

La tectonique, source des plus grands cataclysmes telluriques actuels

Les grands cataclysmes ont fait, dans le siècle écoulé, des millions de victimes. Ces phénomènes nous avons, aujourd'hui, la capacité de les voir venir, donc le temps et les moyens d'agir. Seuls, ou presque, en l'état actuel des connaissances, les grands séismes restent imprévisibles. Pourquoi? Ce que nous savons, ce que nous pouvons faire et comment aller plus loin pour se rapprocher de la prédiction à court terme.

par Paul Tapponnier,

Physicien, Laboratoire de tectonique, Institut de physique du globe de Paris

La Terre est une planète dynamique. Sa surface en perpétuel mouvement nous expose à des catastrophes de plus en plus meurtrières en raison de l'accroissement exponentiel de la population. Douze grandes plaques et quelques-unes plus petites ne cessent de glisser les unes contre les autres, à des vitesses variant de 1 à 15 mètres par siècle. C'est sur les frontières de ces plaques que se concentre l'essentiel de la sismicité et du volcanisme mondial. Dans le siècle qui vient de s'écouler, trem-

blements de terre, éruptions de type explosif et tsunamis associés ont fait des millions de victimes.

Parmi toutes ces catastrophes, les séismes tectoniques, dus à la rupture des failles, l'emportent en puissance et en soudaineté. Chacun se souvient de celui du 26 décembre 2004 à Banda Atjeh-: un glissement de 10 à 20 mètres sur l'interface séparant la plaque indienne de l'Asie, de 50-km de profondeur jusqu'au fond marin, relâchant des tensions accumulées depuis des siècles et déclenchant l'un des tsu-

namis les plus dévastateurs de l'histoire. Une rupture se propageant de Sumatra jusqu'au nord des îles Andaman – 1 200-km en près de 9 minutes-! –, et correspondant à une magnitude de 9.3. Sans doute plus de 400-000 victimes, si les disparus pouvaient être comptés. Nul n'avait anticipé ce séisme, ni l'instant de son déclenchement – ceci échappe encore au savoir-faire technique et conceptuel des géophysiciens et géologues –, ni sa taille. Nul n'imaginait, à ce moment, en cet endroit, la possibilité d'un tel cataclysmes.

D'où, pour partie, l'ampleur des destructions.

Nous sommes aujourd'hui capables de «voir venir» la plupart des grandes catastrophes naturelles.

Les volcans actifs de la planète, par exemple, sont tous recensés. Leur comportement éruptif, à peu près déchiffré. Leurs flancs peuvent être truffés d'instruments très sensibles (sismomètres, géodimètres, etc.), et leur plomberie interne ainsi auscultée au jour le jour. Les variations chimiques de leur haleine, analysées presque en temps réel. La montée du magma, qui précède l'éruption, ne se fait en général pas sans signes que l'on puisse interpréter avant qu'il ne soit trop tard (voir article de Claude-Jaupart dans ce numéro).

Dans une atmosphère transparente, constamment scrutée par les satellites, on voit aussi naître à temps les grandes tempêtes tropicales, dont on peut suivre le trajet d'heure en heure, et évaluer l'évolution et l'impact potentiel.

Pour ces phénomènes, nous avons désormais le temps et les moyens d'agir... du moins en principe. Mais, dans l'état actuel des connaissances, les grands séismes restent imprévisibles. Pourquoi? Comment progresser-?

Tout mécanicien des roches sait pourtant que la rupture brutale

d'un échantillon de granite ou de grès dans un essai triaxial, en laboratoire, est précédée de signes précurseurs mesurables. Déformation volumique et fracturation «-audible-» s'accélèrent. On sait mesurer la charge limite d'une roche où d'une surface de faille, à température et pression données. Pour un petit cylindre de granite à grain fin, à température ambiante et sous une pression de confinement de 50-MPa, par exemple, la contrainte axiale limite avant rupture est à peu près dix fois plus grande (≈ 500 MPa). Cette résistance varie peu avec la température et augmente linéairement avec la pression, c'est-à-dire avec la profondeur dans la partie supérieure de la croûte, là où se déclenchent la plupart des séismes. Les fluides prisonniers de la roche, l'eau principalement, diminuent cette résistance: ils jouent un rôle affaiblissant que l'on sait très bien quantifier. Ces lois s'appliquent à presque toutes les roches et, fait avantageux, dépendent peu de leur minéralogie précise.

Comment se peut-il donc que nous ne sachions pas encore transférer ces acquis expérimentaux et théoriques aux conditions naturelles pour «voir venir» les séismes, au moins les plus grands et meurtriers d'entre eux-?

Une première difficulté, parmi d'autres, est qu'à l'inverse d'un volcan, objet clairement visible et circonscrit, une faille active (capable d'engendrer des séismes) est une structure subtile, pour l'essentiel cachée en profondeur. Chacun d'entre nous peut reconnaître un volcan actif. Bien rares sont ceux qui reconnaissent une faille active lorsqu'ils la traversent. Les signes sont ténus: tout au plus quelques irrégularités dans le sol ou le relief. On est donc bien loin de connaître toutes les failles sismogènes de la planète. Et encore moins leur comportement.

Deuxième difficulté, les failles qui produisent les grands séismes sont de très grands objets: plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres de long. Or le séisme se déclenche en un «-point-»: une petite région, dite focale, d'où la rupture se propage ensuite rapidement à tout le plan de faille. Comment identifier cette zone de nucléation avant le déclenchement-? Où mettre des instruments, et en quel nombre-? Beaucoup, partout, sur des centaines de kilomètres de longueur-? Une telle stratégie est hors d'atteinte dans la plupart des régions sismiques du monde.

Une troisième difficulté, fondamentale, est qu'un séisme est une instabilité mécanique. Les processus de préparation

ne se manifestent que par des variations très faibles des grandeurs physiques mesurables, de surcroît en profondeur. Les conséquences en surface de ces variations sont encore plus faibles. Il reste très difficile de mesurer en temps réel des variations de deuxième ordre (accélérations) des déformations et des contraintes tectoniques. C'est l'obstacle principal entre terrain et laboratoire.

Ceci étant, des progrès décisifs, et rapides, sont en cours. Ils résultent de sauts quantitatifs dans les techniques d'observation de la Terre. Science très jeune (≈ 30 ans), la sismo-tectonique (étude des failles actives) se situe au point de rencontre de trois disciplines (géologie, sismologie, et géodésie) et de leurs approches. La géologie permet de remonter le temps et de comprendre comment les failles ont relâché leurs tensions au cours des siècles passés: quels séismes elles ont produits, et avec quelle fréquence (paléosismologie). L'approche géologique permet aussi de déterminer les vitesses long terme (millénaires) des failles, dont dépendent crucialement les temps de retour des séismes, en mesurant l'évolution des reliefs qu'elles créent ou déplacent (géomorphologie). Géodésie spatiale et sismologie, dont la finesse de perception a été

décuplée par les progrès instrumentaux récents, permettent de détecter des variations des mouvements superficiels et profonds inaccessibles il y a seulement dix ans. Certaines autres techniques géophysiques (mesures des variations des champs électrique ou magnétique) ou géochimiques (mesures des variations des taux d'exhalaison de certains gaz) ont aussi leur mot à dire. Illustrons ces progrès par quelques exemples.

La première urgence est de déchiffrer le comportement sismique passé d'une faille reconnue active. Comme pour un volcan, il faut avant tout savoir à quoi s'attendre. Il est vital, par exemple, de savoir que l'histoire des éruptions du Vésuve est faite d'alternances de phases éruptives à conduit ouvert, continues mais d'ampleur modérée, qui durent des décennies ou des siècles, séparées par des périodes de calme complet à conduit fermé, qui peuvent aussi durer des siècles, mais dont la fin est marquée par les éruptions les plus catastrophiques, d'autant plus catastrophiques que le repos a été long (Pompei en 79-ap. J.-C., 1631, entre autres).

Sur les failles aussi, les séismes se reproduisent à intervalles plus ou moins réguliers, et une règle comparable s'applique: plus l'attente est longue, plus la catastrophe est grande.

Comment préciser le temps de retour moyen (récurrence) et les écarts éventuels par rapport à cette moyenne? Au premier ordre, deux paramètres sont essentiels: la vitesse de glissement de la faille, moyennée sur des milliers d'années, et le glissement «instantané» caractérisant le séisme. Il faut aussi connaître le mieux possible la segmentation de la faille par des irrégularités géométriques (coudes, baïonnettes, etc.), irrégularités qui ont tendance à bloquer la rupture, et contrôlent donc la taille des séismes. L'objectif ultime est de déchiffrer le comportement sismique de chaque segment, et son interaction avec celui des segments adjacents, sur une période de temps aussi longue que possible.

Il y a près de quatre ans, le 14 novembre 2001, un tremblement de terre de magnitude $M_w \approx 8$ a brisé le plus long segment de la faille du Kunlun (séisme de Kokoxili, Figure-1), dans le nord du Tibet (il s'agit d'une faille qui fait coulisser le plateau Tibétain vers l'est par rapport aux régions situées plus au nord). La rupture, déchirure spectaculaire en surface – 3-mètres de glissement horizontal en moyenne, avec des maxima locaux de 8 mètres (Figure-1) –, s'est propagée rapidement vers l'Est sur une longueur totale de 450-kilomètres. Elle s'est arrê-

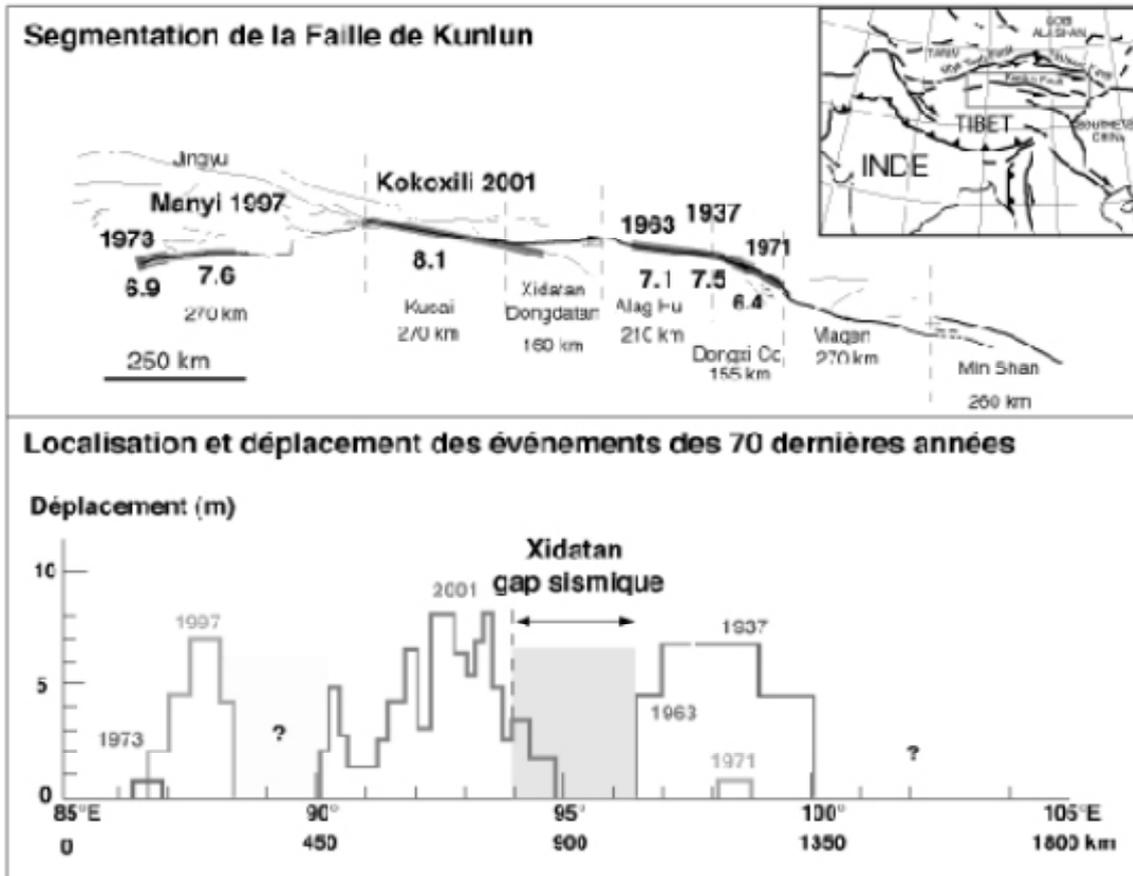


Figure-1-: Segmentation de la faille du Kunlun (nord du Tibet, en haut, à droite) et séquence de séismes depuis 1937. Courbes de glissement horizontal correspondant à chaque séisme. La lacune de Xidatan est, depuis novembre 2001, dans un état critique (D'après Van der Woerd et al., 1998, 2000, 2002a, 2002b-; Xu Xiwei et al., 2002-; Peltzer et al., 1999-; Li Haibing et al., 2005-; Lasserre et al., 2005-; Klinger et al., 2005).

tée à l'ouest d'une série de segments de la faille sur lesquels nous venons de déterminer la vitesse de glissement moyenne à partir de la géomorphologie.

Le principe est simple. On identifie (à l'aide d'images satellitaires de haute résolution ou de photographies aériennes, et sur le terrain) un site où la faille décale clairement des marqueurs morphologiques de surface que l'on peut dater. Le plus souvent, des bords de ter-

rasses fluviales abandonnées, à l'endroit où la faille traverse le cours d'une rivière. Au cours du temps, la rivière creuse son lit dans ses propres alluvions, abandonnant de chaque côté des terrasses de galets. Dès qu'il n'est plus le bord du lit actif de la rivière, un bord de terrasse échappe à l'érosion et devient marqueur passif du mouvement sur la faille. Son décalage croît avec le temps, séisme après séisme (on parle de décalage cumulé). Si l'on

peut mesurer l'âge de ce décalage, on en déduit aussitôt la vitesse de glissement de la faille.

Des bornes de l'âge du décalage sont obtenues en datant l'abandon des surfaces de terrasses au sommet (âge maximum) et au pied (âge minimum) du bord de terrasse. Outre celle, bien connue, du « Carbone-14-» (datation de la mort de plantes ou autres matières organiques enfouies sous la couche supérieure de

galets de chaque terrasse, a l'aide de l'isotope ^{14}C du carbone), une nouvelle technique – âges d'exposition aux rayons cosmiques – est récemment devenue l'outil de choix puisqu'elle permet de dater les surfaces elles-mêmes. On prélève directement des galets de granite ou de quartz: typiquement une dizaine pour obtenir un résultat fiable. Dans ces galets, depuis leur dépôt, les neutrons rapides issus du bombardement de l'atmosphère par les rayons cosmiques ont transformé peu à peu les atomes de silicium et d'oxygène de la silice en atomes de beryllium et aluminium (isotopes 10 et 26, respectivement). L'abondance de ces deux isotopes, déterminée par spectrométrie de masse à l'accélérateur, est une mesure de la durée d'exposition des galets, c'est-à-dire de l'âge de l'abandon des terrasses. Un peu comme si l'on déduisait la durée de vos vacances d'été en bord de mer à la teinte de votre bronzage! Sur la faille du Kunlun, les deux techniques de datation donnent des résultats en parfait accord (Figure-2): 13 marqueurs décalés en une demi-douzaine de sites indépendants impliquent une vitesse de glissement un peu supérieure à 1-cm/an (1-mètre par siècle). Là où l'on connaît le glissement instantané du dernier séisme, on est donc capable d'esti-

mer le temps de retour moyen d'un séisme de taille comparable. Le tremblement de terre de $M \approx 7.5$ qui s'est produit le 7-janvier 1937 sur un segment oriental de la faille, par exemple (Figure-1), n'est susceptible de se reproduire que dans 350-ans environ: avec un glissement de 4,5-mètres, son temps de retour est en effet de l'ordre de 4-siècles (Figure-2). Le temps de retour du séisme de 2001, dont le glissement moyen était de 3-mètres, est d'environ 300-ans. Un temps de retour plus long (de l'ordre de 800-ans) est attendu sur le segment de Xidatan, où le glissement caractéristique des derniers séismes semble

être de l'ordre de 9-mètres (Figures-1 et 2).

En bref, voici un exemple de faille segmentée génératrice de grands séismes dont le fonctionnement commence à être éclairé par l'utilisation systématique de la géomorphologie, combinée à une bonne connaissance de l'histoire sismique récente. Bien sûr, les estimations ci-dessus ne sont que des approximations, par nature floues et imprécises. Il ne faudrait pas imaginer que les failles sont des horloges régulières. Il s'en faut de beaucoup, surtout en raison des interactions mécaniques entre segments de failles voisins et failles voisines. Mais, du moins,

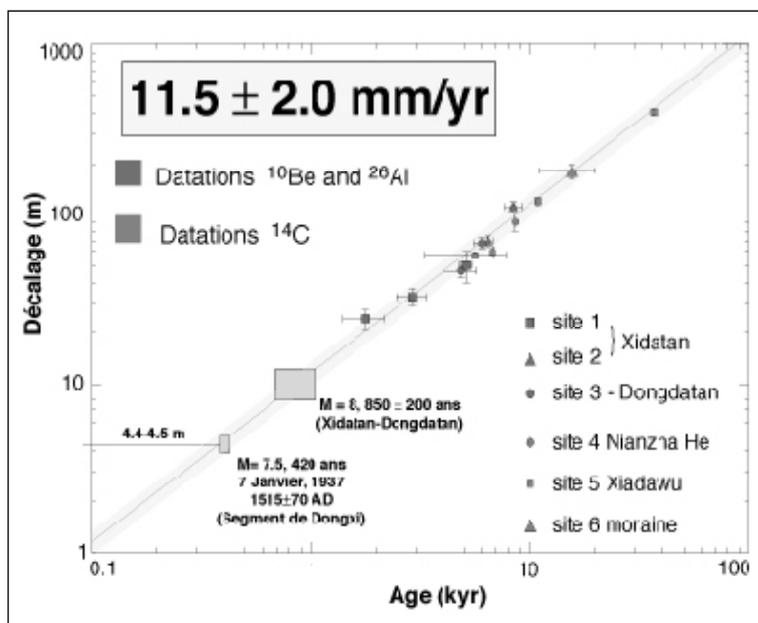


Figure-2: Vitesses de mouvement (sénestre) pendant l'Holocène-Pléistocène supérieur (depuis environ 40 000 ans), obtenues par datations cosmogéniques ^{10}Be , ^{26}Al et ^{14}C de terrasses alluviales en 6 sites le long de la faille du Kunlun. La cohérence des résultats obtenus avec des techniques différentes implique une vitesse uniforme de 11.5 mm/an sur 600-km de longueur (D'après Van der Woerd et al, 1998, 2000, 2002a).

les échelles de temps sont-elles fixées, et les bornes de l'imprévu repoussées. C'est ce type d'étude qui permet d'être certain que, sur la faille de San Andreas en Californie, un séisme comparable à celui de 1906 ne frappera pas la région au nord de San Francisco avant au moins un siècle, alors qu'en Californie du Sud, près de Los Angeles, le *big one* est pour demain, à vingt ans près (!). Pour flou qu'il soit, ce n'est pas un mince résultat.

L'autre technique géologique qui éclaire le fonctionnement passé des failles, la paléosismologie, est née en Californie, il y a 25 ans. Cousine de l'archéologie, elle est basée sur la recherche des traces laissées enfouies dans le sol par les séismes anciens, en relevant et fouillant les parois d'excavations plus ou moins profondes. Elle permet d'abord de préciser les sources de séismes historiques, puis d'explorer, bien au-delà, le monde des tremblements de terre inconnus.

Entre le X^e et le XVIII^e siècles par exemple, le Proche Orient, région pourtant calme depuis l'invention du sismomètre (1892, à Strasbourg), a été dévasté par des tremblements de terre catastrophiques. Au Liban, seules 6 des 54 colonnes (de 20-mètres de haut et 2-mètres de diamètre-!) qui soutenaient à l'origine le monumental tem-

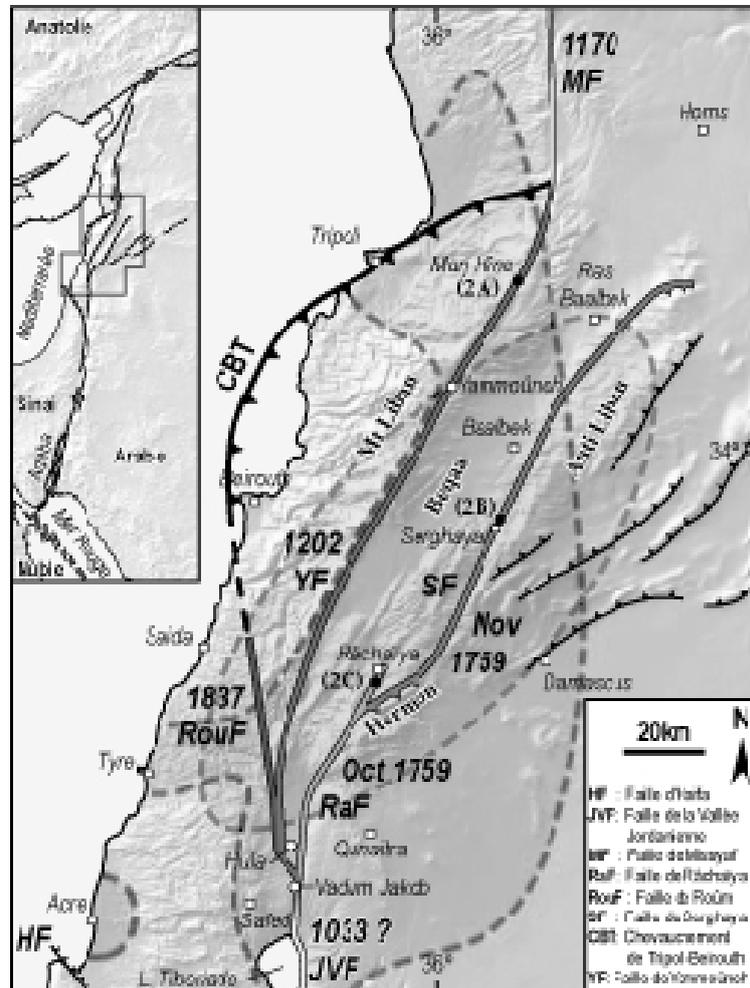


Figure-3-: Carte des principales failles actives du coude «-transpressif-» libanais (encart, position le long de la frontière de plaque Arabie/Afrique, dite zone de faille du Levant). Les lignes colorées indiquent les longueurs maxima des ruptures des plus grands séismes historiques depuis \approx 1000 ans. Les zones colorées encloses dans les courbes tiretées de même couleur correspondent aux régions où les intensités ont dépassé VIII en 1202 et 1759, (D'après Daëron et al., 2005, et références incluses).

ple de Baalbeck se dressent encore intactes. Les 48 autres ont toutes été abattues, par «-paquets-» successifs, par ces séismes. Mais quels séismes, exactement-? Liés au glissement de quelle faille, et quand-? Evidemment, on sait que le Liban, comme la Jordanie au

sud et la Syrie au nord, est traversé par la frontière entre plaques Arabie et Afrique (Figure-3). Mais cette frontière, souvent appelée zone de faille du Levant, s'y divise en au moins trois grandes branches distinctes (Figure-3). Savoir, par exemple, si les séismes

d'octobre-novembre 1759 et de mai 1202 ont fait glisser la même branche de faille n'est pas une question purement académique. Si cela avait été le cas, alors avec un temps de retour approximatif de 550-ans, le prochain séisme sur cette faille ne risquerait de se reproduire que dans 300-ans environ... Largement le temps de s'y préparer. Probablement même le temps de développer des techniques de prédiction sismique à court terme performantes...

Grâce à des tranchées creusées au travers de la faille de Yammouneh, dans l'ancien bassin lacustre du même nom, nous savons aujourd'hui que cela n'a pas été le cas. Les deux catastrophes ont eu pour sources deux failles différentes, de part et d'autre de la plaine de la Bekaa (Figure-3). Sur le mur sud de la tranchée dite du Kazzab (Figure-4), le premier séisme visible sous la surface du sol, donc le dernier à s'être produit, est celui de 1202 (Figure-5). A la précision des datations au ^{14}C , aucune trace des séismes de 1759.

Rappelons rapidement, à l'aide de la figure-4, les principes qui permettent d'aboutir à cette conclusion. La tranchée est creusée dans des sédiments très fins, qui se sont déposés, année après année, au fond du lac aujourd'hui asséché. Ces couches horizontales, de

couleur variable suivant leur teneur en argile ou calcaire, sont remarquablement préservées. Certaines contiennent en abondance de la matière organique fossile, datable au ^{14}C . La série constitue donc une échelle de temps précise et parfaitement lisible. Elle révèle aussi très clairement les décalages tectoniques des dépôts par les jeux successifs de la faille de Yammouneh. A chaque grand séisme, la rupture déchire en effet le fond du lac, ainsi que toutes les couches sous-jacentes déposées auparavant. Après le séisme, les fines couches de sédiment lacustre suivantes couvrent et nappent progressivement cette déchirure, jusqu'à ce qu'elles soient à leur tour coupées et décalées par le prochain séisme. Il suffit donc (simple en théorie, souvent délicat en pratique) de déterminer la terminaison vers le haut des failles qui décalent les paquets de couches. La première couche sus-jacente non décalée, appelée «-horizon d'événement (sismique)-», permet de dater le séisme. En principe..., car même dans des sites exceptionnels et des séries très claires comme celle de Yammouneh, les restes datables ne sont pas toujours au rendez-vous dans ces horizons là, et d'autres avatars peuvent survenir (lacunes de dépôt, etc.). Le résultat reste

donc possiblement entaché d'erreurs (Figure-5). Ceci étant, sur 5-mètres d'épaisseur correspondant à environ 15-000 ans d'histoire sismique, la tranchée de Yammouneh permet de mettre en évidence une succession d'une quinzaine de séismes, avec des temps de retour qui semblent pour l'essentiel compris entre 600 et 1-000 ans (Figure-5). La partie supérieure de la tranchée est la plus claire: 3 grand séismes depuis environ 2-000 ans, le dernier d'entre eux il y a 8 siècles au temps des croisades.

Et le prochain-?... L'ambiguïté est levée: probablement «-demain-»! Nous voici donc en présence d'un problème grave: un grand séisme se prépare sans doute sur la faille de Yammouneh. Il pourrait survenir dans les prochaines décennies plutôt que dans trois siècles. Il est urgent de prendre cette hypothèse au sérieux et de faire face au problème plutôt que d'être victimes de la surprise la plus complète, comme à Sumatra, face à un cataclysme qui sera hélas bien plus destructeur que celui survenu à l'aube du XIII^e siècle. Mieux vaut savoir, transmettre cette connaissance, et avertir, que de faire l'autruche...

On le voit, avec des techniques géologiques maintenant éprouvées et les résultats qui en découlent, toute étude permettant de mieux cerner

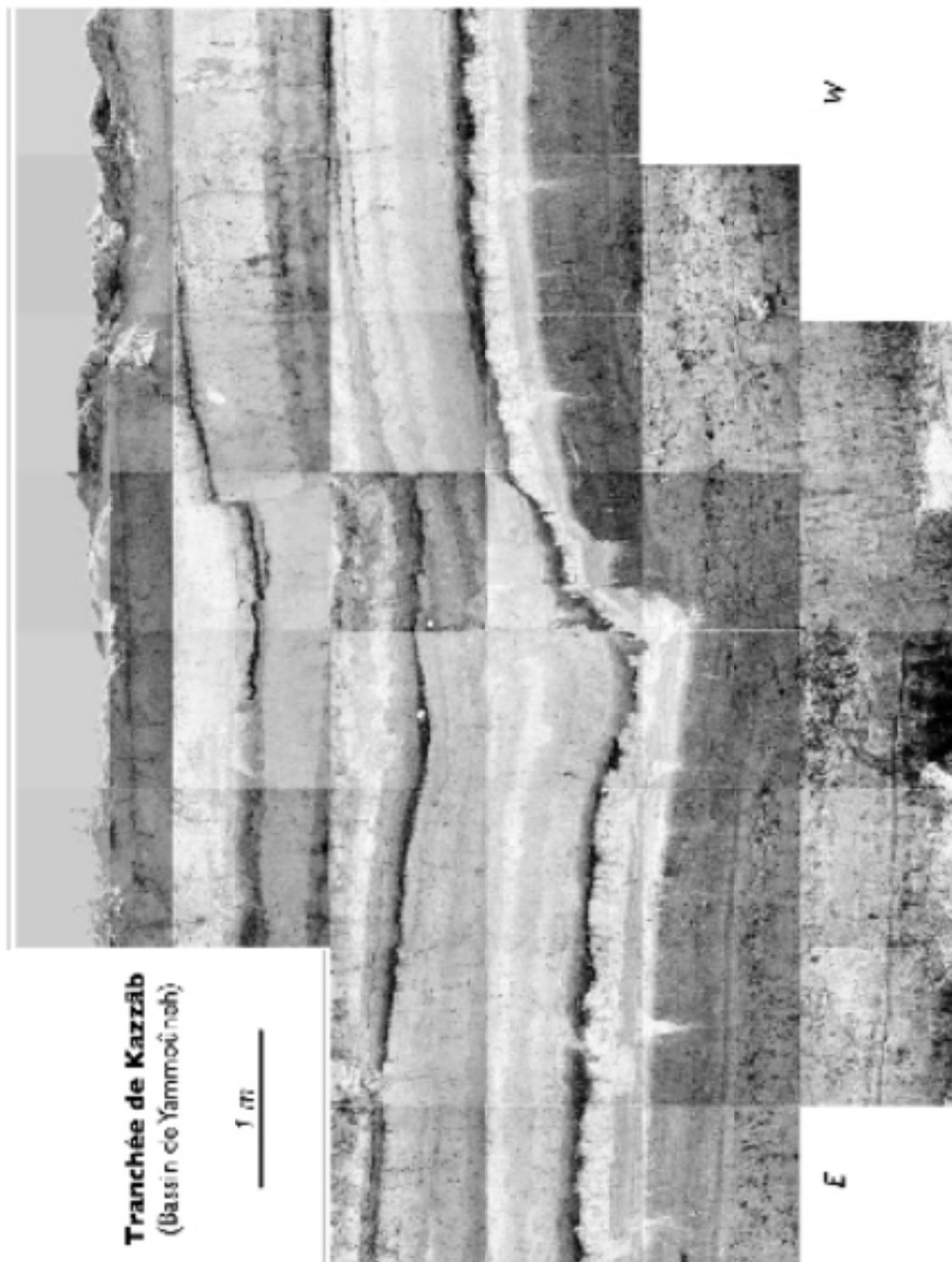


Figure-4-: Mosaïque d'images numériques du mur vertical sud de la tranchée du Kazzab (carroyage métrique). Les ruptures sismiques liées au fonctionnement de la faille de Yammoûneh décalent les couches de sédiments lacustres, initialement horizontales, dans une zone étroite (≈2-m de large) au centre de la mosaïque (D'après Daëron, 2005).

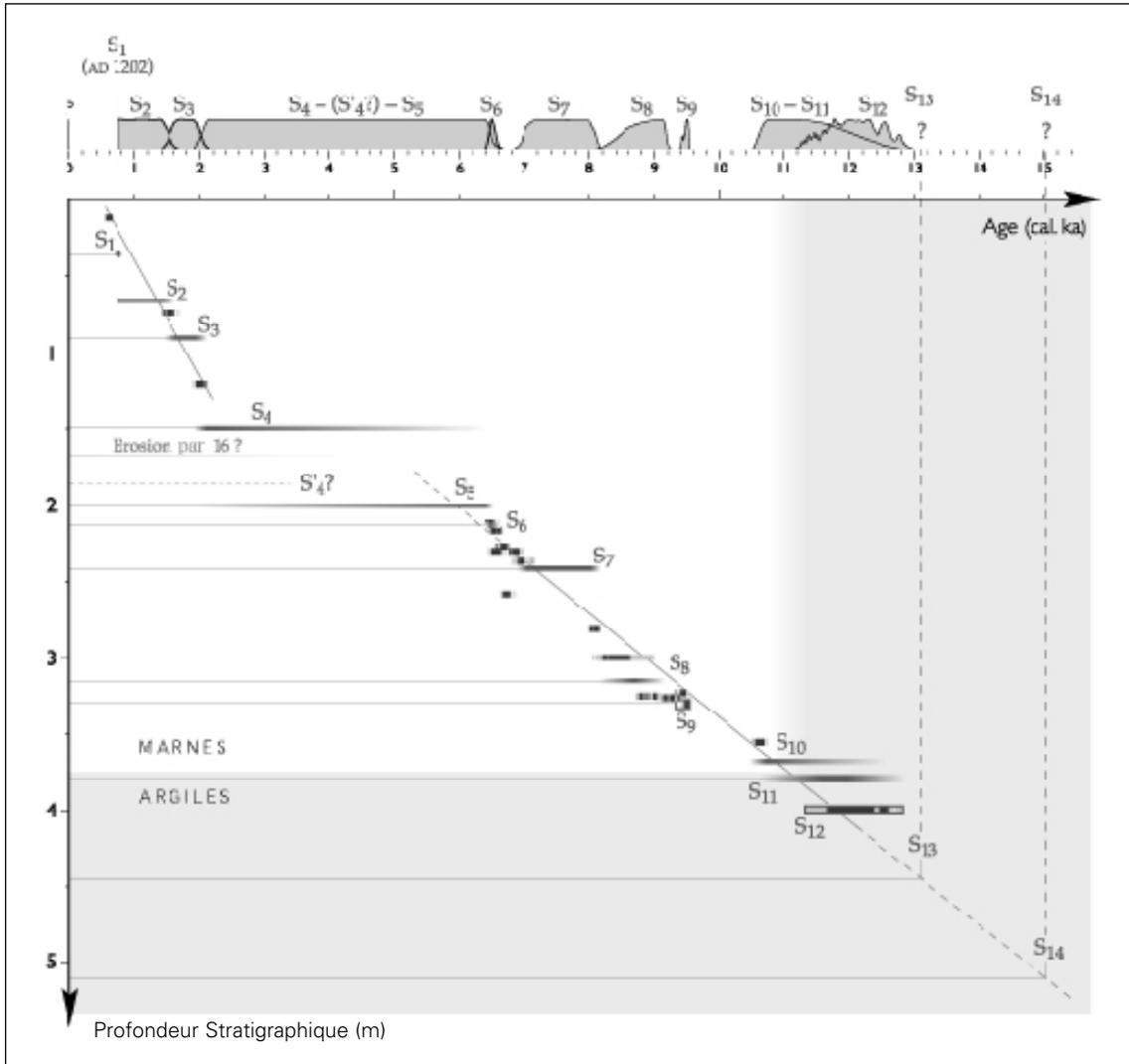


Figure-5-: Bornes, dérivées de la datation au ^{14}C (symboles noirs), sur les âges des tremblements de terre (événements sismiques S1 à 14, symboles gris) identifiés dans la tranchée du Kazzab. Noter que seuls S6 et S9 sont datés à 50 ans près, et que l'enregistrement sédimentaire est perturbé entre S3 et S6 (érosion, lacune de sédimentation-?...), (D'après Daëron, 2005).

la probabilité d'occurrence et la taille des catastrophes sismiques à venir sur les grandes failles de la planète revêt un caractère d'urgence. Force est de constater que seul un petit nombre de ces failles ont été la cible de telles études. Le plus souvent, il faut malheureusement d'abord un grand

séisme pour que les travaux débutent.

Sur la faille Nord Anatolienne en Turquie, qui fait partie des quelques failles les mieux connues, les séismes d'Izmit et Duzce en 1999, pourtant attendus, ont encore surpris par leur taille (plus de 15-000 victimes et un nombre équivalent de disparus pour le premier).

Avec les recherches approfondies entreprises depuis, le prochain séisme, sous la mer de Marmara, devrait beaucoup moins surprendre. Attendu dans les 10 ou 20-ans à venir, ce séisme clôturera la séquence de 9 grands tremblements de terre, initiée en 1939, à l'extrémité orientale de la faille. Répétition, avec varian-

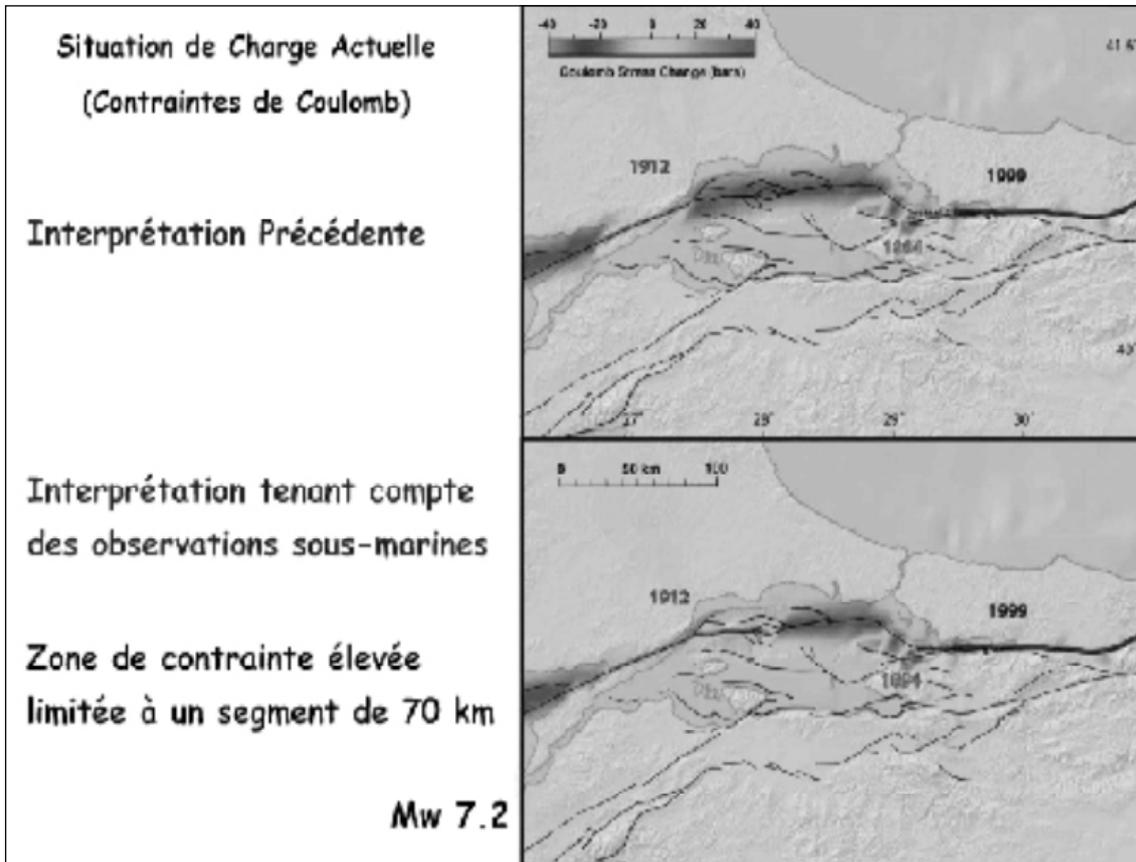


Figure-6-: Comparaison entre les longueurs de rupture anticipées pour le séisme attendu en mer de Marmara avant et après la campagne «-Marmarascarp-». Les zones grisées représentent les régions dans lesquelles la contrainte de Coulomb est élevée (d'après Armijo et al., 2005).

tes, d'une séquence semblable survenue au XVII^e-XVIII^e siècle, qui fit glisser l'intégralité de cette faille.

Grâce à l'application de techniques sous-marines transposées de celles décrites ci-dessus à terre, il semble clair que ce dernier séisme devrait être plus petit que ce que l'on eût pu craindre. En effet, l'observation et la cartographie détaillée, par Rolando Armijo et ses collègues, de la trace de la faille sous-marine (avec le robot submersible Victor de l'Ifremer) indi-

que que la rupture du séisme des « Dardanelles-» de 1912, marquée sur le fond marin par un escarpement parfaitement préservé, d'une «-fraîcheur-» exceptionnelle, s'est propagée 40-km plus à l'est qu'on ne le pensait (Figure-6). La longueur du segment «-lacune-» (qui reste à briser) entre les ruptures de 1999 et 1912 s'en trouve réduite d'autant-: 70-km seulement. Ainsi, par conséquent, que la zone de contraintes élastiques stockées dans la croûte (Figure-6), et la magnitude du

séisme à venir-: Mw \approx 7.2 au lieu de 7.5 ou plus. Plutôt une bonne nouvelle pour les dix millions d'habitants d'Istanbul, et les villes côtières de la mer de Marmara.

Voici ce que nous savons et pouvons faire lorsque moyens, volontés et talents sont conjugués-: mieux cerner les scénarios sismiques du futur, identifier les endroits et les époques de danger maximum, évaluer ce danger et mettre ces endroits en état d'alerte durable.

Comment aller plus loin, et se rapprocher, avec des méthodes géophysiques ou géochimiques, de la prédiction à court terme? Ce problème physique complexe est-il soluble? Où faudra-t-il à jamais se contenter de codes de constructions parasismiques toujours améliorés, dont l'efficacité pour limiter les dommages et sauver les vies n'est plus à démontrer.

On sait que ce qu'il faut mesurer et comprendre pour espérer « prédire » les catastrophes du futur, ce sont les variations du deuxième ordre des mouvements et de la sismicité. Les techniques et les pistes existent.

De concert avec la sismologie qui peut détecter et localiser les moindres frémissements de la Terre à quelques centaines de mètres près, la géodésie spatiale (positionnement global: GPS; radar interférométrique: InSAR) permet aujourd'hui de mesurer en continu des mouvements millimétriques sur de grandes surfaces. Les vitesses « instantanées » de toutes les failles sismogéniques qui comptent sont donc en principe accessibles en temps réel, et peuvent être comparées aux vitesses moyennes millénaires (géomorphologiques). Des variations claires apparaissent. C'est, par exemple, le cas de la faille de Garlock, en Californie, dont la vitesse est d'environ

8-mm/an moyennée sur 10-000 ans, mais sur laquelle InSAR et GPS ne détectent guère de mouvement depuis dix ans. C'est également le cas d'autres grandes failles asiatiques (Failles du Karakorum et de l'Altyn Tagh). Ou de la zone de subduction des Cascades sur laquelle on observe des oscillations de glissement régulières. De telles variations, une fois comprises et modélisées, pourraient renseigner sur le temps qui reste avant le prochain séisme.

On sait désormais bien calculer la nouvelle donne des forces après un ou plusieurs séismes. La modélisation des changements de contraintes dans les régions entourant une faille qui vient de glisser permet d'identifier les failles voisines mises à leur tour en état de glisser. Cette approche rend non seulement compte de la cascade de ruptures qui a brisé d'est en ouest toute la faille Nord Anatolienne depuis 1939, mais elle met en lumière la dernière lacune qui reste en Mer de Marmara (Figure-6). Et celle, devenue particulièrement critique depuis le séisme de 2001, sur la faille du Kunlun: le segment de Xidatan (Figure-1), traversé par la nouvelle voie ferrée Golmud-Lhasa, dont plusieurs ouvrages d'art ne manqueront pas d'être gravement endommagés, voire détruits, par le grand tremblement de terre qui s'y prépare.

Enfin, en inversant fictivement le sens du temps et en sélectionnant avec la logique mécanique appropriée les régions où chercher l'augmentation des forces qui déclenchent le glissement d'une faille, Geoffrey King et ses collègues ont identifié des accélérations claires de la sismicité «-ambiante-» avant quelques grands séismes. Ce n'est encore que de «-l'après coup-», mais on est peut-être au bord d'un autre saut d'interprétation...

Toute avancée dépendra de la mesure en temps réel. Il faut installer sur les segments de failles repérés en état critique, et maintenir pendant des décennies, des réseaux denses d'instruments fonctionnant en continu. C'est une tâche qui doit être entreprise à l'échelle planétaire, au delà du Japon et de la Californie. C'est ce que nous nous efforçons de faire dans les Antilles, en Egée et en Turquie, au Proche Orient, en Chine ou ailleurs. Ce n'est qu'à ce prix qu'on pourra peut-être voir venir un séisme comparable à celui qui dévasta le nord de la Guadeloupe en 1843. Ou d'autres cataclysmes comme ceux qui autrefois ravagèrent notre monde antique. Exemple emblématique: les rivages méditerranéens, de la Sicile à l'Égypte, anéantis en 365 ap. J.-C. par un raz-de-marée dû à un grand tremblement de

terre crétois. Dans une mer si exigeuse que les enjeux y sont d'autant plus formidables. Espérons que notre savoir-faire, qui a si vite progressé en vingt ans, sera ce jour-là au rendez-vous.

Pour en savoir plus, quelques références bibliographiques

Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., Uçarkus, G., Mercier de Lépinay, B., Malavieille, J., Dominguez, S., Gustcher, M.-A., Schmidt, S., Beck, C., Çagatay, N., Çakir, Z., Imren, C., Eris, K., Natalin, B., Özalaybey, S., Tolun, L., Lefèvre, I., Seeber, L., Gasperini, L., Rangin, C., Emre, O., Sarikavak, K., *Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul*, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.-6,-(2005) Q06009, DOI 10.1029/2004GC000896.

Bouchon, M., and M. Vallée, *Observation of Long Supershear Rupture During the Magnitude 8.1 Kunlunshan Earthquake*, *Science* 301 (2003) 824-826.

Daëron, M., Thèse de Doctorat de Géophysique interne, «Rôle, cinématique et comportement sismique à long terme de la faille de Yammounêh, principale branche décrochante du coude transpressif Libanais (faille du Levant)», 178 pp., Institut de physique du globe de Paris, 18 Avril 2005.

Daëron, M., Y. Klinger, P. Tapponnier, A. Elias, E. Jacques, A. Surssock, *Sources of the large A.D. 1202 and 1759 Near East earthquakes*, *Geology*, 33, 7 (2005) 529-532; DOI: 10.1130/G21352.1.

King, G.C.P., R.S. Stein, and Jian Lin, *Static stress changes and the triggering of Earthquakes*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 3, (1994), 935-953.

Klinger, Y., X. Xu, P. Tapponnier, J. Van der Woerd, C. Lasserre, and 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. seism. Soc. Am.*, In press, 2005.

Lasserre, C., G. Peltzer, Y. Klinger, J. Van der Woerd, and P. Tapponnier, *Coseismic deformation of the 2001-Mw=-7.8 Kokoxili earthquake in Tibet, measured by SAR interferometry*, *J. Geophys. Res.*, in press, 2005.

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, and recurrence time of great events comparable to the 14/11/2001 Mw ≈ 7.9 Kokoxili earthquake*, *Earth and Planet. Sc. Lett.*, 237 (2005) 285-299.

Peltzer, G., F. Crampe, and G. King, *Evidence of nonlinear elasticity of the crust from the Mw 7.6 Manyi (Tibet) earthquake*, *Science* 286 (1999) 272-276.

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. Ac. Sc.* 333 (2001) 483-494.

P. Tapponnier, Xu Zhiqin, F. Roger, B. Meyer, N. Arnaud, G. Wittlinger, and Yang J., *Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau*, *Science* 294 (2001) 671-678.

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

Van der Woerd, J., F.J. Ryerson, P. Tapponnier, A.-S. Mériaux, Y. Gaudemer, B. Meyer, R.C. Finkel, M.W. Caffee, Zhao G., Xu Z., *Uniform slip-rate*

along the Kunlun fault: Implications for seismic behaviour and large-scale tectonics, *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000) 2353-2356.

Van der Woerd, J., P. Tapponnier, F.J. Ryerson, A.-S. Mériaux, B. Meyer, Y. Gaudemer, R.C. Finkel, M.W. 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*, *Geophys. J. Int.* 148 (2002a) 356-388.

Van der Woerd, J., A.-S. Mériaux, Y. Klinger, F.J. Ryerson, Y. Gaudemer, and P. Tapponnier, *The 14 November 2001, Mw=7.8 Kokoxili earthquake in northern Tibet (Qinghai province, China)*, *Seismol. Res. Lett.* 73 (2002b) 125-135.

Xu X., Chen W., Ma W., Yu G., Chen G., *Surface ruptures of the Kunlunshan earthquake (Ms8.1), Northern Tibetan Plateau, China*, *Seismol. Res. Lett.* 73 (2002) 884-892.

Yeats, R.S., K. Sieh, C.R. Allen, *The Geology of Earthquakes*, Oxford University Press, New York, 1997, pp. 568.