs dans les alluvions ne se forment qu'après l'abandon définitif du dépôt par la rivière. Ils peuvent par contre se former à des époques bien postérieures en fonction des périodes favorables à leurs formations (changements

Ces nouvelles datations impliqueraient donc de réviser l'âge que nous avons estimé de 35 ± 2.5 ka sur la base d'âges d'exposition de blocs de la surface en faisant l'hypothèse d'une érosion négligeable. L'absence d'horizon calcique plus jeune que 30 ka, et la concentration d'âges cosmogénique autour de 35 ka (âge plateau) indiqueraient que l'érosion n'est pas un processus constant depuis le dépôt de la surface, mais un processus phasé (ou pulsé) modulé par les variations climatiques. Ces données pourraient témoigner d'une évolution rapide de la surface du cône, entre 50 et 30 ka suivi d'une stabilisation depuis (formation de pavement). Le taux d'érosion pourrait alors atteindre 0.04 cm/an pendant 20 ka, puis devenir négligeable par la suite, et expliquerait l'ensemble des données.

Cependant, on peut interpréter ces données autrement, en faisant remarquer tout d'abord que l'âge obtenu Behr et al. (2010) et Fletcher et al. (2010) pour la formation et l'abandon du cône alluvial (45 ka) ne coïncide pas avec un épisode pluvial connu par les paléoclimatologues bien illustré dans l'ouest des Etats-Unis par l'histoire des niveaux du système des lacs du Great Basin (Lowenstein et al., 1999 ; Benson et al., 1990). Si l'on ne peut pas exclure la formation de cônes alluviaux il y a 50 ka d'après les proxis paléoclimatiques, il est par contre clair que si les niveaux lacustres témoignent des changements d'hygrométrie à l'échelle régionale, alors la phase de remplissage lacustres culmine à 13ka bien après 35 ka, en contradiction avec une stabilisation de la surface à 35 ka.

D'autre part, une autre interprétation de la relation taille des blocs en fonction de leur âge est possible et à l'inverse de l'interprétation classique en terme de déflation de la surface (altération/érosion). Cette dernière est d'ailleurs la plus répandue et conduit à l'échantillonnage préférentiel des gros blocs dans la plupart des études, ce que nous pensons contradictoire avec nos observations (Chevalier et al., 2005a, 2005b), et est contredit également dans des études spécifiques (Briner, 2009). Nos réflexions sont guidées par le fait, remarquable à Indio, que les gros blocs sont plutôt rares et que le matériel transporté par la rivière intermittente lors de crues (dépôts de crue) est plutôt de taille relativement modeste (diamètre inférieur à 40 cm ; blocs, cobbles). Les gros blocs (diamètre > 1m) (boulders) sont donc des anomalies dans ces dépôts et se déplacent probablement à l'occasion de crues exceptionnelles non représentatives du mode de transport et dépôt moyen. Ainsi, il est tout à fait possible d'imaginer que ces blocs soient présents dans le lit ou cône actif bien avant l'abandon définitif de la surface moyenne, tels des îlots résistants et peu mobiles. Par conséquent, ceux-ci accumulent une exposition antérieure à l'abandon de la surface depuis le moment où ils sont stabilisés à la surface. Pour peu qu'ils soient suffisamment grands et que les dépôts successifs soient peu épais, alors on peut arriver à une situation où la distribution des concentrations est fonction de la taille des blocs, sans exclure la possibilité d'un certain bruit, comme sur la figure 19 (ou Figure 13 de Behr et al., 2010).

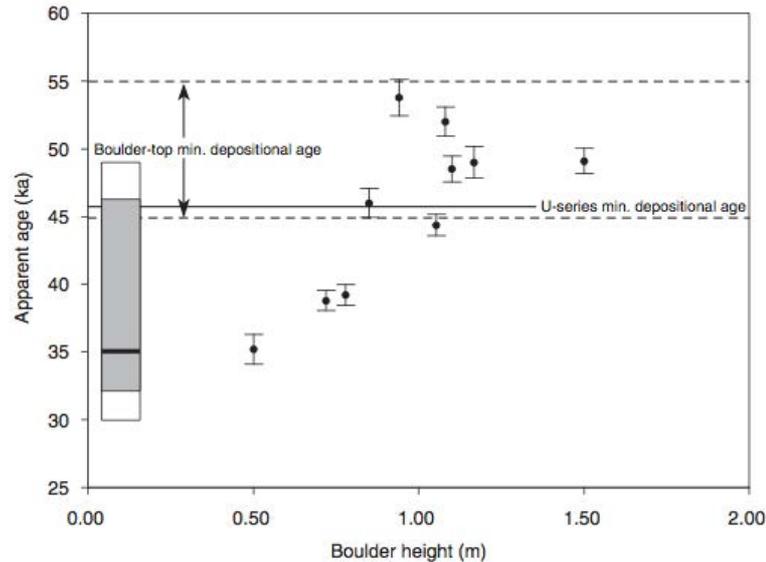


Figure 13. Apparent age of boulder-top samples (assuming zero erosion rate with 2-sigma error bars) plotted against boulder height relative to the current fan surface. Boulders less than ~1.0 m appear to scale with height, whereas those greater than ~1.0 m cluster at around 50 ± 5 ka, as discussed in text. Dashed lines bracket our conservative estimate of the minimum depositional age of T2. Gray rectangle represents the range of ages from cobble-size clasts from van der Woerd et al. (2006); outer rectangle is the full range in the van der Woerd data set including 1-sigma errors; bold black line is the mean cobble age of 35.5 ka. Solid line shows the minimum depositional age from U-series on pedogenic carbonate from Fletcher et al. (this volume).

Figure 19. Copie de la Figure 13 de l'article de Behr et al. (2010). Interprétation de la relation entre taille et âge des blocs comme résultant de l'exhumation progressive par érosion des blocs depuis 50 ka. Cette relation peut aussi être interprétée comme une stabilisation progressive de blocs dans un lit de rivière peu énergétique et intermittent, l'abandon final du niveau alluvial ayant lieu vers 35 ka.

Enfin, il faut noter que les horizons calciques datés par U-Th (Fletcher et al., 2010) se trouvent à des profondeurs importantes : 1.3 à 1.5 m. Sans discuter la qualité des échantillons de Fletcher et al. (2010) dont la cohérence temporelle suggère des systèmes fermés (sans perte d'uranium) et probablement sans héritage, c'est l'hypothèse du « time-lag » ou du temps supposé entre abandon de la surface et début de formation des horizons calciques qui est discutable. Cette dernière hypothèse est à l'origine du choix systématique de l'âge le plus ancien comme étant le plus représentatif ou le plus proche de l'âge d'abandon de la surface. Les auteurs n'envisagent jamais la possibilité de formation des horizons calciques avant l'abandon définitif de la surface, parce qu'il est considéré impossible de former des concrétions dans les lits actifs en raison du lessivage. Ceci est probablement vérifié dans les cas de bassins versants de grande taille aux rivières pérennes à semi-pérennes. Ici, il s'agit d'un petit bassin versant dont la rivière n'est active qu'en cas de pluie (rare) dans une région aride. Sur le dernier siècle, les précipitations sont inférieures à 100 mm/an pour des températures parmi les plus chaudes de l'ouest des Etats-Unis, entre 16 et 32°C avec des maxis à 50°C. Nous envisageons donc, dès lors que les apports hydriques sont intermittents, que la formation d'horizon calcique ait pu avoir lieu bien avant l'abandon définitif des surfaces de dépôts, surtout si ces horizons se forment à des profondeurs supérieures à 1 m. Dans ce cas, l'âge le plus ancien U-Th ne représenterait donc que l'avènement de conditions hygrométriques/climatiques

favorables à leur formation sans relation directe avec l'âge d'abandon du niveau alluvial de surface. Nous notons à ce titre, que les âges les plus anciens pour chacun des clastes analysés au moins deux fois s'étalent de 37 à 52 ka, sur une période longue de 15 ka (Fletcher et al., 2010), et ne représente pas un événement temporel bien défini. L'ensemble des âges U-Th s'étale de 24 à 52 ka, une période encore plus grande (28 ka), démontrant la possibilité de croissance des encroûtements calciques dans des conditions hygro-climatiques variés.

Les données de subsurface que nous avons commencé à analyser dans la partie sud du cône T2 sont également compatibles avec ce modèle (Figure 21), ainsi que des données sur l'âge des vernis du désert sur certains des blocs (35.5 ± 2.5 ka ; Liu and Broecker, 2013 ; Figure 22).

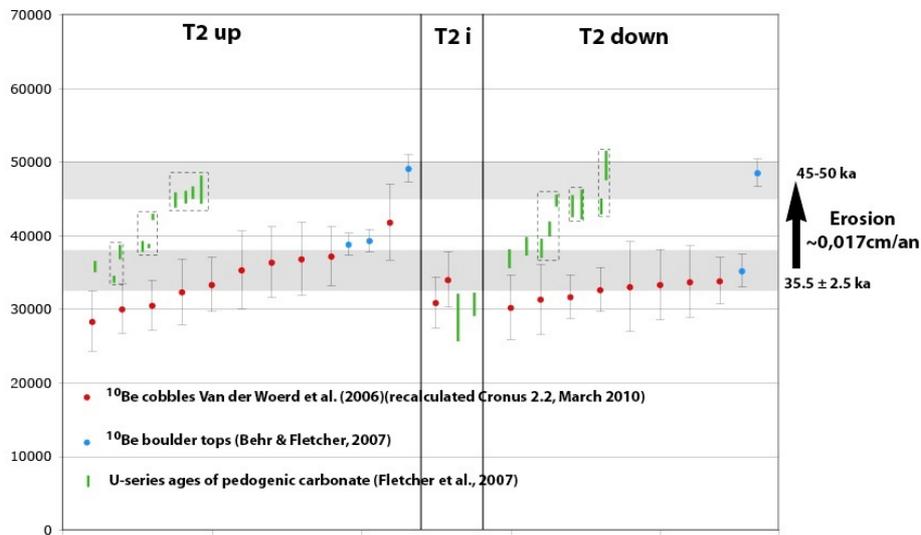


Figure 20. Ensemble des âges issus de la datation de blocs par les nucléides cosmogéniques et d'horizon calcique par les séries de l'Uranium (Van der Woerd et al., 2006 ; Behr et al., 2010 ; Fletcher et al., 2010). Les âges ^{10}Be des gros blocs dont le haut est situé à 1.20-1.40 m au-dessus de la surface ainsi que les âges des horizons calciques du sol les plus anciens indiquent 45-50 ka. Ces distributions peuvent s'interpréter par 1) mise en place à 50 ka et érosion/déflation pendant 20 ka puis stabilisation, ou 2) abandon définitif de la surface à 30-35 ka et érosion/déflation progressive.

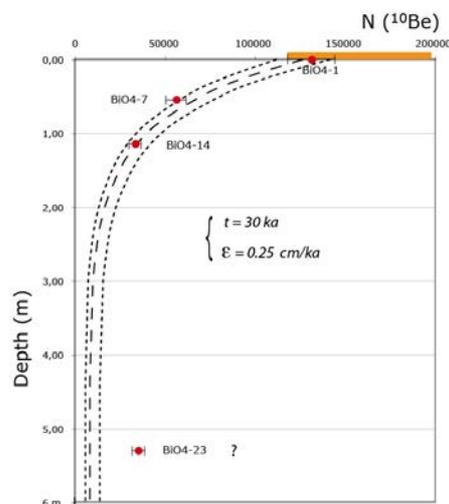


Figure 21. Résultats préliminaires d'un profil de concentration en ^{10}Be dans la surface T2 (A.-S. Mériaux, person. comm.). En considérant l'héritage moyen négligeable, les données sont compatibles avec un âge d'exposition de 30 ka et une érosion de 0.25 cm/ka, c'est-à-dire au moins 75 cm de déflation (densité 2.6).

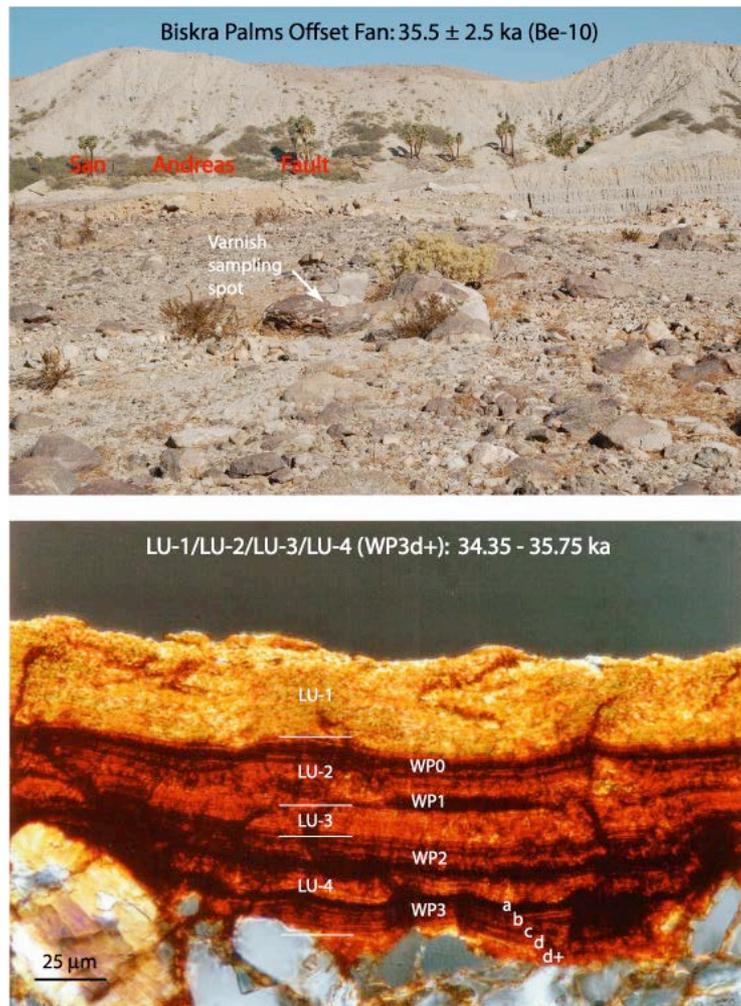


Figure 22. Vue de la surface du cône daté à 35.5 ± 2.5 ka par ^{10}Be (van der Woerd et al., 2006) et microstratigraphies dans un vernis de Mn et Ba qui une fois corrélées avec une échelle de référence (Liu and Broeker, 2013) contraignent l'âge à 34-36 ka.

Des résultats récents de datations de blocs issus du cône alluvial T2 par microstratigraphie du vernis formé à leur surface (Liu and Broeker, 2013) semble indiquer que l'âge d'abandon de la surface T2 est bien celle que nous avons déterminée à 35.5 ± 2.5 ka (Figure 22). Ceci conforterait donc une mise en place de blocs de tailles différentes au cours de la formation de la terrasse, et une relative stabilité de la surface depuis son abandon définitif. La formation des encroûtements de carbonates pédogéniques aurait donc commencé avant l'abandon total de la surface par la rivière, ce qui semble possible dans l'environnement aride du site et compte tenu du caractère intermittent du cours d'eau.

Il est à noter que cette révision de l'âge du cône T2 de 35 à 50 ka ne semble pas changer l'estimation de la vitesse moyenne de la faille de San Andreas à Indio car les auteurs de la révision de l'âge de T2 revoient également à la hausse le décalage cumulé de la surface T2. Alors que nous avons estimé le décalage à 565 ± 80 m, ces auteurs préfèrent des valeurs de 660, 770 et même 980 m (SCEC, 2007). La vitesse moyenne resterait donc à sa valeur révisée de 16 mm/an. Il faut

souligner ici que des sites où il est possible de faire une estimation de vitesse moyenne sur 50 ka sont rares et que malheureusement la complexité de la zone de faille à ce site (Figure 18) ne permettra probablement pas d'avoir une aussi bonne précision sur le décalage (30-50%) de T2 que sur son âge (5-10%).

III Datation des moraines et paléoclimats

III.1 Le cas de la datation des moraines : érosion mais pas d'héritage ?

L'utilisation des moraines comme proxy paléoclimatique est ancienne. Elles sont aussi utilisées en tectonique active comme marqueur de déformation cumulée le long des failles (Peltzer et al., 1989 ; van der Woerd et al., 2002b ; Lasserre et al., 2002 ; Mériaux et al., 2004, 2009; Chevalier et al., 2005a, 2005b, 2012 ; Brown et al., 2002, 2005 ; Matmon et al., 2006). Dès les premières applications des cosmonucléides aux datations in-situ, les moraines ont été la cible de datations par les nucléides cosmogéniques comme le ^{36}Cl , le ^{10}Be et le ^{26}Al (e.g., Phillips et al., 1996).

Le consensus actuel sur le mode d'évolution des moraines suite à leur abandon par les glaciers est dominé par un modèle de dégradation diffusif et l'hypothèse d'un héritage nul ou négligeable (e.g., Putkonen and Swanson, 1983). L'interprétation la plus classique consiste donc à prendre l'âge le plus ancien d'une distribution d'âge comme étant le plus proche de l'âge vrai de l'objet géomorphologique et celui qui a subi le moins d'altération ou d'érosion. Si cela est vérifié dans de nombreux cas, il est possible que la distribution étalée soit, au contraire, en relation avec le style de dépôt de la moraine et son mode de formation, c'est-à-dire un héritage. Je montre, ci-dessous, deux moraines qui ont des distributions d'âge très différentes (Figure 25). Sur une moraine, les âges sont bien groupés, sur l'autre on a un continuum d'âge qui s'étale sur 40 ka (Van der Woerd, 2009b).

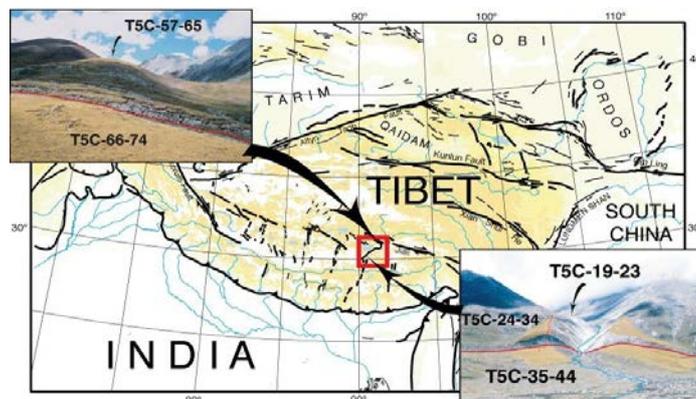


Figure 23. Carte des failles actives du plateau du Tibet. Le cadre rouge indique la région étudiée du massif du Niangqentanglha bordant l'un des systèmes de graben extensif du sud Tibet. Deux sites, Gulu au nord, Yangbajin au sud, montrent des moraines latérales recoupées par des failles normales actives. Les nombres font références aux blocs morainiques échantillonnés.

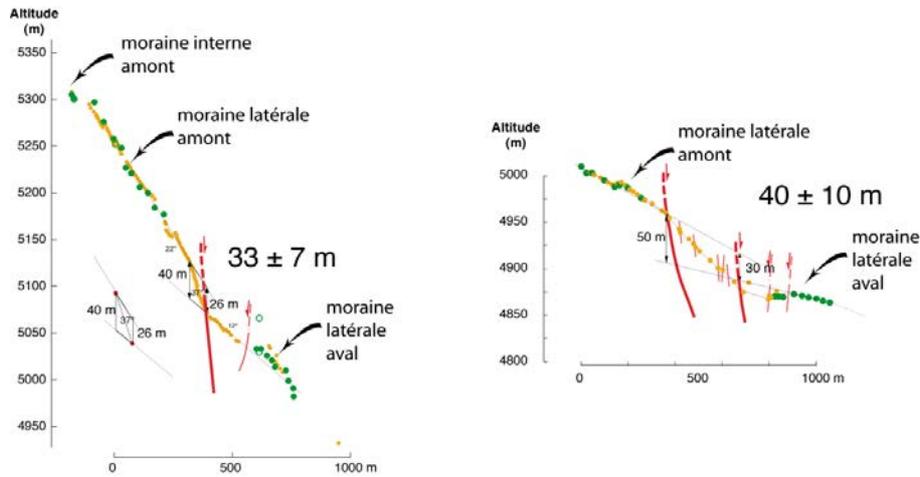


Figure 24. Profils topographiques au travers des deux moraines latérales de Yangbajin et de Gulu. Les profils mettent en évidence le décalage cumulé tectonique dû au mouvement sur les failles normales. En vert, la position des blocs morainiques qui ont été échantillonnés pour des datations cosmogéniques.

Les deux ensembles morainiques se situent dans des environnements glaciaires semblables mais qui comportent des différences notables comme la taille de la vallée glaciaire, la distance au cirque glaciaire source, la pente moyenne du bassin versant, l'altitude du sommet de la chaîne, la pente moyenne des moraines, l'altitude des moraines (200 m de différence) (Figures 23 et 24). Alors que les morphologies actuelles des deux ensembles de moraines ne peuvent être différenciées qualitativement, les distributions des concentrations en ^{10}Be , donc des âges, des blocs à leur surface sont significativement différentes.

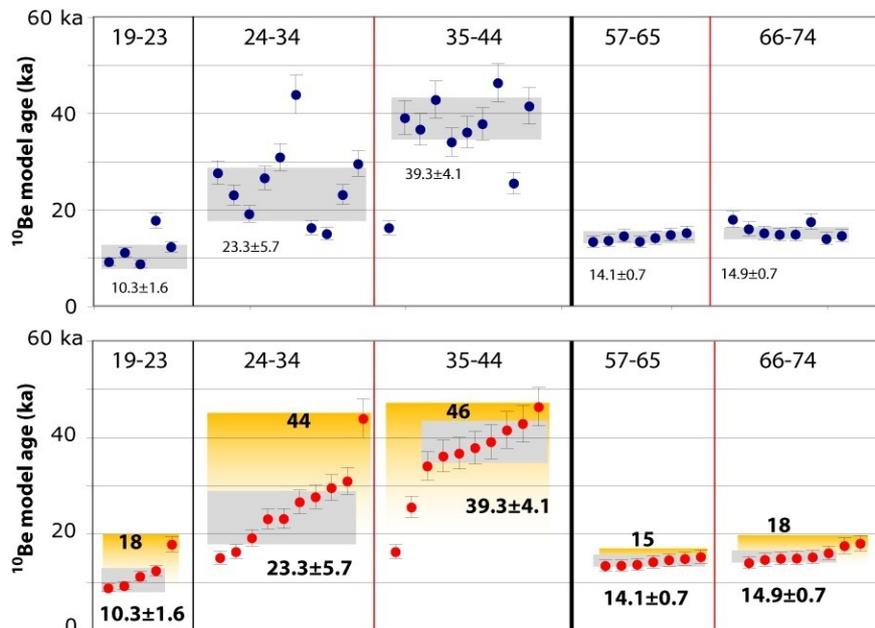


Figure 25. Répartition des âges des blocs échantillonnés sur les moraines latérales de Yangbajin, à gauche, et de Gulu, à droite. En haut, les données sont disposées dans l'ordre d'échantillonnage (c'est-à-dire, d'ouest en est ou du haut vers le bas le long des crêtes morainiques), en bas, elles sont représentées dans un ordre d'âge croissant pour chaque moraine.

Pour chaque moraine, nous avons échantillonné 2 fois 10 échantillons sur l'une des moraines latérales de part et d'autre de l'escarpement cumulé. Au site de Gulu, les âges sont bien groupés et définissent des moyennes de 14.1 et 14.9 ka, à l'ouest et à l'est de la faille, respectivement (Figure 25). Ces moyennes ne sont pas significativement différentes et indique une mise en place de la moraine entre 15 et 14 ka. Les âges les plus vieux, 15 et 18 ka, pourraient indiquer une mise en place légèrement antérieure, avec peut-être la marque du retrait glaciaire, commençant à 18 ka pour la partie la plus distale de la moraine. La moraine marquerait donc l'avancée maximale du dernier maximum glaciaire (LGM ou MIS-2).

Pour le site de Yangbajin, les âges montrent un étalement beaucoup plus grand entre 15 et 45 ka pour la moraine latérale et 10-18 ka pour la moraine frontale en amont de la faille. Plusieurs interprétations sont donc possibles. La moraine frontale entre 10 et 18 ka pourrait être l'équivalent de la moraine de Gulu, c'est-à-dire, le dernier maximum glaciaire (LGM ou MIS-2). La moraine latérale serait donc plus ancienne et pourrait correspondre à l'avancée antérieure du MIS-3b ou 40 ka, en accord avec l'observation quasi systématique au Tibet d'une avancée plus importante au cours du MIS-3b par rapport au LGM (Chevalier et al., 2011). Ceci signifierait donc que l'étalement des âges reflète un processus de dégradation de la moraine, avec l'âge le plus vieux représentant l'âge de la moraine. La dégradation plus importante de la moraine MIS-3b pouvant en partie être le résultat du LGM (Figure 25).

Cette interprétation laisse de côté la différence notable des distributions d'âges. En faisant l'hypothèse qu'un certain nombre d'échantillons ont une histoire d'exposition différente (héritage par remaniement, ou altération/érosion plus importante), on peut alors considérer des ensembles d'âges distincts qui montreraient que la partie distale de la moraine pourrait avoir été mis en place au MIS-3b (40 ka), alors que la partie plus proximale daterait du LGM (23 ka). La moraine frontale serait alors plus jeune (10 ka ; avancée du Younger Dryas ?; Tshudi et al., 2003) (Figure 25).

Ces interprétations variées ont des conséquences tectoniques et géomorphologiques significatives. Du point de vue géomorphologique, il me paraît important de proposer une interprétation qui prend en compte la spécificité des distributions d'âges sur les différentes moraines. Ceci n'est possible qu'à condition de dater un grand nombre d'échantillons, ce qui est rarement le cas. Dans la seconde interprétation, on considère que l'érosion ou la dégradation de la moraine jouent un rôle mineur dans la forme de la distribution des concentrations en ^{10}Be et que celle-ci résulte essentiellement du processus de mise en place de la moraine, soit par incorporation de matériel pré-exposé, soit par incorporation de matériel durant une période longue (glacier quasi stationnaire). Ces hypothèses sont testables sur des sites clés (e.g., Briner et al., 2009 ; Chevalier et

al., 2011), même s'il faut sans doute se garder de généralisations trop systématiques tant les moraines et la dynamiques des bassins versants diffèrent.

III.2 Datations de polis glaciaires dans les Alpes françaises

La faille de la Remuaz est un escarpement de socle qui peut se suivre sur 6 km le long du flanc sud-est du massif des Aiguilles Rouges dans le massif des Alpes. La fraîcheur de l'escarpement dont la base visiblement rajeunie sur plusieurs dizaines de mètres dans une région des Alpes qui était couverte de glace durant la dernière glaciation, pourrait indiquer la trace de mouvements tectoniques récents. C'est également dans cette région que sont décrits 2 séismes historiques d'avril et août 1905 dont la localisation précise ainsi que la source restent débattus (Figure 26).

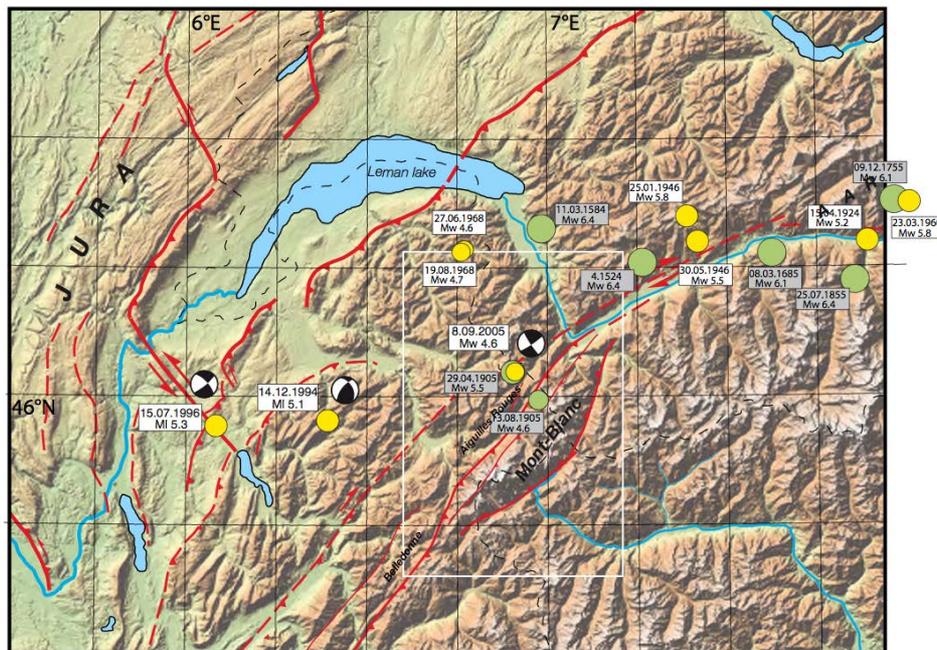


Figure 26. Carte sismotectonique du nord-ouest des Alpes au niveau du Mont-Blanc. Les failles majeures d'après Thouvenot et al. (1998), Leloup et al. (2005), Armijo et al., (1986b). Epicentres macrosismiques (cercles verts et jaunes) des événements majeurs ($M_I \geq 5$) de SisFrance. Les mécanismes au foyer des événements de 1996 et 1994 sont de Thouvenot et al. (1998) et Fréchet et al. (1996), respectivement. Le mécanisme de l'événement de 2005 provient du SSS (ETH, Zurich).

Dans le cadre de la thèse de P.J. Alasset, (2005 ; direction M. Meghraoui, M. Cara) des travaux exploratoires ont été entrepris dans la vallée de Chamonix le long de l'escarpement de faille. Une analyse géomorphologique de terrain en parallèle à des prospections géoradars a précisé le cadre géométrique de cette faille. Des datations cosmogéniques de roches moutonnées et polis glaciaires

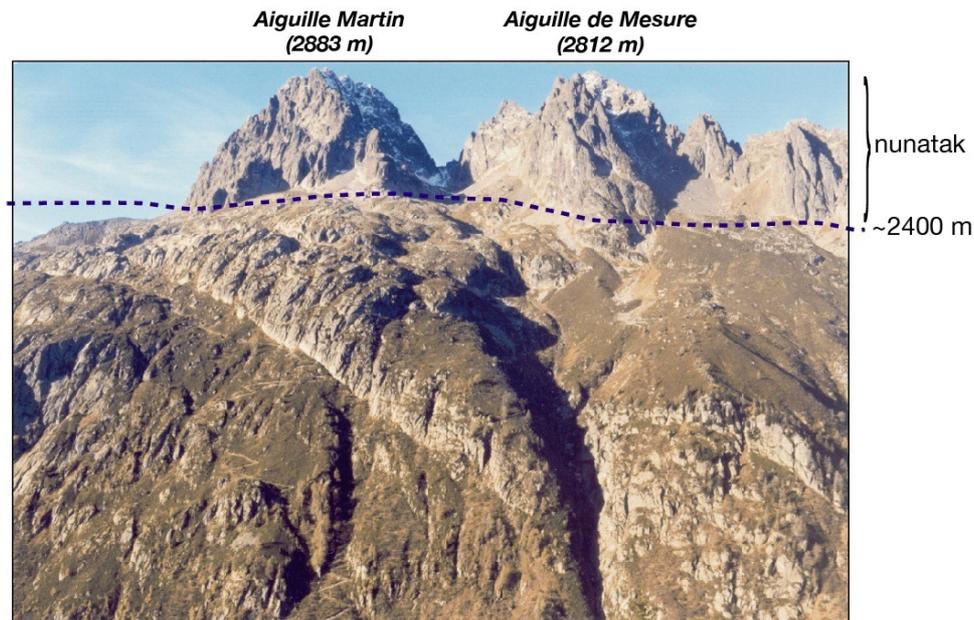


Figure 27. Vue vers l'ouest du massif des Aiguilles Rouges. Lors du dernier maximum glaciaire (15-20 ka) la hauteur du remplissage glaciaire atteignait la base des Aiguilles Rouges (ligne pointillée à 2400 m d'altitude) recouvrant largement la trace de l'escarpement de la faille de la Remuaz. La trace de cet escarpement est visible le long du flanc du massif comme un mur raide de couleur claire à mi-pente dans le massif. Le rejet topographique total atteint 40-60 m, la base raide a une hauteur de 3 à 5 m.



Figure 28. Vue de la base de l'escarpement au contact des dépôts de colluvions enherbées. Une bande de 20 à 30 cm d'épaisseur dépourvu de lichens semble attester d'un rejeu récent du contact colluvion-escarpement. Les causes de ce rafraîchissement de l'escarpement sur plusieurs dizaines de mètres sont discutées (tectonique, gravitaire, tassement, effet des névés, etc...).

aux abords de l'escarpement ont eu pour objectif de préciser le moment de la déglaciation de cette partie du massif des Aiguilles Rouges. Les âges obtenus (8 à 11 ka) en cours d'interprétation, encore rare sur la géomorphologie glaciaire dans cette vallée, sont comparés aux connaissances des avancés et retraits glaciaires et apportent un éclairage nouveau sur la dynamique glaciaire du massif. Ces âges apportent également une contrainte quantitative sur l'activité maximale possible de la faille de la Remuaz, même s'il est difficile de quantifier précisément les mouvements sur la faille qui sont d'au moins plusieurs mètres. Plus récemment, le séisme de Vallorcine (septembre

2005)(Fréchet et al., 2011) apporte un nouvel éclairage sur les données sismiques historiques de la vallée.

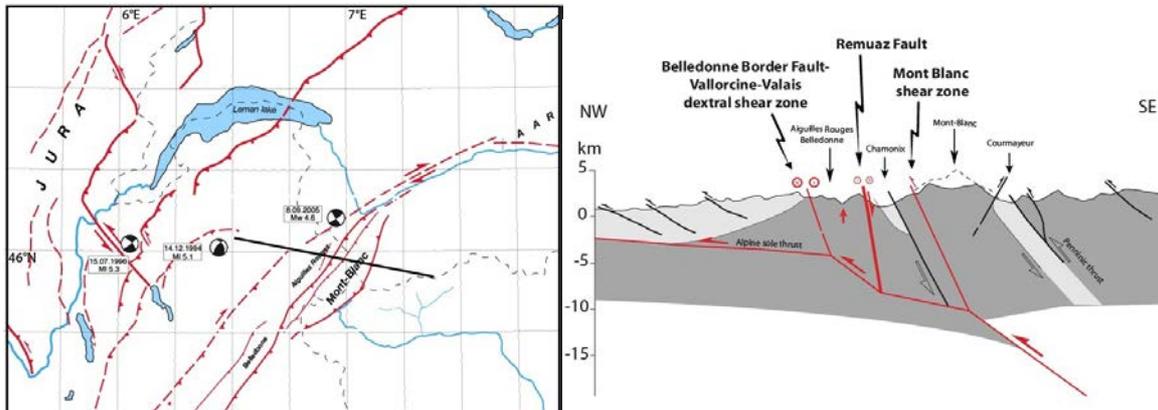


Figure 29. A gauche, carte des principales failles actives et mécanismes au foyer des séismes récents. A droite, coupe simplifiée à travers les massifs du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges. Positionnement de la faille de la Remuaz avec un positionnement possible normal ou normal-décrochant.

L'origine de l'extension au sein du massif du Mont Blanc-Belledonne reste un sujet discuté. Cette extension des parties internes de la chaîne Alpine a été attribuée à un fluage d'origine gravitaire (postorogenic gravitational collapse) qui fait suite à un raccourcissement tectonique qui a pris fin (Delacou et al., 2004), au mouvement d'extrusion latérale de la partie interne des Alpes due au mouvement de rotation de l'Apulie (Fréchet et al., 1996, 2011 ; Champagnac et al., 2006), à des conséquences de mouvements verticaux d'origine tectonique (comportement du slab) (Baran et al., 2014) ou d'origine climatique globale (Champagnac et al., 2009). On ne peut pas non plus exclure qu'une partie de la déformation normale au SE des Aiguilles Rouges soit reliée à l'expulsion vers le haut d'un prisme cristallin dans un contexte en raccourcissement (e.g., Leloup et al. 2005 ; Masson et al., 2002 ; Malavieille et al., 2010) comme le suggère la coupe simplifiée (Figure 29b) et le mécanisme au foyer des séismes les plus importants depuis un siècle dans cette partie des Alpes (Figure 29a).

III.3 Glaciations synchrones ou asynchrones des variations de températures globales

III.3.1 Interprétation des distributions d'âges

Rapidement avec l'extension des datations par les radionucléides cosmogéniques les questions relatives aux glaciations et à leur extension se sont précisées au Tibet. L'existence de calottes couvrant tout le plateau n'est plus d'actualité. Mais si on arrive à confirmer des avancées glaciaires au MIS-6, et à les distinguer des avancées postérieures, on est loin de pouvoir préciser l'importance des amplitudes des différentes glaciations. On est loin aussi de pouvoir discerner dans l'ensemble

des datations les phases globales de variation climatique, telles qu'elles sont inscrites dans les variations du delta-O18 dans les carottes de glaces au Tibet ou ailleurs. Pour cela, il faudrait que les datations soient plus précises, non pas du point de vue analytique, mais du point de vue de l'interprétation des séries d'âges obtenues sur les moraines.

Rares sont les études qui corrélées avec d'autres méthodes de datation (C14, OSL) permettent de décrire avec une bonne précision les avancées glaciaires. Celles-ci sont en général restreintes à l'Holocène, si ce n'est à l'Holocène supérieur (Schaefer et al., 2009 ; Tschudi et al., 2003). Dès que l'on s'intéresse aux avancées glaciaires plus anciennes, les incertitudes grandissent. D'où, sans doute, le débat sur l'asynchronicité des avancées glaciaires au Tibet par rapport aux grandes variations climatiques de l'hémisphère nord (e.g., Owen et al., 2008).

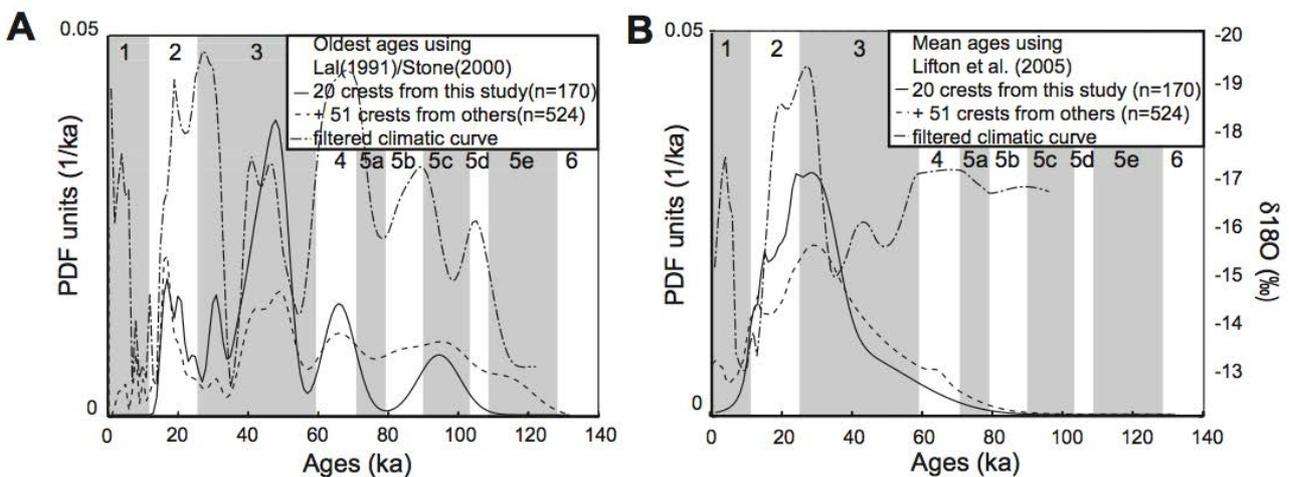


Figure 30. Tentative de corrélations des âges les plus vieux des moraines ou de l'âge moyen avec une courbe de variation climatique (Chevalier et al., 2011), le delta 18O de la calotte glaciaire de Guliya (Thompson et al., 1997).

Nous avons complété la base de données d'âges et tenté d'expliquer l'ensemble des âges obtenus par deux modèles extrêmes, l'un qui considère que l'érosion exhume progressivement les blocs avec peu d'héritage et donc l'échantillon le plus ancien de chaque distribution est l'âge le plus proche de la formation de la moraine, et un autre modèle, qui considère que l'érosion est négligeable et donc que la moyenne des âges est représentative de l'âge de formation de la moraine (Chevalier et al., 2011)(Figure 30). La corrélation faible de ces modèles avec des données indépendantes des variations climatiques ne permet pas de discriminer l'un ou l'autre des modèles. Si les minimas à 20 et 40 ka sont retrouvés dans la base de données des moraines, il n'en reste pas moins que certaines distributions d'âges montrent des différences de plus de 50% entre l'échantillon le plus jeune et le plus ancien rendant difficile l'attribution d'une moraine à un événement

climatique unique. D'autres part, de nombreuses moraines semblent ne pas se corréliser avec un épisode climatique froid.

III.3.2 Quelle stratégie pour la datation des moraines ?

Cependant la base de données de datation par cosmonucléides des moraines, si elle est l'une des plus importantes (Owen et al., 2008 ; Heyman et al., 2011), avec près de 1000 blocs datés sur environ 230 moraines différentes, ne comporte que 20% de moraines datées avec 5 échantillons (ou 45 moraines) ou encore 2-3% de moraines datées avec 10 échantillons, c'est-à-dire, 5 moraines ! (Van der Woerd et al., 2011). Il est dès lors, difficile d'en tirer un modèle d'interprétation fiable pour les âges d'exposition des moraines. Pour essayer de mieux contraindre cela, nous contribuons à augmenter cette base de données d'environ 25%, avec un ensemble de 250 échantillons sur 32 moraines, c'est-à-dire 84% de moraines datées avec 5 échantillons ou 22% datées avec 10 ou plus d'échantillons (Chevalier et al., 2011). Il est en effet difficile d'interpréter une distribution d'âge si elle ne comporte que 3 ou 4 échantillons, même s'ils ont tous le même âge.

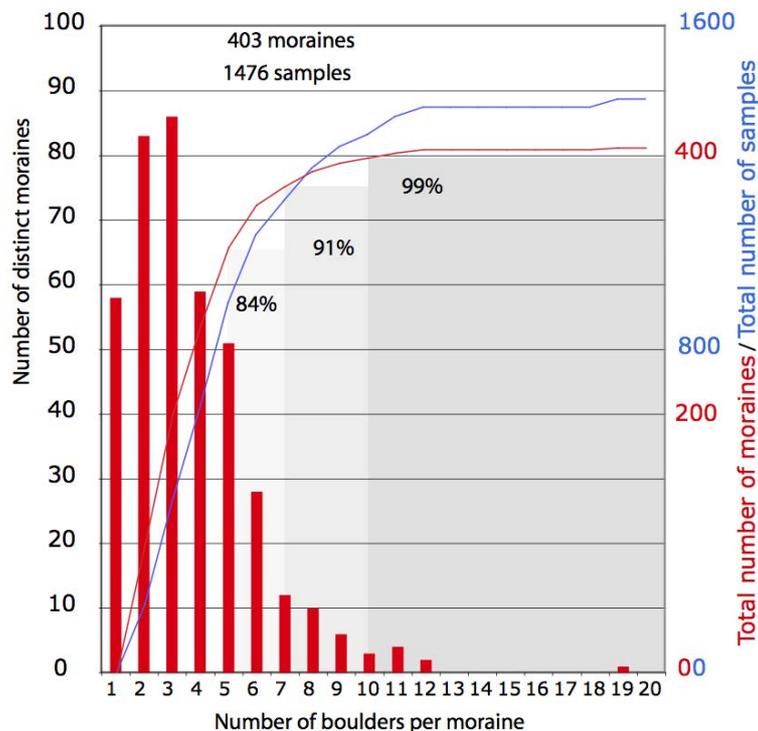


Figure 31. Distribution du nombre de moraines en fonction du nombre de blocs datés pour chaque dépôt pour une compilation d'âges de moraines du Tibet (Chevalier et al., 2011; Owen et al., 2008; Heyman et al., 2011; cette étude). 84% des dépôts sont datés avec moins de 6 échantillons, 94% le sont avec moins de 8 échantillons et seulement 2-3% sont datés avec 10 blocs ou plus pour un total de 403 moraines (ou 1476 échantillons).

La question a été abordée plus haut, mais il faut sans doute revoir la manière dont se forme les dépôts morainiques en particulier dans l'environnement relativement aride du Tibet.

L'interprétation des formes de distribution d'âge de plusieurs moraines est en cours et est rendue possible par le grand nombre d'échantillons datés par objet. Contrairement au modèle le plus répandu qui suppose aucune pré-exposition du matériel transporté par les glaciers et un modèle de formation rapide de moraine, il est possible qu'à des moments donnés de leur histoire les glaciers ont d'abord remobilisé du matériel déjà exposé et que les moraines soient des objets beaucoup plus composites que l'on ne croit. Il est évident qu'une meilleure compréhension de ces marqueurs paléoclimatiques proviendra de l'augmentation des données chronologiques variées sur ces objets.

Le rythme et la succession des phases glaciaires et interglaciaires pourraient être responsable de la disponibilité plus ou moins grande de matériel transportable par les glaciers. Les conditions de pré-expositions des sédiments doivent donc changer au cours du cycle glaciaire et entre les cycles glaciaires. L'héritage négligeable observé pour des moraines actuelles ou récentes (<20 ka), qui sont essentiellement des moraines de retrait après un grand maximum, pourrait ne pas être représentatif d'avancées glaciaires plus anciennes (>30 ka) (Figure 32).

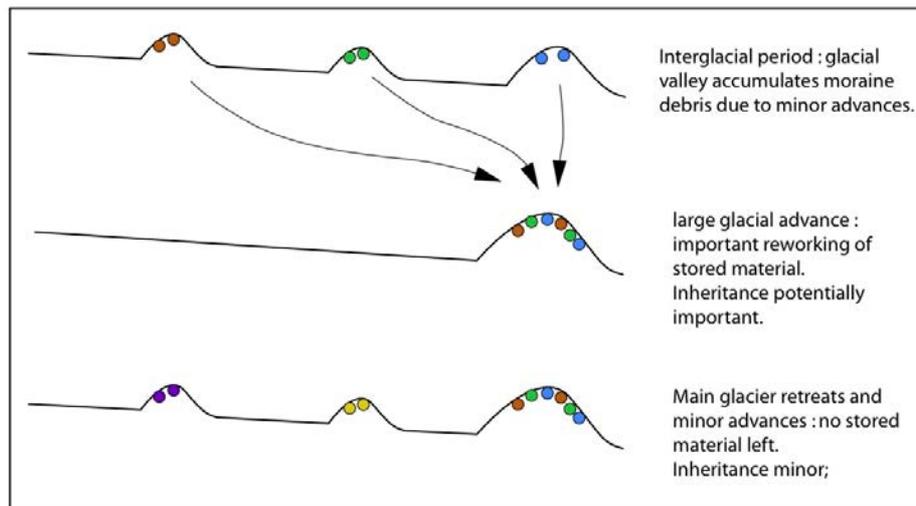


Figure 32. Au cours du cycle glaciaire il est probable que le matériel incorporé aux glaciers et abandonnés dans les moraines soit de nature différente quant à son contenu en isotopes cosmogéniques. Ainsi, selon l'histoire des avancées et des retraits, une moraine pourrait contenir des blocs remaniés de dépôts antérieurs ou au contraire être formé de blocs de même origine.

IV Contraintes sur l'incision des fleuves et l'évolution des marges du Tibet

IV.1 Utilisation conjointe du ^{10}Be et ^{26}Al pour contraindre l'incision du Fleuve Jaune

La concentration N en nucléide cosmogénique à la surface terrestre à un temps donné Δt pour une profondeur z , peut s'exprimer de la manière suivante :

$$N(z, \Delta t) = N_0(z, \Delta t) \exp(-\lambda \Delta t) + \left[\frac{P_n}{\lambda + \frac{\rho}{\Lambda_n} \varepsilon} \exp\left(-\frac{\rho}{\Lambda_n} z\right) + \left(1 - \exp\left(-\left(\lambda + \left(\frac{\rho}{\Lambda_n} \varepsilon\right) \Delta t\right)\right)\right) \right] \times \left(1 - \exp\left(-\left(\lambda + \left(\frac{\rho}{\Lambda_m} \varepsilon\right) \Delta t\right)\right)\right) + \left[\frac{P_m}{\lambda} \exp\left(-\frac{\rho}{\Lambda_m + \frac{\rho}{\Lambda_m} \varepsilon} z\right) \right] \times \left(1 - \exp\left(-\left(\lambda + \left(\frac{\rho}{\Lambda_m} \varepsilon\right) \Delta t\right)\right)\right) \quad (1)$$

avec N_0 la concentration héritée, P_n et P_m les taux de productions respectifs des composantes de spallation et muonique, λ la constante radioactive, $\Lambda_{n,m}$ la longueur d'atténuation de la particule incidente, r et ε la densité et le taux d'érosion (Gosse and Phillips, 2001; Anderson et al., 1996; Repka et al., 1997). L'expression (1) comporte trois inconnues Δt , N_0 et ε . La méthode courante pour estimer Δt est de contraindre N_0 et ε en minimisant l'écart entre un modèle calculé et des mesures de concentrations en nucléides le long d'un profil en profondeur. Si l'on mesure les concentrations de deux nucléides différents, comme le ^{10}Be et ^{26}Al , qui ont des constantes radioactives différentes, on peut également modéliser la variation du rapport $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ avec la profondeur. Ces deux types de profils permettent de contraindre l'âge de mise en place de dépôts fluviaux (Figures 33 et 34).

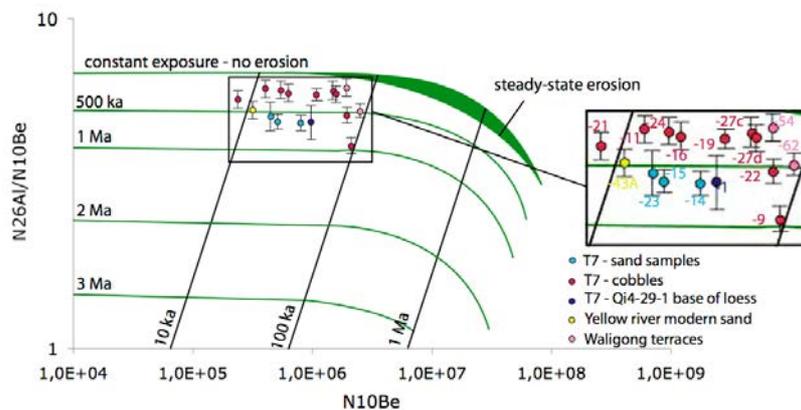


Figure 33. Les rapports $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ des échantillons de T7 (en rouge) indiquent une phase d'enfouissement plus courte que les sables fossiles ou actuels. Ceci témoigne soit de temps de transports très différents entre les galets et les sables, ou bien la remobilisation de sables de dépôts sédimentaires anciens.

Nous avons appliqué cette méthode aux terrasses du Fleuve Jaune au nord-est du Tibet (Perrineau et al., 2011). Le Fleuve Jaune ou Huang He s'échappe du plateau du Tibet par le nord-est à travers un défilé de gorges exceptionnelles de près de 500 m de profondeur. Cette incision récente du fleuve à travers des chaînes en surrection rend compte de la croissance active du plateau du Tibet sur sa marge nord-est. Nous nous sommes intéressés à une série de terrasses alluviales qui forment un éventail à travers le bassin sédimentaire de Gonghe pour contraindre l'histoire de l'incision du

fleuve. Nous avons combiné des âges d'exposition en surface avec des mesures de la concentration en profondeur des deux isotopes ^{10}Be et ^{26}Al . La variation de la concentration en profondeur entre 0 et 10 m de ces deux isotopes et de leur rapport permet en effet de rendre compte à la fois de la phase d'exposition récente de la terrasse et de sa phase antérieure de déposition. Nous avons utilisé les expressions analytiques de Granger and Smith (2000) qui prennent en compte la production muonique (muons rapides et capture de muons négatifs) avec la profondeur.

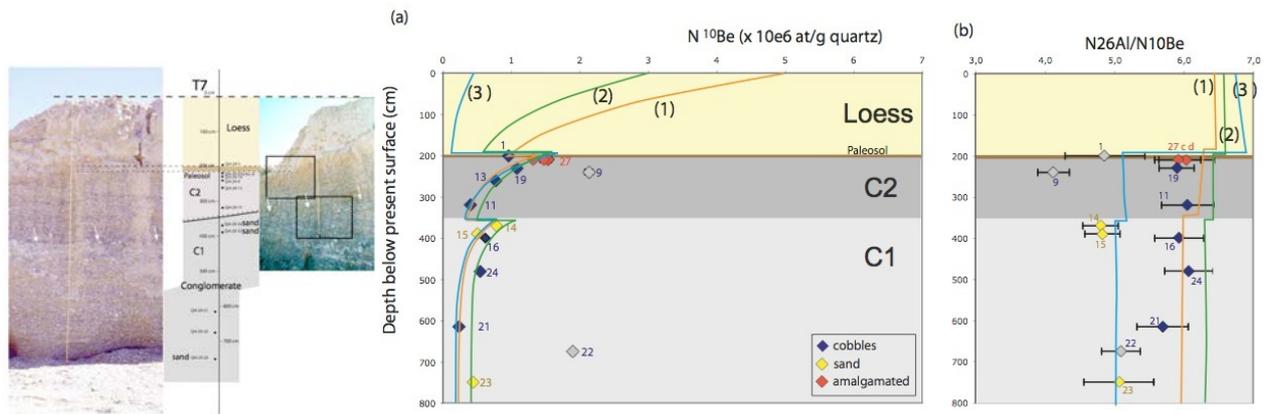


Figure 34. A gauche, vue en coupe des couches supérieures de la terrasse T7 situées 500 m au-dessus du lit actuel du Fleuve Jaune. a) variation de la teneur en ^{10}Be de galets et sables de la terrasse la plus haute entre 0 et 8 m de profondeur. b) variation du rapport $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ le long du même profil. Plusieurs modèles qui prennent en compte la complexité du dépôt permettent de contraindre l'âge du dépôt et son exposition entre 150 et 250 k (modèle 1).

La modélisation de l'âge de la terrasse supérieure du Fleuve Jaune a tenu compte à la fois de la stratification du dépôt conglomératique (2 phases discontinues), de la formation d'un paléosol au top du dépôt (sol brun-rouge de 20 cm d'épaisseur, probablement contemporain de l'altération de la partie supérieure du conglomérat), et de la couverture de loess (2 m de loess dont le mode et la chronologie de dépôt sont inconnues) (Figure 34).

Ces résultats nous ont permis de montrer que le bassin de Gonghe, l'un des plus grands bassins endoréique du nord-est Tibet encore récemment, s'est fait capturé par le Fleuve Jaune seulement depuis environ 150 ka (state MIS-6) (Perrineau et al., 2011 ; Li et al., 2014) en contraste avec une chronologie de régression fluviale plus progressive (Harkins et al., 2007 ; Craddock et al., 2010 ; Zhang et al., 2014). Le fleuve y a incisé une gorge profonde de 500 m à la vitesse de 4 mm/an. L'interaction de l'érosion régressive du fleuve avec le soulèvement tectonique des chaînons chevauchants enfermant des bassins sédimentaires, un processus efficace d'accroissement du relief sur la bordure nord du Tibet (Tapponnier et al., 2001b ; Métivier et al., 1998), reste encore à être décrit dans les détails.

IV.2 Incision du Yangtse à travers l'anticlinal du Yulong Shan (Yunnan, Chine)

Sur la base de nouvelles données de terrain, d'interprétation d'images satellitaires et de cartes topographiques, de datations des terrasses fluviales du Yangtse, et en accord avec les données cinématiques, sismologiques et géodésiques sur les failles de la région, nous confortons l'hypothèse suggérée depuis longtemps (Tapponnier and Molnar, 1977 ; Tapponnier et al., 1982 ; Armijo et al., 1986a, 1989 ; Leloup et al., 1995 ; Lacassin et al., 1996) que la région ou « bloc » de Dali est un relais extensif entre les failles décrochantes dextre du Fleuve Rouge et de Zhongdian formant la bordure cisailante sud de l'extrusion actuelle du bloc Tibet-Chine du sud (Armijo et al., 1989 ; Avouac and Tapponnier, 1993 ; Figure 35). Cette extrusion initiée depuis le Mio-Pliocène, prend le relais à la fin de l'extrusion du bloc Indochine qui a lieu de l'Oligocène au Miocène inférieur (36-17 Ma ; Leloup et al., 1995 ; Lacassin et al., 1996), et en conséquence, conduit à l'inversion tectonique d'un ensemble de décrochements sénestres et chevauchements en décrochement dextre et failles normales, respectivement.

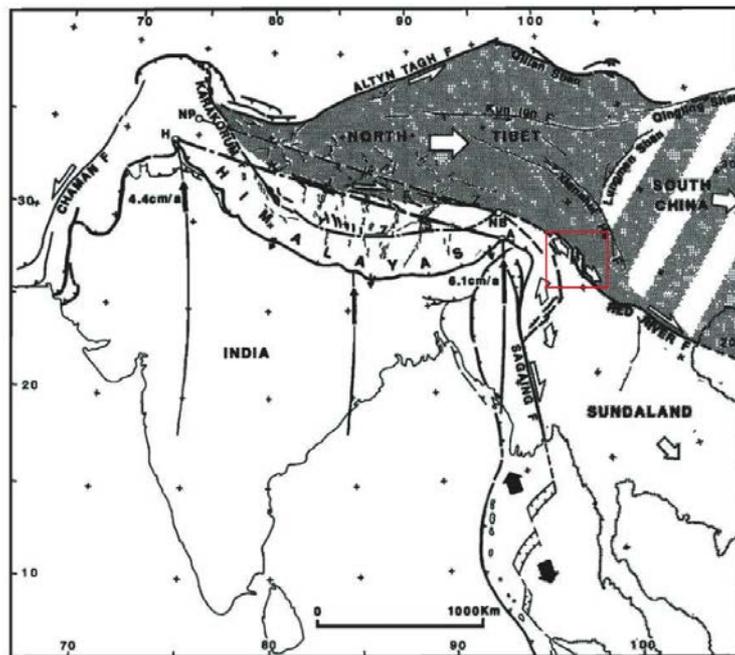


Figure 35. Cinématique de l'extrusion du Tibet d'après Armijo et al., (1989). Le bloc de Dali (encadré rouge) est vu comme un pull-apart entre les failles de Jiali et du Fleuve Rouge.

Nous nous focalisons sur le bassin situé au pied de la faille normale de Daju qui borde le massif du Yulong Shan au nord-est et sur la chronologie d'abandon de terrasses Pléistocène du Yangtse pour mieux comprendre la formation de la gorge la plus profonde du Yangtse (sans doute la cluse la plus grande du monde ; Lacassin et al., 1996) et de sa double boucle en épingle à cheveux dans le Yunnan occidental (Figure 36).

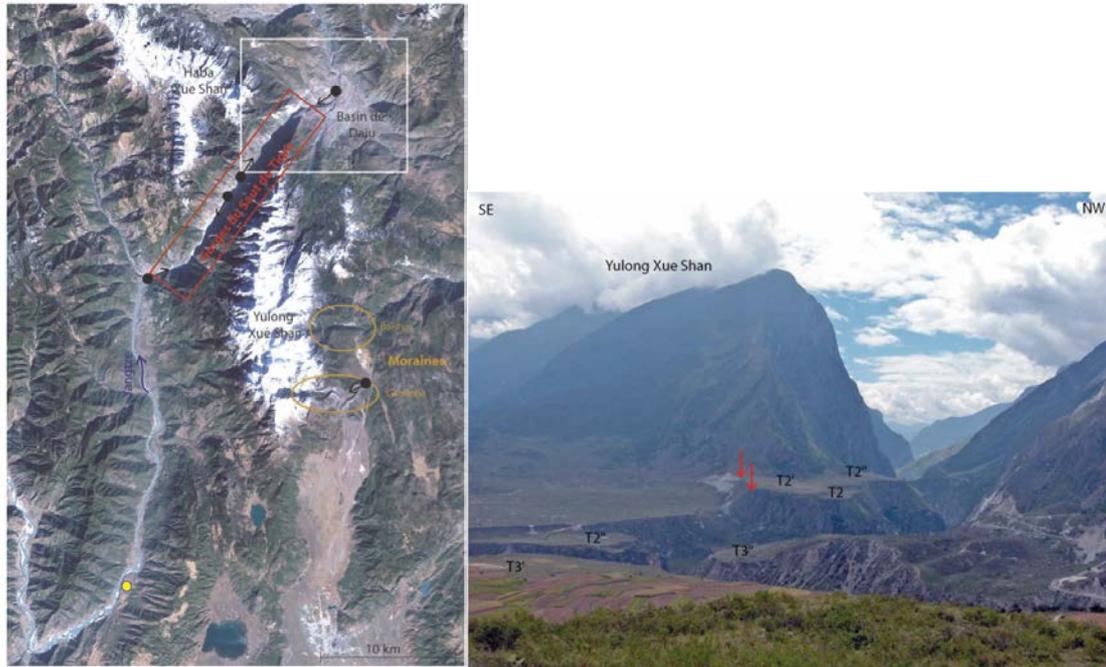


Figure 36. Image Landsat de la gorge du Yangtse à travers le Yulong Shan. Vue vers le sud de la gorge du Yangtse à travers le Yulong Shan. Les terrasses du fleuve sont décalées par la faille normale de Daju à l'origine des grandes facettes triangulaires qui bordent le massif du Yulong Shan au nord.

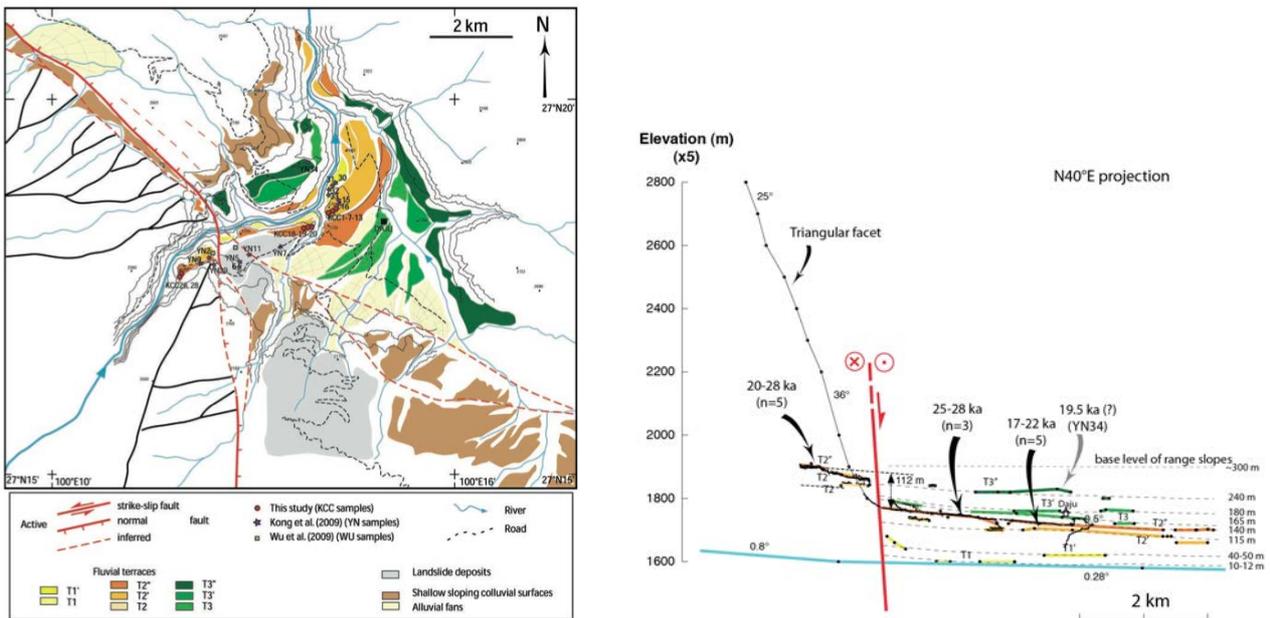


Figure 37. A gauche carte géomorphologique des terrasses du Yangtse dans le bassin de Daju en aval des gorges du Yulong Shan ; à droite, coupe NE-SW à travers la faille de Daju et projection des différents niveaux de terrasses.

La cartographie des terrasses dans la gorge et dans le bassin de Daju, ainsi que les levés topographiques des niveaux de terrasses (Figure 37) permettent de préciser l'évolution geomorphologique du bassin de Daju ainsi que l'amplitude du décalage tectonique d'un niveau

majeur de terrasse. La chronologie d'emplacement des terrasses a été déterminée par des datations aux isotopes cosmogéniques.

L'ensemble des échantillons a été analysé conjointement pour le ^{10}Be et le ^{26}Al sauf 4. Tous les rapports $\text{N}^{10}\text{Be}/\text{N}^{26}\text{Al}$ sont proches de la valeur de 6,75 et témoignent d'une histoire d'exposition simple. Les âges s'étalent de 8 à 30 ka de T1' à T2". Les âges de T1' s'étalent de 8 à 12 ka, avec des sous-niveaux identifiés par Kong et al. (2009) à 8.1, 9.4 et 12.2 ka (Figure 38). Les âges de T2' s'étalent de 17.5 à 22.6 ka avec une moyenne de 19.8 ± 2.1 ka. Les âges de T2" en aval s'étalent de 24.7 à 29.7 ka avec une moyenne de 27.4 ± 2.5 ka. En amont les âges de T2" s'étalent de 19.8 à 27.7 ka avec une moyenne de 24.01 ka. Si on corrige ces âges du soulèvement tectonique de 130 m (Figure 38), la variation du taux de production sur cet intervalle d'altitude implique une correction de l'ordre de 10% sur les âges. Ainsi la moyenne des âges de T2" en amont serait de 26.4 ± 3.8 ka, une moyenne similaire à la moyenne des âges de T2" aval (la moyenne de l'ensemble des âges de T2" après correction de soulèvement tectonique est de 26.8 ± 3.2 ka).

Seul le décalage vertical des terrasses T2" a pu être précisé et il est de 130 m (± 20 m) (Wu et al., 2009). Compte-tenu de l'âge de la terrasse T2" (26.8 ± 3.2 ka), la vitesse de mouvement vertical sur la faille de Daju est de 4.9 ± 1.3 mm/an.

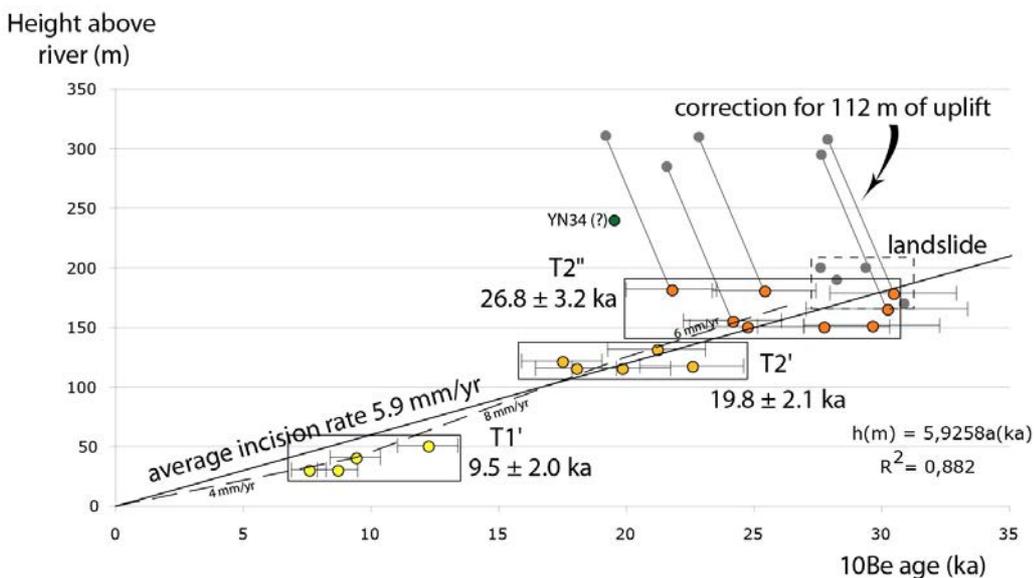


Figure 38. Vitesse d'incision du fleuve Yangtze déduit de l'âge des différentes terrasses datées dans le bassin de Daju (notre étude et Kong et al., 2009). La hauteur des terrasses décalées par la faille de Daju a été corrigée de la valeur du soulèvement tectonique.

Les âges des terrasses sont représentés en fonction de leur altitude sur la figure 38. Les âges des terrasses situées au mur de la faille normale sont corrigés du soulèvement de 130 m. La vitesse d'incision est donc de 5.9 mm/an. Si l'on considère l'incision à travers la gorge, celle-ci correspond à la vitesse d'incision moyenne en dehors de la gorge additionnée à la vitesse de soulèvement des

terrasses dans la gorge. Cette vitesse serait de 10,8 mm/an à la sortie de la gorge.

Les âges obtenus sur les terrasses du bassin impliquent une incision du Yangtze à une vitesse d'environ 5,9 mm/an depuis 30 ka. L'incision et la formation des terrasses du Yangtze à Daju pourraient avoir comme origine un barrage momentané du fleuve avec formation d'un lac. Le lac pourrait avoir comme origine un barrage par une moraine ou un glissement de terrain au cours de la dernière période glaciaire, où la capacité d'incision du fleuve était amoindrie.

La vitesse de mouvement verticale déterminée à partir du décalage des terrasses par la faille normale de Daju est de $4.9 \pm 1,3$ mm/an et témoigne d'une tectonique particulièrement active. L'âge de début de mouvement impliqué par cette vitesse est compris entre 0,5 et 1 Ma si l'on considère le relief de 1500 à 2000 m du Yulong Shan au-dessus de l'altitude moyenne du plateau (3500 - 4000 m). La vitesse totale de glissement est de l'ordre de 6 mm/an. Ces vitesses et ces âges sont en accord avec un changement récent de la cinématique régionale, en extension entre deux failles décrochantes dextres.

L'activité actuelle est attestée par les séismes de 1966 (M. 6,4) et 1996 (M. 7,0) et par le profil du fleuve, qui montre l'impact très fort de l'activité tectonique sur l'incision du fleuve. Nulle part ailleurs le long du fleuve il n'y a une telle chute, et la vitesse totale d'incision dans les gorges atteindrait 10,8 mm/an. La pré-existence d'un grand fleuve par rapport au soulèvement du Yulong Shan est nécessaire pour expliquer le creusement des gorges. Il est donc probable que le Yangtze pré-existe au début du mouvement sur la faille de Daju. Si les vitesses estimées pour les derniers 30 ka sont révélatrices de la vitesse de mouvement à long terme de la faille, le Yulong Shan et les gorges pourraient ne dater que du début du Quaternaire et seraient postérieures à la formation de la boucle du fleuve.

IV.3 Surrection de l'Ama Drime et capture de bassin lacustre aux sources de l'Arun

Cela fait longtemps que l'extension est-ouest est reconnue comme étant le régime tectonique principal au sud du plateau tibétain (Tapponnier and Molnar, 1977 ; Molnar and Tapponnier, 1978 ; Figure 39). Cette extension contraste avec la convergence nord-sud actuelle entre l'Inde et l'Asie. Jusqu'ici, il y a eu peu de tentatives de quantifier le mouvement sur les failles normales qui bordent les grabens avec des méthodes de datation de la geomorphologie décalée. Ici, nous nous focalisons sur le bassin de l'Arun, l'une des seules rivières qui traverse la haute chaîne himalayenne et dont les terrasses sont recoupées par la faille normale de Kharta à l'ouest du massif de l'Ama Drime dans la région de l'Everest.

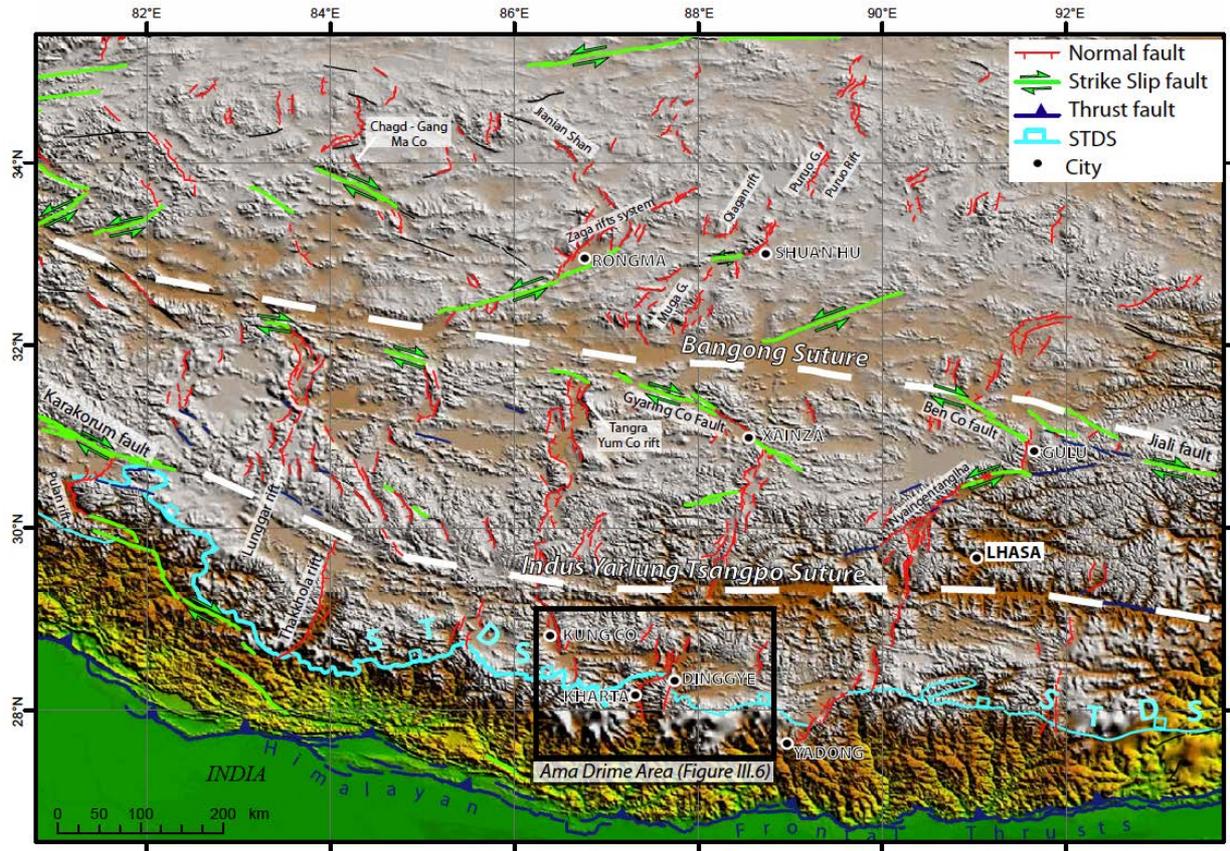


Figure 39. Carte des failles actives du Tibet central et sud. Au nord-est de l’Everest (cadre noir), le horst de l’Ama Drime bordée de failles normales actives interrompt les sommets de la haute chaîne himalayenne. Les syntaxes Ouest du Nanga Parbat avec l’Indus et Est du Namche Barwa avec le Yarlung-Brahmapoutre, avec le graben à l’ouest de l’Amadrime et la rivière Arun-Phung Chu, ce sont les seuls endroits de l’Himalaya où les rivières traversent la haute chaîne.

C’est sans doute grâce à l’activité de la faille de Kharta, que l’Arun arrive à traverser la chaîne Himalayenne. A deux endroits dans le bassin de Kharta, la rivière quitte le graben pour entailler le mur de la faille normale, au nord dans la gorge de Yo Ri et au sud du bassin. Alors que différentes causes sont proposées pour la formation de la gorge de Yo Ri (antécédence de la rivière, capture), il est clair que cette rivière a été barrée plusieurs fois au niveau de la gorge de Yo Ri ou juste en amont, séparant le bassin amont de son exutoire en aval. Des dépôts lacustres et des lignes de rivages abandonnées à plus de 300 m de hauteur, à environ 4400 m d’altitude, témoignent d’alternance de phases lacustres et drainées (Figure 40).

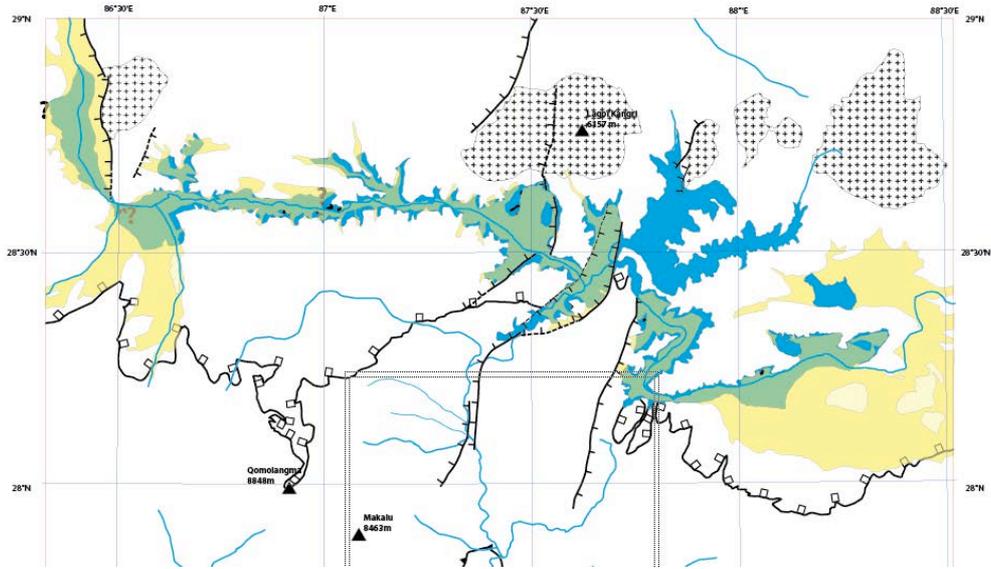


Figure 40. Reconstitution du périmètre du paléo-lac Arun en amont de la gorge et du bassin de Kharta marqué par des dépôts lacustres ainsi que des lignes de rivages abandonnés.

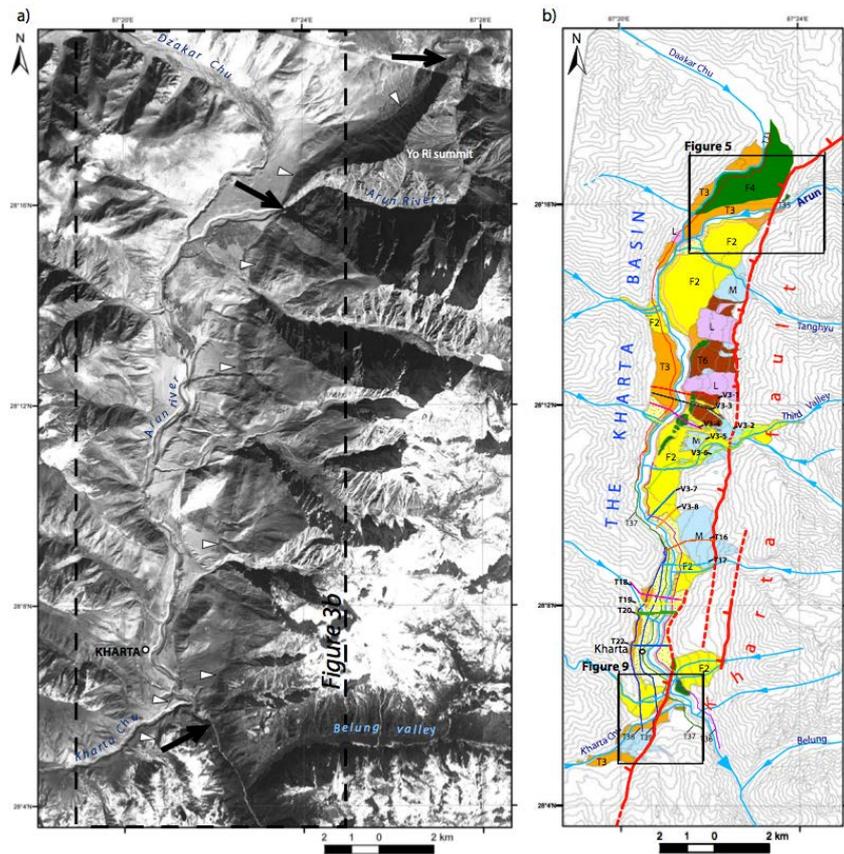


Figure 41. Carte géomorphologique des terrasses de l'Arun dans le bassin de Kharta à l'ouest de l'Ama Drime. Au nord et au sud du bassin, la faille normale de Kharta recoupe et décale les terrasses de la rivière.

La faille de Kharta borde le bassin de Kharta sur sa bordure est (Figure 41). Elle se situe au pied de facettes triangulaires spectaculaires qui forment la bordure ouest du massif de l’Ama Drime. L’activité récente de la faille est marquée par le décalage vertical systématique des terrasses et dépôts alluviaux au pied des facettes. Des glissements de terrain récents, détachés de l’une des facette triangulaire et recouvrant un niveau de terrasse récent résultent très probablement de l’activité sismique importante de cette faille.

Les terrasses alluviales et moraines décalées cartographiées sur le terrain et grâce à des images satellitaires de haute résolution se regroupent en deux ensembles. Le premier regroupe des dépôts ante dernier maximum glaciaire (LGM), avec des terrasses décalées de plus de 100m. L’autre ensemble, regroupe les terrasses post-glaciaires abandonnées par l’Arun dans le bassin de Kharta avec des décalages décimétriques (Figure 42).

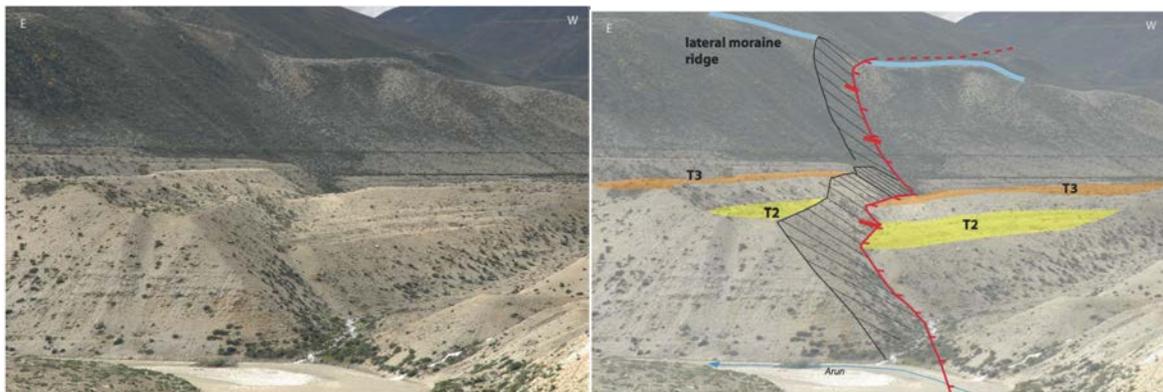


Figure 42. Décalages de ride morainique (20-30 m) et terrasses (10-15 m) au sud du bassin de Kharta.

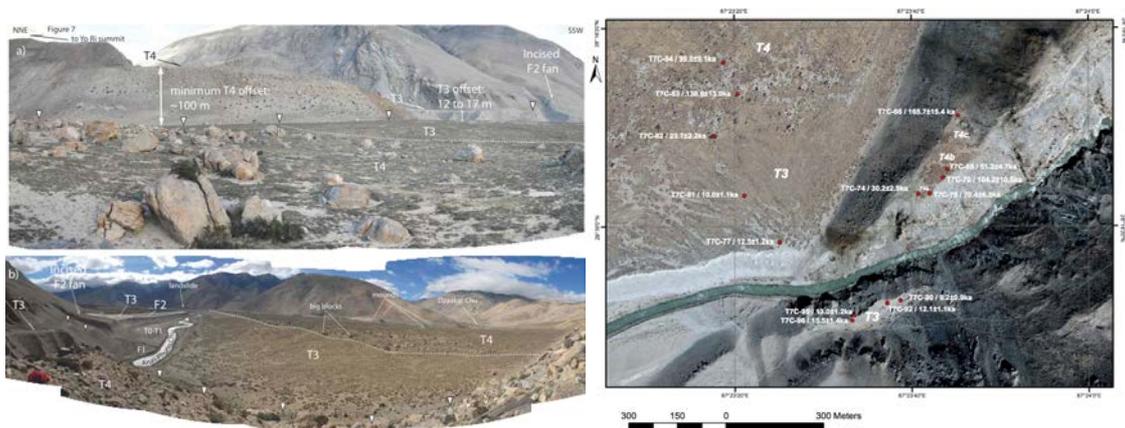


Figure 43. Vue de la terrasse T4 de l’Arun décalée verticalement plus de 100 m au sortir de la gorge à travers l’Ama Drime. Au premier plan, dépôts catastrophiques de blocs décimétriques associés à une débâcle fluvio-glaciaire.

Les résultats de datation obtenus sur les terrasses et les moraines corroborent de manière générale des résultats obtenus ailleurs au Tibet. Ainsi, l’âge des moraines correspond aux avancées des maxima de 40 et 20 ka (Chevalier et al., 2011), ou au avancées tardi-glaciaire à 15 ka et au Younger

Drias (11 ka)(Van der Woerd, 2009 ; Lasserre et al., 2002). Le niveau majeur de terrasse, le niveau T3, est daté de la déglaciation Holocène à 12 ka, indiquant un épisode majeur de remodelage du paysage à cette époque. L'âge de la terrasse supérieure T4 est moins bien contraint par les datations des blocs de surface, certainement en raison de phases d'érosion durant le dernier cycle glaciaire, mais est compatible avec un âge correspondant à l'interglaciaire précédent, c'est-à-dire 125 ka.

Notre étude contraint la vitesse de mouvement vertical de la faille de Kharta à 1.3 ± 0.3 mm/an et détermine des bornes de la vitesse sur les autres failles de Mabja et Dinggye autour de 1 ± 0.5 mm/an. La vitesse totale cumulée sur les failles normales du horst de l'Ama Drime est donc de 2 mm/an. Bien que peu d'autres déterminations de vitesses existent, celles-ci sont semblables à celles déterminées dans un autre graben, le graben de Pulan au pied du Gurla Mandatha à l'extrémité sud-est de la faille du Karakorum (Chevalier et al., 2012). Ces vitesses sont aussi semblables à des vitesses déterminées le long du graben de Yadong-Gulu à Gulu, Damxung et Yangbajin (1-2 mm/an ; Kali, 2010)(Figure 44).

Le mouvement vertical moyen le long des grabens du sud Tibet serait donc de 1.5-2 mm/an, en bon accord avec les estimations d'Armijo et al. (1986) et ces résultats confirment que la vitesse des failles normales au sud Tibet est plus importante qu'au nord de la suture de Bangong (Armijo et al., 1986 ; Blisniuk and Sharp, 2003). Par exemple, le long du graben de Shuang Hu, le graben le plus marqué du Tibet central au nord de la suture de Bangong, la vitesse de mouvement sur la faille normale est estimé à 0.07 mm/an sur les derniers 233 ka avec un maximum à environ 0.3 mm/an (Blisniuk and Sharp, 2003), c'est-à-dire, au moins un ordre de grandeur moins rapide qu'au sud Tibet.

Considérant une vitesse maximum de 2 mm/an et un pendage de faille normale compris entre 45 et 60°, la vitesse d'extension horizontale le long de l'Ama Drime atteint 1.5 ± 0.8 mm/an. Des vitesses semblables déterminées à Pulan (Chevalier et al., 2012) et le long du massif du Nyainqentanglha (Kali, 2010) suggèrent que ces vitesses sont semblables le long des 7 rifts majeurs du sud Tibet. Dans ce cas, la vitesse totale d'extension atteindrait 1 ± 0.5 cm/an au travers du sud Tibet. Cette vitesse est en accord avec des estimations des champs de déformation géodésiques qui indique des taux plus grand de l'ordre de 20 mm/an (Zhang et al., 2004 ; Wang et al., 2001). De manière semblable, Chen et al. (2004) rapporte un taux d'extension d'environ 5.9 ± 0.7 mm/an pour le rift de Yadong-Gulu, alors qu'étant donnée la position des stations à l'ouest du rift, au moins 2 autres rifts sont impliqués dans cette estimation. Si on distribue ces 6 mm/an sur les 3 rifts, on obtient une vitesse de 2 mm/an en meilleur accord avec les estimations des vitesses géologiques Holocène à Pléistocène supérieur.

L'initiation du rifting sud tibétain est supposé être Plio-Quaternaire (Armijo et al., 1986), bien que des évidences d'extension N-S ou NE-SW au Miocène supérieur existent le long de

certain rifts (Harrison et al., 1995 ; Kali et al., 2010). Il reste à déterminer si l'extension a été continue depuis le Miocène supérieur dans tout le Tibet du sud et à quelle vitesse. Bien que le nombre de données de vitesses augmente (Chevalier et al., 2012 ; Kali, 2010), d'initiation de cisaillement ductile normal (Murphy et al., 2002 ; Kali et al., 2010 ; Leloup et al., 2010 ; Harrison et al., 1995 ; Kapp et al., 2005), l'évolution spatio-temporelle de la distribution de l'extension reste imprécise. En particulier, alors que certains modèles proposent que l'extension soit une conséquence de la subduction de la plaque Indienne et prédisent de l'extension parallèle à l'arc Himalayen, ces modèles n'expliquent pas la géométrie en éventail vers le nord des grabens (les grabens à l'est sont en échelon à droite, alors que ceux à l'ouest sont en échelon à gauche) (Armijo et al., 1986a ; Murphy et al., 2010 ; Ratschbacher et al., 2010) et ils n'expliquent pas non plus la direction NS relativement uniforme de ces grabens indiquant de l'extension presque purement EW (Armijo et al., 1986a, 1989 ; Hintersberger et al., 2010).

Nos déterminations de vitesses sont une étape vers une meilleur compréhension du fonctionnement de ces grabens au sud Tibet. Les vitesses que l'on obtient permettent d'estimer un taux d'extension total EW au sud Tibet d'environ 15 mm/an pour les derniers 150 ka, une vitesse comparable aux vitesses court-terme géodésiques au travers des rifts du sud Tibet (Wang et al., 2001 ; Zhang et al., 2004 ; Chen et al., 2004) et sont en accord avec des modèles cinématiques qui lient l'extension à, à la fois, l'étalement du sud Tibet sur la plaque subductante indienne à une vitesse de 2 cm/an et au mouvement de cisaillement dextre de la zone de Jiali (e.g., Armijo et al., 1986 ; McCaffrey and Nabelek, 1998).

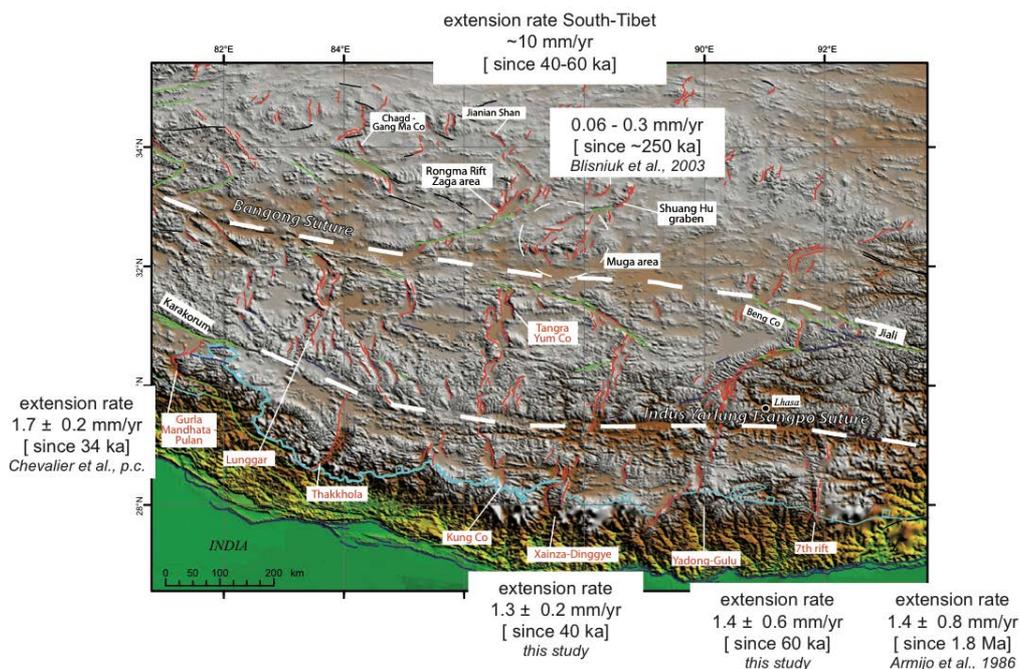


Figure 44. Ensemble des vitesses de mouvement sur les failles normales du Tibet déterminées par des méthodes morpho-tectoniques.

V Perspectives et projets

Dans cette partie nous passons en revue des projets en cours qui permettent d'aborder d'une part les problèmes de datation de la géomorphologie par les isotopes cosmogéniques et d'autre part les problèmes de vitesse de déformation tectonique.

A part le chantier des Vosges où l'objectif est d'apporter des contraintes chronologiques à l'évolution d'un profil de sol dans un contexte tectonique plutôt stable (ou à déformation lente), l'ensemble des chantiers concernent la détermination du mouvement sur des failles actives qui déforment la morphologie Quaternaire.

Profils pédologiques dans les Vosges

Le projet des Vosges a pour objectif de mesurer conjointement les concentrations des isotopes des séries de l'Uranium et des isotopes cosmogéniques sur des profils de sols dans le bassin versant du Strengbach (Observatoire Hydro-Géologique de l'Environnement) afin d'apporter des contraintes sur la chronologie de formation des sols et des processus d'altération. Ce projet se fait dans le cadre d'une thèse (J. Ackerer, dir. F. Chabaux). Des résultats préliminaires de ^{10}Be et ^{26}Al sont encourageants. Ils devraient non seulement apporter une information pertinente sur les vitesses d'érosion du socle granitique sur le dernier cycle glaciaire, mais également, nous permettre de mieux contraindre nos analyses de ^{26}Al dont la détermination est moins robuste que pour le ^{10}Be .

Grands séismes et chevauchements dans la syntaxe Est-Himalayenne

Le projet sur la syntaxe Est-Himalayenne, un projet de l'Earth Observatory of Singapore auquel nous collaborons a pour objectif, entre autres, de préciser la source des grands séismes intra-continentaux de l'Assam (M 8.6, 1950) et de Shillong (M 8.3, 1897), mais aussi de déterminer la vitesse de mouvement sur divers chevauchements. Celui de l'Himalaya en Assam d'une part, des failles inverses au sud du plateau de Shillong, mais aussi des chaînes Indo-Birmanes au Bangladesh. Des résultats de datations de surface, préliminaires, sont en cours de validation par des mesures de la concentration en ^{10}Be dans des profils de sub-surface et des datations au ^{14}C . Ce travail fait également l'objet d'une thèse en coopération avec le Geological Survey of Bangladesh (A. Ahsan, dir. C. Dorbath).

Raccourcissement au nord du Tibet

Un projet concerne la détermination de la vitesse des chevauchements du nord Tibet, une région en cours de raccourcissement et d'épaississement crustal. Nous reprenons ici un travail commencé

durant ma thèse et mon post-doc durant lesquels les datations de surface des cônes alluviaux faillés et déformés par les chevauchements actifs n'avaient pas abouti. En collaboration avec la China Earthquake Administration et un étudiant en thèse à Beijing (Y. Shao, dir. Liu-Zheng Jing), ces datations sont complétées par des datations en sub-surface le long de profils dans les différentes terrasses. Trois profils dans des terrasses d'âges différents devraient nous permettre de préciser la concentration en ^{10}Be hérité, son éventuelle évolution au cours du temps, et donc l'évolution des bassins versants au cours du dernier cycle glaciaire.

Les autres projets concernent la détermination de la vitesse de mouvement de divers décrochements.

Faille de San Andreas – segment de Banning (USA)

En collaboration avec A.S. Mériaux (U. Newcastle) nous cherchons à déterminer la vitesse de mouvement de la faille de Banning, l'une des branches majeures de la faille de San Andreas située entre à l'ouest le relais compressif de San Geronio et à l'est le segment de Indio (voir ci-dessus ; van der Woerd et al., 2006). La manière dont la faille de San Andreas traverse le relais compressif d'une part et d'autre part, comment le mouvement dextre se répartit sur les diverses branches de la faille de San Andreas à l'est de Los Angeles (failles de Mission Creek, Banning, San Jacinto) restent mal déterminés. Un ensemble de terrasses décalées de plusieurs dizaines de mètres à 1.5 km ont été ciblées pour des datations aux isotopes cosmogéniques. Des datations de surfaces sont complétées par 9 profils verticaux de 1.5 à 3m de profondeur pour des datations en sub-surface qui permettront d'aborder les questions d'héritage et d'érosion à l'échelle du bassin versant.

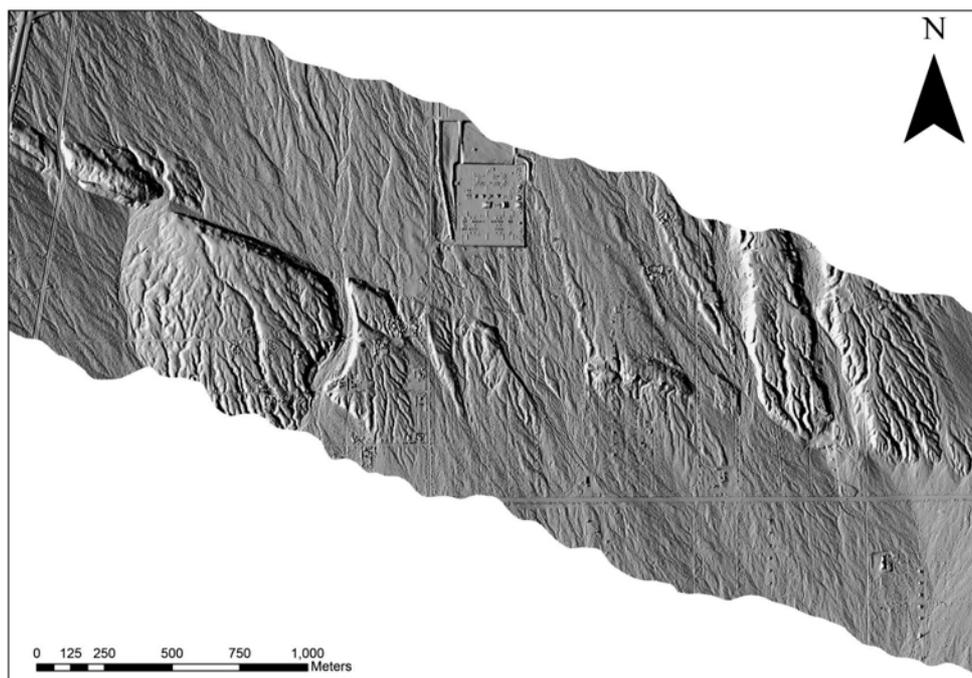


Figure 45. Exemple de modèle numérique Lidar sur le segment de la faille de Banning.

Décrochement dextre de Fuyun (Chine)

Nous travaillons depuis plusieurs années à la détermination de la vitesse de mouvement dextre sur le décrochement de Fuyun. Lieu du séisme de magnitude 8 le 11 août 1931, cette faille dextre accommode le déplacement vers le nord de la Dzungarie.



Figure 46. Vue en hauteur de la faille de Fuyun et en particulier de l'escarpement de la rupture du séisme de magnitude 8 de 1931. L'ensemble du drainage, sub-perpendiculaire à la direction de la faille est décalé par les derniers séismes qui ont rompu la faille.

Cette région est relativement aride et a permis une bonne conservation des traces de rupture de ce séisme, mais conserve également les formations quaternaires décalées par la faille. Des acquisitions de modèles numériques de terrain de haute précision avec un Lidar terrestre nous permettent de bénéficier d'une cartographie précise des différents sites étudiés. Un travail sur l'amplitude de décalages cosismiques du dernier séisme et des décalages cumulés de la géomorphologie conclut à la répétition de au moins 6 séismes avec un déplacement co-sismique moyen semblable de 6 m. Afin de déterminer la récurrence de ces séismes nous avons effectué à la fois des tranchées paléosismologiques et des datations des surfaces décalées par la faille. Les datations en cours dans les fosses et tranchées avec un échantillonnage multiple à la fois en méthode (14C) et en type d'échantillons (blocs, matrices, amalgames) de surface et de sub-surface vont nous permettre de préciser l'âges des périodes principales d'alluvionnement et d'abandon des cônes d'alluvions. Ces âges permettront de préciser l'âge des décalages cumulés le long de la faille et donc sa vitesse long-terme.

En parallèle, afin de mieux appréhender le facteur « érosion » pour les datations par isotopes cosmogéniques, un travail de synthèse est effectué sur l'ensemble des datations qui ont été faites dans la région Altaï-Mongolie. L'érosion est le plus souvent un paramètre libre des modèles d'inversion des profils de sub-surface ce qui conduit à des déterminations de taux d'érosion très variés au travers d'une région aux variations climatiques semblables, et donc à des âges de la géomorphologie très variés. Une harmonisation de ces taux d'érosion devrait permettre de mieux comprendre les phases majeurs d'alluvionnement et d'incision en rapport avec des variations climatiques régionales ou globales (e.g., van der Woerd et al., 2002b ; Hetzel, 2013).

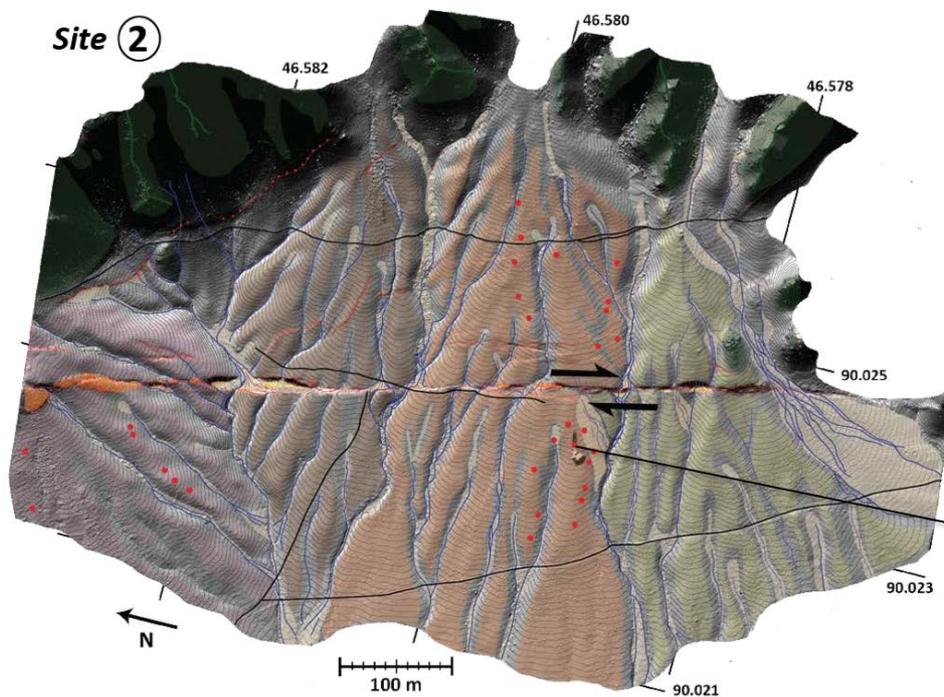
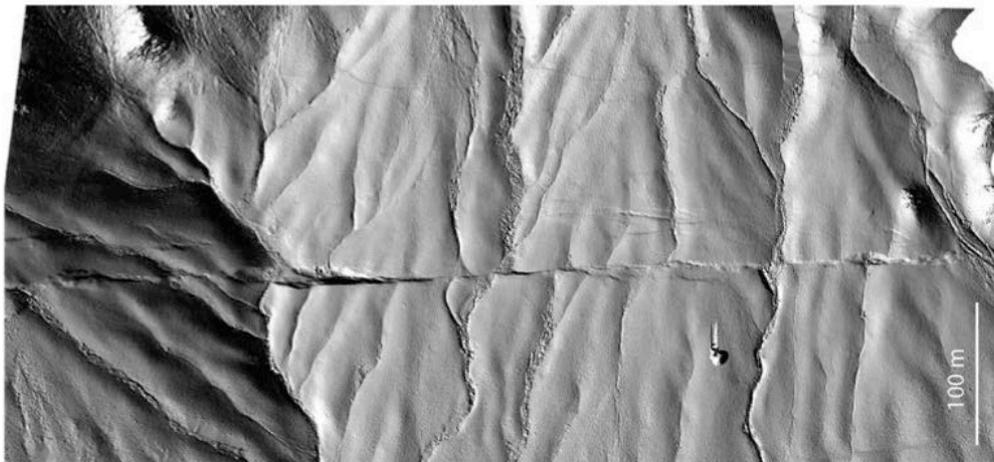


Figure 47. Exemple de modèle numérique de terrain Lidar levé sur le terrain le long de la faille de Fuyun. En bas, interprétation du modèle et mise en évidence des décalages co-sismiques et cumulés des chenaux incisés sur des cônes alluviaux. Les points rouges sont les sites d'échantillonnage de surface et sub-surface sur les différents cônes.

Vitesses des décrochements du Kunlun et de l'Altyn Tagh

Contrairement à d'autres grandes failles du Tibet (Altyn Tagh, Karakorum), la faille du Kunlun est dans un cycle d'activité sismique depuis un siècle et comme d'autres failles ailleurs dans le monde (San Andreas, Nord-Anatolienne), cette activité sismique contribue à mieux comprendre son fonctionnement. La faille du Kunlun s'étend sur plus de 1500 km. On peut distinguer 8 segments de plusieurs centaines de kilomètres de long sur la base de leur géométrie à grande échelle. Cette segmentation géométrique et en partie structurale (relais en pull-apart ou en push-up, chevauchement de segments, etc...) ne correspond pas forcément à la segmentation sismique comme l'a montré le dernier séisme de $M_w=7.9$ de Kokoxili dont la rupture de 435 km de long initié dans un relais extensif s'est propagé le long de deux segments (Tocheport et al., 2006).

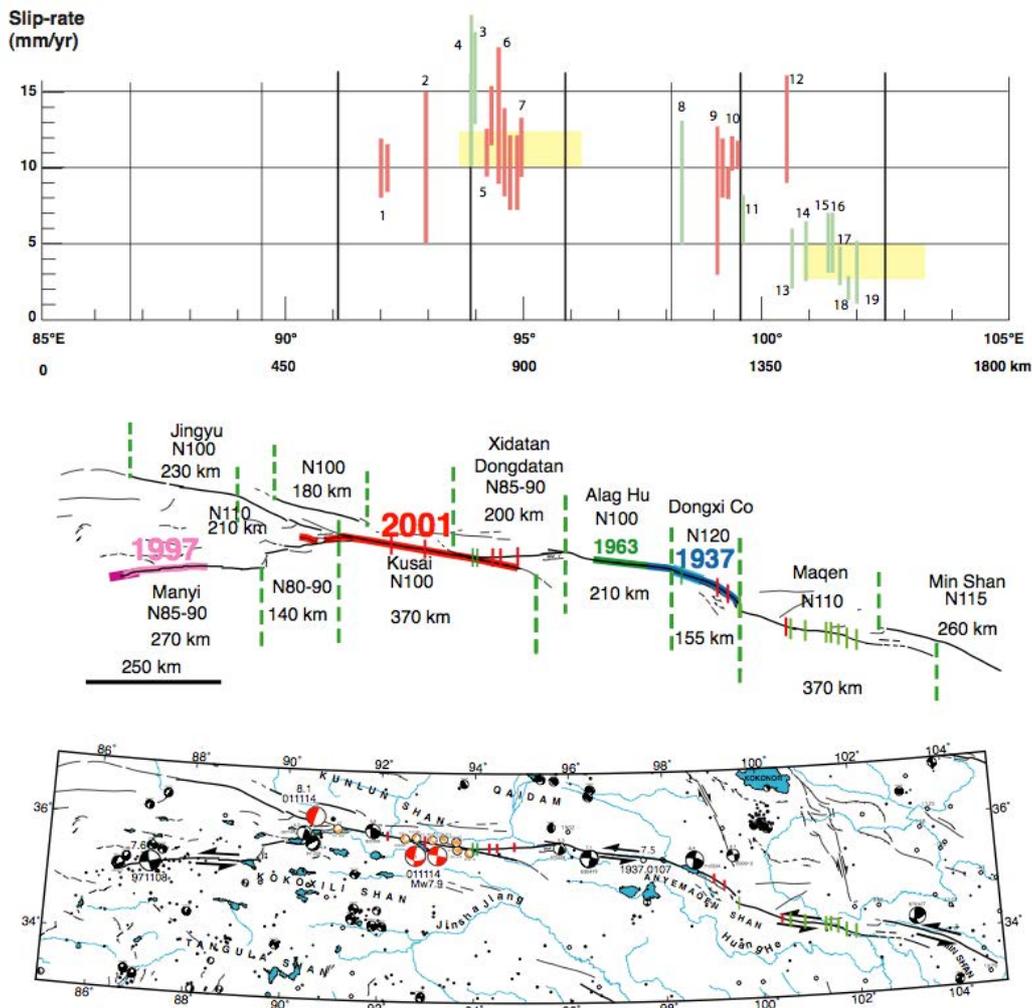


Figure 48. a) Distribution des vitesses moyennes géologiques déterminées le long de la faille du Kunlun (en rouge, résultats issus de nos travaux). b) Segmentation à grande échelle de la faille du Kunlun et localisation des grandes ruptures depuis 1937. c) Carte sismo-tectonique simplifiée de la faille du Kunlun au nord Tibet.

Depuis des travaux initiaux à la fin des années 1980, le nombre de sites qui permettent de définir une vitesse moyenne n'a cessé d'augmenter pour atteindre aujourd'hui une vingtaine (van

der Woerd et al., 1998, 2000, 2002, 2007 ; Li et al., 2005 ; Kirby et al., 2007 ; Harkins and Kirby, 2008 ; Lin and Guo, 2008 ; Ren et al., 2013). Un résultat que nous avons mis en évidence est la constance de la vitesse moyenne obtenue autour de 10-12 mm/an sur des sites distants de plus de 800 km (van der Woerd et al., 2002, 2007 ; Li et al., 2005 ; Kirby et al., 2007) pour une période de temps essentiellement Holocène (12 ka) et possiblement jusqu'à 40 ka (Figure 48).

La faille du Kunlun est citée comme un exemple où les vitesses géodésiques GPS s'accordent avec les vitesses géologiques. Les mesures GPS accumulées maintenant depuis les années 1991 sur le plateau du Tibet ont permis d'estimer la vitesse géodésique de la faille du Kunlun (Wang et al., 2001 ; Zhang et al., 2004), essentiellement sur sa partie Est, mais c'est aussi là où les données géologiques sont les plus nombreuses. En réalité, le champ de déplacement GPS s'accorde avec les données géologiques à condition de prendre des stations GPS à plus de 150 km de la faille, ceci impliquant de faire abstraction de failles certes moins importantes au Nord et au Sud. Si l'on se place à une distance de 50 km de part et d'autre (distance à laquelle la vitesse n'est plus influencée par la proximité de la faille dans un modèle de type Savage and Burford (1973)) alors la vitesse ne serait plus que de ~ 6 mm/an. Cette vitesse est proche de celle obtenue par les modèles de déformation avec de nombreux blocs rigides (Thatcher et al., 2007 ; Meade, 2007).

La documentation du comportement sismique de ce décrochement à la fois au long-terme et au court-terme est à poursuivre. La partie centrale du décrochement plus difficilement accessible est aussi celle qui est la moins bien documentée pourrait être l'objectif de missions de terrain futur. Une question importante qui nécessite plus de documentation de terrain est celle relative à la manière dont les séismes majeurs se sont répétés sur cette faille et si ils ont eut toujours la même extension latérale.

Le décrochement sénestre de l'Altyn Tagh

De manière paradoxale, la faille de l'Altyn Tagh, sans doute le système décrochant le plus imposant de la collision Inde-Asie par son extension (>2000 km) et son expression structurale et géomorphologique, n'a pas été le lieu de grands séismes depuis plus d'un siècle, si l'on exclut le séisme de Changma de 1931, de magnitude $M=7.5$ qui a eu lieu sur une branche chevauchodécrochante à son extrémité Est (Peltzer et al., 1988 ; Meyer, 1991), et le séisme dont on peut voir les traces le long du segment de la Karakax de magnitude probable 7.5 (datant de 1879 ?) (Li et al., 2008, 2012). Les séismes récents du Kunlun occidental (séisme de Pingding, $M_w=7.1$ 20/03/2008 et de Ashikule $M_w=6.9$ 12/02/2014) ont eu lieu sur des branches à la jonction entre la faille de l'Altyn Tagh et le système de Gozha ; seraient-il le signe du retour d'une activité sismique le long du décrochement de l'Altyn Tagh ?

En 20 ans, nous avons étudié environ 20 sites répartis le long de ce décrochement, depuis le segment de la Karakax à l'ouest jusqu'à son extrémité Est au front des Qilian Shan (Figure 49). Pour chacun des sites, ce sont souvent plusieurs décalages qui ont été datés, ce qui fait un total d'environ 50 vitesses déterminées de manière indépendante. D'Ouest en Est, la vitesse passe de environ 5 mm/an, à 15-20 mm/an, à 25 mm/an, à 17 mm/an, à 20 mm/an, à 15 mm/an, à 5 mm/an (Li et al., 2012 ; Mériaux et al., 2005, 2004, 2012; van der Woerd et al., 2001 ; van der Woerd, 1998 ; Meyer et al., 1996 ; Xu et al., 2001).

La vitesse de l'Altyn Tagh issue de mesures géodésiques GPS le long de 2 transects à 85°E et 90°E sur la période 1994-2011 semble converger vers 9 ± 4 mm/an (Bendick et al., 2000 ; Wallace et al., 2004; He et al., 2013). Cette vitesse est confirmée par des modèles de blocs contraints par les mêmes données (Loveless and Meade, 2011). Les résultats d'interférométrie InSAR donnent des résultats plus contrastés. A l'Ouest (79°E), les données très bruitées au travers du Kunlun occidental indiqueraient une vitesse de 0 ± 3 mm/an sur le segment de la Karakax (Wright et al., 2004). A 85°E, un profil InSAR également affecté par des problèmes d'épaisseur troposphérique à travers la marge du plateau du Tibet permet d'estimer la vitesse de mouvement sénestre à 11 ± 5 mm/an (Elliott et al., 2008) sur l'. Enfin, à 94°E, la vitesse est estimée à 9 ± 1 mm/an le long d'une des branches de la faille (Jolivet et al., 2009).

La différence entre les vitesses géodésique de 4 à 16 mm/an et géologique de 9 à 27 mm/an déterminées sur des périodes de temps pluri-millénaires a conduit à poser la question du comportement sismique cyclique ou non de la faille, de la possibilité de phases rapides suivies de phases plus lentes, ou de l'influence du cycle sismique sur les vitesses géodésiques. A ce stade, les incertitudes sur les déterminations des vitesses géologiques et géodésiques, ne permettent pas de conclure sur la concordance entre les vitesses géodésiques et géologiques (Figure 2). A ces incertitudes sur la vitesse en un site donné, il faut également ajouter la variation de la vitesse le long de la structure elle-même. En effet, le branchement de chevauchements actifs sur la faille permet de penser que la vitesse décroît d'ouest en est (Figure 49). Ces variations structurelles de la vitesse sont sans doute largement comprises dans les incertitudes des déterminations des vitesses géologiques et géodésiques.

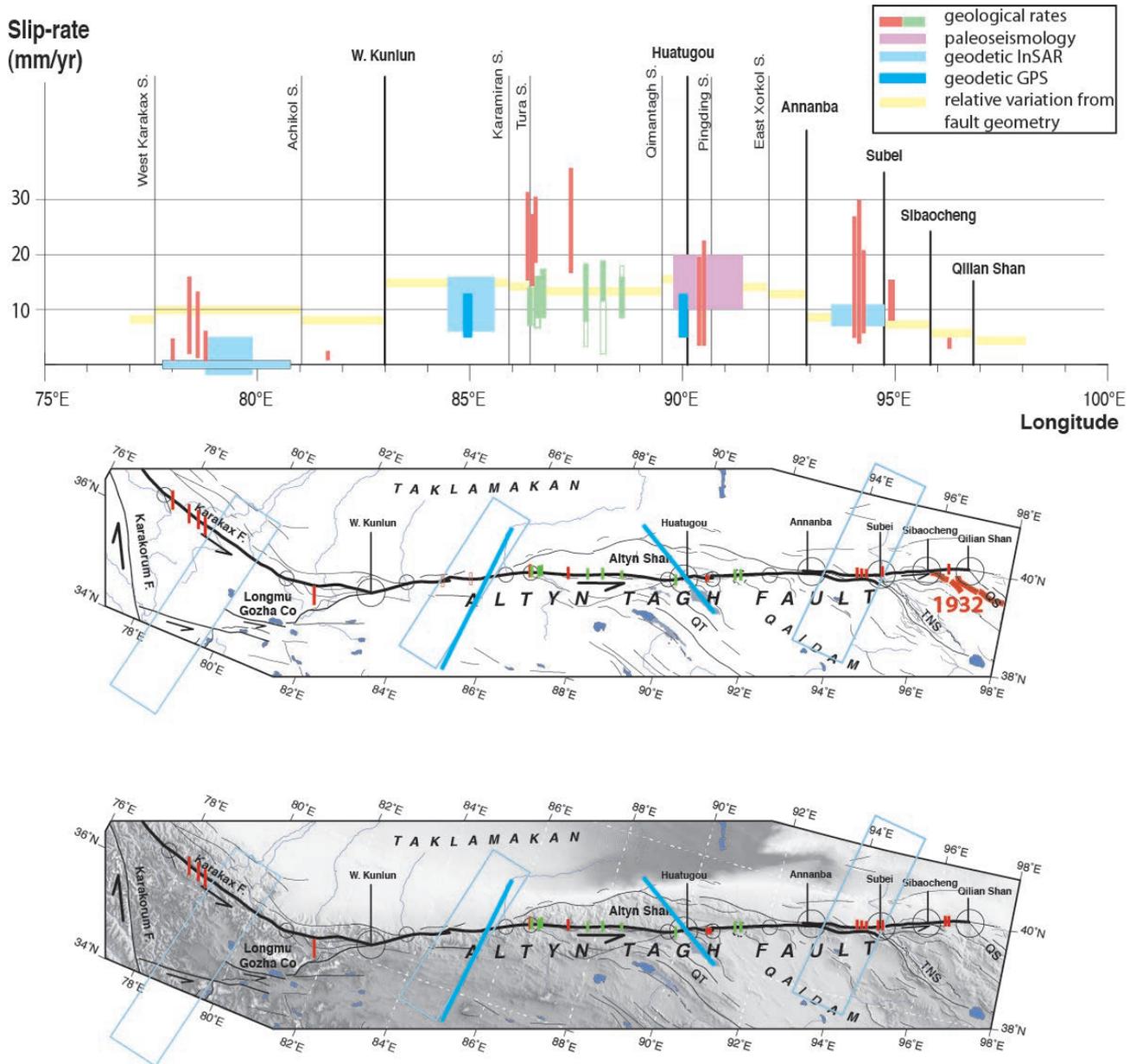


Figure 49. Ensemble des vitesses déterminées le long du décrochement de l’Altyn Tagh par des méthodes géologiques (vert et rouge) et géodésiques GPS ou InSAR (bleu). En jaune : variation probable de la vitesse des différents segments en rapport avec les jonctions et bifurcations.

Il est donc nécessaire de mieux documenter en des sites choisis la vitesse et de préférence avec des datations croisés multi-méthodes. Des travaux sont en cours dans la partie occidentale de la faille (84-85°E) encore peu documentée du point de vue géologique. Deux sites nouveaux ont fait l’objet d’une mission de terrain en 2012 en associant plusieurs méthodes de datation de la géomorphologie (10Be, 14C et OSL) à des levés topographiques de précision des décalages sénestres des terrasses. Enfin, nous avons entrepris de reprendre une à une les données géologiques publiées afin d’homogénéiser les approches et interprétations, et de pouvoir donner une appréciation sur la qualité de la détermination de la vitesse. La figure 50 illustre une approche possible par un exemple de réinterprétation où on essaie de redéfinir des bornes minimales ou maximales de la vitesse selon

différents critères, avec l'objectif d'analyser les données spatialement et temporellement, plutôt que de tout moyenner. Ce travail préliminaire fait apparaître des variations importantes de la vitesse et met mieux en évidence celles qui sont des bornes inférieures ou supérieures. La période de temps impliquée inférieure à 10 ka ou inférieure à 6 ka pour de nombreux décalages reste sans doute trop courte pour moyenner correctement la vitesse.

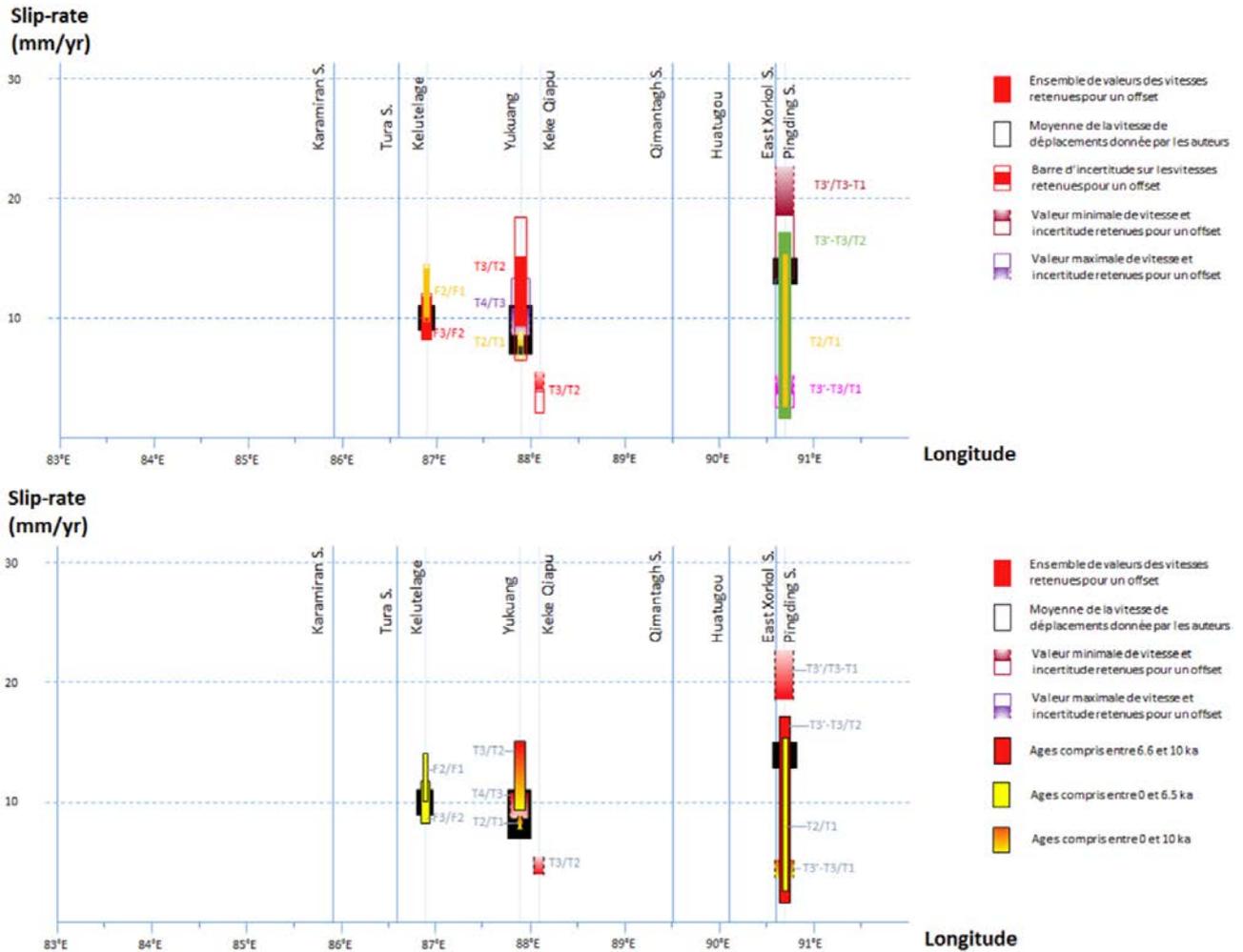


Figure 50. Tentative de réinterprétation des données de décalages géomorphologiques et de datations en 4 sites le long de la faille de l'Altyn Tagh. En haut, bornes et variations des vitesses selon les marqueurs à chacun des sites. En bas, même données représentées en fonction de l'âge du marqueur. On notera qu'à ces sites seuls des morphologies Holocène sont concernées.

VI Bibliographie

- Alasset, P.-J., Sismotectonique et identification des sources sismiques en domaine à déformation lente : cas des Pyrénées Occidentales et des Alpes du Nord (France). Le Tsunami créé par le séisme de Zemmouri (Mw=6.9, Algérie) du 21 mai 2003, PhD dissertation, University Louis Pasteur, Strasbourg, p.214, 2005.
- Anderson, R. S., Repka, J. L. & Dick, G. S., Explicit treatment of inheritance in dating depositional surfaces using in situ ^{10}Be and ^{26}Al . *Geology*, 24, 47–51, 1996.
- Armijo, R., P. Tapponnier, J.L. Mercier and Han Tong Lin, Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonics implications, *J. Geophys. Res.*, 91, n°B14, 13803-13872, 1986a.
- Armijo, R., A. Deschamps and J.P. Poirier, Carte sismotectonique Europe et Bassin Méditerranéen, U. de Paris, INSU, IGP, 1986b.
- Armijo, R., P. Tapponnier and Han Tong Lin, Late cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern China, *J. Geophys. Res.*, 94, n°B3, 2787-2838, 1989.
- Avouac, J.-P., Tapponnier, P., 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophysical Research Letters* 20, 895–898. doi:10.1029/93GL00128.
- Baran, R., A.M. Friedrich, F. Schlunegger, The late Miocene to Holocene erosion pattern of the Alpine foreland basin reflects Eurasian slab unloading beneath the western Alps rather than global climate change, *Lithosphere*, 2, 124-131, doi :10.1130/L307.1, 2014.
- Behr, W.M., D.H. Rood, K.E. Fletcher, N. Guzman, R. Finkel, T.C. Hanks, K.W. Hudnut, K.J. Hendrick, J.P. Platt, W.D. Sharp, R.J. Weldon, J.D. Yule, Uncertainties in slip-rate estimates for the Mission Creek strand of the southern San Andreas fault at Biskra Palms Oasis, southern California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 122, 1360-1377, doi :10.1130/B30020.1, 2010.
- Bendick, R., Bilham, R., Freymueller, J., Larson, K., Yin, G., Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system, *Nature*, 404, 69–72, 2000.
- Benson, L.V., D.R. Currey, R.I. Dorn, K.R. Lajoie, C.G. Oviatt, S.W. Robinson, G.I. Smith, S. Stine, Chronology of expansion and contraction of four Great Basin lake systems during the past 35,000 years, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 78, 241-286, 1990.
- Blisniuk, P. M., and W. D. Sharp, Rates of late Quaternary normal faulting in central Tibet from U-series dating of pedogenic carbonate in displaced fluvial gravel deposits, *Earth and Planetary Science Letters*, 215, 169-186, 2003.
- Briner, J.P., Moraine pebbles and boulders yield indistinguishable ^{10}Be ages : a case study from Colorado, USA, *Quaternary Geochronology*, 4, 299-305, 2009.
- Brown, E.T., Bendick, R., Bourles, D.L., Gaur, V., Molnar, P., Raisbeck, G.M., Yiou, F., Slip rates of the Karakorum fault, Ladakh, India, determined using cosmic ray exposure dating of debris flows and moraines, *Journal of Geophysical Research*, 107, doi:10.1029/2000JB000100 (art. no. 2192), 2002.
- Brown, E. T., Molnar, P., and Bourlés, D. L., Comment on "Slip-rate measurements on the Karakorum Fault may imply secular variations in fault motion." *Science* 309, 1326b, 2005.
- Champagnac, J.D. C. Sue, B. Delacou, P. Tricart, C. Allanic, M. Burkhard, Miocene lateral extrusion in the inner western Alps revealed by dynamic fault analysis, *Tectonics*, 25, TC3014, doi :10.1029/2004TC001779, 2006.
- Champagnac, J.D., F. Schlunegger, K. Norton, F. von Blanckenburg, L.M. Abbühl, M. Schwab, Erosion-driven uplift of the modern Central Alps, *Tectonophysics*, 474, 236-249, 2009.
- Chen, Q. Z., J. T. Freymueller, Z. Q. Yang, C. J. Xu, W. P. Jiang, Q. Wang, J. N. Liu, Spatially variable extension in southern Tibet based on GPS measurements, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 109(B9), 2004.
- Chevalier, M.L., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, R.C. Finkel, J. Van der Woerd, Li H., Liu Q., Slip-rate measurements on the Karakorum fault may imply secular variations in fault motion, *Science*, 307, 411-414, 2005a.

- Chevalier, M.L., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, R.C. Finkel, J. Van der Woerd, Li H., Liu Q., Response to Comment on “Slip-Rate Measurements on the Karakorum Fault May play Imply Secular Variations in Fault Motion”, *Technical Comment, Science*, 309, 1326-1326, 2005b.
- Chevalier, M.-L., G. Hilley, P. Tapponnier, J. van der Woerd, J. Liu-Zeng, R.C. Finkel, F.J. Ryerson, H. Li, X. Liu, Constraints on the late Quaternary glaciations in Tibet from cosmogenic exposure age dating of moraine surfaces, *Quaternary Science Review*, 30, 528-554, 2011.
- Chevalier, M.-L., P. Tapponnier, J. van der Woerd, F.J. Ryerson, R.C. Finkel, H. Li, Spatially constant slip rate along the southern segment of the Karakorum fault since 200 ka, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2011.12.014, 2012.
- Cowgill, E., Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: Revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 254(3–4), 239–255, doi:10.1016/j.epsl.2006.09.015, 2007.
- Cowgill, E., R. D. Gold, C. Xuanhua, W. Xiao-Feng, J. R. Arrowsmith, and J. Southon, Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet, *Geology*, 37(7), 647–650, doi:10.1130/G25623A.1, 2009.
- Craddock, W. H., Kirby, E., Harkins, N. W., Zhang, H., Shi, X. & Liu, J., Rapid fluvial incision along the Yellow River during headward integration. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NNGEO777, 2010.
- Delacou, B., C. Sue, J.D. Champagnac, M. Burkhard, Present-day geodynamics in the bend of the western and central Alps as constrained by earthquake analysis, *Geophys. J. Int.*, 158, 753-774, 2004.
- De Michele, M., D. Raucoules, C. Lasserre, E. Pathier, Y. Klinger, J. Van der Woerd, J. de Sigoyer, Xu X., The Mw 7.9, 12 May 2008 Sichuan earthquake rupture measured by sub-pixel correlation of ALOS PALSAR amplitude images, *Earth, Planets and Space*, 62, 875-879, 2010.
- Dorbath, C., J. Van der Woerd, S.S. Areviev, E. Rogozhin, J. Aptekman, The Altai (Chuya) 2003 earthquake : the first instrumentally recorded Mw 7.3 event in Gorny Altai (Russia), *Bulletin of Seismological Society of America*, 98, 6, 2849-2865, doi:10.1785/0120080166, 2008.
- Elliott, J.R., J. Biggs, B. Parsons, T.J. Wright, InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12309, 2008.
- Fletcher, K.E., W.D. Sharp, K.J. Kendrick, W.M. Behr, W.M. Hudnut, K.W. Hudnut, T.C. Hanks, 230Th/U dating of a late Pleistocene alluvial fan along the southern San Andreas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 122, 9/10, 1347-1359, 2010.
- Fréchet, J., F. Thouvenot, L. Jenatton, Pho Hoang-Trong, and M. Frogneux, Le séisme du Grand-Bornand (Haute-Savoie) du 14 décembre 1994 : un coulissage dextre dans le socle subalpin, *C.R. Acad. Sci, Paris*, 323, 517-524, 1996.
- Fréchet, J., F. Thouvenot, M. Frogneux, N. Deichmann, M. Cara, The Mw 4.5 Vallorcine (French Alps) earthquake of 8 September 2005 and its complex aftershock sequence, *J. of Seismology*, 15, 43-58, 2011.
- Gaudemer, Y., P. Tapponnier, B. Meyer, G. Peltzer, Guo Shunmin, Chen Zhitai, Dai Huagung and I. Cifuentes, Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the "Tianzhu gap", on the Western Haiyuan Fault, Gansu (China), *Geophysical J. International*, 120, 599-645, 1995.
- Gilbert, G. K., A theory of the earthquakes of the Great Basin, with a practical application, *Am. J. Sci., Series 3 Vol.* 27:49-53, doi:10.2475/ajs.s3-27.157.49, 1884.
- Gold, R. D., E. Cowgill, J. R. Arrowsmith, J. C. Gosse, X. Chen, and X. F. Wang, Riser diachroneity, lateral erosion, and uncertainty in rates of strike-slip faulting: A case study from Tuzidun along the Altyn Tagh Fault, NW China, *J. Geophys. Res.*, 114, B04401, doi:10.1029/2008JB005913, 2009.
- Gosse, J. C., Phillips, F. M., Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and applications, *Quaternary Science Reviews*, 20, 1475–1560, 2001.

- Granger, D. E., Smith, A. L., Dating buried sediments using radioactive decay and muogenic production of ^{26}Al and ^{10}Be , *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B172, 822–826, 2000.
- Hanks, T.C., W. Thatcher, The slip-rate discrepancy for the Altyn Tagh fault : an example of epistemic uncertainty, AGU, Fall Meeting, abstract #T21E-03, 2006.
- Harkins, N., Kirby, E., Heismath, A., Robinson, R. & Reiser, U., Transient fluvial incision in the headwaters of the Yellow River, northeastern Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 112, F03S04, doi: 10.1029/2006JF000570, 2007.
- Harkins, N., Kirby, E., Fluvial terrace riser degradation and determination of slip rates on strike-slip faults : an example from the Kunlun fault, China, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05406, doi:10.1029/2007GL033073, 2008.
- Harrison, T. M., P. Copeland, W. S. F. Kidd, and O. M. Lovera, Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone - Implications for Uplift of the Southern Tibetan Plateau, *Tectonics*, 14(3), 658-676, 1995.
- He, J., P. Vernant, J. Chéry, W. Wang, S. Lu, W. Ku, W. Xia, R. Bilham, Nailing down the slip rate of the Altyn Tagh fault, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5382-5386, 2013.
- Hetzl, R., Active faulting, mountain growth, and erosion at the margins of the Tibetan Plateau constrained by in situ-produced cosmogenic nuclides, *Tectonophysics*, 582, 1-24, 2013.
- Heyman, J., Stroeve, A.P., Harbor, J.M., Caffee, M.W., Too young or too old: evaluating cosmogenic exposure dating based on analysis of compiled boulder exposure ages, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 302, 71-80, 2011.
- Hintersberger, E., R.Ch. Thiede, M.R. Strecker, B.R. Hacker, East-west extension in the NW Indian Himalaya, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 122, 1499-1515, 2010.
- Hubert-Ferrari, A., J. Suppe, J. Van Der Woerd, Xin Wang, Huafu Lu, Irregular earthquake cycle along the southern Tianshan front, Aksu area, China, *Journal of Geophysical Research*, 110, B06402, doi:10.1029/2003JB002603, 2005.
- Hubert-Ferrari, A., G. King, J. Van Der Woerd, I. Villa, E. Altunel, R. Armijo, Long-term evolution of the North Anatolian fault : New constraints on its eastern termination, in *Collision and Collapse at the Africa-Arabia-Eurasia Subduction Zone*, *Geological Society, London, Special Publications*, 311, 133-154, doi: 10.1144/SP311.5, 2009.
- Jolivet, R., R. Cattin, N. Chamot-Rooke, C. Lasserre, and G. Peltzer, Thin-plate modeling of interseismic deformation and asymmetry across the Altyn Tagh fault zone, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02309, 2009.
- Kali, E., De la déformation long-terme à court-terme sur les failles normales du Sud - Tibet : approche géochronologique multi-méthodes (Be10, Al26, U-Th/He, Ar/Ar, U/Pb) », Thèse de l'Université de Strasbourg, 377p., 2010.
- Kali, E., P. H. Leloup, N. Arnaud, G. Maheo, D. Liu, E. Boutonnet, J. Van der Woerd, L. Xiaohan, J. Liu-Zeng, and L. Haibing, Exhumation history of the deepest central Himalayan rocks (Ama Drime range): key P-T-D-t constraints on orogenic models, *Tectonics*, doi:10.1029/2009TC002551, 2010.
- Kapp, P., A. Yin, T. M. Harrison, and L. Ding, Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet, *Geological Society of America Bulletin*, 117(7-8), 865-878, 2005.
- Keller, E. A., M. S. Bonkowski, R. J. Korsch, and R. J. Shlemon, Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone in the southern Indio Hills, Coachella Valley, California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 93, 46– 56, 1982.
- Kirby, E., N. Harkins, E. Wang, X. Shi, C. Fan, D. Burbank, Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault, *Tectonics*, 26, TC2010, doi:10.1029/2006TC002033, 2007.
- Klinger, Y., Xu X., P. Tapponnier, J. Van der Woerd, C. Lasserre, G. King, High-resolution satellite imagery mapping of the surface rupture and slip distribution of the Mw ~7.8, November 14, 2001 Kokoxili earthquake (Kunlun Fault, Northern Tibet, China), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95, 1970-1987, 2005.

- Kong, P., C. Na, D. Fink, X. Zhao et W. Xiao, Moraine dam related to late Quaternary glaciation in the Yulong Mountains, southwest China, and impacts on the Jinsha River. *Quaternary Science Reviews*, 28:3224–3235, doi:10.1016/j.quascirev.2009.08.005, 2009.
- Lacassin, R., U. Schaerer, P. H. Leloup, N. Arnaud, P. Tapponnier, X. Liu, and L. Zhang, Tertiary deformation and metamorphism SE of Tibet: The folded Tiger-leap decollement of NW Yunnan, China, *Tectonics*, 15, 605–622, doi:10.1029/95TC03749, 1996.
- Lasserre, C., et al., Postglacial left slip rate and past occurrence of $M \geq 8$ earthquakes on the western Haiyuan fault, Gansu, China, *J. Geophys. Res.*, 104(B8), 17,633–17,651, doi:10.1029/1998JB900082, 1999.
- Lasserre C., Y. Gaudemer, P. Tapponnier, A.-S. Mériaux, J. Van der Woerd, F.J. Ryerson, Yuan Daoyang, Late Pleistocene slip-rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai China, using in situ ^{10}Be and ^{26}Al cosmogenic dating, *Journal of Geophysical Research*, 107, 2276-2291, 2002.
- Lasserre, C., G. Peltzer, F. Crampé, Y. Klinger, J. Van der Woerd, and P. Tapponnier, Coseismic deformation of the 2001 $M_w = 7.8$ Kokoxili earthquake in Tibet, measured by synthetic aperture radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, 110, B12408, doi:10.1029/2004JB003500, 2005.
- Lawson, A.C., compiler, 1908, The California earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission, vol. I: Carnegie Institution of Washington Publication 87, 451 p.
- LeDortz, K., B. Meyer, M. Sébrier, R. Braucher, D. Bourlès, L. Benedetti, H. Nazari, M. Foroutan, Interpreting scattered in-situ produced cosmogenic nuclide depth-profile data, *Quat. Geochron.* 11, 98-115, doi:10.1016/j.quageo.2012.02.020, 2012.
- Leloup, P. H., R. Lacassin, P. Tapponnier, U. Schaerer, D. Zhong, X. Liu, L. Zhang, S. Ji, and P. T. Trinh, The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina, *Tectonophysics*, 251, 3–10, doi:10.1016/0040-1951(95)00070-4, 1995.
- Leloup, P.H., N. Arnaud, E.R. Sobel, and R. Lacassin, Alpine thermal and structural evolution of the highest external crystalline massif: The Mont Blanc, *Tectonics*, 24, TC4002, doi: 10.1029/2004TC001676, 2005.
- Lensen, G.J., The general case of progressive fault displacement of flights of degradational terraces, *New Zealand J. of Geol. And Geophys.*, 7:4, 864-870, 1964.
- Lensen, G.J., Analysis of progressive fault displacement during downcutting at the Branch River terraces, South Island, New Zealand, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 79, 545–556, 1968.
- Li Haibing, J. Van der Woerd, Y. Klinger, P. Tapponnier, Qi Xuexiang, Yang Jingsui, Zhu Yintang, Slip rate on the Kunlun Fault and recurrence time of great earthquake comparable to the 14/11/2001, $M_w \sim 7.8$ Kokoxili earthquake at Hongshui Gou, *Earth and Planetary Science Letters*, 237, 285-299, 2005.
- Li, H., J. van der Woerd, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, Xu Z., Yang J., Paleo-seismic, Cumulative Offsets and Long-term Slip-rate Along the Karakax Fault, Western Segment of the Altyn Tagh Fault, Northwest Tibet, *Eos, Trans. AGU*, 87(47), AGU 2006 fall meeting, San Francisco, 11-15 December 2006.
- Li, H., Van der Woerd, J., Sun, Z., Meriaux, A.-S., Tapponnier, P., Ryerson, F.J., Si, J., Pan, J., Late Quaternary left-slip rate and large earthquake recurrence time along the Kangxiwar (Karakax) segment of the Altyn Tagh fault, Northern Tibet. *Quaternary Sciences* 28 (2), 197–217 (in Chinese with English abstract), 2008.
- Li, H., Si, J., J. van der Woerd, Pei J., Fu X., P. Tapponnier, Co-seismic rupture and maximum displacement of the 2008 Wenchuan earthquake and its tectonic implications, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T21E-04, 2009.
- Li, H., J. van der Woerd, Sun, Z., Si, J., P. Tapponnier, Pan, J., Liu, D., M.-L. Chevalier, Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet, *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2011.07.025, 24p., 2012.
- Li, J., Fang X., Song C., Pan B., Ma Y., Yan M., Late Miocene-Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes, *Quat. Res.*, doi: 10.1016/j.yqres.2014.01.002, 2014.

- Lin, A., Guo J., Nonuniform slip rate and millennial recurrence interval of large earthquakes along the eastern segment of the Kunlun fault, northern Tibet, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 2866-2878, 2008.
- Liu, T., and W.S. Broecker, Millennial-scale varnish microlamination dating of late Pleistocene geomorphic features in the drylands of western USA, *Geomorphology*, 187, 38-60, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.12.034, 2013.
- Liu-Zeng, J., Zhang Z., Wen L., P. Tapponnier, Sun J., Xing X., Hu G., Xu Q., Zeng L., Ding L., Ji C., K. Hudnut, J. Van der Woerd, Co-seismic ruptures of the 12 May, 2008, Mw 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: EW crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the edge of Tibet, *Earth and Planetary Science Letters*, 286, 355-370, 2009.
- Lowenstein, T.K., Li J., C. Brown, S.M. Roberts, T.L. Ku, S. Luo, W. Yang, 200 k.y. paleoclimate record from Death Valley salt core, *Geology*, 27, 3-6, 1999.
- Malavielle, J., Impact of erosion, sedimentation and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges : analog models and case studies. Geological Society of America, account GSA Today, v. 20, no. 1, doi : 10.1130/GSATG48A.1, 2010.
- Matmon, A., D. Schwartz, P. Haeussler, R. Finkel, J. Lienkaemper, H. D. Stenner, and T. E. Dawson, Denali fault slip rates and Holocene – late Pleistocene kinematics of central Alaska, *Geology*, 34(8), 645–648, doi:10.1130/G22361.1, 2006.
- Masson, F., F. Gal, and P.H. Leloup, Une carte gravimétrique haute résolution du massif du Mont-Blanc: implications structurales, *C. R. Geosciences*, 334, 1011-1019, 2002.
- McCaffrey, R., and J. Nabelek, Role of oblique convergence in the active deformation of the Himalayas and southern Tibet Plateau, *Geology*, 26(8), 691-694, 1998.
- Meade, B. J., and B. H. Hager, Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 110, B03403, doi:10.1029/2004JB003209, 2005.
- Meade, B.J., Present-day kinematics at the India-Asia collision zone, *Geology*, 35, 81-84, 2007.
- Mériaux, A.-S., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, J. Van der Woerd, R.C. Finkel, Xu X., Xu, Z., M.W. Caffee, Rapid slip along the central Altyn Tagh Fault: Morphochronologic evidence from Cherchen He and Sulamu Tagh, *Journal of Geophysical Research*, 109 (B6), B06401, 2004.
- Mériaux, A.-S., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, Xu Xiwei, G. King, J. Van der Woerd, R.C. Finkel, Li H., M.W. Caffee, Xu Z., Chen W., The Aksay segment of the northern Altyn Tagh fault: tectonic geomorphology, landscape evolution, and Holocene slip rate, *Journal of Geophysical Research*, 110, B04404, doi:10.1029/2004JB003210, 2005.
- Mériaux, A.-S., K. Sieh, R. C. Finkel, C. Rubin, M. Taylor, A. J. Meltzner, and F. J. Ryerson, Kinematic behavior of southern Alaska constrained by westward decreasing postglacial slip rates on the Denali Fault, Alaska, *J. Geophys. Res.*, 114, B03404, doi:10.1029/2007JB005053, 2009.
- Mériaux, A.-S., J. Van der Woerd, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, R. C. Finkel, C. Lasserre, Xu X., The Pingding segment of the Altyn Tagh Fault (91°E): Holocene slip-rate determination from cosmogenic dating of offset fluvial terraces, *Journal of Geophysical Research*, 117, B09406, doi:10.1029/2012JB009289, 2012.
- Métivier, F., Gaudemer, Y., Tapponnier, P., Meyer, B., Northeastward growth of the Tibet Plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: the Qaidam and Hexi Corridor basins, China, *Tectonics*, 17, 823–842, 1998.
- Meyer, B., 1991, Mécanismes des grands tremblements de Terre et du raccourcissement crustal oblique au bord Nord-Est du Tibet, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI.

- Meyer, B., P. Tapponnier, Y. Gaudemer, G. Peltzer, S. M. Guo, and Z. T. Chen, Rate of left-lateral movement along the easternmost segment of the Altyn Tagh fault, east of 96°E (China), *Geophys. J. Int.*, 124(1), 29–44, doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb06350.x, 1996.
- Meyer, B., P. Tapponnier, L. Bourjot, F. Metivier, Y. Gaudemer, G. Peltzer, G. Shunmin, and C. Zhitai, Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau, *Geophys. J. Int.*, 135(1), 1–47, doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00567.x, 1998.
- Molnar, P. and P. Tapponnier, Active tectonics of Tibet, *J. Geophys. Res.*, 83, 5361-5375, 1978.
- Murphy, M. A., A. Yin, P. Kapp, T. M. Harrison, C. E. Manning, F. J. Ryerson, L. Ding, and J. H. Guo, Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: Implications for the eastward extent of the Karakoram fault system, *Geological Society of America Bulletin*, 114(4), 428-447, 2002.
- Murphy, M.A., V. Sanchez, M.H. Taylor, Syncollisional extension along the India-Asia suture zone, south-central Tibet: implications for crustal deformation of Tibet, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290, 233-243, 2010.
- Owen, L.A., Caffee, M.W., Finkel, R.C., Seong, Y.B., Quaternary glaciation of the Himalayan-Tibetan orogen, *J. Quat. Sci.*, 23, 513-531, 2008.
- Peltzer, G., P. Tapponnier, and R. Armijo, Magnitude of Late Quaternary left-lateral displacements along the north edge of Tibet, *Science*, 246(4935), 1285–1289, doi:10.1126/science.246.4935.1285, 1989.
- Peltzer, G., P. Tapponnier, Y. Gaudemer, B. Meyer, Guo Shunmin, Yin Kelun, Chen Zhitai and Dai Huagung, Offsets of late quaternary morphology, rate of slip, and recurrence of large earthquakes on the Chang Ma fault (Gansu, China), *J. Geophys. Res.*, 93, n°B7, 7793-7812, 1988.
- Peltzer, G., A. Socquet, C. Lasserre, A.-S. Mériaux, P. Tapponnier, F.R. Ryerson, InSAR observations of interseismic strain along the central Altyn Tagh fault consistent with Holocene slip-rate, AGU, Fall Meeting, abstract #T21E-02, 2006.
- Perrineau, A., Evolution morphologique et tectonique récente des marges NE et SE du plateau tibétain: lien avec la dynamique des grands fleuves, Thèse Institut de Physique du Globe de Paris, 421p., 2010.
- Perrineau, A., J. van der Woerd, Y. Gaudemer, J. Liu-Zeng, R. Pik, P. Tapponnier, R. Thuizat, R. Zheng, Incision rate of the Yellow River in northeastern Tibet constrained by 10Be and 26Al cosmogenic isotopes dating of fluvial terraces: implications for catchment evolution and plateau building, in Gloaguen, R., & Ratschbacher, L. (eds) *Growth and collapse of the Tibet plateau*, Geological Society, London, special publications, 353, 189-219, doi:10.1144/SP353.10, 2011.
- Phillips, F.M., M.G. Zreda, L.V. Benson, M.A. Plummer, D. Elmore, P. Sharma, Chronology for fluctuations in late Pleistocene Sierra Nevada glaciers and lakes, *Science*, 274, 749-751, 1996.
- Putkonen, J., Swanson, T., Accuracy of cosmogenic ages for moraines. *Quaternary Research* 59, 255-261, 2003.
- Reid, H.F., 1910, The mechanics of the earthquake, v. II of Lawson, A.C., chairman, The California earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Institution of Washington Publication 87, 192 p. (reprinted in 1969).
- Ren, J., Xu X., R.S. Yeats, Zhang S., Millennial slip rates of the Tazang fault, the eastern termination of Kunlun fault: Implications for strain partitioning in eastern Tibet, *Tectonophysics*, 608, 1180-1200, 2013.
- Repka, J. L., Anderson, R. S., Finkel, R. C. Cosmogenic dating of fluvial terraces, Freemont River, Utah, *Earth and Planetary Science Letters*, 152, 59–73, 1997.
- Richon, P., Y. Klinger, P. Tapponnier, Li C., J. Van der Woerd, F. Perrier, Measuring radon flux across active faults : Relevance of excavating and possibility of satellite discharges, *Radiation Measurements*, 45, 211-218, 2010.
- Ritz, J.-F., R. Vassallo, R. Braucher, E.T. Brown, S. Carretier, D.L. Bourlès, Using in situ-produced 10Be to quantify active tectonics in the Gurvan Bogd mountain range (Gobi-Altay, Mongolia), *Geol. Soc. Am. Special Paper* 415, 87-110, 2006.

- Ryerson, F.J., Tapponnier, P., Finkel, R.C., Mériaux, A.-S., Van der Woerd, J., Lasserre, C., Chevalier, M.-L., Xu, X., Li, H., and King, G.C.P.; Applications of morphochronology to the active tectonics of Tibet, in Siame, L.L., Bourlès, D.L., and Brown, E.T., eds., Application of cosmogenic nuclides to the study of Earth surface processes: The practice and the potential: Geological Society of America Special Paper 415, p. 61–86, doi: 10.1130/2006.2415(05), 2006.
- Savage, J. C., and R. O. Burford, Geodetic determination of the relative plate motion in central California, *J. Geophys. Res.*, 78, 832–845, 1973.
- Schaefer et al., High-frequency Holocene glacier fluctuations in New Zealand differ from northern signature, *Science*, 324, 622–625, doi: 10.1126/science.1169312, 2009.
- SCEC field notebook, Behr, W., K. Hudnut, T. Hanks, K. Kendrick, W. Sharp, K. Fletcher, D. Rood, R.C. Finkel, A revised slip rate estimate for the Coachella Valley strand of the southern San Andreas fault at Biskra Palms Oasis, 16–25, 2007.
- Sieh, K., and R. Jahns, Holocene activity of the San Andreas fault at Wallace Creek, California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 883–896, 1984.
- Sieh, K., and R.E. Wallace, The san Andreas fault at Wallace Creek, San Luis Obispo County, California, *Geological Society of America Centennial Field Guide – Cordilleran Section*, 233–238, 1987.
- Suggate, R.P., The interpretation of progressive fault displacement of flights of terraces, *N. Z. J. Geol. Geophys.* 3 (3), 364–374, 1960.
- Tapponnier, P., and P. Molnar, Active faulting and tectonics in China, *J. Geophys. Res.*, 82(20), 2905–2930, doi:10.1029/JB082i020p02905, 1977.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Armijo, R., Le Dain, A.-Y., Cobbold, P., Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10, 611–616, 1982.
- Tapponnier, P., F. J. Ryerson, J. Van der Woerd, A.-S. Mériaux, C. Lasserre, Long-term slip rates and characteristic slip: keys to active fault behaviour and earthquake hazard, *C. R. Acad. Sci., Ser. II*, 333(9), 483–494, 2001a.
- Tapponnier, P., Z. Q. Xu, F. Roger, B. Meyer, N. Arnaud, G. Wittlinger, and J. S. Yang, Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau, *Science*, 294(5547), 1671–1677, doi:10.1126/science.105978, 2001b.
- Thatcher, W., Microplate model for the present-day deformation of Tibet, *J. Geophys. Res.*, 112, B01401, doi:10.1029/2005JB004244, 2007.
- Thompson, L.G., Yao, T., Davis, M.E., Henderson, K.A., Mosley-Thompson, E., Lin, P.-N., Beer, J., Synal, H.-A., Cole-Dai, J., Bolzan, J.F., Tropical climate instability: the last glacial Cycle from a Qinghai-Tibetan ice core, *Science*, 276, 1821–1825, 1997.
- Thouvenot, F., J. Fréchet, P. Tapponnier, J.-C. Thomas, B. Le Brun, G. Menard, R. Lacassin, L. Jenatton, J.-R. Grasso, O. Coutant, A. Paul and D. Hatzfeld, The Ml 5.3 Epagny (French Alps) earthquake of 1996 July 15: a long-awaited event on the Vuache Fault, *Geophys. J. Int.*, 135, 876–892, 1998.
- Tocheport, A., L. Rivera, J. Van der Woerd, An integrated study of the Kokoxili, November 14, 2001, earthquake: history and geometry of the rupture from teleseismic data and field observations *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 1729–1741, 2006.
- Tschudi, S., J.M. Schäfer, Z. Zhao, X. Wu, S. Ivy-Ochs, P.W. Kubik, C. Schlüchter, Glacial advances in Tibet during the Younger Dryas ? Evidence from cosmogenic ^{10}Be , ^{26}Al , and ^{21}Ne , *J. of Asian Earth Sciences*, 22, 301–306, 2003.
- Van der Woerd, J., Couplage cinématique entre décrochements et chevauchements actifs dans le nord du Tibet. Croissance du plateau Tibétain. Kinematic coupling between active strike-slip and thrust faults in northeast Tibet. Growth of the Tibet plateau, Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 440p., 1998.

- Van Der Woerd J., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, Y. Gaudemer, R. Finkel, A. S. Mériaux, M. Caffee, Zhao Guoguang, He Qunlu, Holocene left-slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun Fault (Qinghai, China), *Geology*, 26, 695-698, 1998.
- Van Der Woerd J., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, A. S. Mériaux, Y. Gaudemer, B. Meyer, R.C. Finkel, M.W. Caffee, Zhao Guoguang, Xu Zhiqin, Uniform slip-rate along the Kunlun Fault: implications for seismic behaviour and large-scale tectonics, *Geophysical Research Letters*, 27, 2353-2356, 2000.
- Van Der Woerd J., Xu Xiwei, Li Haibing, P. Tapponnier, B. Meyer, F.J. Ryerson, A.S. Mériaux, Xu Zhiqin, Rapid active thrusting along the northwestern range front of the Tanghenan Shan (Western Gansu, China), *Journal of Geophysical Research*, 106, 30475-30504, 2001.
- Van der Woerd, J., A.-S. Mériaux, Y. Klinger, F.J. Ryerson, Y. Gaudemer and P. Tapponnier, The November 14th, 2001, Mw=7.8 Kokoxili Earthquake in Northern Tibet (Qinghai Province, China), *Seismological Research Letters*, 73, 144-154, 2002a.
- Van Der Woerd J., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, A.S. Mériaux, B. Meyer, Y. Gaudemer, R. Finkel, M. Caffee, Zhao G., Xu Z., Uniform Post-Glacial slip-rate along the central 600 Km of the Kunlun Fault (Tibet), from ²⁶Al, ¹⁰Be, and ¹⁴C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology, *Geophysical Journal International*, 148, 356-388, 2002b.
- Van der Woerd, J., L.A. Owen, P. Tapponnier, Xu, X., F. Kervyn, R.C. Finkel, P.L. Barnard, Giant, similar to M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics, *Geological Society of America Bulletin*, 116 (3-4): 394-406, 2004.
- Van der Woerd, J., Y. Klinger, K. Sieh, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, A.-S. Mériaux, Long-term slip rate of the southern San Andreas Fault from 10Be-26Al surface exposure dating of an offset alluvial fan, *Journal of Geophysical Research*, 111, B04407, doi:10.1029/2004JB003559, 2006.
- Van der Woerd, J., Y. Klinger, Xu X., K. LeDortz, P. Tapponnier, G. King, D. Bowman, Ma W., Chen W., Co-seismic and paleo-seismic slip along the Kokoxili Mw 7.8 earthquake rupture, *Eos, Trans. AGU*, 88(52), AGU 2007 fall meeting, San Francisco, 10-14 December 2007.
- Van der Woerd, J., Ph.H. Leloup, Liu-Zeng J., R. Lacassin, P. Tapponnier, Comment to “Orogen-parallel left-slip faults in the Eastern Himalaya: Implications for the growth mechanism of the Himalayan Arc” by Dewei Li and An Yin, *EPSL*, 274 (2008) 258-267, *Earth and Planetary Science Letters*, 285, 217-222, 2009a.
- Van der Woerd, J., La datation par l’isotope cosmogénique 10Be et l’extension tectonique au Tibet, *Géochroniques*, juin 2009b, n°110, p33-34.
- Van der Woerd, J., M.-L. Chevalier, E. Kali, G. Hilley, J. Liu-Zeng, P. Tapponnier, H. Li, R.C. Finkel, A.-S. Mériaux, Patterns of cosmogenic age distribution for late Quaternary moraines in Tibet, Goldschmidt conference, Prague, 14-19 August, 2011.
- Van der Woerd, J., C. Dorbath, F. Ousadou, L. Dorbath, B. Delouis, E. Jacques, P. Tapponnier, Y. Hahou, M. Menzhi, M. Frogneux, H. Haessler, The Al Hoceima Mw 6.4 earthquake of 24 February 2004 and its aftershocks sequence, *Journal of Geodynamics*, doi:10.1016/Lj.jog.2013.12.004, 2014.
- Wallace, K., Yin, G., Bilham, R., Inescapable slow slip on the Altyn Tagh fault, *Geophysical Research Letters*, 31, 1–4, doi:10.1029/2004GL019724 L09613, 2004.
- Wang, Q., Zhang P., J.T. Freymueller, R. Bilham, K.M. Larson, Lai X., You X., Niu Z., Wu J., Li Y., Liu J., Yang Z., Chen Q., Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements, *Science*, 294, 574-577, 2001.
- Weldon, R., K.Scharer, E. Fumal, G. Biasi, Wrightwood and the earthquake cycle: what a long recurrence record tells us about how faults work, *GSA Today*, 14, doi:10.1130/1052-5173, 4-10, 2004.
- Wright, T.J., Parsons, B., England, P.C., Fielding, E.J., InSAR observations of low slip rates on the major faults of Western Tibet, *Science*, 305, 236–239, 2004.

- Wu, Z. H., Y. S. Zhang, D. G. Hu, X. T. Zhao et P. S. Ye : Late Quaternary normal faulting and its kinematic mechanism of eastern piedmont fault of the Haba-Yulong Snow Mountains in northwestern Yunnan, China, *Science in China (Series D)*, 52:1470–1484, 2009.
- Xu, X., P. Tapponnier, J. Van Der Woerd, F.J. Ryerson, Wang F., Zheng R., Chen W., Ma W., Yu G., Chen G., Mériaux A.-S., Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh fault and its structural transformation model, *Science in China*, (Series D), 48(3): 384—397 (in Chinese with English abstract), 2005.
- Xu, X., Ma W., Yu G., P. Tapponnier, Y. Klinger, J. Van der Woerd, Re-evaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake (Mw7.8), Northern Tibetan Plateau, China, *Journal of Geophysical Research*, 111, B05316, doi:10.1029/2004JB003488, 2006.
- Zhang, P.Z., et al., Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data, *Geology*, 32, 809-812, 2004.
- Zhang, H., Zhang, P., J.-D. Champagnac, P. Molnar, R.S. Anderson, E. Kirby, W.H. Craddock, Liu S., Pleistocene drainage reorganization driven by the isostatic response to deep incision into the northeastern Tibetan Plateau, *Geology*, G35115, doi:10.1130/G35115.1, 2014.
- Zielke, O., J.R. Arrowsmith, L.G. Ludwig, S.O. Akciz, Slip in the 1857 and earlier large earthquake along the Carrizo plain, San Andreas fault, *Science*, 327, 1119-1122, 2010.
- Zoback, M.L., The 1906 earthquake and a century of progress in understanding earthquakes and their hazards, *GSA Today*, 16, doi :10.1130/GSAT01604.1, 4-11, 2006.

VII Annexe : le laboratoire de géochronologie nucléides cosmogéniques ^{10}Be et ^{26}Al à Strasbourg

Après quelques années de fonctionnement, il est possible de faire un bilan du laboratoire de géochronologie cosmogénique ^{10}Be et ^{26}Al . Le projet s'est concrétisé en 2003 par l'obtention d'un financement universitaire (appel d'offre Université de Strasbourg) avec un objectif de développement de méthodes conjointes nucléides cosmogéniques – séries de désintégration de l'Uranium entre les deux UMR (IPGS et CGS) et deux équipes (Tectonique et Géochimie). Ce financement a été suivi d'un soutien de REALISE (Région Alsace) et complété par des ressources de fonctionnement de projets de recherche (Figure 52).

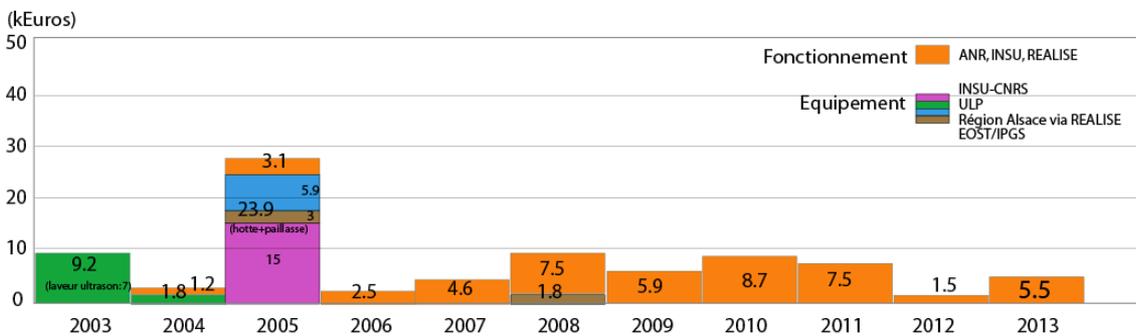


Figure 52. Répartition du financement par catégorie et par an du laboratoire.

La mise en place du nouvel équipement et l'aménagement d'une hotte spécifique aux attaques fluorhydriques en 2005 permettent d'effectivement commencer la chimie cosmogénique en 2006. Fin 2007, le laboratoire a atteint une vitesse de croisière de 6 à 8 échantillons analysés par mois (Figure 53). Si on prend les dépenses de fonctionnement globales nettes du laboratoire on obtient environ 80-110 Euros/échantillon (le LN2C au CEREGE facture à environ 300 Euros l'échantillon; CAMS au LLNL facture à environ 400 US \$; PrimeLab à Purdue facture à 800 US \$; sans compter la mesure au spectromètre AMS).

La durée de préparation d'un échantillon est encore longue. Entre le début de l'analyse chimique et la mesure au spectromètre de masse par accélération (ASTER) au CEREGE il se passe en moyenne 6 mois (± 3 mois).

Le fonctionnement du laboratoire (maintenance, organisation, formation des usagers) est assuré par un ingénieur-recherche (R. Thuizat jusqu'en 2010 ; E. Kali depuis 2011). Il s'assure du suivi des échantillons et le maintien à niveau de l'ensemble de la chaîne de traitement. Le laboratoire a accueilli des étudiants qui ont été formés aux pratiques d'analyse chimique des nucléides cosmogéniques. Compte-tenu des délais d'analyses des échantillons (rarement inférieur à 3 mois) il

est difficile d'accueillir des étudiants en M2 sur un projet complet d'analyse et de datations d'échantillons. Par contre, ces analyses sont tout à fait du ressort d'un travail de thèse.



Figure 53. Nombre d'échantillons analysés (par mois) depuis 2006 (courbe cumulée et total par an).

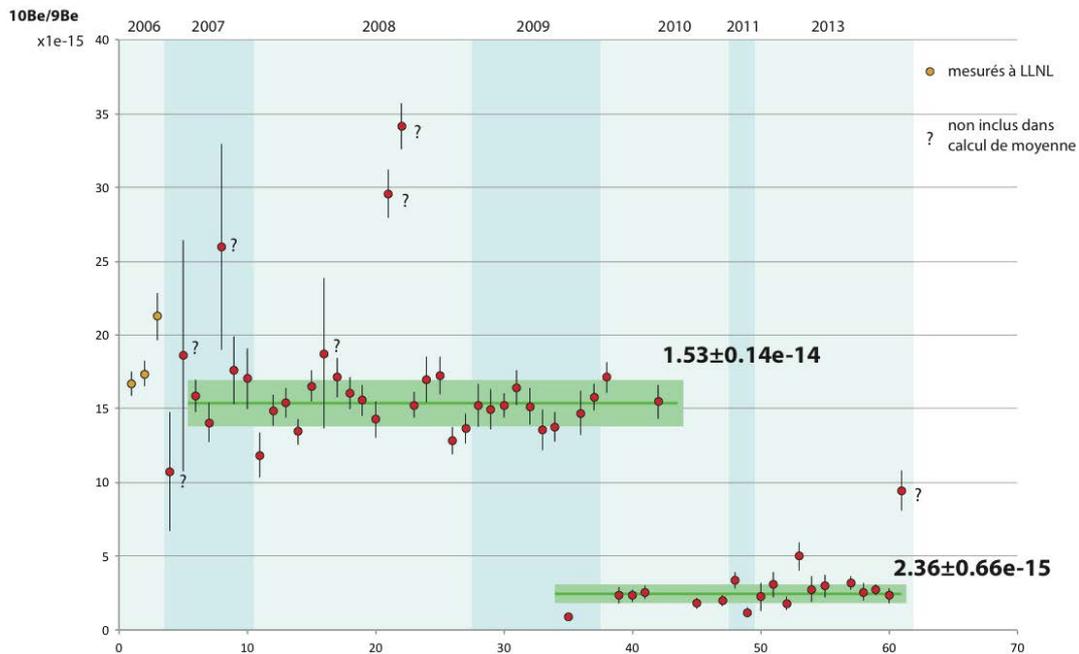


Figure : suivi du rapport $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ des blancs du laboratoire. Le changement (facteur 8) entre 2009 et 2010 est dû au changement du porteur ^9Be (d'origine commerciale).

Le suivi des blancs permet de se rendre compte de la stabilité du laboratoire vis à vis de contaminations externes. Le bruit de fond est bas et permet d'analyser des échantillons peu concentrés.

Plusieurs thèses et articles reposant sur des datations du laboratoire sont publiés, Bollinger et al., (2014), Benedetti et Van der Woerd (2014), Guérit L. (2014), Gayer et al., (2013), Drab L. (2012), Chevalier et al., (2011), Perrineau et al. (2011), Perrineau A. (2010), Kali E. (2010), Van der Woerd (2009).

- Benedetti, L., J. van der Woerd, Shaken and stirred: earthquakes, faults and toppled blocks, *Elements*, submitted (2014).
- Bollinger, L., P. Tapponnier, S.N. Sapkota, Y. Klinger, M. Rizza, J. van der Woerd, D.R. Tiwari, R. Pandey, I. Siwakoti, Return period of the great Himalayan earthquakes: evidences from Patu and Bardibas strands of the Main Frontal Thrust, *J. Geophys. Res.*, submitted (2014).
- Chevalier, M.-L., G. Hilley, P. Tapponnier, J. van der Woerd, J. Liu-Zeng, R.C. Finkel, F.J. Ryerson, H. Li, X. Liu, Constraints on the late Quaternary glaciations in Tibet from cosmogenic exposure age dating of moraine surfaces, *Quaternary Science Review*, 30, 528-554, 2011
- Drab, L., Etude multidisciplinaire le long de la Faille Nord Anatolienne, Turquie : Paléosismologie marine et paléomagnétisme en Mer de Marmara ; Etude géomorphologique du décalage de la rivière Kızılırmak par utilisation des isotopes cosmogéniques, Thèse Université de Liège, 2012.
- Gayer, E., C. Narteau, M. Holschneider, L. Barrier, J. van der Woerd, L. Guérit, E. Lajeunesse, F. Métivier, Investigating Holocene climatic zonation in North Tian Shan from fluvial terraces dating : a new Bayesian approach for cosmogenic $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ age determination from depth profiles, AGU, Fall Meet., 9-13 Dec., Abstract, 2013.
- Guérit, L., Caractéristiques morpho-sédimentaires des cônes alluviaux et reconstitution de leurs paléo-flux d'eau et de sédiments : exemples naturels du piedmont nord du Tian Shan (Xinjiang, Chine) et modélisation expérimentale, Thèse de l'Université Paris VII, 2014.
- Kali, E., De la déformation long-terme à court-terme sur les failles normales du Sud - Tibet : approche géochronologique multi-méthodes (Be^{10} , Al^{26} , U-Th/He, Ar/Ar, U/Pb, Thèse Université de Strasbourg, 377p., 2010.
- Perrineau, A., J. van der Woerd, Y. Gaudemer, J. Liu-Zeng, R. Pik, P. Tapponnier, R. Thuizat, R. Zheng, Incision rate of the Yellow River in northeastern Tibet constrained by ^{10}Be and ^{26}Al cosmogenic isotopes dating of fluvial terraces: implications for catchment evolution and plateau building, in Gloaguen, R., & Ratschbacher, L. (eds) Growth and collapse of the Tibet plateau, Geological Society, London, special publications, 353, 189-219, doi:10.1144/SP353.10, 2011.
- Perrineau, A., Evolution morphologique et tectonique récente des marges NE et SE du plateau tibétain: lien avec la dynamique des grands fleuves, Thèse Institut de Physique du Globe de Paris, 421p., 2010.
- Van der Woerd, J., La datation par l'isotope cosmogénique ^{10}Be et l'extension tectonique au Tibet, *Géochroniques*, juin 2009, n°110, p33-34.

VIII Renseignements administratifs

1 Curriculum vitae

Jérôme van der Woerd

Équipe de Dynamique Globale et Déformation Active
Institut de Physique du Globe de Strasbourg UMR 7516
5, Rue René Descartes
67084 Strasbourg Cedex
Tél : 03 68 85 03 49 ; Fax : 03 68 85 01 25
E-mail : jeromev@unistra.fr

Né le 18 Août 1967 à Neuilly-sur-Seine (92)
Nationalité française
Marié, 2 enfants.

a) Recherche

Production scientifique en sept. 2013: 37 articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture plus 3 soumis et 123 communications dans des congrès internationaux (dont 34 en 1^{er} auteur).

Nombre de citations 1318, h index : 19.

Centre d'intérêts

Détermination des vitesses court et long-terme des failles actives. Géomorphologie alluviale et glaciaire. Relations tectonique-climat. Fonctionnement sismique des failles, paléosismicité. Caractérisation et fonction de glissement des grands séismes intra-continentaux. Tectonique continentale.

Responsable du service de géochronologie cosmonucléides ¹⁰Be et ²⁶Al de l'UMR 7516.

Relecteur pour des revues : *Journal of Geophysical Research, Tectonophysics, Geology, Journal of Structural Geology, Earth and Planetary Science Letters, Geological Society of America Bulletin, Bulletin of the Seismological Society of America, Geophysical Journal International, Tectonics, Terra Nova, Geophysical Research Letters, Journal of Geology, Quaternary International, Journal of Asian Earth Sciences, Quaternary Geochronology, Climate Dynamics, Journal of Geodynamics*, et pour des agences de financement :

US National Science Foundation, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Agence National pour la Recherche.

b) Emplois occupés

2001- Chargé de recherche 1ère classe CNRS à l'UMR7516.

1998-2001 Employé au Lawrence Livermore National Laboratory dans le cadre d'un stage post-doctoral à l'Institut of Geophysics and Planetary Physics, Livermore, USA.

1996-1997 A.T.E.R IPGP Enseignement en Maîtrise et D.E.S.S., cours de cartographie et d'analyse d'image satellitaire SPOT, Tectonique et Analyse structurale.

c) Distinction

Outstanding Student paper, Tectonophysics section, AGU Fall Meeting 1997.

Prix Fernand Holweck, Léon Grelaud et Marie Guido-Triossi de l'Académie des Sciences de Paris, 3 octobre 2006.

Bénéficiaire de la Prime d'Excellence Scientifique 2010-2012.

d) Formation

Thèse de Doctorat de l'Université Denis Diderot – Paris VII, soutenue le 12 octobre 1998 à l'Institut de Physique du Globe de Paris.

Titre : « Couplage cinématique entre décrochements et chevauchements actifs dans le nord du Tibet. Croissance du plateau Tibétain. Kinematic coupling between active strike-slip and thrust faults in northeast Tibet. Growth of the Tibet plateau ».

Jury :

BULL William B.	Examineur
MONTAGNER Jean-Paul	Examineur
PHILIP Hervé	Rapporteur
RYERSON Frederick J.	Examineur
TAPPONNIER Paul	Directeur de Thèse
WELDON II Ray J.	Rapporteur

2 Publications

a) Dans des revues à comité de lecture

Soumis :

Chevalier, M.L., **J. van der Woerd**, P. Tapponnier, Li H., F.J. Ryerson, R.C. Finkel, Towards a spatially and temporally constant Karakorum fault slip-rate, *Geol. Soc. Am. Bull.*, submitted 2013.

Bollinger, L., P. Tapponnier, S.N. Sapkota, Y. Klinger, M. Rizza, **J. van der Woerd**, D.R. Tiwari, R. Pandey, I. Siwakoti, Return period of the great Himalayan earthquakes: evidences from Patu and Bardibas strands of the Main Frontal Thrust, *J. Geophys. Res.*, submitted 2013.

Benedetti, L., **J. van der Woerd**, Shaken and stirred: earthquakes, faults and toppled blocks, *Elements*, submitted 2013.

En préparation :

Van der Woerd, J., Y. Klinger, Xu X., K. LeDortz, P. Tapponnier, H. Li, G. King, Ma W., Chen W., Co-seismic and cumulative slip along the Kokoxili Mw 7.9 earthquake rupture (Kunlun Fault, northeastern Tibet).

Li, H., A.-S. Mériaux, **J. van der Woerd**, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, , Long-term slip-rate along the Karakax segment of the Altyn Tagh fault (western Kunlun, Xinjiang, China) from Be10 surface exposure dating of geomorphic landforms, (en preparation).

Kali, E., **J. van der Woerd**, J. Liu-Zeng, P.H. Leloup, R. Thuizat, M.L. Chevalier, Late Pleistocene-Holocene slip-rates on the normal faults of the Ama Drime horst (south Tibet) from in situ 10Be and 26Al cosmogenic isotopes dating, (in prep for *Journal of Geophysical Research*).

Kali, E., S. Choudhury, P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, E. Okal, S. Baruah, A. Coudurier-Couvreur, C. Dorbath, L. Bollinger, Tectonic geomorphology and source of the 1950 Great Assam earthquake, eastern Himalaya (in prep for *Nature Geosciences*).

Publiés :

37. **Van der Woerd, J.**, C. Dorbath, F. Ousadou, L. Dorbath, B. Delouis, E. Jacques, P. Tapponnier, Y. Hahou, M. Menzhi, M. Frogneux, H. Haessler, The Al Hoceima Mw 6.4 earthquake of 24 February 2004 and its aftershocks sequence, *Journal of Geodynamics*, doi:10.1016/Lj.jog.2013.12.004, 2014.

36. Brantingham, P.J., Gao X., D. Rhode, C. Perreault, **J. van der Woerd**, J.W. Olsen, Late occupation of the high-elevation northern Tibetan plateau based on cosmogenic, luminescence, and radiocarbon ages, *Geoarcheology*, 28, 5, 413-431, DOI: 10.1002/geo.21448, 2013.

35. Mériaux, A.-S., **J. Van der Woerd**, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, R. C. Finkel, C. Lasserre, Xu X., The Pingding segment of the Altyn Tagh Fault (91°E): Holocene slip-rate determination from cosmogenic dating of offset fluvial terraces, *Journal of Geophysical Research*, 117, B09406, doi:10.1029/2012JB009289, 2012.

34. Chevalier, M.-L., P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, F.J. Ryerson, R.C. Finkel, H. Li, Spatially constant slip rate along the southern segment of the Karakorum fault since 200 ka, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2011.12.014, 2012.
33. Li, H., **J. van der Woerd**, Sun, Z., Si, J., P. Tapponnier, Pan, J., Liu, D., M.-L. Chevalier, Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet, *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2011.07.025, p24, 2012.
32. Chevalier, M.-L., G. Hilley, P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, J. Liu-Zeng, R.C. Finkel, F.J. Ryerson, H. Li, X. Liu, Constraints on the late Quaternary glaciations in Tibet from cosmogenic exposure age dating of moraine surfaces, *Quaternary Science Review*, 30, 528-554, 2011.
31. Perrineau, A., **J. van der Woerd**, Y. Gaudemer, J. Liu-Zeng, R. Pik, P. Tapponnier, R. Thuzat, R. Zheng, Incision rate of the Yellow River in northeastern Tibet constrained by ¹⁰Be and ²⁶Al cosmogenic isotopes dating of fluvial terraces: implications for catchment evolution and plateau building, in Gloaguen, R., & Ratschbacher, L. (eds) *Growth and collapse of the Tibet plateau*, *Geological Society, London, special publications*, 353, 189-219, doi:10.1144/SP353.10, 2011.
30. Kali, E., P. H. Leloup, N. Arnaud, G. Maheo, D. Liu, E. Boutonnet, **J. Van der Woerd**, L. Xiaohan, J. Liu-Zeng, and L. Haibing, Exhumation history of the deepest central Himalayan rocks (Ama Drime range): key P-T-D-t constraints on orogenic models, *Tectonics*, doi:10.1029/2009TC002551, 2010.
29. Richon, P., Y. Klinger, P. Tapponnier, Li C., **J. Van der Woerd**, F. Perrier, Measuring radon flux across active faults : Relevance of excavating and possibility of satellite discharges, *Radiation Measurements*, 45, 211-218, 2010.
28. De Michele, M., D. Raucoules, C. Lasserre, E. Pathier, Y. Klinger, **J. Van der Woerd**, J. de Sigoyer, Xu X., The Mw 7.9, 12 May 2008 Sichuan earthquake rupture measured by sub-pixel correlation of ALOS PALSAR amplitude images, *Earth, Planets and Space*, 62, 875-879, 2010.
27. Liu-Zeng, J., Zhang Z., Wen L., P. Tapponnier, Sun J., Xing X., Hu G., Xu Q., Zeng L., Ding L., Ji C., K. Hudnut, **J. Van der Woerd**, Co-seismic ruptures of the 12 May, 2008, Mw 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: EW crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the edge of Tibet, *Earth and Planetary Science Letters*, 286, 355-370, 2009.
26. **Van der Woerd, J.**, Ph.H. Leloup, Liu-Zeng J., R. Lacassin, P. Tapponnier, Comment to “Orogen-parallel left-slip faults in the Eastern Himalaya: Implications for the growth mechanism of the Himalayan Arc” by Dewei Li and An Yin, *EPSL*, 274 (2008) 258-267, *Earth and Planetary Science Letters*, 285, 217-222, 2009.
25. Hubert-Ferrari, A., G. King, **J. Van Der Woerd**, I. Villa, E. Altunnel, R. Armijo, Long-term evolution of the North Anatolian fault : New constraints on its eastern termination, in *Collision and Collapse at the Africa-Arabia-Eurasia Subduction Zone*, *Geological Society, London, Special Publications*, 311, 133-154, doi: 10.1144/SP311.5, 2009.
24. Dorbath, C., **J. Van der Woerd**, S.S. Areviev, E. Rogozhin, J. Aptekman, The Altai (Chuya) 2003 earthquake : the first instrumentally recorded Mw 7.3 event in Gorny Altai (Russia), *Bulletin of Seismological Society of America*, 98, 6, 2849-2865, doi:10.1785/0120080166, 2008.

23. Xu, X., Ma W., Yu G., P. Tapponnier, Y. Klinger, **J. Van der Woerd**, Re-evaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake (Mw7.8), Northern Tibetan Plateau, China, *Journal of Geophysical Research*, 111, B05316, doi:10.1029/2004JB003488, 2006.
22. **Van der Woerd, J.**, Y. Klinger, K. Sieh, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, A.-S. Mériaux, Long-term slip rate of the southern San Andreas Fault from ¹⁰Be-²⁶Al surface exposure dating of an offset alluvial fan, *Journal of Geophysical Research*, 111, B04407, doi:10.1029/2004JB003559, 2006.
21. Tocheport, A., L. Rivera, **J. Van der Woerd**, An integrated study of the Kokoxili, November 14, 2001, earthquake: history and geometry of the rupture from teleseismic data and field observations *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 1729-1741, 2006.
20. Ryerson, F.J., Tapponnier, P., Finkel, R.C., Mériaux, A.-S., **Van der Woerd, J.**, Lasserre, C., Chevalier, M.-L., Xu, X., Li, H., and King, G.C.P.; Applications of morphochronology to the active tectonics of Tibet, 2006, in Siame, L.L., Bourlès, D.L., and Brown, E.T., eds., Application of cosmogenic nuclides to the study of Earth surface processes: The practice and the potential: Geological Society of America Special Paper 415, p. 61–86, doi: 10.1130/2006.2415(05).
19. Chevalier, M.L., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, R.C. Finkel, **J. Van der Woerd**, Li H., Liu Q., Response to Comment on “Slip-Rate Measurements on the Karakorum Fault May play Imply Secular Variations in Fault Motion”, *Technical Comment, Science*, 309, 1326-1326, 2005b.
18. Chevalier, M.L., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, R.C. Finkel, **J. Van der Woerd**, Li H., Liu Q., Slip-rate measurements on the Karakorum fault may imply secular variations in fault motion, *Science*, 307, 411-414, 2005a.
17. Mériaux, A.-S., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, Xu Xiwei, G. King, **J. Van der Woerd**, R.C. Finkel, Li H., M.W. Caffee, Xu Z., Chen W., The Aksay segment of the northern Altyn Tagh fault: tectonic geomorphology, landscape evolution, and Holocene slip rate, *Journal of Geophysical Research*, 110, B04404, doi:10.1029/2004JB003210, 2005.
16. Hubert-Ferrari, A., J. Suppe, **J. Van Der Woerd**, Xin Wang, Huafu Lu, Irregular earthquake cycle along the southern Tianshan front, Aksu area, China, *Journal of Geophysical Research*, 110, B06402, doi:10.1029/2003JB002603, 2005.
15. Xu, X, P. Tapponnier, **J. Van Der Woerd**, F.J. Ryerson, Wang F., Zheng R., Chen W., Ma W., Yu G., Chen G., Mériaux A.-S., Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh fault and its structural transformation model, *Science in China*, (Series D), 48(3): 384-397 (in Chinese with English abstract), 2005.
14. Li Haibing, **J. Van der Woerd**, Y. Klinger, P. Tapponnier, Qi Xuexiang, Yang Jingsui, Zhu Yintang, Slip rate on the Kunlun Fault and recurrence time of great earthquake comparable to the 14/11/2001, Mw~7.8 Kokoxili earthquake at Hongshui Gou, *Earth and Planetary Science Letters*, 237, 285-299, 2005.
13. Lasserre, C., G. Peltzer, F. Crampé, Y. Klinger, **J. Van der Woerd**, and P. Tapponnier, Coseismic deformation of the 2001 Mw = 7.8 Kokoxili earthquake in Tibet, measured by synthetic aperture radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, 110, B12408, doi:10.1029/2004JB003500, 2005.
12. Klinger, Y., Xu X., P. Tapponnier, **J. Van der Woerd**, C. Lasserre, G. King, High-resolution satellite imagery mapping of the surface rupture and slip distribution of the Mw ~7.8, November 14,

2001 Kokoxili earthquake (Kunlun Fault, Northern Tibet, China), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95, 1970-1987, 2005.

11. **Van der Woerd, J.**, L.A. Owen, P. Tapponnier, Xu, X., F. Kervyn, R.C. Finkel, P.L. Barnard, Giant, similar to M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics, *Geological Society of America Bulletin*, 116 (3-4): 394-406, 2004.

10. Mériaux, A.-S., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, **J. Van der Woerd**, R.C. Finkel, Xu X., Xu, Z., M.W. Caffee, Rapid slip along the central Altyn Tagh Fault: Morphochronologic evidence from Cherchen He and Sulamu Tagh, *Journal of Geophysical Research*, 109 (B6): art. no.-B06401, 2004.

9. Benedetti, L., P. Tapponnier, Y. Gaudemer, I. Manighetti and **J. Van Der Woerd**, Evidence for an emergent thrust along the southwestern edge of the Po Plain: The Broni-Stradella fault, *Journal of Geophysical Research*, 108(B5), 2238, doi: 10.1029/2001JB001546, 2003.

8. Meghraoui, M., Gomez, F., Sbeinati, R., **Van der Woerd, J.**, Mouty, M., Darkal, A.N., Radwan, Y., Layyous, I., Al Najjar, H., Darawcheh, R., Hijazi, F., Al-Ghazzi, R., Barazangi, M., Evidence for 830 years of seismic quiescence from palaeoseismology, archaeoseismology and historical seismicity along the Dead Sea fault in Syria. *Earth and Planetary Science Letters* 210 (1-2): 35-52, 2003.

7. **Van der Woerd, J.**, A.-S. Mériaux, Y. Klinger, F.J. Ryerson, Y. Gaudemer and P. Tapponnier, The November 14th, 2001, Mw=7.8 Kokoxili Earthquake in Northern Tibet (Qinghai Province, China), *Seismological Research Letters*, 73, 144-154, 2002.

6. **Van Der Woerd J.**, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, A.S. Mériaux, B. Meyer, Y. Gaudemer, R. Finkel, M. Caffee, Zhao G., Xu Z., Uniform Post-Glacial slip-rate along the central 600 Km of the Kunlun Fault (Tibet), from ²⁶Al, ¹⁰Be, and ¹⁴C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology, *Geophysical Journal International*, 148, 356-388, 2002.

5. Lasserre C., Y. Gaudemer, P. Tapponnier, A.-S. Mériaux, **J. Van der Woerd**, F.J. Ryerson, Yuan Daoyang, Late Pleistocene slip-rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai China, using in situ ¹⁰Be and ²⁶Al cosmogenic dating, *Journal of Geophysical Research*, 107, 2276-2291, 2002.

4. **Van Der Woerd J.**, Xu Xiwei, Li Haibing, P. Tapponnier, B. Meyer, F.J. Ryerson, A.S. Mériaux, Xu Zhiqin, Rapid active thrusting along the northwestern range front of the Tanghenan Shan (Western Gansu, China), *Journal of Geophysical Research*, 106, 30475-30504, 2001.

3. Tapponnier, P., F. J. Ryerson, **J. Van der Woerd**, A.-S. Mériaux, C. Lasserre, Long-term slip rates and characteristic slip: keys to active fault behaviour and earthquake hazard, *C. R. Acad. Sci., Ser. II*, 333(9), 483-494, 2001.

2. **Van Der Woerd J.**, F.J. Ryerson, P. Tapponnier, A. S. Mériaux, Y. Gaudemer, B. Meyer, R.C. Finkel, M.W. Caffee, Zhao Guoguang, Xu Zhiqin, Uniform slip-rate along the Kunlun Fault: implications for seismic behaviour and large-scale tectonics, *Geophysical Research Letters*, 27, 2353-2356, 2000.

1. **Van Der Woerd J.**, F.J. Ryerson, P. Tapponnier, Y. Gaudemer, R. Finkel, A. S. Mériaux, M. Caffee, Zhao Guoguang, He Qunlu, Holocene left-slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun Fault (Qinghai, China), *Geology*, 26, 695-698, 1998.

e) Autres publications

- Van der Woerd, J.**, La datation par l'isotope cosmogénique ^{10}Be et l'extension tectonique au Tibet, *Géochroniques*, juin 2009, n°110, p33-34.
- Li Haibing, **J. Van der Woerd**, Sun Zhiming, Meriaux A-S, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, Si Jialiang, Pan Jiawei, Late Quaternary left-slip rate and large earthquake recurrence time along the Kangxiwar (Karakax) segment of the Altyn Tagh fault, Northern Tibet. *Quaternary Sciences*, 28(2): 197-217, (in Chinese with English abstract), 2008.
- Li, H., Fu, X., **Van Der Woerd, J.**, Si, J., Wang, Z., Hou, L., Qiu, Z., Li, N., Wu, F., Xu, Z., P., Tapponnier, Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the M 8.0 wenchuan earthquake, *Acta Geologica Sinica*, vol. 82, issue 12, 2008, 1623 – 1643.
- Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhi-qin, Sun Zhiming, Paul Tapponnier, **Jerome Van der Woerd**, Anne-Sophie Meriaux, The constraint of the Altyn Tagh fault system to growth and rise of the northern Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 59-79, 2006.
- Ryerson, R.J., R. Finkel, **J. van der Woerd**, A. Yin, G. Pelfzer, M. Taylor, L. Owen, P. Bernanrd, P. Tapponnier, A.-S. Meriaux, X. Xiwei, Satellite-Based Observation of the Tectonics of Southern Tibet. *U.S. Department of Energy, Lawrence Livermore National Laboratory*, 2003.
- Lasserre, C., **J. Van der Woerd** et G. Peltzer, « *Une collision qui continue* », in « Himalaya-Tibet, Le choc des continents », *CNRS Editions*, 2002.

b) Communications à des colloques internationaux

1. Coudurier-Curveur, A., E. Kali, P. Tapponnier, **J. Van Der Woerd**, S. Baruah, S. Vaideswaran, E. Okal, C. Karakas, Primary surface rupture of the 1950 Assam earthquake, AOGS, Sapporo, Japan, 28 July-1 August 2014.
2. Kali, E., S. Choudhury, P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, E. Okal, L. Bollinger, P. Banerjee, S. Baruah, A. Coudurier-Curveur, C. Dorbath, Tectonic geomorphology, aftershock relocation, and sources of the great 1950 and 1897 East Hiamalyan earthquakes, AGU, Fall Meet., 9-13 Dec., Abstract, 2013.
3. Li, H., **J. van der Woerd**, Sun Z., Pan J., P. Tapponnier, Liu D., Si J., M.-L. Chevalier, Zhang W., Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet, China, AGU, Fall Meet., 9-13 Dec., Abstract, 2013.
4. Bollinger, L., P. Tapponnier, S.N. Sapkota, Y. Klinger, M. Rizza, **J. van der Woerd**, Return period of great Himalayan earthquakes in Eastern Nepal: evidence from the Patu and Bardibas strands of the Main Frontal Thrust, AGU, Fall Meet., 9-13 Dec., Abstract, 2013.
5. Gayer, E., C. Narteau, M. Holschneider, L. Barrier, **J. van der Woerd**, L. Guerit, E. Lajeunesse, F. Métivier, Investigating Holocene climatic zonation in North Tian Shan from fluvial terraces dating : a new Bayesian approach for cosmogenic $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ age determination from depth profiles, AGU, Fall Meet., 9-13 Dec., Abstract, 2013.

6. **van der Woerd, J.**, A. Perrineau, Y. Gaudemer, P.H. Leloup, Jing Liu-Zeng, L. Barrier, R. Thuizat, Extensional step-over between the Zhongdian and Red River faults: kinematics of the Daju normal fault, incision of the Yangtze river and plateau evolution (Yulong Shan, Yunnan), GSC-GSA Joint Meeting 2013, Roof of the World, Chegdu, China, 17-19 June 2013.
7. **Van der Woerd, J.**, A.-S. Mériaux, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, C. Lasserre, R.C. Finkel, X. Xu, The Pingding segment of the Altyn Tagh Fault (91°E): slip rate determination from cosmogenic radionuclide dating of offset fluvial terraces, vol. 15, 7-12 April 2013, EGU2013-6168, oral.
8. Chevalier, M.-L., **J. van der Woerd**, P. Tapponnier, H. Li, F.J. Ryerson, R.C. Finkel, Towards a spatially and temporally constant Karakorum fault slip rate, AGU, Fall Meet., 3-7 Dec., Abstract G23B-0934, 2012.
9. Etchebes, M., P. Tapponnier, Y. Klinger, **J. van der Woerd**, X. Xu, X. Sun, M. Rizza, L.H. Tang, Characteristic vertical throw, slow late-Quaternary uplift rate, and hanging-wall extension on the Karaxingar push-up thrust, Fuyun, China, AGU, Fall Meet., 3-7 Dec., Abstract T13D-2642, 2012.
10. Kali, E., P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, S. Choudury, S. Baruah, K. Alam, A. Ahsan, C. Dorbath, P. Banerjee, Tectonic geomorphology and active megathrust traces in the East-Himalayan Syntaxis, 27th Himalayan-Karakoram-Tibet Workshop, Kathmandu, 28-30 Nov. 2012.
11. A.-S. Mériaux, **Van der Woerd, J.**, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, C. Lasserre, R.C. Finkel, X. Xu, The Pingding segment of the Altyn Tagh Fault (91°E): slip rate determination from cosmogenic radionuclide dating of offset fluvial terraces, Wegener 2012, 17-20 Sept. 2012, Strasbourg, France.
12. E. Kali, P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, S. Choudhury, S. Baruah, K. Alam, A. Ahsan, C. Dorbath, P. Banerjee, Tectonic geomorphology and active megathrust traces in the East Himalayan Syntaxis, Wegener 2012, 17-20 Sept. 2012, Strasbourg, France.
13. M. Etchebes, P. Tapponnier, M. Rizza, L.H. Tsang, X. Xu, Y. Klinger, **J. Van Der Woerd**, X. Sun, Slow slip-rates and long characteristic earthquake recurrence times on the Fuyun fault, Xinjiang, China, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, 13-17 Aug. 2012, Singapore.
14. Etchebes, M., P. Tapponnier, Y. Klinger, **J. van der Woerd**, X. Xu, X. Tan, X. Sun, M. Rizza, T. Lok Hang, Slow late quaternary slip rate and long earthquake recurrence time along the Fuyun fault, Xinjiang, China, vol. 14, 22-27 April 2012, EGU2012-8568, poster.
15. Etchebes, M., P. Tapponnier, Y. Klinger, **J. van der Woerd**, X. Xu, X. Tan, X. Sun, M. Rizza, T. Lok Hang, Application of terrestrial LiDAR topographic data to reconstruct offset geomorphic markers along the Fuyun strike-slip fault, Xinjiang, China, vol. 14, 22-27 April 2012, EGU2012-8691, poster.
16. **Van der Woerd, J.**, Kinematics of strike-slip faults: the geological perspective, EGU General Assembly 2012, Geophysical Research Abstracts, vol. 14, 22-27 April 2012, EGU2012-13089, poster.

17. Li, H., **J. van der Woerd**, Z. Sun, J. Si, P. Tapponnier, J. Pan, D. Liu, M.-L. Chevalier, Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet, EGU General Assembly 2012, Geophysical Research Abstracts, vol. 14, 22-27 April 2012, EGU2012-8588, poster.
18. **Van der Woerd, J.**, A. Perrineau, Y. Gaudemer, P.-H. Leloup, J. Liu-Zeng, L. Barrier, R. Thuizat, Extensional step-over between the Zhongdian and Red River faults: kinematics of the Daju normal fault constrained by cosmogenic dating of the Yangtze terraces (Yulong Shan, Yunnan), EGU General Assembly 2012, Geophysical Research Abstracts, vol. 14, 22-27 April 2012, EGU2012-10971, poster.
19. Kali, E., **J. van der Woerd**, J. Liu-Zeng, M. LeBéon, P.-H. Leloup, G. Mahéo, P. Tapponnier, R. Thuizat, Active normal faults and river damming: the importance of tectonics and climate in shaping the landscape of the southern Tibetan plateau, EGU General Assembly 2012, Geophysical Research Abstracts, vol. 14, 22-27 April 2012, EGU2012-11051, poster.
20. **Van der Woerd, J.**, Plateau building and erosion: the role of large rivers in the evolution of relief in active orogens, colloque de l'Académie des Sciences, Institut de France, Paris, 26-27 March 2012, oral.
21. Li, H., **J. Van der Woerd**, Z. Sun, J. Si, P. Tapponnier, J. Pan, D. Liu, M.-L. Chevalier, Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet, AGU, Fall Meet., 5-9 Dec., Abstract T43F-2453, 2011, poster.
22. Etchebes M., Y. Klinger, P. Tapponnier, C. Narteau, **J. van der Woerd**, X. Xu, Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China, AGU, Fall Meet., 5-9 Dec., Abstract T53C-01, 2011, oral.
23. Coudroy T., L. Barrier, M. Simoes, P. Tapponnier, H. Li, **J. van der Woerd**, Lithospheric structure and kinematics of deformation of the Western Kunlun range (Xinjiang, China), AGU, Fall Meet., 5-9 Dec., Abstract T43F-2454, 2011, poster.
24. Pan J., H. Li, **J. van der Woerd**, Z. Sun, J. Si, J. Pei, F. Wu, M.-L. Chevalier, First quantitative slip-rate estimate along the Ashikule fault and tectonics of the westernmost segment of the Altyn Tagh fault, AGU, Fall Meet., 5-9 Dec., Abstract T43F-2452, 2011, poster.
25. **Van der Woerd, J.**, M.-L. Chevalier, E. Kali, G. Hilley, J. Liu-Zeng, P. Tapponnier, H. Li, R.C. Finkel, A.-S. Mériaux, Patterns of cosmogenic age distribution for late Quaternary moraines in Tibet, Goldschmidt conference ,14-19 August 2011, Prague, poster.
26. Chevalier, M.-L., P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, F.J. Ryerson, R.C. Finkel, H. Li, Karakorum fault slip-rate seems to be constant along strike over the last 200 ka, 26th Himalaya-Karakoram-Tibet workshop, Canmore, Alberta, Canada, July 12-13, 2011, poster.
27. **Van der Woerd, J.**, Geological constraints on vertical strain rates along the Rhine graben, Workshop on Seismic and aseismic deformation in crustal domains subject to very slow deformation rates, Strasbourg- Mont Ste-Odile, 29 May – 1st June 2011, oral.
28. Moulin, A., , L. Benedetti, **J. Van der Woerd**, A. Elias, P.-H. Blard, R. Finkel, R. Braucher, J. Lavé, D. Bourles, M. Daeron and P. Tapponnier Team, LGM glaciers on Mount Lebanon? New insights from ³⁶Cl exposure dating of moraine boulders, EGU General Assembly 2011, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, 3-8 April 2011, EGU2011-11465, poster.

29. Etchebes, M., Y. Klinger, P. Tapponnier, Xu X., **J. Van Der Woerd**, C. Narteau, and N. Wechsler, Geometry, Slip distribution and Segmentation of the 11/08/1931 Fuyun Earthquake (Ms 7.9), Xinjiang, China, from satellite image analyses and field observations, EGU General Assembly 2011, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, 3-8 April 2011, EGU2011-3680, oral.
30. **Van der Woerd, J.**, A. Perrineau, Y. Gaudemer, Liu-Zeng J., R. Pik, P. Tapponnier, R. Thuizat, Zheng R., Incision and uplift patterns along the Yellow River from fluvial terrace dating in northeastern Tibet: implications for plateau building, AGU, Fall Meet., 13-17 Dec., Abstract T43C-2244, 2010, poster.
31. Kali, E., **J. Van der Woerd**, P.H. Leloup, G. Maheo, N.O. Arnaud, J. Liu-Zeng, M.-L. Chevalier, R. Lacassin, P. Tapponnier, R. Thuizat, Extension in Central-South Tibet, insight from cosmogenic nuclide dating, AGU, Fall Meet., 13-17 Dec., Abstract T41D-04, 2010, oral.
32. Drab, L., A. Hubert-Ferrari, L. Benedetti, **J. Van der Woerd**, Evolution of the Kizilmak river and its interaction with the North Anatolian Fault, Turkey, AGU, Fall Meet., 13-17 Dec., Abstract EP41B-0696, 2010, poster.
33. Chevalier, M.-L., P. Tapponnier, **J. Van der Woerd**, F.J. Ryerson, R.C. Finkel, H. Li, Quaternary slip on the southern segment of the Karakorum fault and Pulan graben, Western Tibet, AGU, Fall Meet., 13-17 Dec., Abstract T33A-2202, 2010, poster.
34. Hubert-Ferrari, A., **J. Van der Woerd**, G. King, I.M. Villa, E. Altunel, R. Armijo, Long-term evolution of the North Anatolian Fault, GSA meeting, Ankara, No. 14-2, 4-8 October 2010, oral.
35. De Michele M., D. Raucoules, J. de Sigoyer, M. Pubellier, C. Lasserre, E. Pathier, Y. Klinger, **J. van der Woerd**, N. Chamot-Rooke, Three dimensional surface displacement of the Sichuan earthquake (Mw 7.9, China) from Synthetic Aperture Radar, EGU General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-3555, 2010, poster.
36. De Michele, M., D. Raucoules, J. de Sigoyer, M. Pubellier, C. Lasserre, E. Pathier, Y. Klinger, **J. Van der Woerd**, N. Chamot-Rooke, Three dimensional surface slip partitioning of the Sichuan earthquake from Synthetic Aperture Radar, Colloque du groupement de recherché G2, Strasbourg, 18-20 novembre 2009, oral.
37. **Van der Woerd, J.**, Y. Klinger, Xu X., Li H., P. Tapponnier, How do earthquake repeat along faults in space and time ? Example from the Kunlun Fault and the 14 November 2001 Mw 7.9 Kokoxili earthquake, Colloque du groupement de recherché G2, Strasbourg, 18-20 novembre 2009, poster.
38. Coudroy, T., H. Li, **J. Van der Woerd**, L. Barrier, M. Simoes, P. Tapponnier, G. Mainsant, J. Pan, R. Thuizat, Deformation and propagation of the Western Kunlun foreland into the Tarim Basin (Xinjiang, China), EOS Trans. AGU, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract GP21A-0771, 2009, oral.
39. De Michele, M., D. Raucoules, J. de Sigoyer, M. Pubellier, C. Lasserre, E. Pathier, Y. Klinger, **J. Van der Woerd**, Three dimensional surface slip partitioning of the Sichuan earthquake from Synthetic Aperture Radar, AGU, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T11A-1765, 2009, oral.

40. Li, H., Si, J., **J. van der Woerd**, Pei J., Fu X., P. Tapponnier, Co-seismic rupture and maximum displacement of the 2008 Wenchuan earthquake and its tectonic implications, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T21E-04, 2009, oral.
41. Li, H., **J. Van der Woerd**, P. Tapponnier, Z. Wang, X. Fu, L. Hou, J. Si, Z. Qiu, Large > 10 m coseismic oblique slip along the rupture of the Mw 7.9 12 May 2008 Wenchuan earthquake (Sichuan, China), EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-7788, 2009, poster.
42. Perrineau, A., **J. Van der Woerd**, Liu-Zeng J., Y. Gaudemer, R. Pik, P. Tapponnier, R. Thuizat, Incision rate of the Yellow River in northeastern Tibet constrained by cosmogenic isotope dating (10Be, 26Al) of fluvial terraces: implications to catchment evolution and plateau building, EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-3200, 2009, poster.
43. **Van der Woerd, J.**, Y. Klinger, Xu X., K. LeDortz, P. Tapponnier, H. Li, G. King, Ma W., Chen W., Co-seismic and cumulative slip along the Kokoxili Mw 7.9 earthquake rupture (Kunlun Fault, northeastern Tibet), EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-7691, 2009, oral.
44. Kali, E., **J. Van der Woerd**, N. Arnaud, P.H. Leloup, G. Mahéo, Liu-Zeng J., M.L. Chevalier, R. Lacassin, P. Tapponnier, R. Thuizat, Morphologic and geochronological constraints on the long (>Ma) and short (10-100 Kyr) term vertical rates on south Tibetan normal faults, EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-9743, 2009, oral.
45. Coudroy, T., **J. Van der Woerd**, H. Li, L. Barrier, P. Tapponnier, M. Simoes, R. Thuizat, J. Pan, J. Si, T. Xu, Shortening rates across the foothills of the Western Kunlun (Xinjiang, China) inferred from geomorphic measurements and cosmogenic 10Be dating, EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-10435, 2009, poster.
46. Toussaint, R., J. Schmittbuhl, C. Doubre, S. Santucci, M. Grob, K.J. Maloy, G. Peltzer, **J. Van der Woerd**, L. Rivera, G. Daniel, Space and time correlations in the activity of fracture front dynamics: a comparison to the statistics of slip and microseismicity of natural faults, EGU General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-13091, 2009, oral.
47. Li H., **J. Van der Woerd**, Wang Z., Fu X., Hou L., Si J., Qiu Z., Wu F., P. Tapponnier, The Mw 7.9 Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China: Surface rupture and oblique right-lateral co-seismic thrusting, *Eos Trans. AGU*, 89(53), AGU 2008 fall meeting San Francisco, 15-19 December 2008, oral.
48. Chevalier, M.-L., G.E. Hilley, Liu-Zeng J., P. Tapponnier, **J. Van der Woerd**, Surface-exposure cosmogenic dating of Southern Tibet moraines reveal glaciations coincident with the Northern Hemisphere, *Eos Trans. AGU*, 89(53), AGU 2008 fall meeting San Francisco, 15-19 December 2008, oral.
49. Kali, E., N. Arnaud, P.H. Leloup, G. Maheo, E. Boutonnet, **J. van der Woerd**, Liu-Zeng J., Miocene metamorphism and exhumation, and recent normal faulting along the grabens of southern Tibet, Abstract RST Nancy, 21-24 Avril 2008, oral.
50. Perrineau, A., **J. van der Woerd**, P.-H. Leloup, R. Pik, Liu-Zeng J., L. Barrier, G. Maheo, Y. Gaudemer, R. Lacassin, P. Tapponnier, Link between tectonic and erosion in building the

Tibetan plateau, a geomorphological and geochronological approach, Abstract RST Nancy, 21-24 Avril 2008, poster.

51. Schmittbuhl, J. R. Toussaint, K. Maloy, S. Santucci, M. Grob, C. Doubre, **J. Van der Woerd**, G. Peltzer, Velocity fluctuations of a slow crack front during slow propagation: an experimental approach, and comparison to large scale spatio temporal scaling law in fault slip dynamics, EGU General Assembly 2008, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-10996, 2008, oral.
52. **Van der Woerd, J.**, Y. Klinger, Xu X., K. LeDortz, P. Tapponnier, G. King, D. Bowman, Ma W., Chen W., Co-seismic and paleo-seismic slip along the Kokoxili Mw 7.8 earthquake rupture, *Eos, Trans. AGU*, 88(52), AGU 2007 fall meeting, San Francisco, 10-14 December 2007, oral.
53. Chevalier, M.L., F.J. Ryerson, **J. Van der Woerd**, P. Tapponnier, R.C. Finkel, Li Haibing, Clear signature of Last Glacial Maximum advances in Southern Tibet, *Eos, Trans. AGU*, 88(52), AGU 2007 fall meeting, San Francisco, 10-14 December 2007, oral.
54. Hubert-Ferrari, A., **J. Van der Woerd**, G. King, I. Villa, and R. Armijo, New constraints on the Karliova Triple Junction between Arabia, Eurasia and Anatolia, European Geosciences Union, Geophysical Research Abstract, Vol. 9, 06822, 2007, oral.
55. Ferhat, G., **J. Van der Woerd**, M. Ferry, F. Masson, M. Meghraoui, J. Hinderer, partners of the “Alps-GPSQuakenet” projectd, Continuous GPS network monitors the Upper Rhine Graben deformation, European Geosciences Union, Geophysical Research Abstract, Vol. 9, 2007, poster.
56. **van der Woerd, J.**, H. Li, P. Tapponnier, Y. Klinger, X. Xu, A.-S. Meriaux, F.J. Ryerson, From Coseismic to Cumulative Offsets: Linking the Earthquakes to the Long Term Slip Rate Along the Kunlun Fault (Tibet), AGU 2006 fall meeting, San Francisco, 11-15 December 2006.
57. Li, H., **J. van der Woerd**, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, Xu Z., Yang J., Paleo-seismic, Cumulative Offsets and Long-term Slip-rate Along the Karakax Fault, Western Segment of the Altyn Tagh Fault, Northwest Tibet, *Eos, Trans. AGU*, 87(47), AGU 2006 fall meeting, San Francisco, 11-15 December 2006.
58. Mériaux, A.-S., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, **J. van der Woerd**, R.C. Finkel, Xu X., Fast morphochronologic slip-rates on the Altyn Tagh fault at $\sim 90^{\circ}\text{E}$: a critical assessment of potential sources of an enduring discrepancy, AGU 2006 fall meeting, San Francisco, 11-15 December 2006.
59. Chevalier, M.L., P. Tapponnier, **J. van der Woerd**, R.C. Finkel, F.J. Ryerson, Li H., Liu Q., Determination, by ^{10}Be Cosmogenic Dating, of Slip-rates on the Karakorum Fault (Tibet) and Paleoclimatic Evolution Since 200 ka, AGU 2006 fall meeting, San Francisco, 11-15 December 2006.
60. Ferhat, G., **J. van der Woerd**, M. Ferry, M. Meghraoui, J. Hinderer, A CGPS Network Along the Rhine Graben in Eastern France: Monitoring Slow Rates of Deformation at the Northwestern Margin of the Alps, AGU 2006 fall meeting, San Francisco, 11-15 December 2006.

61. **van der Woerd, J.**, G. Ferhat, M. Meghraoui, M. Ferry, J. Hinderer, partners of the “Alps-GPSQuakenet” project, The Alpine integrated CGPS network EU Project : the Alsace network at the northwestern margin of the Alps, 7th Eucor-Urgent meeting, Freudenstadt, Allemagne 4-6 Octobre 2006.
62. **van der Woerd, J.**, G. Ferhat, M. Meghraoui, M. Ferry, J. Hinderer, partners of the “Alps-GPSQuakenet” project, The Alpine integrated CGPS network EU Project : the Alsace network at the northwestern margin of the Alps, XIII Assembly of Wegener - Nice - 4-7 September 2006.
63. Cara, M., P.J. Alasset, L. Rivera, **J. Van der Woerd** and J. Fréchet, The Chamonix, 1905, earthquake: focal mechanism determination based on two Göttingen Wiechert records, 30th General Assembly of the ESC, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.
64. **van der Woerd, J.**, Y. Klinger, K. Sieh, P. Tapponnier, F. J. Ryerson¹, A.-S. Mériaux, Long-term slip rate of the southern San Andreas Fault, from ¹⁰Be-²⁶Al surface exposure dating of an offset alluvial fan, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 07786, European Geosciences Union, 2006.
65. **van der Woerd, J.**, G. Ferhat, M. Ferry, M. Meghraoui, J. Hinderer, partners of the “Alps-GPSQuakenet” project (3). The Alpine integrated CGPS network EU Project : the Alsace network at the northwestern margin of the Alps, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 07786, European Geosciences Union 2006.
66. **van der Woerd, J.**, P.J. Alasset, M. Cara, M. Meghraoui, L. Rivera, A.S. Mériaux, The Remua fault in the Aiguilles Rouges massif (France): evidence for an active normal fault NW of the Mont Blanc ? Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 07786, European Geosciences Union, 2006.
67. Toussaint, R., K.J. Maloy, S. Santucci, J. Schmittbuhl, **J. van der Woerd**, Velocity fluctuations of a crack front during slow propagation, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 07786, European Geosciences Union, 2006.
68. Chevalier, M.L, **J. Van Der Woerd**, P. Tapponnier, F.J. Ryerson, R.C. Finkel, Li Haibing, Timing of glaciations in south and west Tibet determined by cosmogenic ¹⁰Be dating, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 07786, European Geosciences Union, 2006.
69. Alasset, P.-J., **J. van der Woerd**, M. Cara, M. Meghraoui, A.-S. Mériaux, An active normal fault NW of the Mont Blanc massif, France: evidence of extensive tectonics near the main thrust zone of the Chamonix valley ?, AGU 2005 fall meeting, San Francisco, 5-9 December 2005.
70. **Van Der Woerd, J.**, F.J. Ryerson, P. Tapponnier, A.-S. Meriaux, Xu Xiwei, B. Meyer, R.C. Finkel, Rates of crustal uplift and shortening along the northern margin of Tibet based on Pleistocene-Holocene cosmogenic dating of folded alluvial fans and terraces, Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop, 29-31 mars 2005.
71. Chevalier, M. L, Tapponnier, P., Ryerson, F. J., Finkel, R., **Van Der Woerd, J.**, Li, Haibing., Liu, Q., Tenfold disparity between decadal InSAR and millennial morphochronologic slip-rates on the Karakorum Fault, Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop, 29-31 mars 2005.
72. Dorbath L., Hahou Y., Delouis B., Dorbath C., **Van Der Woerd, J.**, Badrane S., Frogneux M.,

Haessler H., Jacques E., Menzhi M., Tapponnier P., Étude sismologique sur le séisme d'Al Hoceima : localisation et mécanisme du choc principal et des répliques, contraintes et structures de la zone épiscopale , Workshop Séisme d'Al Hoceima : bilan et perspectives, Al Hoceima, Maroc, 24-26 Février 2005.

73. **Van der Woerd, J.**, P. Tapponnier, E. Jacques, L. Dorbath, Y. Hahou, M. Menzhi, Z. Cakir, S. Badrane, C. Dorbath, H. Haessler, M. Frogneux, Le séisme d'Al Hoceima de Mw 6.4 du 24 Février 2004, Workshop Séisme d'Al Hoceima : bilan et perspectives, Al Hoceima, Maroc, 24-26 Février 2005.
74. **Van der Woerd, J.**, M. Meghraoui, G. Ferhat, and M. Ferry, Seismic hazard potential and strain measurements across the Alps, workshop du projet européen ALPS-GPSQUAKENET, Grenoble 10-11 February 2005.
75. Klinger, Y., Michel R., **Van der Woerd J.**, Xu X., Tapponnier P. Slip-distribution and rupture pattern of the 14 November 2001, Mw 7.8 Kokoxili earthquake (China), AGU 2004 fall meeting, San Francisco, Dec. 2004.
76. Chevalier, M, Ryerson, F J, Tapponnier, P, Finkel, R C, **Van Der Woerd, J**, Li, H, Liu, Q Tenfold Disparity Between Decadal InSAR and Millennial Morphochronologic Slip-Rates on the Karakorum Fault, AGU 2004 fall meeting, San Francisco, Dec. 2004.
77. **Van Der Woerd J.**, Y.Klinger, P. Tapponnier, Xu Xiwei, Chen Wenbin, Li Haibing, Ma Wentao, Coseismic and cumulative slip along the rupture of the 14 November 2001 Mw=7.9 Kokoxili Earthquake (Northern Tibet), The 4th International Symposium on the Tibetan Plateau, Lhasa, China, 4-7 August 2004.
78. Chevalier, M.L., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, R. Finkel, **J. Van der Woerd**, Li Haibing, Liu Qing, Long-term slip-rate of the Karakorum fault from cosmogenic dating (Be10) of glacial moraines, The 4th International Symposium on the Tibetan Plateau, Lhasa, China, 4-7 August 2004.
79. Klinger, Y., R. Michel, C. Lasserre, Xu Xiwei, P. Tapponnier, **J. Van der Woerd**, G. Peltzer, Surface rupture of the Nov. 14th, 2001 Kokoxili earthquake (Mw~7.8) imaged from space, The 4th International Symposium on the Tibetan Plateau, Lhasa, China, 4-7 August 2004.
80. **Van der Woerd, J.**, Y. Klinger, P. Tapponnier, Xu Xiwei, Chen Wenbin, Li Haibing, Ma Wentao, Coseismic and cumulative slip along the rupture of the 14 November 2001 Mw=7.9 Kokoxili earthquake (northern Tibet), IIIrd International Conference on Continental Earthquakes, Beijing, China, 11-14 July 2004.
81. Klinger, Y., R. Michel, C. Lasserre, X. Xu, P. Tapponnier, **J. Van Der Woerd**, G. Peltzer, Surface rupture of the Nov. 14th, 2001 Kokoxili earthquake (Mw~7.8) imaged from space, IIIrd International Conference on Continental Earthquakes, Beijing, China, 11-14 July 2004.
82. Li Haibing, **J. Van der Woerd**, P. Tapponnier, Y. Klinger, Qi Xuexiang, Yang Jingsui, Zhu Yintang, Slip rate on the Kunlun Fault at hongshui gou area, and recurrence time of great events comparable to the 14/11/2001, Mw~7.9 kokoxili earthquake, IIIrd International Conference on Continental Earthquakes, Beijing, China, 11-14 July 2004.
83. **Van der Woerd, J.**, Y. Klinger, Xu X., P. Tapponnier, Li H., Chen W., Ma W., Coseismic and cumulative deformation along the 14 November 2001 Mw=7.9 Kokoxili earthquake (northern

Tibet), European Union of Geosciences, Nice, France, 26-30 Avril 2004.

84. Jacques, E., **J. Van der Woerd**, L. Dorbath, H. Vasquez, L. Rivera, H. Haessler, B. Delouis, M. Frogneux, M. Meghraoui, M. Cara, Preliminary results of the 22 February 2003 Rambervillers (Vosges, France) earthquake sequence, European Union of Geosciences, Nice, France, 26-30 Avril 2004.
85. Chevalier, M.L., Tapponnier, P., Ryerson, R., Finkel, R., **Van Der Woerd, J.**, Liu, Q., Determination of the slip-rate on the Karakorum Fault (Tibet) by dating of radioisotopes (^{10}Be), European Union of Geosciences, Nice, France, 26-30 Avril 2004.
86. Meriaux A.-S., Ryerson F. J., Tapponnier, P., **Van der Woerd, J.**, Finkel, R. C., Xu Xiwei Xu Zhiqin Northeastwards decrease in the late Pleistocene-Holocene slip-rate and propagation of the Altyn Tagh fault (China), *Eos Trans. AGU*, 84(46), Fall Meet. Suppl., Abstract T22C-08, 2003.
87. Jacques E., **J. van der Woerd**, L. Dorbath, H. Vasquez, H. Haessler, M. Meghraoui, Preliminary results of the 22 February 2003 Rambervillers earthquake sequence, EUCOR-URGENT Symposium, "Assessing Natural Hazards in a Densely Populated Area", Basel, Switzerland, 29, 30 September and 1. October 2003.
88. **Van der Woerd J.**, L. A. Owen, P. Tapponnier, Xu X., F. Kervyn, R. C. Finkel, P. L. Barnard, Characteristics and dynamics of giant ice avalanches triggered by the Mw=7.8 Kokoxili earthquake along the Kunlun Fault (Northern Tibet), EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
89. **Van Der Woerd J.**, Y. Klinger, P. Tapponnier, Xu X., Chen W., Ma W., G. King, Coseismic offsets and style of surface ruptures of the 14 November 2001 Mw=7.8 Kokoxili Earthquake (Northern Tibet), EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
90. Meriaux A-S., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, Xu Xiwei, J. Van Der Woerd, G. King, R. C. Finkel, Li Haibing, M. W. Caffee, Xu Zhiqin, Post-glacial slip-rate on the Aksay segment of the northern Altyn Tagh Fault, derived from cosmogenic radionuclide dating of morphological offset features, EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
91. Xu, X.W.; Chen, W.B.; Ma, W.T.; Van der Woerd, J.; Klinger, Y.; Tapponnier, P.; King, G.; Zhao, R.B.; Li, J. Re-Evaluation of Co-Seismic Strike-Slip and Surface Rupture Length of the 2001 Kunlunshan Earthquake, Northern Tibetan Plateau, China, EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
92. Klinger, Y.; **Van der Woerd, J.**; Tapponnier, P.; Xu, X.W.; King, G.; Chen, W.B.; Ma, W.T.; Peltzer, G.; Bowman, D. Detailed strip map of the Kokoxili earthquake rupture (Mw 7.8, 14/11/01) from space, EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
93. Rivera, L.; **Van der Woerd, J.**; Tocheport, A.; Klinger, Y.; Lasserre, C. The Kokoxili, November 14, 2001, earthquake: history and geometry of the rupture from teleseismic data and field observations, EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
94. Lasserre, C.; Peltzer, G.; **Van der Woerd, J.**; Klinger, Y.; Tapponnier, P. Coseismic deformation from the Mw=7.8 Kokoxili, Tibet earthquake, from ERS InSAR data, EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.

95. King, G.; Bowman, D.; Klinger, D.; **Van der Woerd, J.**; Tapponnier, P.; Xu, X.; Chen, W.; Ma, W. Slip Partitioned Surface Breaks for the 14 November 2001, Mw 7.8 Kokoxili Earthquake, EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
96. Li, H.; Qi, X.; Zhu, Y.; Yang, J.; Klinger, Y.; Tapponnier, P.; **Van der Woerd, J.** Coseismic ruptures of the 14/11/2001, Mw=7.8 Kokoxili earthquake near Hongshui Gou, EGS-AGU-EUG Joint meeting, Nice, April 2003.
97. **Van der Woerd J.**, Y. Klinger, A.-S. Mériaux, F.J. Ryerson, Y. Gaudemer and P. Tapponnier, The 14 November 2001, Mw=7.8 Kokoxili earthquake in northern Tibet (Qinghai Province, China), XXVIIth European Geophysical Society, Nice, April 2002.
98. Klinger, Y., **J. Van der Woerd**, K. Sieh, P. Tapponnier, and F.J. Ryerson, First long-term slip-rate along the San Andreas fault based on ^{10}Be - ^{26}Al surface exposure dating : the Bisikra palms site, 23 mm/yr for the last 30 000 years, XXVIIth European Geophysical Society, Nice, April 2002.
99. Hubert-Ferrari A., J. Suppe, **J. Van der Woerd** and Xin Wang, Active thrusting and earthquake recurrence near Aksu, southern Tian Shan, XXVIIth European Geophysical Society, Nice, April 2002.
100. Meghraoui, M., F. Gomez, R. Sbeinati, **J. Van der Woerd**, M. Mouty, A. Darkal, R. Darawcheh, Y. Radwan, R. Al-Ghazzi, M. Barazangi, Late Holocene Paleoseismic timing and slip-rate along the Missyaf segment of the Dead Sea Fault in Syria, XXVIIth European Geophysical Society, Nice, April 2002.
101. **Van der Woerd J.**, Y. Klinger, K. Sieh, P. Tapponnier, and F.J. Ryerson, First long-term slip-rate along the San Andreas fault based on ^{10}Be - ^{26}Al surface exposure dating : the Biskra palms site, 23 mm/yr for the last 30 000 years, *Eos Trans, AGU 82 (47)*, Fall Meet. Suppl., 2001.
102. Meghraoui, M., F. Gomez, R. Sbeinati, **J. Van der Woerd**, M. Mouty, F. Hijazi, A. Darkal, R. Darawcheh, Y. Radwan, H. Al-Najjar, I. Layous, R. Al-Ghazzi, M. Barazangi, Late Holocene Paleoseismic timing and slip-rate along the Missyaf segment of the Dead Sea Fault in Syria, *Eos Trans, AGU 82 (47)*, Fall Meet. Suppl., 2001.
103. **Van der Woerd J.** and Paleoseismology Working Group, Slip-rate and earthquake recurrence time on the Hebgen Lake Fault (Montana, USA): constraints from surface exposure dating of alluvial terraces and bedrock fault scarp, EUG XI, April 2001.
104. **Van der Woerd J.**, L. Benedetti, M.W. Caffee, R. Finkel and the Hebgen Lake Paleoseismology Working Group, Slip-rate and earthquake recurrence time on the Hebgen Lake Fault (Montana): constraints from surface exposure dating of alluvial terraces and bedrock fault scarp, *AGU Fall meeting*, 2000.
105. F.J. Ryerson, **J. Van der Woerd**, P. Tapponnier, B. Meyer, Xu Xiwei, Guo Shunmin, Tu Dalou, Zeng Qiusheng, Xiang Hongfa, Xu Zhiqin, Formation of topographic barriers and filling of sedimentary basins, a mechanism for the growth of the Tibetan plateau. Examples of Northeastern Tibet : the Tanghenan Shan and Qinghainan Shan, *AGU Fall meeting*, 2000.
106. F.J. Ryerson, **J. Van der Woerd**, P. Tapponnier, Zhao Guoguang, Xu Zhiqin, A.-S. Mériaux, B. Meyer, Y. Gaudemer, R.C. Finkel, M.W. Caffee, Uniform Post-Glacial slip-rate along the

central 600 Km of the Kunlun Fault (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology, *International Symposium on Geoscience of the Northern Qinghai-Tibet Plateau*, Beijing, 5-8/10/2000.

107. **J. Van der Woerd**, P. Tapponnier, B. Meyer, Guo Shunmin, Xu Zhiqin, Tu Dalou, Zeng Qiusheng, Xiang Hongfa, Formation of topographic barriers and filling of sedimentary basins, a mechanism for the growth of the Tibetan plateau. Example of Northeastern Tibet : interaction between the Qinghainan Shan, the Kokonor and Gonghe Basins and the Huang He, *International Symposium on Geoscience of the Northern Qinghai-Tibet Plateau*, Beijing, 5-8/10/2000.
108. Xu Xiwei, **J. Van der Woerd**, Li Haibing, P. Tapponnier, Xu Zhiqin, B. Meyer, F.J. Ryerson, A.-S. Mériaux, R.C. Finkel, M.W. Caffee, The Altyn Tagh Fault–Tanghenan Shan Thrust Triple Junction : Kinematic Constraints and Implications for the Growth of the Tibetan Plateau, *International Symposium on Geoscience of the Northern Qinghai-Tibet Plateau*, Beijing, 5-8/10/2000.
109. Mériaux, A.-S., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, Xu Xiwei, Wang Feng, **J. Van der Woerd**, Large-scale strain patterns, great earthquakes and late Pleistocene slip-rate along the Altyn Tagh Fault (China), 15th Himalayan-Karakorum-Tibet Workshop, 2000.
110. Mériaux, A.-S., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, **J. Van der Woerd**, R.C. Finkel, M.W. Caffee, Xu Zhiqin, Tectonique et volcanisme actifs au Nord Tibet, Réunion des Sciences de la Terre, 2000.
111. Ryerson, F J.G. Peltzer, P. Tapponnier, A. Mériaux, **J. Van der Woerd**, R. C. Finkel, M. Caffee, Active Slip-Rates on the Altyn Tagh Fault - Karakax Valley Segment: Constraints from Surface Exposure Dating, *AGU Fall meeting*, 1999.
112. **Van Der Woerd J.**, P. Tapponnier, B. Meyer, Xu Xiwei, F.J. Ryerson, A. Mériaux, R. Finkel, M. Caffee, The Altyn Tagh Fault-Tanghenan Shan Thrust Triple Junction : Kinematic Constraints and Implications for the Growth of the Tibetan Plateau, *EUG 10*, Abstract suppl. N°1, Terra nova 10, 1999.
113. **Van Der Woerd J.**, F.J. Ryerson, P. Tapponnier, A.S. Mériaux, B. Meyer, Y. Gaudemer, R.C. Finkel, M.W. Caffee, Zhao Guoguang, Xu Zhiqin, Consistent slip-rates of ~12mm/yr over 600 km of the Kunlun Fault (Qinghai, China) determined by cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al , and ^{14}C dating methods, 14th Himalayan-Karakoram-Tibet Workshop, Kloster Ettal, Germany, 1999.
114. **Van der Woerd J.**, P. Tapponnier, B. Meyer, Xu Xiwei, F.J. Ryerson, A.S. Mériaux, The Altyn Tagh Fault-Tanghenan Shan triple junction: kinematic constraints and implications for the growth of the Tibetan Plateau, 14th Himalayan-Karakoram-Tibet Workshop, Kloster Ettal, Germany, 1999.
115. **Van Der Woerd J.**, F.J. Ryerson and P. Tapponnier, Consistent slip-rates of ~12 mm/yr over 600 km of the Kunlun fault (Qinghai, China) determined by cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al , and ^{14}C dating methods, *AGU Fall meeting*, 1998.
116. **Van Der Woerd J.**, F.J. Ryerson and P. Tapponnier, Consistent slip-rates of ~12 mm/yr over 600 km of the Kunlun fault (Qinghai, China) determined by cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al , and ^{14}C dating methods, *AGU Fall meeting*, 1998.

117. **Van Der Woerd J.**, Xu Xiwei, B. Meyer, P. Tapponnier, A. Meriaux, F.J. Ryerson, R. Finkel, M. Caffee, Alluvial surface dating along the eastern segment of the Altyn-Tagh fault and along the northern folded piedmont of Tanghenan Shan constrains the kinematic of a major splay of the Altyn Tagh fault (Gansu, China), EOS, Transactions, AGU vol. 78, n18, 1997.
118. Ryerson, F.J., **J. Van Der Woerd**, P. Tapponnier, Y. Gaudemer, R. Finkel, M. Caffee, Zhao Guoguang and He Qunlu, Holocene left-slip rate along the Kunlun Fault (Qinghai, China) determined by cosmogenic surface dating, International Conference and Sino-American Symposium on Tectonics of East Asia, Chungli, Taiwan, 1997.
119. Finkel, R.C., F.J. Ryerson, M. Caffee, P. Tapponnier, **J. Van Der Woerd**, and A. Meriaux, Dating deformation : Application of cosmogenic exposure dating to active tectonics, GSA Abstracts with Program, A-170, 1997.
120. **Van Der Woerd J.**, B. Meyer, P. Tapponnier, F.J. Ryerson and Xu Xiwei, High altitude active thrusting in North-East Tibet, EUG 9, Abstract suppl. N°1, Terra nova 9, 1997.
121. Tapponnier P., B. Meyer, Y. Gaudemer et **J. Van Der Woerd**, Strike-slip driven growth of the Tibet Plateau and other SE Asian reliefs, Symposium on uplift and deep structure of northern Tibet, Montpellier, September 1995, *abstract*.
122. **Van Der Woerd J.**, P. Tapponnier, Y. Gaudemer, Zhao Guoguang, He Qunlu, F.J. Ryerson, M. Kashgarian, R. Finkel and M. Caffee, Strain-styles, large-scale morphology and post-glacial slip-rates along the active Kunlun (Kusai Hu-Maqu) Fault (Qinghai, China), Symposium on uplift and deep structure of northern Tibet, Montpellier, September 1995, *abstract*.
123. Gaudemer Y., P. Tapponnier, **J. Van Der Woerd** and B. Meyer, Block rotations, fault bending and mountain building, EUG 8, Abstract suppl. N° 1, Terra nova 7, 1995.

c) Séminaires

1. « Les ruptures de surface sismiques : une fenêtre sur le fonctionnement des failles », intervention 1^{ère} année étudiants de l'Ecole de Physique du Globe, EOST, Strasbourg, 2 oct. 2013.
2. « ¹⁰Be cosmogenic nuclide denudation rate : preliminary results from the Strengbach catchment (Vosges, France) », module de l'Ecole Doctorale Sciences de la Terre, Environnement et Univers, 5 avril 2012.
3. « *Quelle est la vitesse d'une faille ?* », intervention 1^{ère} année étudiants de l'Ecole de Physique du Globe, EOST, Strasbourg, 26 sept. 2011.
4. « *Co-seismic and cumulative slip along the Kokoxili Mw = 7.9 earthquake rupture (Kunlun Fault, northeastern Tibet)* », Sino-French Symposium on the Dynamics of the Tibetan Plateau, CAGS, Beijing, China, 14 sept. 2010.
5. « *Le séisme du 12 janvier 2010 de Mw 7.0 à Haiti : contexte sismologique et géologique* », Institut de Physique du Globe de Strasbourg, 22 janvier 2010.

6. « *The 12 May 2008 Wenquan Mw 8.0 earthquake and Tibet tectonics* », séminaire invité à UC Santa Cruz, USA, 17 mars 2009.
7. « *Croissance de barrières topographiques et remplissage de bassins sédimentaires : formation de plateaux continentaux et le rôle des grandes rivières* », Journées de l'Ecole Doctorale, Strasbourg, 22-23 janvier 2007.
8. « *Tremblements de terre et tsunamis, Le séisme d'Aceh (Sumatra) du 26 décembre 2004* », conférence invitée à l'Université Populaire de Belfort, 14 Mars 2006.
9. « *Coseismic and cumulative slip and deformation along the rupture of the 14 November 2001 Mw=7.9 Kokoxili earthquake (Northern Tibet)* », séminaire invité à l'Institut de Géologie, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, Chine, 28 Octobre 2005.
10. « *Le séisme de magnitude 9-9.3 d'Aceh (Sumatra) du 26 décembre 2004 et le tsunami de l'océan Indien* », conférence publique, invité par l'association de l'EPSAN (Brumath), 12 Mai 2005.
11. « *Le séisme d'Aceh (Sumatra) du 26 décembre 2004 de magnitude 9-9.3 et le tsunami de l'océan Indien* », conférence dans le cadre de la formation des professeurs du secondaire, 9 Mars 2005.
12. « *Est-ce que la vitesse d'une faille varie dans le temps ? L'exemple des décrochements continentaux d'Asie* », séminaire invité au CRPG, Nancy, 27 Janvier 2005.
13. « *Le séisme d'Aceh (Sumatra) du 26 décembre 2004 de magnitude 9-9.3 et le tsunami de l'océan Indien* », conférence invité au Lycée Strasbourg, 20 Janvier 2005.
14. « *La crise sismique de Rambervilliers (St Dié, 22/02/2003 – 03/2004) et le séisme de Roulans (Besançon, 23/02/2004)* », journées techniques du RAP, CNRS (Carry-le-Rouet, 2-4 juin 2004).
15. « *Coseismic and cumulative slip and deformation along the rupture of the 14 November 2001 Mw=7.9 Kokoxili earthquake (Northern Tibet)* », séminaire invité au Seismology Laboratory, California Institute of Technology, 7 mai 2004.
16. « *Long-term slip-rate and recurrence time of earthquakes* », séminaire au Laboratoire de Tectonique, Institut de Physique du Globe de Paris, workshop rencontres Franco-Chinoise, China Seismological Bureau-Laboratoire de Tectonique, 7 janvier 2004.
17. « *Long-term slip-rates, recurrence time of large earthquakes along active faults : new dating methods* », séminaire invite au China Seismological Bureau, Xining, China, 29 Novembre 2003.
18. « *Une conférence sur les séismes en Alsace* », conférence donné dans le cadre d'Exposcience 2003 à Sélestat organisé par la Boutique des Sciences, 23 mai 2003.
19. « *Le contexte tectonique du séisme de St Dié* », conférence donnée dans le cadre des journées du Plan académique de formation en Sismologie pour les enseignants du Secondaire à l'EOST, Strasbourg, 30 avril 2003.

20. “Grandes failles et grands tremblements de terre au Tibet”, Séminaire invité au Laboratoire Magmas et volcans, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, France, 15 Avril 2003.
21. « Failles et tremblements de terre : ruptures de surface et implications sur l'aléa sismique », conférence donné au colloque Construction du paysage et catastrophes naturelle, organisé par l'Institut de Recherches Interdisciplinaires sur les Sciences et Technologies à Strasbourg, 28 mars 2003.
22. “Croissance du plateau du Tibet : Contraintes chronologiques par les isotopes cosmogéniques ^{10}Be et ^{26}Al ”, Séminaire invité au Centre de Géochimie de la Surface (UMR 7517, Strasbourg), 17 avril 2002.
23. “Northeastward growth of the Tibetan Plateau. Kinematic constraints on strike-slip faults and thrusts from surface exposure dating ($^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$) of offset geomorphic features.” séminaire invité au Seismology Laboratory, California Institute of Technology, 30 mars 2001.
24. “Datations de surfaces alluviales par les éléments cosmogéniques pour la détermination des vitesses de déformation tectonique, exemple du Tanghe Nan Shan (Nord-Tibet)”, séminaire invité à l'UMR7516, Strasbourg, 7 Mars 2000.
25. “Datations de surfaces alluviales par les éléments cosmogéniques pour la détermination des vitesses de déformation tectonique, exemple du Tanghe Nan Shan (Nord-Tibet)”, séminaire IPGP, février 2000.
26. “Active strike-slip faulting and thrusting at the northern margin of Tibet : growth of a plateau”, séminaire invité au Seismological Laboratory, University of Berkeley, California, 19 Avril 1999.
27. « The Subei triple junction : kinematic constraints from cosmogenic $\text{Be}^{10}\text{-Al}^{26}$ dating », séminaire invité à University of California Los Angeles, Mars 1999.
28. « Vitesses de mouvement long-terme le long des failles décrochantes, contraintes par les isotopes cosmogéniques », séminaire invité Université de Montpellier II, 1998.

3 Encadrement

a) Post-docs

Coopération avec François Kervyn au cours de son stage post-doctoral dans l'équipe de Tectonique Active sur l'utilisation conjointe d'images optiques et de données topographiques pour l'évaluation de volumes d'avalanches. Application aux avalanches catastrophiques du séisme de Kokoxili de Mw 7.9 le long de la faille du Kunlun en 2001, publié dans Geological Society of America Bulletin (Van der Woerd et al., 2004).

b) Étudiants en thèse

2003-2006

Co-direction de la thèse de Marie-Luce Chevalier (Directeur : P. Tapponnier, IPG Paris), « Détermination, par datations cosmogéniques, des variations de la vitesse de glissement sur la faille du Karakorum (Tibet) et reconstruction paléoclimatique depuis 200 ka », soutenue le 12 juillet

2006. Les résultats obtenus par la datation de moraines décalées le long d'un segment de faille ont fait l'objet d'une publication à Science (Chevalier et al., 2005a ; 2005b).

2004-2006

Dans le cadre de la thèse d'Audrey Tocheport (Directeur : Luis Rivera) nous avons collaboré sur l'analyse du séisme de Mw7.9 de Kokoxili du 14 Novembre 2001 (faille du Kunlun), en particulier sur la compréhension de l'initiation de la rupture sur une zone de relais complexe. Ces travaux ont été publiés dans le Bulletin of the Seismological Society of America (Tocheport et al., 2006).

2005-2006

Co-direction dans le cadre d'un projet sur la marge nord du Tibet, la thèse d'Anatole Lorne (Directeur : P. Tapponnier), devait combiner des méthodes géochronologiques diverses afin de contraindre la formation de l'une des plus grandes chaînes à la bordure nord-ouest du Tibet. Malheureusement l'étudiant a abandonné sa thèse.

2007-2010

Co-direction de la thèse d'Elise Kali sur le sujet : « De la déformation long-terme à court-terme sur les failles normales du Sud - Tibet : approche géochronologique multi-méthodes (Be10, Al26, U-Th/He, Ar/Ar, U/Pb) ». Co-direction : P.H. Leloup (U. de Lyon), N. Arnaud (Géosciences Montpellier).

2007-2010

Co-direction de la thèse d'Aude Perrineau sur le sujet : « Evolution morphologique et tectonique récente des marges NE et SE du plateau tibétain: lien avec la dynamique des grands fleuves, ». Co-direction : Y. Gaudemer (Directeur, IPGP), P.H. Leloup (U. de Lyon).

2007-abandon 2012

Co-encadrement de la thèse de Thomas Coudroy sur le sujet : « Quantification du raccourcissement le long de la chaîne du Kunlun Occidental ». Direction : P. Tapponnier (Directeur), M. Simoes, L. Barrier (IPGP).

2010-2012

Encadrement de la partie isotope cosmogénique de la thèse de Laureen Drab (ENS, U. de Liège, Dir : A. Ferrari).

2013-2015

Co-encadrement de la thèse d'Akatrul Ahsan sur le sujet : « Failles actives et grands séismes au Bangladesh (plateau de Shillong, chaîne Indo-Birmane) ». Direction : C. Dorbath. Encadrement : P. Tapponnier (EOS), K. Alam (GSB).

2013-2015

Co-encadrement de la thèse de Shao Yanxiu sur le sujet : « Contraintes cinématiques sur le relais compressif des Qilian Shan entre les décrochements de l'Altyn Tagh et de Haiyuan au nord Tibet ». Direction : Liu Jing (Chinese Earthquake Administration, Beijing).

c) Étudiants en DEA ou second cycle

2003-2004

Audrey Morgenthaler, stage (DEUG – L2) avec production d'un rapport : “Détermination de la vitesse moyenne de la faille de la Karakax (Xinjiang, Chine) à partir de décalages de la géomorphologie datés par les isotopes cosmogéniques ^{10}Be et ^{26}Al ”.

2004-2005

Kristell Ledortz, stage M1 à l'EPG de Strasbourg, avec production d'un rapport : "*Quantification des déformations cosismiques et cumulées le long de la rupture du tremblement de terre de Kokoxili de Mw=7.9 du 14 novembre 2001*".

2005-2006

Caroline Pierre, M2 Sciences de la Terre, Géosciences, Environnement, Risque, co-direction Louis Dorbath, Catherine Dorbath, titre du rapport : "*Études sismologique et tectonique du Maroc*".

Malgven Roudot, M1, 2ème année de l'EPG, co-direction Jean Schmittbuhl, Renaud Toussaint, titre du rapport : "*Caractérisation du spectre de déplacement cosismique pour les séismes majeurs*".

2006-2007

Thomas Coudroy, M2, Master STEP, IPG Paris, co-direction avec Laurie Barrier (IPG Paris), « *La croissance du plateau tibétain vue du bassin du Tarim* ».

Christophe Hansen, M2, Sciences de la Terre, Géosciences, Environnement, Risque, co-direction avec A. Serradj, « *Caractérisation de la morphologie de surfaces alluviales par analyse d'images satellitaires* ».

Haned Abdehramane, M2, Sciences de la Terre, Géosciences, Environnement, Risque, « *La séquence de répliques du séisme de Rambervillers du 22 février 2003* », co-direction L. Dorbath, C. Dorbath, J. Van der Woerd.

2007-2008

Romain Durand et Guillaume Reichart, M1, EPG, « *Etude d'un pli dans la zone de collision Himalaya-Tibet : cas du décollement du Kunlun Occidental* ».

Lilla Collet et Jean-Rémi Dujardin, M1, EPG, « *Paléo-environnements lacustres au Tibet* ».

2008-2009

Julie Baron, M1, EPG, « *L'extension au Sud-Tibet : Etude morphologique et géochronologique des failles normales du rift de Yadong-Gulu* », co-direction J. Van der Woerd et E. Kali.

2009-2010

Sofiane Gharbi, M2, EPG, « *Détermination de la vitesse de mouvement sur le décrochement de l'Altyn Tagh dans le bassin d'Ashikule, théorie et pratique des méthodes de datation par nucléides cosmogéniques* ».

2010-2011

Simon Schalk, M2, ISIE, " *Détermination de taux d'érosion par les isotopes cosmogéniques ^{10}Be et ^{26}Al dans un bassin versant des Vosges*", co-direction J. van der Woerd, et M.C Pierret, F. Chabaux (Lhyges).

2012-2013

Séverine Furst, M1, EPG, Vitesses Géologique et Géodésique du Décrochement de l'Altyn Tagh, Relation avec la Segmentation et le Cycle Sismique, co-direction J. van der Woerd, E. Kali.

Pierre Turquais, M1, EPG, Sismo-tectonique sur le plateau du Shillong, co-direction E. Kali, J. van der Woerd.

Cyndie Pauvert, M1, STUE, Estimation de taux d'érosion via des profils de production cosmonucléides, co-direction J. van der Woerd, E. Kali.

Fanny Diehl, M2 SVT, Détermination de la vitesse de mouvement sénestre sur un segment de la faille de l'Alтын Tagh (Tibet) à partir de données géomorphologiques, direction J. van der Woerd.

d) Formation à la méthode de datation cosmogénique

Lucie Pham (thèse 1999-2002 IPGP-LLNL), apprentissage et formation aux méthodes d'analyses chimiques pour la mesure de la concentration en ^{10}Be de sables de rivières.

Zheng Rongzhang, chercheur associé, invité de la China Earthquake Administration de Beijing. La formation à l'analyse des échantillons pour la mesure du ^{10}Be a eu lieu lors d'un stage à Strasbourg. Cette formation est associée à la mise en place d'un laboratoire d'analyse à Beijing.

Robert Thuizat, ingénieur recherche, IPG Strasbourg, géochronologie ^{10}Be .

Formation d'étudiants en thèse : A. Lorne, A. Perrineau, E. Kali, T. Coudroy, Pan Jiawei, L. Drab.

4 Participation à des jurys de thèse

Marie-Luce Chevalier, 12 Juillet 2006, co-direction.

Audrey Tocheport, 8 Novembre 2006, invité.

R. Vassallo, 29 Novembre 2006, examinateur.

G. Rixhon, 18 Novembre 2010, rapporteur.

D. Melnick (HDR), 10 décembre 2012, examinateur.

Comité de thèse 2008 de K. LeDortz (thèse U. Paris VI, Dir. B. Meyer)

Comité de thèse 2010, 2011 de L. Drab (thèse ENS Paris, Dir. A. Hubert-Ferari).

Comité de thèse 2011 de A. Moulin (thèse U. Aix-Marseille, Cerege, dir. D. Bourlès).

Comité de thèse 2012 de Y. Caniven (thèse Géosciences Montpellier, dir. Dominguez et Soliva)

5 Contrats de recherche obtenus et implications dans des projets

2003

Installation d'un complexe de salles de chimie pour le développement à Strasbourg (UMR 7516- UMR 7517) des méthodes géochronométriques quaternaires : Radionucléides ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{226}Ra et cosmonucléides ^{10}Be - ^{26}Al

Responsables : Jérôme van der Woerd, M.C. Pierret et F. Chabaux

Laboratoires : IPG S UMR 7516 et CGS UMR 7517, Strasbourg.

Appel d'offre : Equipement, Conseil scientifique de l'Université Louis Pasteur (mars 2003)

Budget : 50 000 Euros.

Implication : 100%.

Séisme de Rambervillers du 22 février 2003.

Responsables : J. van der Woerd, E. Jacques et M. Meghraoui

Laboratoire : Equipe Tectonique Active, IPGS UMR 7516, Strasbourg.

Origine : Intervention post-sismique : INSU

Budget : 4000 Euros.

Implication : 40%.

Demande **REALISE** (Conseil Régional d'Alsace), « Les isotopes au service de l'environnement », resp., J. van der Woerd, M.C. Pierret, F. Chabaux, 40 kEuros.

Programme ACI DYETI (INSU-CNRS), « Failles décrochantes et subduction continentale dans l'Ouest du Tibet », resp. R. Lacassin, participation 30 %.

Programme ACI Risques Naturels (INSU-CNRS), « Failles actives en zones à sismicité actuelle modérée en domaine montagneux en France », resp. M. Meghraoui, participation 20 %.

2004

Datation multi-isotopiques des marqueurs géomorphologiques du Quaternaire et mesure des transferts isotopiques : installation d'un complexe de chimie pour les cosmonucléides ^{10}Be et ^{26}Al à Strasbourg (UMR7516-UMR7517).

Responsables : Jérôme van der Woerd

Laboratoires : IPGS UMR 7516, Strasbourg.

Origine : Equipement, INSU 2004.

Budget : 15 000 Euros.

Implication : 100%.

Programme ACI Reliefs de la Terre (INSU-CNRS) « Morphologie du Tibet », resp. Y. Gaudemer, participation 20 %.

2005

Risque sismique et mesures des déformations actives par géodésie spatiale (GPS) dans le fossé Rhénan

Responsable : K. Aoudia (U. de Trieste, Italie)

responsable EOSt Strasbourg : Jérôme van der Woerd.

Laboratoire ; Tectonique Active, UMR7516

Origine : Projet européen Interreg IIIB – ALPS-GPSQUAKENET

Budget EOSt : 375 000 Euros (sur 2 ans, 2005-2006-2007).

Implication : 50%.

ANR CATTEL 2005, 2006-2008, projet LACUNES, « Lacunes sismiques et précurseurs sur les décrochements continentaux », P. Tapponnier, participation 30 %.

ANR CATTEL 2005, 2006-2008, projet MODALSIS, « La faille Nord-Anatolienne : des processus fondamentaux le long de la faille à la quantification de l'aléa sismique d'une grande capitale », resp. J. Schmittbuhl, participation 10 %.

2006

Inversion d'images optiques haute-résolution pour obtenir le champ de déformation dense : développements méthodologiques

Responsable : Delphine Fitzenz. Collaborateurs : J. van der Woerd, J. Schmittbuhl, R. Toussaint, A. Jalobeanu-LSIIT).

Laboratoire : IPGS UMR 7516, Strasbourg

Origine : Appel d'offre PNTS de l'INSU

Budget : 7500 Euros.

Implication : 20%.

Programme PNTS (INSU-CNRS), « Inversion d'images optiques haute-résolution », resp. D. Fitzenz, participation 20%.

ANR CATTEL 2006, 2007-2010, projet PAKSIS, « Séisme du 8 octobre 2005, géomorphologie quantitative, déformation post-sismique, paléosismicité, glissements de terrain induits », resp. F. Jouanne, participation 20%.

2007

Failles actives et grands séismes à l'intérieur du plateau du Tibet : de la déformation instantanée à la déformation cumulée long-terme

Responsable : Jérôme van der Woerd.

Laboratoire : IPGS UMR 7516, Strasbourg

Origine : Projet de recherche Franco-Chinois, Ministère des Affaires Etrangères

Budget EOST : 17 000 Euros (sur 2 ans).

Implication : 50%.

Des bassins versants au bassin sédimentaire : dynamique du relief aux échelles de temps géologiques. Exemple de la chaîne du Kunlun occidental.

Responsable : Jérôme van der Woerd.

Laboratoire : IPGS UMR 7516, Strasbourg

Origine : Appel d'offre INSU Reliefs de la Terre

Budget : 10 000 Euros accordés pour 2007.

Implication : 30%.

ANR JC 2007, 2008-2011, projet Altyn Tagh, « The Altyn Tagh fault slip rate paradox », resp. Ph. Vernant, participation 20 %.

2008

Cinématique récente de l'extension au sud du Tibet, vitesse des failles normales et décrochantes dextres associées.

Responsable : Jérôme van der Woerd

Laboratoire : IPGS UMR 7516, Strasbourg

Origine : Appel d'offre INSU Fluide-Faille-Flux

Budget : 15 000 Euros accordés pour 2008.

Implication : 30%.

Des chaînes de montagnes aux bassins versants : dynamique des flux de matière aux échelles de temps géologiques

Responsable : Martine Simoes

Laboratoire : IPGP

Origine : Appel d'offre INSU Reliefs de la Terre

Budget : 15 000 Euros accordés pour 2008.

Implication : 40%.

2009

Projet non financé ANR Blanc : SICHUAN (Nouvelle approche pluridisciplinaire de la mécanique des fronts chevauchants actifs, application au risque sismique dans la province du Sichuan)

Responsable : R. Cattin. Partenaire 3/4 : Jérôme van der Woerd
Laboratoire : IPGS UMR 7516, Strasbourg
Origine : Appel d'offre ANR non thématique.
Budget part. 3 : 227 200 Euros (sur 4 ans) (total : 886 800 Euros).
Implication : 33%.

Projet non financé ANR JC : INTERSED (Cinématique des chaînes de montagnes, flux de matière et interactions entre tectonique et processus de surface)

Responsable : M. Simoes. Partenaire 2 : Jérôme van der Woerd
Laboratoire : IPGP, IPGS, U. Lyon 1
Origine : Appel d'offre ANR Jeunes chercheuses et jeunes chercheurs.
Budget : 193 000 Euros (sur 4 ans).
Implication : 33%.

2010

Cinématique récente de l'extension au sud du Tibet.

Responsable : Jérôme van der Woerd
Laboratoire : IPGS UMR 7516, Strasbourg
Origine : Appel d'offre INSU Action de suivi
Budget : 3000 Euros pour 2010.
Implication : 30%.

Projet non financé ANR Flash : HEART (Interventions d'urgence géophysique et sismotectonique après le séisme d'Haïti du 12 janvier 2010)

Responsable : B. Mercier de Lépinay
Laboratoire : Géoazur
Origine : Appel d'offre ANR Flash.
Budget : (sur 3 ans) (total : 1 178 657 Euros).
Implication : 30%.

2011-2014

Projet PICS : CINETIBET (Cinématique de l'extension continentale, approche multi-méthode appliquée au plateau du Tibet (Chine))

Responsable : J. van der Woerd
Organisme partenaire : Institute of Tibetan Plateau research, Chinese Academy of Sciences, Beijing.
Budget : 6000 Euros pour 2012, 2013, 2014.

2012-2013

Projet SYSTER : Tectonique active et géomorphologie des événements megathrust dans l'Est de l'Himalaya

Responsable : Jérôme van der Woerd
Laboratoire : IPGS UMR 7516, Strasbourg
Origine : Appel d'offre INSU Action incitative
Budget : 7600 Euros pour 2013.
Implication : 30%.

6 Animation de la recherche, responsabilités collectives

2002-2006 Intervention dans le cours de Master 2-EPG Tectonique Active et paléosismologie
2002-2012 Intervention en Master 2 Sciences de la Terre Tectonique-érosion-climat : couplages et rétroactions (6-8h).
2013-2014 Cours Master 2 – Tectonique-érosion-climat
2005-2011 Membre de la commission Recherche l'École et Observatoire des Sciences de la Terre
2005-2012 Membre de la commission Observatoire de l'École et Observatoire des Sciences de la Terre
2004-2008 Membre du Conseil de l'UMR 7516 (2004-2008)

2004-2006 Membre du comité scientifique du Programme « Reliefs de la Terre » de l'INSU.
2004-2006 Comité de coordination de la collaboration Franco-Chinoise entre le Chinese Earthquake Administration (Beijing) et l'INSU.

2007-2009 Membre du Comité Scientifique Disciplinaire 6 « Sciences pour l'univers et géo-environnement » de l'Agence National de la Recherche (2007-2009) - Programme Blanc, Jeunes Chercheurs et International.

2012- Directeur Adjoint de l'École Doctorale Sciences de la Terre et de l'Environnement (ED413) de l'Université de Strasbourg

Membre de l'American Geophysical Union
Membre de l'European Geosciences Union

7 Coopérations Scientifiques extérieures à l'IPG Strasbourg

F.J. Ryerson, Datations cosmogéniques et tectonique active aux USA et en Chine, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, USA.

P. Tapponnier, Y. Gaudemer, R. Lacassin, Laurie Barrier, Tectonique active et géologie, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France.

Xu Xiwei, Tectonique active, Institute of Geology, China Seismological Administration, Beijing, China.

Liu Jing, Tectonique active et géomorphologie, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.

Li Haibing, Tectonique et géologie, Institute of Geology, Ministry of Land and Resources, Beijing, China.

K. Sieh, Tectonique active de la faille de San Andreas en Californie du Sud, California Technological Institute, Pasadena, California, USA.

D. Schwartz, Paléosismologie (Montana, USA), US Geological Survey, Menlo Park, California, USA.

L. Owen, Géomorphologie glaciaire et paléoclimats en Chine, University of Cincinnati, Ohio, USA.

F. Chabaux, Géochimie environnementale, altération et érosion, Centre de Géochimie de la Surface, Strasbourg, France.

- R. Pik, Thermochronologie en Chine, Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Nancy, France.
- P.H. Leloup, Mécanismes de la déformation continentale, zones de cisaillement ductile, Université Lyon 1, Lyon, France.
- N. Arnaud, Géochronologie, thermochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Géosciences Montpellier, Montpellier, France.
- L. Benedetti, L. Vidal, Paléoclimat Liban, Cerege, Aix-en-Provence, France.

8 Expérience de terrain

1. 14 fév – 10 mars 2014 Géomorphologie et paléosismologie le long de l'escarpement de Shahajibazar, Bangladesh, Collaboration IPGS - EOS Singapour - Geological Survey of Bangladesh.
2. 10 -18 Janv. 2014 Géomorphologie et datations le long de la faille de Banning, faille de San Andreas, Californie, USA. Collaboration IPGS – Université de Newcastle.
3. 2 nov – 18 nov. 2013 Cartographie des failles actives, géomorphologie et coupes structurales sur le front de l'Himalaya en Assam (Inde), Collaboration NEIST Jorhat, Assam, India ; EOS Singapore.
4. 29 août – 22 sept. 2013 Paléosismologie, géomorphologie et datations le long du décrochement de Fuyun, Chine. Collaboration IPGS-IPGP-China Earthquake Administration, Beijing
5. 18 juin-13 juillet 2012 – Paléosismologie, géomorphologie et tectonique le long de la partie centrale de la faille de l'Altyn Tagh. Collaboration IPGS-Géosciences Montpellier, IPGP, CAGS Beijing.
6. 2-4 juin et 23-24 oct 2012 – Intervention post-sismique Italie en Emilie-Romagne, séismes du 20 et 29 mai 2012. Collaboration IPGS-Géosciences Azur-CEREGE-IPGP-CETE.
7. 20-27 Nov. 2011 – Géomorphologie, failles actives et ruptures sismiques au Bangladesh, séisme de Mw8.3 de 1897 et le long de l'arc Birman. Collaboration Geological Survey of Bangladesh, Dhaka ; EOS Singapore.
8. 4-20 Nov. 2011 – Cartographie des failles actives, géomorphologie et coupes structurales sur le front de l'Himalaya en Assam (Inde), région du séisme de Mw8.6 de 1950 et sur le plateau de Shillong, Meghalaya (Inde), région du séisme de Mw8.3 de 1897. Collaboration NEIST Jorhat, Assam, India ; EOS Singapore.
9. 22-29 Oct. 2011 Cartographie géomorphologie glaciaire et chronologie glaciaire au Mont Liban. Collaboration CEREGE, AUB Beyrouth.
10. 4-19 Oct. 2011 Datation géomorphologie Quaternaire, vitesse long-terme et cartographie des déplacements cosismiques le long de la rupture du séisme de M 8 du 11 Août 1931, Faille de Fuyun, Chine. Collaboration IPGS-IPGP-China Earthquake Administration, Beijing.

11. 1^{er}-16 Oct. 2010 Vitesse long-terme et cartographie des déplacements cosismiques le long de la rupture du séisme de M 8 du 11 Août 1931, Faille de Fuyun, Chine. Collaboration IPGS-IPGP-China Earthquake Administration, Beijing.
12. 3-11 Nov. 2009 Caractérisation et chronologie glaciaire au Mont Liban. Collaboration CEREGE, AUB Beyrouth.
13. 1^{er}-21 Nov. 2008 Rupture du séisme de Mw 8.0 de Wenchuan (Sichuan, Chine), coopération IPGS-U. Lyon 1- CAGS.
14. 20-31 Oct. 2008 Déformation active dans le piémont du Kunlun Occidental (Tibet, Chine), coopération IPGP-IPGS-CAGS.
15. 6-28 Oct. 2007 Quantification de l'exhumation et des mouvements récents des failles normales le long du massif de l'Ama Drime, sud Tibet, coopération IPGS-U. Lyon 1- ITPR Beijing.
16. 16 Sept.-5 oct 2007 Raccourcissement le long de la chaîne du Kunlun Occidental (Tibet, Chine), coopération IPGP-IPGS-Institut of Geology, Académie des Sciences Géologiques de Chine, Beijing.
17. 8 –31 Oct. 2006 Stratigraphie des séries Tertiaires plissées du front du Kunlun Occidental (Tibet, Chine) coopération IPGP-IPGS-Institut of Geology, Académie des Sciences Géologiques de Chine, Beijing
18. 16 Sept.-1^{er} Oct. 2006, Paléoreliefs et incision du Yangtse sur la marge orientale du plateau du Tibet (Sichuan, Yunnan), coopération IPGP-IPGS-Institut of Tibetan Plateau Research, Académie des Sciences de Chine, Beijing.
19. 6 Oct.- 30 Oct 2005 Raccourcissement le long de la chaîne du Kunlun Occidental (Tibet, Chine), coopération IPGP-IPGS-Institut of Geology, Académie des Sciences Géologiques de Chine, Beijing.
20. 12 Sept.-5 Oct. 2005 Quantification de l'initiation et des taux d'extension au Sud Tibet par des approches géochronologiques multi-méthodes (Tibet, Chine), coopération IPGP-IPGS-U. Lyon – Institut of Tibetan Plateau Research, Académia Sinica, Beijing.
21. Septembre 2005, missions d'exploration dans les Vosges pour le repérage de sites d'installation de stations GPS permanentes. Projet Interreg IIIB ALPS-GPSQuakenet.
22. 22-28 Février 2005, Excursion suite au Workshop Séisme d'Al Hoceima : bilan et perspectives, Al Hoceima, Maroc.
23. 1er – 27 Oct Géochronologie des soulèvements récents du Nord Tibet et de l'incision du Fleuve Jaune dans le Nord du Tibet (Qinghai, Gansu, Chine), coopération IPGP-IPGS-Institut of Tibetan Plateau Research, Académie des Sciences de Chine, Beijing.
24. 15 Juillet-3 Août Paléosismologie le long du segment central de Xidatan de la faille du Kunlun (Qinghai, Chine) coopération IPGP-IPGS-China Earthquake Administration, Beijing.
25. 20-22 Juin 2004 Géomorphologie de la faille de la Remuaz (Chamonix, Alpes).

26. 3 – 11 Mai 2004 Géomorphologie de la faille de San Andreas sur le segment de Indio (coopération Caltech – IPG Paris – IPG Strasbourg).
27. 25 – 31 Avril 2004 Intervention post-sismique dans la region du tremblement de terre d’Al Hoceima (23 Février 2004, Mw6.4 (Maroc).
28. 1 – 30 Nov. 2003 Géomorphologie de la partie ouest de la rupture sismique du tremblement de terre M 8 de Kokoxili du 14 novembre 2001 (collaboration China Earthquake Administration – IPG Paris – IPG Strasbourg).
29. 2 Sept. – 4 Oct. 2003 Mission d’exploration et de géomorphologie le long de la partie sud-ouest de la faille de l’Altyn Tagh et le long du piémont chevauchant au sud du Tarim (Tibet, Chine) (cooperation Institut de Géologie, Ministère de la Géologie, Beijing – IPG Paris – IPG Strasbourg).
30. 8-19 Juillet 2003 Géologie et cinématique des failles à la jonction triple Faille Nord-Anatolienne et Faille Est-Anatolienne, coopération Université de Neuchâtel (Suisse) et IPG Strasbourg.
31. 22 Fév- Mars 2003 Intervention post-sismique dans les Vosges, tremblement de terre de Rambervillers (22 Février 2003, M15.4).
32. 13 – 15 Nov. 2002 Reconnaissance géologique dans la région d’Arudy (Pyrénées, France) dans le cadre de la thèse de P.J. Alasset.
33. 23 Sept. – 2 Oct. 2002 Paléosismologie de la faille du Levant en Syrie (coopération IPGS- Université technologique Damas).
34. 21 – 22 Juillet 2002 Reconnaissance géologique dans la region de Chamonix, faille de la Remuaz (Alpes, France).
35. 19 Mai – 14 Juin 2002 Géomorphologie et cartographie de la rupture sismique du tremblement de terre de M=8 du 14 novembre 2001 le long de la faille du Kunlun (Tibet). Collaboration IPG Strasbourg et Paris-China Seismological Bureau (Beijing).
36. 1-15 Mai 2001 Paléosismologie de la faille du Levant en Syrie (coopération IPGS- Université technologique Damas).
37. 9-13 Décembre 2000 Paléosismologie de la faille inverse de la Trévaresse dans le cadre de l’étude du séisme de Lambesc (1909). Géomorphologie, choix de sites de mesures. Coopération IPGS-IPGP.
38. 12 Sept. - 2 Oct. 2000 : Tectonique active et géomorphologie du décrochement de l’Altyn Tagh dans sa partie centrale (Qinghai, Chine). Collaboration IPGP, LLNL et China Seismological Bureau (Beijing).
39. 26 Juillet-30 Août 2000 Géologie, géomorphologie et tectonique dans le sud du Tibet (failles de Gyaring Co, du Karakorum). Échantillonnage de cônes alluviaux, terrasses et moraines pour des études de vitesse de faille. Coopération coopération franco-chinoise, CNRS-INSU, France--Ministère de la Géologie-Beijing, Chine.

40. 2000-2001 Géomorphologie et tectonique active de la faille de San Andreas. Choix d'un site de mesures. Échantillonnage pour des datations cosmogéniques (Al^{26} et Be^{10}). Collaboration IPG Paris-Caltech (Pasadena).
41. 1999-2000 : étude paléosismologique de la faille normale de Hebgen Lake (Montana, USA) et de la rupture de 1959 ($M_s = 7.6$). Datations de paléoévénements par les éléments cosmogéniques (Cl^{36} , Be^{10} et Al^{26}). Collaboration LLNL et USGS.
42. 2-5 Novembre 1999 : étude paléosismologique de la faille normale de Hebgen Lake (Montana, USA) et de la rupture de 1959 ($M_s = 7.6$). Datations de paléoévénements par les éléments cosmogéniques (Cl^{36} , Be^{10} et Al^{26}). Collaboration LLNL et USGS.
43. 10 Juin - 30 Juillet 1999 : Tectonique et géomorphologie dans le Basin and Range (Nevada, USA). Etudes des cônes alluviaux avec échantillonnages de sables dans le but de contraindre des vitesses d'érosion par des méthodes de datation cosmogéniques (^{26}Al et ^{10}Be).
44. 13 Juin - 16 Juillet 1998 : Géologie et néotectonique du décrochement de l'Altyn Tagh entre $85^{\circ}E$ et $95^{\circ}E$ (Xinjiang-Gansu, Chine), datations (^{14}C et éléments cosmogéniques) de la morphologie fluviale et glaciaire Pléistocène à Holocène (coopération franco-chinoise, CNRS-INSU -- Bureau d'Etat de la Sismologie, Beijing).
45. 11-19 Avril 1996 : Failles inverses, plis et décrochements actifs au Nord de l'Italie.
46. 15 Mai - 15 Juin 1996 : Failles et plis actifs au Nord-Tibet, datations de la morphologie Holocène (Qinghai, Chine), (coopération CNRS-INSU, France -- Bureau d'Etat de la Sismologie, Beijing, Chine).
47. 23-29 Septembre 1995 : Excursion géologique dans les Alpes occidentales dans le cadre du Symposium on uplift, deformation and deep structure of Northern Tibet (Montpellier).
48. 1-30 Juin 1995 : Géologie et néotectonique de la faille de Haiyuan (Gansu, Chine) (coopération franco-chinoise, CNRS-INSU, France--Bureau d'Etat de la Sismologie, Lanzhou, Chine).
49. 26 Octobre-2 Novembre 1994 : Néotectonique dans les Appennins Centraux et dans le Frioul (Italie).
50. 15 Août-30 Septembre 1994 : Geotraverse Xining-Yushu, mission pluri-disciplinaire de géophysique, géologie, tectonique et paléoclimatologie (Qinghai, Chine) (coopération franco-chinoise, CNRS-INSU, France--Ministère de la Géologie-Beijing, Chine).
51. 1-30 Juillet 1994 : Décrochement du Kunlun et plis actifs au Nord-Tibet (Qinghai, Chine) (coopération franco-chinoise, CNRS-INSU, France--Bureau d'Etat de la Sismologie - Beijing, Chine).

