
APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION À L'ÉTUDE DES FAILLES ACTIVES ET DES RISQUES SISMIQUES AU NORD DU VIÊT-NAM

PHAN TRONG Trinh^{1,2}, MAI Thanh Tan¹, NGO Van Liem¹, HOANG Quang Vinh¹,
NGUYEN Van Huong¹, DINH Van The, CLOSSON Damien³ et OZER André^{2,4}

¹ Institut des sciences géologiques, Académie des sciences et technologie du Viêt-nam, 84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi.
Télécopieur : 8447754797 ; courriel : phantrongt@yahoo.com, pttrinh@ncst.ac.vn

² Académie royale des sciences d'Outre Mer, rue Defacqz, 1 bte 3, 1000 Bruxelles, Belgique.

³ École royale militaire, Signal and Image Center, avenue de la Renaissance, 30, B-1000, Bruxelles, Belgique.
Courriel: dclosson@elec.rma.ac.be

⁴ Laboratoire de géomorphologie et télédétection, Université de Liège, allée du 6 Août, 2, B 4000 Liège, Belgique.
Courriel : aozer@ulg.ac.be

Soumis le 9 mars 2007 ; révisé le 1^{er} mai 2007 ; accepté 26 juillet 2007 - © Revue Télédétection, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 465-481

Résumé

Dans cet article, nous présentons les résultats provenant de travaux effectués dans deux domaines différents au nord du Viêt-nam : il s'agit de l'identification des segments de failles et de la nature des failles actives ainsi que de l'évaluation du risque sismique. Parmi les failles majeures actives au nord du Viêt-nam, celles du fleuve Rouge et de Dien Bien Phu sont les plus dynamiques. La mesure de la longueur des segments des failles actives a été effectuée à partir d'images satellitaires ETM+ de Landsat-7, HRVIR de SPOT-4, RSO de RADARSAT, d'ERS-1 et d'ERS-2 ainsi que de photographies aériennes. Ces failles ont enregistré les déformations et déplacements accumulés au cours de l'Holocène. Leur connaissance est nécessaire pour une détermination crédible de la magnitude d'un tremblement de terre. Pour les reconnaître, nous avons appliqué un filtrage directionnel sur des images HRVIR de SPOT-4 et ETM+ de Landsat-7 combinées avec des modèles numériques d'altitude réalisés à partir des données topographiques des images radar et combinées avec les observations géomorphologiques et géologiques sur le terrain. La localisation la plus probable des futurs séismes a été réalisée en analysant, dans un système d'information géographique (SIG), les résultats précédents avec des données géomorphologiques, des modèles numériques d'altitude et une cartographie du champ des contraintes. L'application d'une série de méthodes nous a permis d'estimer la magnitude maximale d'un tremblement de terre ainsi que l'accélération au sol (Peak ground acceleration).

Mots-clefs : faille active, segment de faille, faille normale, faille décrochante, état de contrainte, risque sismique, magnitude maximale, accélération au sol, tremblement de terre, télédétection, Viêt-nam.

THE CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING TO THE STUDY OF ACTIVE FAULTS AND SEISMIC RISKS IN THE NORTH OF VIÊT-NAM

Abstract

In this paper, we present the results of a study of active fault segments, their characteristics and seismic hazard assessment. The Red river fault and the Dien Bien Phu fault are the most active faults in North Vietnam. We used Landsat-7 ETM+, SPOT-4 HRVIR, ERS-1 RSO, ERS-2 RSO images and aerial photographs to determine active fault lengths, their characteristics and to measure horizontal displacements accumulated during the Holocene. For this purpose, we interpreted the fault geomorphology and used directional filtering over SPOT-4 HRVIR and Landsat-7 ETM+ images combined with a digital elevation models derived from topographic data and the radar images. These parameters were then used to estimate maximum credible earthquake magnitude and peak ground acceleration. We integrated these results with the geomorphologic features, digital terrain models, earthquake epicentres and stress fields within a geographical information system (GIS).

Keywords: Active fault, fault segment, normal fault, strike-slip fault, state of stress, seismic risk, maximum magnitude, peak ground acceleration, earthquake, remote sensing, Viêt-nam.

1. INTRODUCTION

Les études géologiques et géophysiques des phénomènes qui façonnent la surface de la Terre sont très importantes puisqu'elles permettent, dans les meilleurs cas, de prédire et de réduire leurs conséquences négatives. Ces conséquences sont, entre autres, la désertification, les processus d'érosion, les variations du niveau relatif de la mer, les mouvements de la croûte terrestre, les tremblements de terre et les glissements de terrain.

Depuis trois décennies, la télédétection fournit aux chercheurs en sciences de la Terre des informations fort utiles, telle que l'identification des roches et des structures géologiques. De nos jours, les données provenant des capteurs de SPOT-4, de Landsat-7, d'ERS-1 et d'ERS-2, ainsi que des photographies aériennes sont utilisées pour la cartographie et l'exploration géologique. Les capteurs à très hautes résolutions spatiale et spectrale ainsi qu'à capacité de vision stéréoscopique permettent une approche quantitative des agents qui agissent sur la surface de la planète. Ces progrès constants rendent possible l'utilisation de la télédétection dans les études sur les risques géologiques. Les failles actives, les mouvements tectoniques récents et les risques de tremblement de terre figurent parmi les thèmes majeurs qu'il est possible d'analyser à partir d'images satellitaires. En télédétection, il existe actuellement trois approches pour mesurer la valeur des déplacements tectoniques ou l'amplitude des mouvements résultant d'un tremblement de terre : la géodésie spatiale, l'interprétation d'images à haute résolution spatiale et l'interférométrie radar.

La géodésie spatiale est basée sur la mesure des déplacements à l'échelle du sous-pixel à partir d'images obtenues avec un capteur passif. Cette approche a été développée au Jet Propulsion Laboratory (Crippen, 1992). On a ainsi été capable de mettre en évidence les déplacements associés à un tremblement de terre. Dans cette approche, chaque valeur de la radiance d'un pixel est pondérée par une fonction de diffusion (*Point spread function*). Le principe de la méthode consiste à comparer les valeurs de milliers de pixels provenant d'une image acquise avant un tremblement de terre à celles des mêmes pixels provenant d'une image acquise après ce tremblement de terre. Le résultat final est un fichier qui comporte chaque vecteur de déplacement.

La deuxième approche correspond à l'interprétation des signatures géomorphologiques à partir d'images à haute résolution spatiale, comme celles de HRVIR de SPOT-4. Le but consiste à rechercher les traces de faille et d'en estimer le déplacement comme le décalage d'éléments tels que les thalwegs, les cônes de déjection quaternaires ou les terrasses. Si l'âge des formes du relief peut être estimé de manière raisonnable, un taux de déplacement peut alors être évalué (Tapponnier *et al.*, 1990).

Depuis l'avènement des radars imageurs embarqués sur des satellites, des progrès significatifs ont été enregistrés dans le domaine de la cartographie des champs de déformation de la croûte terrestre. En effet, la troisième technique traite de la cartographie du champ de déformation après un tremblement de terre à l'aide de l'interférométrie radar différentielle (Massonnet *et al.*, 1993). L'étude du tremblement de terre de Landers, en Californie, a fourni les premières images d'un champ de déformation post-sismique obtenu à l'aide de cette approche. La précision de la mesure était de l'ordre de 28 mm, c'est-à-dire une demi-longueur d'onde du capteur RSO (AMI) d'ERS-1. Un interférogramme a d'abord été réalisé à partir de deux images radar prises avant et après le tremblement de terre. Ensuite, la composante topographique a été soustraite par interférométrie différentielle. Le déplacement des failles actives mesuré par cette technique était en accord avec les mesures réalisées sur le terrain ainsi qu'avec les résultats d'un modèle de dislocation élastique de la croûte terrestre. Le décrochement dextre de la faille a pu être estimé à partir de l'interférogramme, en supposant que les changements observés suivant la portée du radar sont seulement dus au décrochement dextre de la faille dans un plan ayant une tendance déterminée.

En comparaison avec les techniques de mesures géodésiques, l'interférométrie radar différentielle fournit un échantillonnage du champ de déformations plus important et plus précis. De plus, il n'est pas nécessaire d'installer des stations de mesure au sol avant le tremblement de terre. Pour les tremblements de terre superficiels, tel que celui de Landers, les changements mesurés sur l'interférogramme étaient en accord à la fois avec les observations sur le terrain et les modèles de dislocation pour les champs intermédiaires et lointains. L'interférométrie différentielle avec l'arrivée de l'interférométrie par cible permanente est un grand progrès. Cette nouvelle technique combinée avec la mesure à l'aide de GPS (système de positionnement global) permet d'estimer des taux de déplacement annuel de surface de l'ordre du millimètre par année (Ferretti *et al.*, 2001).

Dans le travail présenté ici, nous avons interprété des images satellitaires en les validant à l'aide d'observations sur le terrain. Pour cette étude, les images utilisées sont :

- une image multibande HRVIR de SPOT-4, de juillet 1999, de 20 m de résolution spatiale ;
- une image ETM+ de Landsat-7, de septembre 2000, tant en mode panchromatique de 15 m de résolution qu'en mode multibande de 30 m ;
- une paire d'images RSO d'ERS-1 et d'ERS-2 respectivement des 15 et 16 avril 1996.

Nous avons également effectué des mesures classiques de géodésie et nous avons positionné nos observations à l'aide d'un GPS. Nous montrons que, lorsque la télédétection est associée à des études en géologie, en géophysique et en géomorphologie, cette technique se révèle d'un apport appréciable pour la reconnaissance des failles actives et l'évaluation du risque sismique.

2. CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES FAILLES ACTIVES

La collision entre les plaques indienne et eurasienne est un événement important à l'origine de changements fondamentaux du cadre tectonique global de l'Asie. Des études systématiques menées le long de la zone de cisaillement du fleuve Rouge, depuis la province du Yunnan en Chine et jusqu'au Viêt-nam, ont montré que les affleurements de gneiss de la zone métamorphique du fleuve Rouge ont été formés au Cénozoïque (Leloup *et al.*, 1995, 2001 ; Phan Trong Trinh, 1994, Phan Trong Trinh *et al.*, 1999, 2002a ; Roger *et al.*, 2000). La compréhension des déformations apparues au Tertiaire et l'émergence d'un relief dans la région du nord-ouest du Viêt-nam ont été clarifiées grâce aux analyses des déformations historiques de la zone faillée du fleuve Rouge (ZFFR). L'activité tectonique dans le nord-ouest du Viêt-nam résulte du décrochement senestre le long de la zone de cisaillement constituée de segments de failles orientés NO-SE. L'analyse des conditions thermodynamiques indique, qu'il y a 15 Ma, la température a progressivement diminué de 300 °C pendant 10 Ma le long de la ZFFR (Leloup *et al.*, 1995, 2001 ; Phan Trong Trinh *et al.*, 1999). Les zones métamorphiques et de cisaillement qui apparaissent dans les granites de Ye Yen Sun (23 Ma) doivent avoir été formées à une profondeur de 4 à 10 km. Actuellement, elles se situent à 3 km au-dessus du niveau de la mer. Ainsi, nous estimons le soulèvement compris entre 7 et 13 km. La surface actuelle ne date pas du Paléocène mais plutôt du Miocène. L'intervalle de temps entre 15 et 5 Ma a été suffisant pour former une surface relativement douce qui a permis l'accumulation de sédiments fins contenant le charbon de Hang Mon. Les plus hauts sommets de la surface topographique actuelle sont les témoins d'une paléogéographie antépliocène.

Les analyses de la microtectonique cassante (Phan Trong Trinh, 1994) indiquent que deux phases tectoniques majeures ont affecté le nord-ouest du Viêt-nam depuis le Miocène. Pour chacune de ces deux phases, le champ de contrainte était décrochant dans la partie nord-ouest et extensif dans le bassin de Hanoi, avec une direction de contrainte minimale σ_3 demeurant constante, mais avec une direction de contrainte intermédiaire σ_2 permutant avec la direction de contrainte maximale σ_1 . Le champ de contrainte de la première phase est compatible avec le décrochement senestre du Miocène le long de la zone de cisaillement du fleuve Rouge et l'ouverture de la Mer du Sud de la Chine, entre 35 Ma et 16 Ma. La seconde phase et les éléments tectoniques actifs qui lui sont associés au nord du Viêt-nam (décrochement le long du fleuve Rouge, compression N-S, extension E-O) ont débuté il y a 5 Ma (Phan Trong Trinh, 1994). Il existe un état de contrainte où la direction de contrainte maximale σ_1 est approximativement N-S et la direction de contrainte minimale σ_3 est E-O.

Sur les images ETM+ et HRVIR du nord du Viêt-nam, on peut suivre le tracé de plusieurs failles actives associées à la seconde phase. Deux zones principales présentent des mouvements rapides : celles de la ZFFR et de la faille de Dien Bien Phu. Dans le nord du Viêt-nam, la ZFFR se divise en deux branches actives majeures : celle de la vallée du fleuve Rouge, limitée au sud-ouest par le massif métamorphique de Day Nui Con Voi, et celle de la vallée de la rivière de la rivière Chay (figure 1). Elles sont très apparentes sur les images HRVIR et ETM+ et elles sont situées au nord-est du massif de Day Nui Con Voi (Phan Trong Trinh, 1995 ; Phan Trong Trinh *et al.*, 2002b). Les décrochements dextres qui leur sont associés ont été déterminés en analysant le tracé des rivières affluentes, la forme des cônes de déjection quaternaires, les directions des écoulements observés à partir des images satellitaires, les déductions issues de l'analyse des cartes topographiques et les observations sur le terrain. L'activité continue de ces failles s'exprime fort bien dans la géomorphologie du fait de l'intensité des phénomènes d'érosion. La faille géologique représente une zone de fracture de la croûte terrestre. Les géologues d'expérience distinguent facilement à partir des images satellitaires les failles géologiques des autres linéaments comme les ruisseaux, les routes ou les crêtes. On peut aussi séparer les failles géologiques anciennes des failles actives. Les failles actives sont celles qui se déplacent seulement depuis 10 000 à 12 000 ans jusqu'à aujourd'hui. Elles sont identifiées par le changement des marqueurs géomorphologiques de leurs côtés. La faille décrochante liée au champ de contrainte transformant est mise en évidence par le décalage des marqueurs : rivières, ruisseaux, cônes alluviaux ou terrasses. On peut déterminer en même temps le sens de mouvement et le rejet de faille grâce à l'observation des marqueurs géomorphologiques. La faille active normale liée au champ de contrainte extensive est mise en évidence par une série de facettes triangulaires. La faille inverse est plus difficile à déterminer, mais cela est rendu possible par la cartographie, sur le terrain, des escarpements de failles et par la connaissance du mécanisme au foyer. La faille active ne se prolonge pas de manière continue, mais elle est découpée en plusieurs segments. Le déplacement ne se trouve que le long du segment de faille. L'image satellitaire nous donne un outil efficace pour déterminer la longueur du segment de faille et le sens du déplacement. Cela nous donne l'information sur l'état de contrainte. Ce sont des paramètres importants pour estimer la magnitude maximale d'un tremblement de terre.

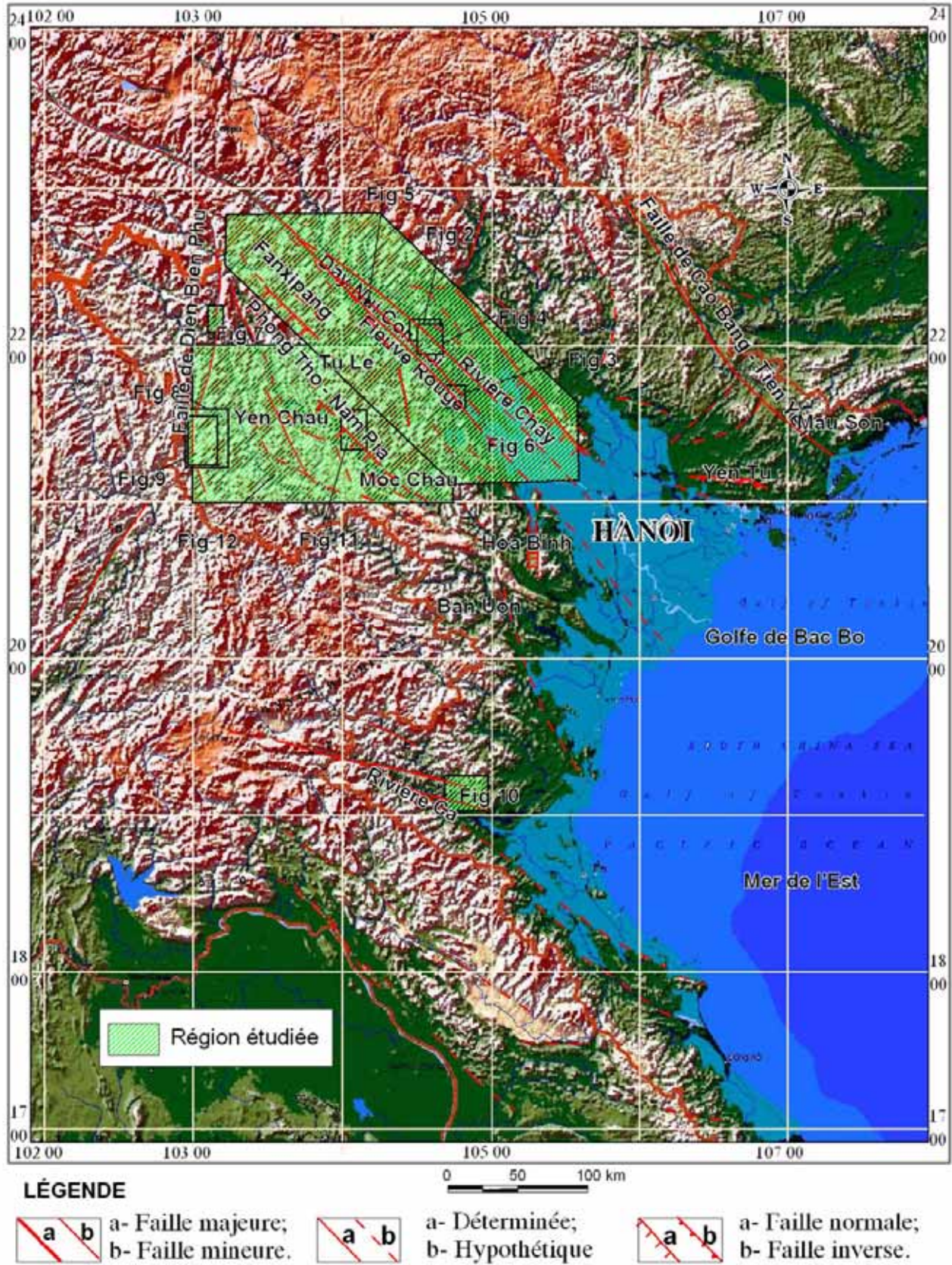


Figure 1 : Région étudiée et les failles actives au nord du Viêt-nam basées sur un MNA de 30 m de résolution. *Study area and active faults in North Vietnam based on 30 m resolution DEM.*

Le long de la branche située au sud-ouest du fleuve Rouge, le tracé des rivières témoigne de décrochements dextres qui varient entre 220 et 700 m, avec une moyenne d'environ 313 m.

Le long de la branche située au nord-est du fleuve Rouge, le déplacement est de l'ordre de $358 \text{ m} \pm 109 \text{ m}$. Les données géomorphologiques et le déplacement observé grâce à la topographie suggèrent que ces mouvements décrochants possèdent également une composante normale. Le long de la branche de la rivière Chay, le déplacement horizontal dextre de la rivière est compris entre 250 et 1 000 m, avec une moyenne de 566 m.

En direction du sud-est, la branche de la vallée du fleuve Rouge se ramifie en plusieurs segments de failles. Une d'entre elles s'incurve vers Hoa Binh et prend une direction N-S. La cinématique de cette faille change également, de faille décrochante dextre, elle devient faille normale à l'origine du graben de Hoa Binh (Winter *et al.*, 1994).

À partir de l'analyse de détail d'une image HRVIR, de photographies aériennes au 1 : 33 000 et d'un modèle numérique d'altitude (MNA), nous pouvons cartographier les segments principaux des failles actives le long du fleuve Rouge et de la rivière Chay (figures 2 à 4). Les observations géologiques et géomorphologiques sur le terrain confirment l'interprétation obtenue à l'aide de l'image satellitaire (figure 5). En combinant l'interprétation des images satellitaires avec les observations géomorphologiques, les cartes géologiques et l'investigation géophysique, nous avons établi une carte de failles actives représentant les segments de failles (figure 6), pour laquelle la source des données de tremblements de terre est l'Institut de géophysique (1997).

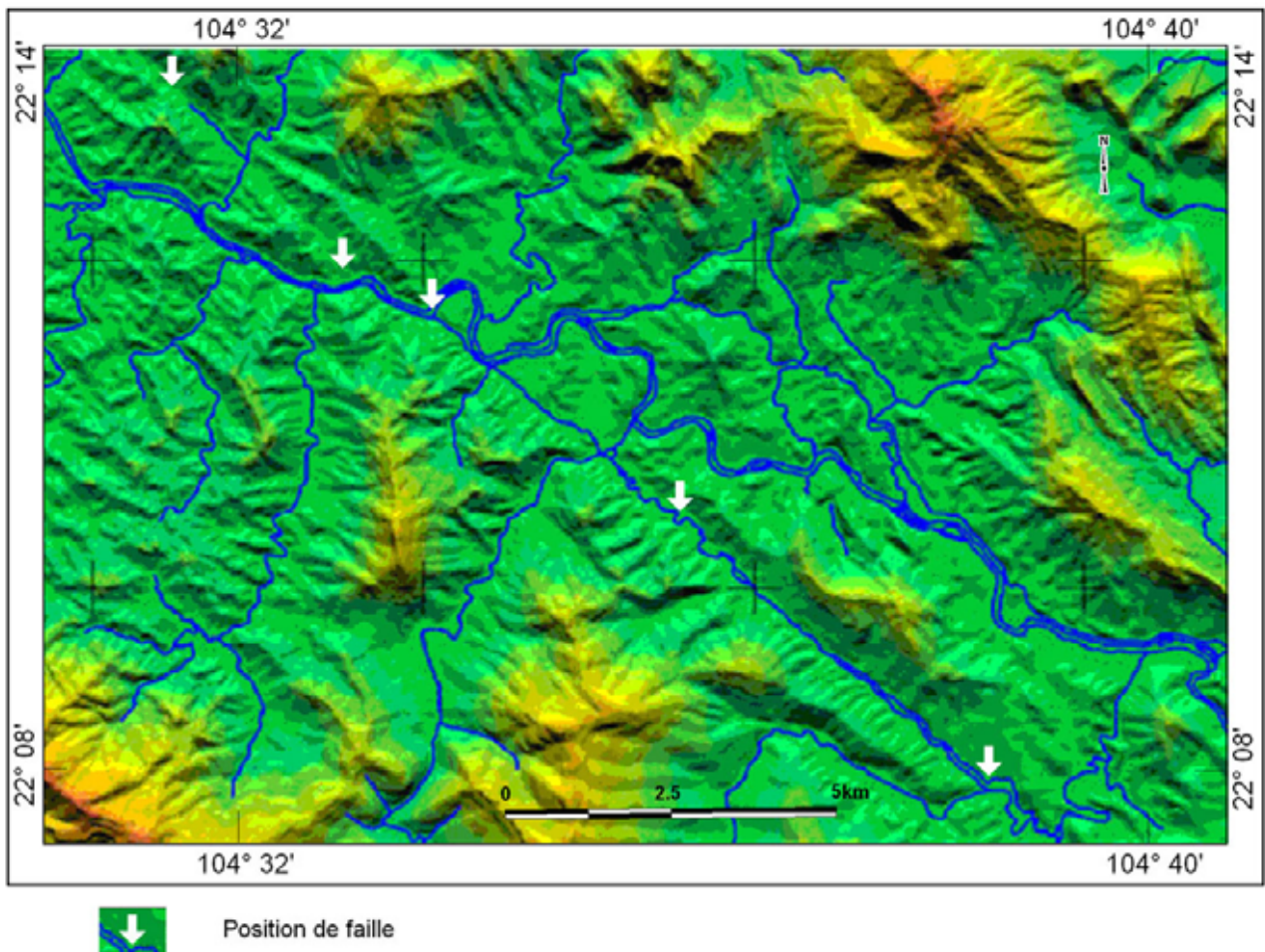


Figure 2 : Faille de la rivière Chay mise en évidence à partir d'un MNA réalisé à partir de la carte topographique au 1 : 50 000.
Chay river fault based on DEM derived from topographic map at the scale of 1 : 50 000.

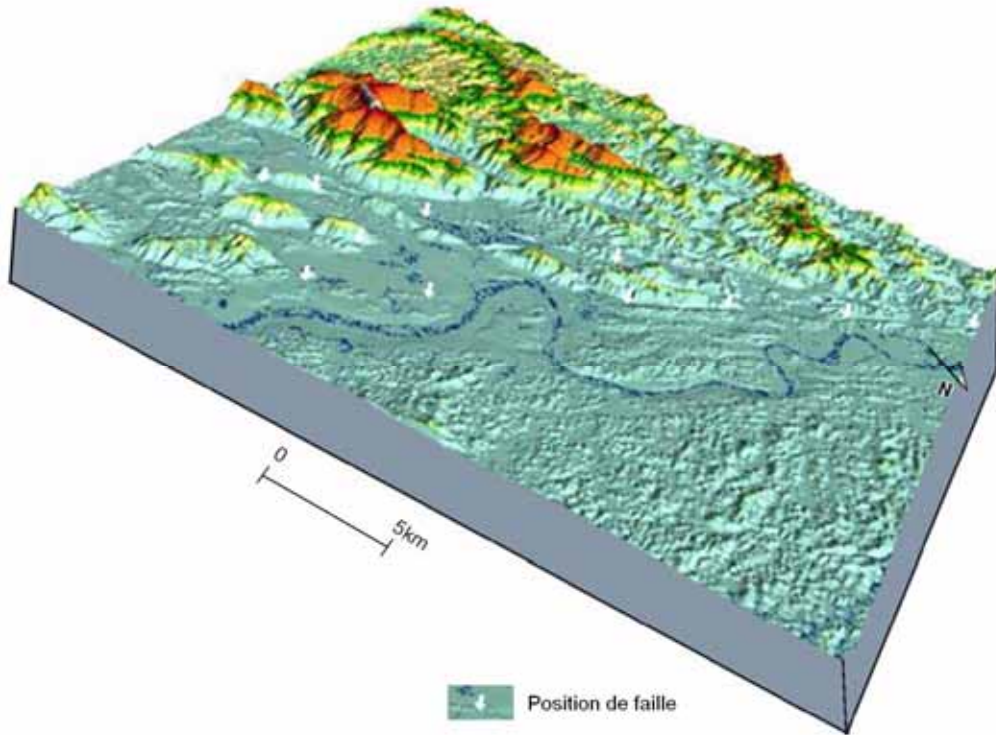


Figure 3 : MNA mettant en évidence des failles actives parallèles au fleuve Rouge. *Active faults along the Red River are enhanced in the DEM.*

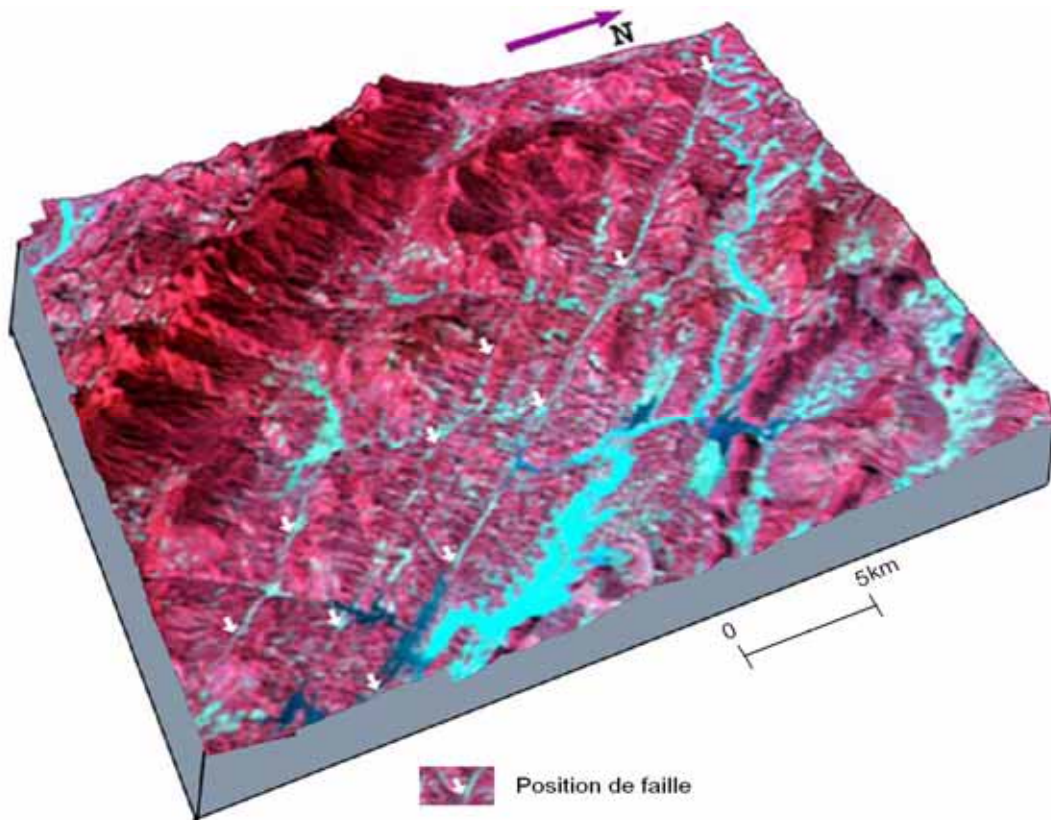


Figure 4 : Image de HRVIR superposée sur un MNA mettant en évidence une série de failles actives parallèles (région de Song Chay). *SPOT-4 HRVIR image superimposed on the DEM enhancing the parallel active fault zone in Song Chay region.*



Figure 5 : Zone de mylonites prouvant la présence d'une faille active le long du fleuve Rouge. Les observations de terrain confirment les interprétations. *Mylonite zone presents fault evidence along the Red River. Field observations confirm satellite interpretations.*

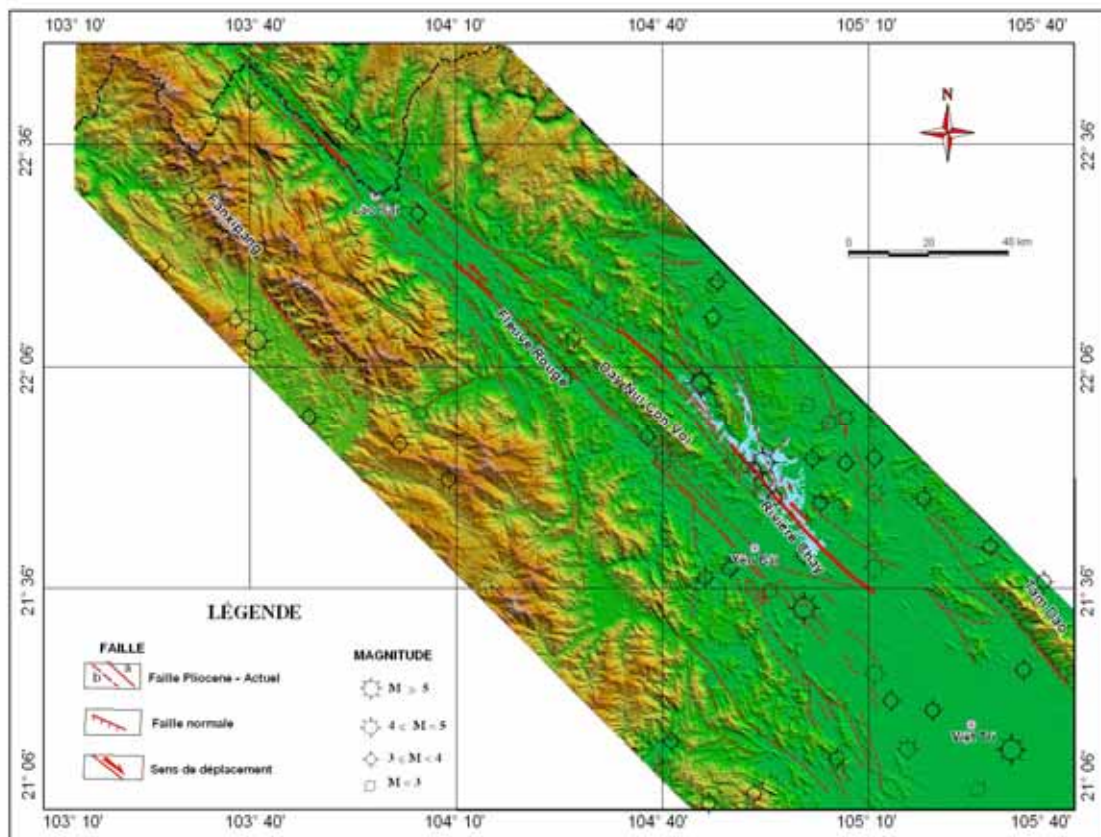


Figure 6 : Carte des failles actives et épicentres de tremblement de terre le long des failles du fleuve Rouge et de la rivière Chay. *Map of active faults and earthquake epicentres along the Red River and Chay faults.*

Pour la faille conjuguée de Dien Bien Phu, les traces d'un mouvement décrochant actif peuvent aussi être observées (figure 7). Un déplacement sénestre variant de 270 à 790 m peut être déduit de l'interprétation du tracé du réseau hydrographique. Le sens du mouvement sénestre et le rejet de faille active de Dien Bien Phu sont mis en évidence par la représentation d'un bassin d'extension longitudinale (figure 7). Ce bassin d'extension longitudinale est le résultat de l'extension locale produite par le déplacement sénestre le long de la faille de Dien Bien Phu. La largeur du bassin d'extension longitudinale représente en même temps le rejet de cette faille. À l'extrémité SO de la faille de Dien Bien Phu, on observe le bassin de Dien Bien, représentant aussi un état de contrainte extensif local. L'interférométrie à partir d'images RSO d'ERS-1 et d'ERS-2 nous a permis de réaliser un MNA du bassin de Dien Bien Phu (figure 8). La superposition de l'image ETM+ sur le MNA met en évidence les segments de faille active dans la région (figure 9).

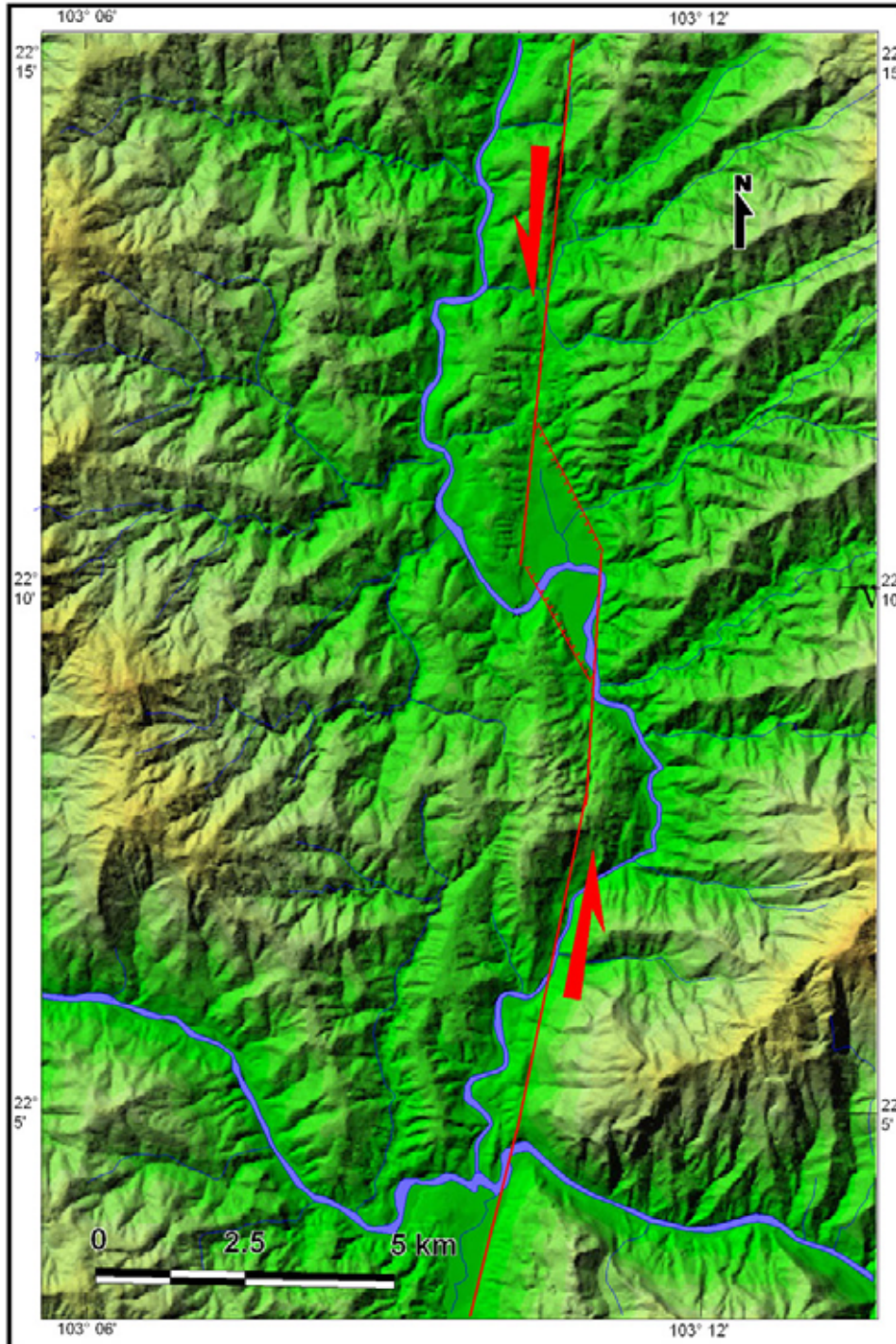


Figure 7 : MNA réalisé à partir des cartes topographiques le long de la faille de Dien Bien Phu. Il met en évidence des failles actives décrochantes sénestres et un bassin d'extension. L'état de contrainte dans la région interne de bassin est extensif tandis que l'état de contrainte le long de la faille est décrochant. *DEM derived from topographic map along the Dien Bien Phu fault showing left strike-slip active fault and extensive basin. The state of stress in the internal area of the basin is extensive while the state of stress along the fault is transcurrent.*

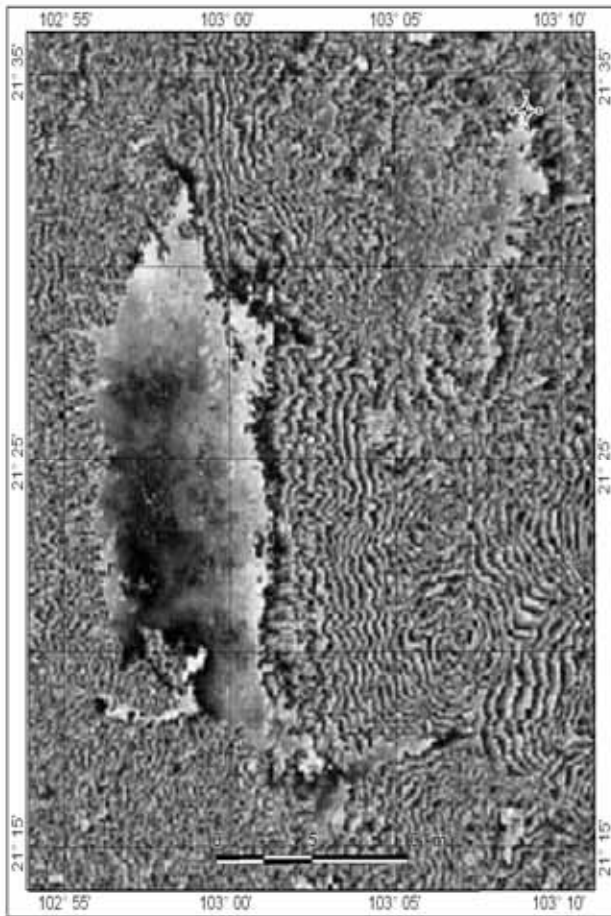


Figure 8 : Interférométrie radar d'images RSO d'ERS-1 (15-04-1996) et d'ERS-2 (16-04-1996) à la terminaison SO de la faille de Dien Bien Phu. *Radar interferometry using ERS-1 RSO (14-04-1996) and ERS-2 RSO (16-04-1996) images at SW termination of the Dien Bien Phu fault.*

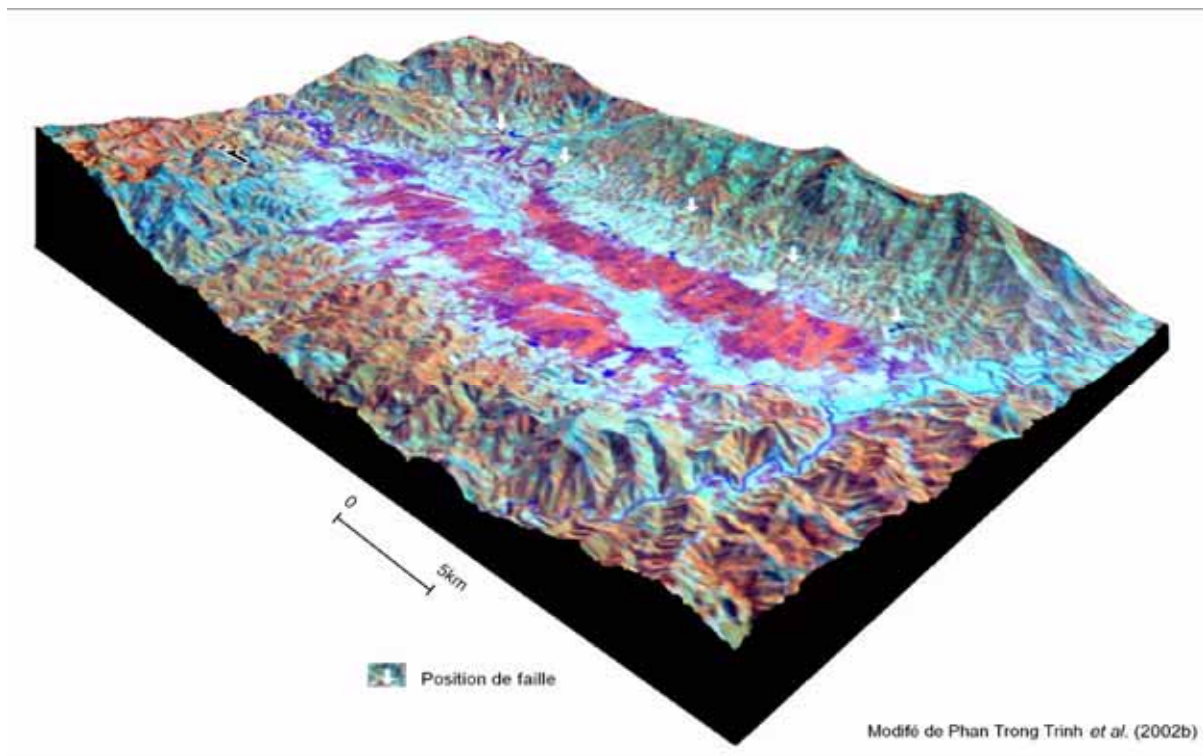


Figure 9 : Superposition de l'image ETM+ sur un MNA de la dépression de Dien Bien Phu afin de mettre en évidence les failles actives. *Superposition of ETM+ images on a DEM in Dien Bien Phu depression showing active faults.*

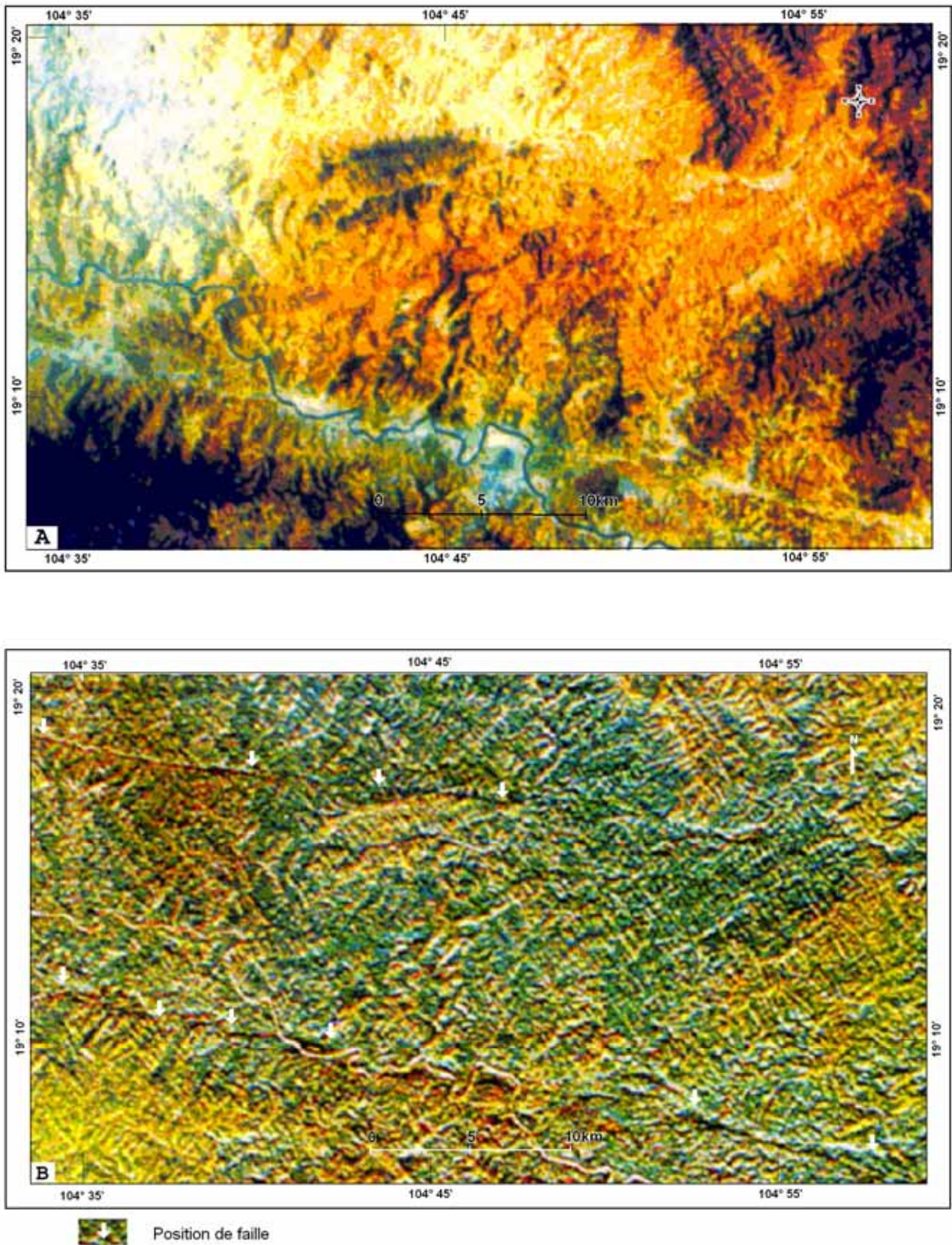


Figure 10 : Failles actives dans la région de Song Ma. A) image ETM+ de la région de la rivière Ca ; B) filtrage directionnel (NO-SE) mettant en évidence deux grandes failles subparallèles. Ces failles montrent localement des discontinuités. *Active faults in Song Ma region. A) ETM+ image in the Ca River region ; B) directional filtering showing discontinuity fault segments.*

Le soulèvement du massif de Fanxipang, qui culmine à plus de 3 000 m d'altitude, pourrait être le résultat du mouvement de ces deux très grandes zones de décrochement. Ce soulèvement rapide pourrait être expliqué par le déplacement d'un certain nombre de segments de failles normales orientées NO-SE et NNO-SSE. Au NE de la zone faillée du fleuve Rouge, sur les images HRVIR et ETM+, on voit clairement une faille normale inclinée vers le sud-ouest suivant une direction NO-SE et donc parallèle à la zone faillée du fleuve Rouge. Les facettes triangulaires qui bordent le sud-ouest du massif de Tam Dao indiquent l'escarpement de faille sur le terrain et traduisent l'importance de l'effondrement. Plus au nord-est, la faille de Cao Bang-Tien Yen présente un mouvement décrochant dextre. Son tracé s'arrête au golfe de Bac Bo. Les îles du côté nord-est de la faille sont considérées comme une structure anticlinale récente qui résulte de l'interruption de cette faille décrochante dextre. Le massif de Mau Son, qui culmine à plus de 2 000 m d'altitude, se situe à côté de la faille de Cao Bang-Tien Yen. Il peut être considéré comme une structure anticlinale datant du Quaternaire, orientée suivant un axe E-O (Phan Trong Trinh *et al.*, 2002a). Le soulèvement du massif de Yen Tu, également orienté E-O, est bordé par deux failles qui résultent d'une compression N-S. Plus au sud, près de la rivière Ca, on peut observer la combinaison de segments de failles normales et de failles décrochantes. On peut mettre en évidence certains segments de faille grâce au filtrage directionnel NO-SE de l'image ETM+ (figure 10).

La région du nord-ouest a été affectée par des déformations importantes au cours du Tertiaire. Les chevauchements se sont amplement développés, comme en témoignent l'arc de Hoa Binh, localisé à 70 km à l'ouest de Hanoi, le marbre de Sapa et les calcaires de Phong Tho. Notons ici que le calcaire triasique de Phong Tho chevauche les schistes crétacés de Yen Chau. Ceci peut être observé indirectement sur le plateau de Moc Chau (Findlay et Phan Trong Trinh, 1997) ainsi qu'à 10 km de Yen Chau, en direction du nord, sur la route de Ban Dan à Ban Ngo, avec un pendage inverse à celui du système des schistes de Yen Chau. Le contact de ce chevauchement peut être cartographié en détail à l'aide des images HRVIR. La faille normale de Phong Tho-Nam Pia constitue la limite à l'échelle régionale entre la zone volcanique de Tule d'âge crétacé et la rivière Da. Des facettes triangulaires avec un pendage vers le sud-ouest sont clairement visibles sur les images HRVIR et le MNA. Ces facettes triangulaires appuient l'existence d'une faille active normale dans la région. Les cartes topographiques indiquent que la hauteur des triangles varie de 300 à 500 m. L'orientation passe du NO-SE vers O-E à l'ouest de la zone volcanique de Tule. Le taux de déplacement du segment orienté O-E n'est manifestement pas clair. Dans la partie située entre Muong La à Bac Yen, la faille prend à nouveau la direction NO-SE. Une activité extensive se manifeste dans ce secteur. En effet, la faille se sépare en deux tronçons, identifiés Muong La 1 et 2. De Bac Yen à Phu Yen, la faille change à nouveau d'orientation ainsi que la nature de son mouvement qui est un décrochement horizontal dextre (figures 11 et 12).

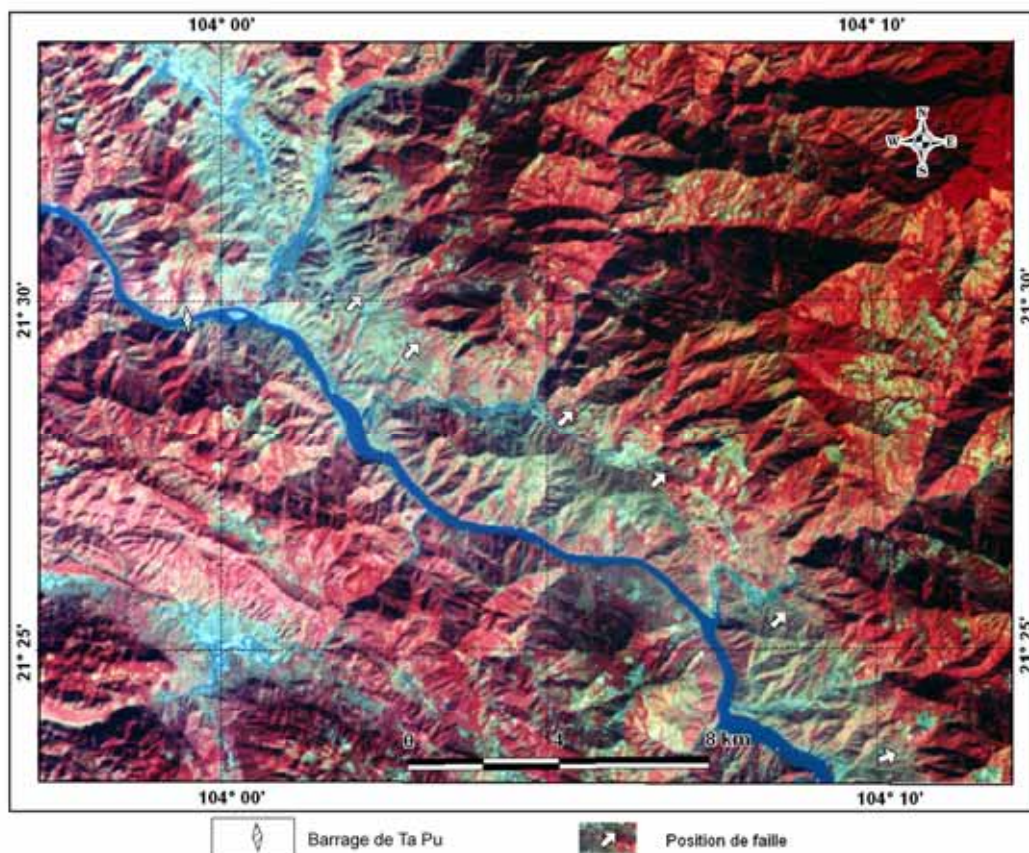
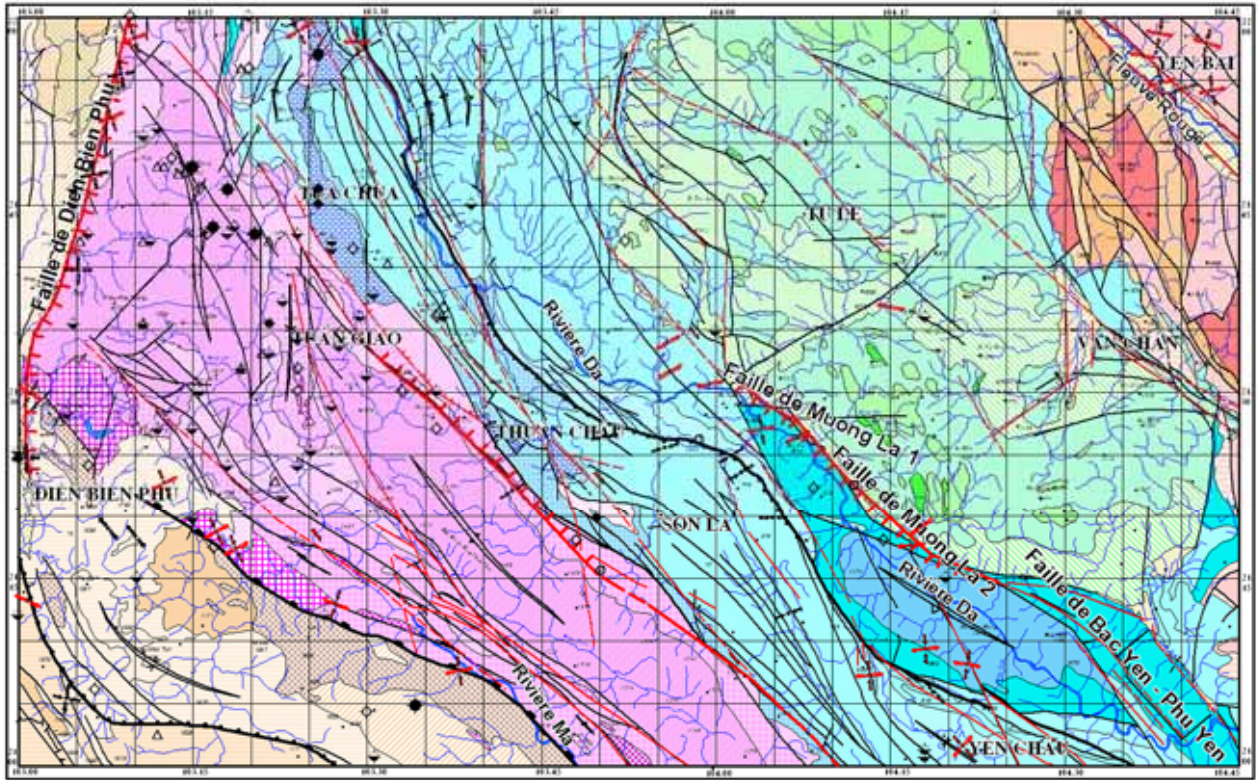


Figure 11 : Le barrage de Son La est construit à côté de la faille active normale. L'image HRVIR aide à localiser précisément la longueur du segment de faille. Les facettes triangulaires montrent la faille normale formée dans le champ de contrainte extensive. Les observations sur le terrain ont confirmé les interprétations de l'image HRVIR. *Son La dam is built next to a normal active fault. The SPOT-4 HRVIR image helps to locate precisely the length of fault segment. Triangular facets demonstrate this normal fault formed in the extensive state of stress. Field observations confirmed the interpretation from SPOT-4 HRVIR.*



Modifié de Phan Trong Trinh *et al.* (1999)

LÉGENDE

- Formation terrigène Néogène - Quaternaire
- RÉGION DE TULE**
- Formation granite Paléogène
- Tufogène, calcaire Paléogène.
- Formation riolite Paléogène.
- Formation trachite - liparite, liparite - basalte, Jurassique - Crétacé
- Formation mafrique Crétacé
- RÉGION DE FLEUVE DA**
- Formation terrigène Triasique - Jurassique
- Formation terrigène Calcaire Triasique
- Formation basalte Permien - Triasique
- Formation terrigène calcaire, diabase et tuff Permien.
- Formation basalte: Calcaire Carbonifère - Permien.
- Formation terrigène calcaire Dévonien
- RÉGION DE FLEUVE MA**
- Formation terrigène calcaire Carbonifère - Permien.
- Formation terrigène calcaire Dévonien
- Formation magma Permien: granite, granite - liparite
- Formation terrigène calcaire, basalte, O - D.
- Formation Plagiogranite
- Formation méta-basite métasilicate Cambrien.
- Formation terrigène calcaire, basalte, Pz - Cambrien.
- RÉGION DE SAMNUA - PHUHOAT**
- Formation terrigène Triasique - Jurassique
- Formation terrigène Triasique
- Formation granitoïde Triasique
- Formation Permien - Triasique
- Formation terrigène, basalte Carbonifère - Permien.
- Formation terrigène Silurien - Dévonien.
- Formation terrigène éruptive métamorphisée Protérozoïque - Cambrien.

RÉGION DE FLEUVE ROUGE

- Formation terrigène- calcaire, O-S
- Formation terrigène calcaire-phosphorite, Pz-Cambrien
- Formation terrigène plagiogneiss, granitogène-plagiogé, Pz
- Formation plagiogranite Protérozoïque
- Formation meta terrigène metamorphite Protérozoïque
- Formation meta terrigène éruptif Protérozoïque

FAILLE

- Faille Pliocène - Actuel
- Faille avant Pliocène
- Faille régionale
- Faille normale
- Faille inverse
- Suture tectonique
- Sens de déplacement

ÉTAT DE CONTRAINTE

- État de contrainte Compressive
- a. Pliocène - Actuel; b. Avant Pliocène.
- État de contrainte décrochante
- a. Pliocène - Actuel; b. Avant Pliocène.
- État de contrainte extensive
- a. Pliocène - Actuel; b. Avant Pliocène.

MAGNITUDE DE TREMBLEMENT DE TERRE

- 6.0 < M < 6.9 Anticlinal
- 5.0 < M < 5.9 Synclinal
- 4.0 < M < 4.9
- 0 < M < 3.9

Figure 12 : Carte sismotectonique de la région du nord-ouest du Viêt-nam. Superposition de plusieurs couches : géologique structurale, faille active, champs de contrainte, tremblement de terre. *Seismotectonic map in the northwest region of Vietnam. Superposition of various layers : geological structure, active fault, state of stress and earthquakes.*

Le futur barrage hydroélectrique de Son La aura une hauteur de 175 m et sera établi dans une zone très complexe ayant connu plusieurs événements tectoniques majeurs, telles les déformations du Cénozoïque. Des analyses sismotectoniques ont été réalisées sur l'ensemble de la partie nord-ouest du Viêt-nam afin d'évaluer le risque géodynamique et de mieux concevoir la construction en fonction des contraintes géologiques. Des investigations ont été menées par télédétection, par observations directes des failles (études géomorphologiques, analyses tectonophysiques) et indirectes (profils sismiques, profils électriques, détection de vapeurs de mercure, détection de la radioactivité).

La zone métamorphique du fleuve Rouge, les régions de Hoang Lien Son et de la zone volcanique de Tule ont été fortement soulevées depuis le Pliocène jusqu'à nos jours. Le bassin de la rivière Da a également été soulevé, mais avec un taux beaucoup plus faible. Le soulèvement le plus important est contemporain de celui de la région montagneuse de Fanxipang, avec un taux de soulèvement moyen d'environ 1,4 à 2,6 mm/an depuis le Pliocène (l'amplitude du soulèvement est de 7 à 13 km en 5 Ma). De façon analogue, l'altitude moyenne de 2 000 m de la région de Tule résulte d'un soulèvement évalué entre 0,93 et 1,73 mm/an. Quant aux sommets du bassin de la rivière Da, qui culminent à 900 m d'altitude, ils résultent d'un soulèvement dont la moyenne est estimée entre 0,4 et 0,8 mm/an (Phan Trong Trinh *et al.*, 1999). À partir de ces informations, le taux de déplacement relatif entre le bassin de la rivière Da et le massif de Tule serait de 0,53 à 0,93 mm/an. Afin de déterminer le taux de déplacement relatif des zones de Tule et de la rivière Da, au travers de la faille de Phong Tho, il est nécessaire de prendre en compte le déplacement des deux zones principales par rapport à la zone faillée de Phong Tho-Nam Pia. Nous pouvons corriger de 30 % le taux précédemment avancé car il comporte une part du déplacement causé par des failles secondaires. Ainsi, nous pouvons estimer le taux de soulèvement moyen de la partie nord-ouest par rapport à la branche sud-ouest avec un taux moyen estimé entre 0,35 et 0,62 mm/an pour la faille de Phong Tho-Nam Pia.

Afin d'évaluer le taux de déplacement de la faille de Phong Tho-Nam Pia pour des intervalles de temps plus courts, nous avons utilisé deux autres approches. La première utilise les images HRVIR ainsi que les documents géomorphologiques et géologiques. La seconde est basée sur des mesures géodésiques accumulées au cours des vingt dernières années.

Les facettes triangulaires ont été clairement observées sur les images satellitaires. La différence d'amplitude entre les deux sites de faille est de 300 m, pour les facettes les plus visibles, et de 500 m, pour les facettes moins nettes. Si l'on postule que la surface actuelle date du début du Quaternaire (1 Ma), nous devrions estimer le taux de déplacement entre 0,3 et 0,5 mm/an. Si cette surface est reliée au processus de formation de la surface topographique actuelle, corrélée au dernier interglaciaire, soit il y a environ 100 000 ans, nous estimerons le taux entre 3 et 5 mm/an. Ceci semble plus raisonnable si l'on considère que la différence d'altitude de surface de 500 m correspond au début du Quaternaire. Nous pouvons alors estimer le taux de déplacement à 0,5 mm/an et la différence de surface de 300 m correspond à 100 000 ans, pour un décrochement estimé à 3 mm/an. Pour cette raison, le taux de déplacement moyen de la faille de Phong Tho-Nam Pia est estimé suivant l'interprétation géomorphologique entre 0,5 et 3 mm/an.

Dans le cadre de l'évaluation du risque sismique pour la zone du barrage hydroélectrique de Son La, nous avons concentré notre attention sur les systèmes de failles ayant une longueur considérable et qui sont proches du barrage. Nous avons mesuré la longueur des segments de failles à l'aide des images HRVIR et contrôlé ces valeurs par des mesures de terrain géomorphologiques et géophysiques. La faille décrochante dextre de Phong Tho-Nam Pia s'étire depuis Phong Tho jusqu'à Phu Yen. Cette zone de faille est scindée en de nombreux segments, qui présentent différents niveaux d'activité. Dans la zone du futur barrage hydroélectrique de Son La, nous distinguons les segments de faille de Muong La 1 (10 à 12 km de longueur) et de Muong La 2 (30 km de longueur). L'observation des surfaces schisteuses, associées au segment de Muong La 2, indique un pendage de l'ordre de 75° vers le SE et une profondeur estimée à 15 km. À vol d'oiseau, 4,4 km sépare le segment de Muong La 1 du site prévu de construction du futur barrage le plus en amont sur la rivière Noire (Pa Vinh) et 4,2 km du site prévu le plus en aval (Ta Bu). Environ 8 km séparent ces deux sites. La plus courte distance entre le segment de Muong La 2 et le barrage de Pa Vinh est de 17 km et de 10 km pour celui de Ta Bu.

La profondeur de la faille de Muong La 1 ne peut pas être déterminée correctement. Pour l'estimation la plus probable d'un tremblement de terre, la profondeur de la faille peut être évaluée de deux manières possibles. La première est basée sur les caractéristiques sismiques de la région et le long de la zone de faille. Normalement, la profondeur des foyers des séismes se situe entre 10 et 20 km. En effet, la profondeur d'un séisme est relativement dépendante de la longueur de la faille. En principe, la profondeur n'excède pas les deux-tiers de la longueur de la faille en surface. Pour cette raison, nous supposons que la profondeur maximale d'un foyer de tremblement de terre pour le segment de Muong La 1 est d'un maximum de 10 km. La seconde approche est basée sur le changement des propriétés mécaniques de la croûte terrestre avec la profondeur. Compte tenu de la plus grande proximité du segment de Muong La 1 des deux sites potentiels de la construction du barrage, la détermination exacte de la longueur de la faille présente un très grand intérêt pour la prévision de l'intensité d'un tremblement de terre. C'est pour cette raison qu'une série de mesures sismologiques, électriques et de détection de la radioactivité ont été réalisées à proximité de l'extrémité de la faille, de manière à affiner la localisation de la limite de ce segment. Les endroits choisis pour la réalisation des profils ont été sélectionnés à partir de l'analyse de l'image HRVIR. Il a ainsi été possible d'estimer de manière suffisante la longueur de la faille, le pendage et la nature du déplacement.

3. ÉVALUATION DU RISQUE SISMIQUE

Pour l'évaluation du risque sismique, nous devons réaliser trois étapes : l'estimation de la magnitude du tremblement de terre, l'estimation de l'accélération au sol et l'estimation de l'accélération spectrale. Dans la première étape, nous devons connaître la dimension de la faille active, le régime de contrainte, la période de retour de tremblement de terre. Deux paramètres importants comme la longueur de la faille et l'état de contrainte sont fournis par la télédétection. Dans la deuxième étape, nous devons connaître la magnitude du tremblement de terre et la distance entre la faille et le site afin d'estimer l'accélération au sol. Le premier paramètre est le résultat de la première étape. La distance est fournie par la télédétection. Dans la troisième étape, on a besoin aussi de la distance entre la faille et le site.

Le comité international pour les grands barrages recommande que trois magnitudes de tremblement de terre soient utilisées lors de la conception d'un barrage : le tremblement de terre maximum crédible (MCE), le tremblement de terre maximum concevable (MDE) et le tremblement de terre de base opérationnel (OBE). Les MDE et OBE peuvent être déterminés à partir du MCE en combinaison avec la période de retour. La méthode basée sur la longueur de la faille destructrice est celle de Slemmons (1982) et de Well et Coppersmith (1994). La méthode de Slemmons a été utilisée pour la première fois au Viêt-nam dans un projet du PNUD (Programme des Nations-Unies pour le développement) pour l'évaluation du risque sismique du barrage de Hoa Binh (Winter *et al.*, 1994). Dans la présente étude, les méthodes pour le calcul de magnitude maximale à partir d'une zone faillée ont été celles de Well et Coppersmith (1994), Wyss (1979), Woodward-Clyde (1983) et plus spécialement celle d'un MCE à partir du moment d'un tremblement de terre. Le moment sismique d'un tremblement de terre est un paramètre qui traduit la signification physique et qui permet de décrire la taille d'un tremblement de terre à partir des paramètres de la faille (Hanks and Kanamori, 1979). En combinant des méthodes variées, nous prenons la valeur moyenne tout en pondérant les nombres provenant d'une méthode de calcul. Afin de prendre la valeur moyenne, la méthode basée sur le moment sismique d'un tremblement de terre est utilisée avec un coefficient de 3 du fait de sa haute confiance. La méthode basée sur la surface de la zone faillée prend un coefficient 2 et la méthode basée sur la longueur de la faille destructrice prend un coefficient 1. Compte tenu de l'absence de lois spécifiques pour le Viêt-nam de l'accélération au sol (PGA), nous utilisons les modèles 1, 2, 3 et 4 de Campbell (Campbell, 1981, 1997) et les formules d'Idriss (1985), de Xiang et Gao (1994) et Ambraseys (1995). Les modèles 1, 2, 3 et 4 de Campbell sont basés sur des données globales de vibration près de la source. Ils ont donc une grande fiabilité dans le cas de la prévention d'un séisme pour un rayon de 50 km ou moins autour du barrage. Le modèle 4 de Campbell est plus récent : il est basé sur les données des modèles 1, 2 et 3. C'est pourquoi le modèle 4 de Campbell est utilisé dans notre calcul avec le coefficient 3. La formule de Xiang et Gao ne peut utiliser qu'un coefficient 2 parce qu'elle a été mise au point à partir de données de tremblements de terre au Yunnan donc dans des conditions géologiques et structurales proches du Viêt-nam. Les formules de Woodward-Clyde (1983), d'Idriss (1985) et d'Ambraseys (1995) ne peuvent être utilisées qu'avec un coefficient 1 parce qu'elles sont basées sur des données provenant de sources réparties dans un rayon de 400 km. L'unité d'accélération au sol est calculée avec $1g$, équivalent à $9,8 \text{ m/s}^2$. Nous rectifions le modèle du tremblement de terre proche en réduisant le coefficient du modèle de Campbell et en augmentant celui d'Ambraseys par la méthode d'Idriss (1985).

Sur le tableau 1, on représente un exemple de l'estimation de la magnitude maximale pour la faille de Ban Uon 1 dans la région du barrage hydroélectrique de Ban Uon, dans la rivière Ma. Ce barrage se situe à 70 km au sud-ouest de Hoa Binh (figure 1). La longueur du segment de la faille est de 15,8 km. La profondeur de faille de 10 km est calculée à partir du catalogue sismique et le régime de contrainte décrochante est déterminé par télédétection et confirmé par investigation géophysique. Le pendage de la faille subverticale de 90 degrés est déterminé par observation géologique et investigation géophysique. Le rejet du déplacement de 0,24 m est d'abord déterminé par les méthodes de Well et Coppersmith et de Slemmons. Cette valeur est ensuite corrigée par itération. Les autres valeurs sur le tableau 1 sont des résultats de calculs à l'aide de méthodes différentes. Les résultats finaux montrent une magnitude moyenne de tremblement de terre de 6,2, avec une variance de 0,2, et une magnitude maximale de 6,4. De la même manière, on peut estimer les magnitudes maximales de tremblement de terre pour plusieurs sites dans la région.

Sur le tableau 2, on représente un exemple de l'estimation de l'accélération au sol (*Peak ground acceleration* ou PGA) pour le site choisi du futur barrage hydroélectrique de Ban Uon. La première ligne du tableau 2 représente les données de calcul pour la magnitude maximale de tremblement de terre, la distance de faille, le pendage de faille et le coefficient de déplacement. La magnitude maximale de tremblement de terre de 6,4 est le résultat de calcul dans la première étape. La distance entre la faille et le barrage de 11,8 km est déterminée sur la carte. La profondeur de faille et le pendage de faille sont déjà utilisés pour le calcul dans la première étape. Sur ce tableau 2, on présente d'abord les résultats de calcul de la PGA à l'aide de neuf méthodes différentes puis le résultat final de 0,19. La valeur moyenne de l'accélération au sol est de 0,17 g avec une variance de 0,02 g et l'accélération au sol maximale est de 0,19 g , où g est l'accélération gravitaire de la Terre équivalant à $9,8 \text{ m/s}^2$.

Tableau 1 : Estimation de la magnitude maximale du segment de la faille de Ban Uon 1 dans la vallée de rivière Ma par différentes méthodes. Sont représentés la longueur, la profondeur et le pendage de faille ainsi que le déplacement et le régime de contraintes. Les magnitudes sont des résultats de calculs. *Estimation of maximum magnitude at fault segment Ban Uon 1 in the Valley of Ma River by various methods. Fault length, fault depth, fault dip, displacement and state of stress are represented. Magnitudes are the results of calculation.*

| Longueur de faille (km) | Profondeur de faille (km) | Pendage de faille (degrés) | Déplacement (m) | Régime de contrainte décrochante |
|--|---------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 15,8 | 10 | 90 | 0,25 | |
| Magnitude estimée à l'aide de la méthode de Slemmons (1982) en utilisant la longueur de la faille | | | | 6,3 |
| Magnitude estimée à l'aide de la méthode de Well et Coppersmith (1994) en utilisant la longueur de la faille | | | | 6,5 |
| Magnitude estimée à l'aide de la méthode de Well et Coppersmith (1994) en utilisant la longueur de la faille | | | | 6,2 |
| Magnitude estimée à l'aide de la méthode de Wyss (1979) en utilisant la superficie de la faille | | | | 6,3 |
| Magnitude estimée à l'aide de la méthode de Woodward-Clyde (1983) en utilisant la superficie de la faille | | | | 6,3 |
| Magnitude estimée à l'aide de la méthode du moment sismique de Hanks et Kanamori (1979) | | | | 6,0 |
| Déplacement (m) estimé à l'aide de la méthode de Slemmons (1982) | | | | 0,15 |
| Vitesse de la faille (mm/a) estimée à l'aide de la méthode de Woodward-Clyde (1983) | | | | 0,18 |
| Déplacement maximal (m) de la faille estimé à l'aide de la méthode de Well et Coppersmith (1994) | | | | 0,24 |
| Déplacement moyen (m) de la faille estimé à l'aide de la méthode de Well et Coppersmith (1994) | | | | 0,19 |
| Magnitude moyenne | Variance (g) | | Magnitude maximale | |
| 6,2 | 0,2 | | 6,4 | |

Tableau 2 : Estimation, par différentes méthodes, de l'accélération au sol pour le site choisi du futur barrage hydroélectrique de Ban Uon. *Estimation by different methods of the peak ground acceleration for hydropower dam site in Ban Uon.*

| Magnitude (km) | Distance de faille (km) | Profondeur de faille (km) | Pendage de faille (degré) | PGA(g) | Coefficient |
|---|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------|
| 6,4 | 11,8 | 10 | 90 | | |
| PGA estimé pour la source proche, modèle 1 de Campbell (1981) | | | | 0,14 | 0 |
| PGA estimé pour la source proche, modèle 2 de Campbell (1981) | | | | 0,15 | 0 |
| PGA estimé pour la source proche, modèle 3 de Campbell (1981) | | | | 0,15 | 0 |
| PGA estimé pour la source proche, modèle 4 de Campbell (1988) | | | | 0,14 | 3 |
| PGA estimé à l'aide de la méthode d'Idriss (1985) | | | | 0,21 | 1 |
| PGA estimé à l'aide de la méthode de Xiang et Gao (1994) | | | | 0,16 | 2 |
| PGA estimé à l'aide de la méthode de Woodward-Clyde (1983) | | | | 0,17 | 1 |
| PGA estimé à l'aide de la méthode d'Ambraseys (1995) | | | | 0,19 | 1 |
| Accélération moyenne | | Variance | | Accélération maximale | |
| 0,17 | | 0,02 | | 0,19 | |

4. CONCLUSION

Nous sommes témoins de la rapide évolution de la télédétection tant dans le domaine de la résolution spatiale que dans celui de la résolution spectrale. Les images satellitaires de 0,6 à 1 m de résolution spatiale seront de plus en plus disponibles à un coût acceptable. Ce seront des outils puissants pour la prévention des risques de nature géologique tels que les glissements de terrain et l'activité volcanique.

La combinaison de moyens tels que l'interférométrie radar, les systèmes d'information géographique et les GPS augmentera la précision pour la mesure des mouvements tectoniques et des déformations associées aux tremblements de terre. Un certain nombre de scientifiques ont pour objectif de réaliser la corrélation automatique des images optiques à l'échelle du sous-pixel pour mesurer les déformations co-sismiques (Dominguez *et al.*, 2003 ; Avouac *et al.*, 2006 ; Leprince *et al.*, 2007). La haute résolution d'images en infrarouge aura d'importantes répercussions dans l'étude de l'activité tectonique, les risques de tremblement de terre et le volcanisme. Nous nous attendons à des progrès qualitatifs grâce à la combinaison d'informations déduites de la télédétection et d'autres sources au sein des SIG. La cartographie du champ des déformations à partir de l'interférométrie radar est la grande réalisation de la décennie précédente. On peut modéliser le champ de contrainte pour prédire le champ de déplacement en profondeur. La mesure de la vitesse de la faille active et l'utilisation de ce paramètre d'évaluation du risque sismique font partie de nos projets de recherche futurs.

Dans cet article, nous avons souligné les progrès les plus importants en télédétection relativement aux risques géologiques tel que la mesure des mouvements tectoniques et des risques sismiques. Par exemple, dans l'étude des failles actives et du risque sismique, nous montrons que l'utilisation de la télédétection se confine aux applications thématiques ; par contre, si nous les associons avec d'autres données, telles que la géologie et la géomorphologie, nous pouvons estimer le taux de déplacement des failles, évaluer de futurs tremblements de terre et prévenir les dangers sismiques. Nous espérons que la combinaison par SIG des images à haute résolution et des données multisources et GPS donneront dans un futur proche des outils suffisamment précis pour la mesure et la surveillance des risques naturels.

Remerciements

Ce travail est le résultat d'une coopération entre l'Institut des sciences géologiques de l'Académie des sciences et technologie du Viêt-nam et le Département de géographie de l'Université de Liège dans le cadre d'une recherche partagée financée par le Réseau Télédétection de l'Agence universitaire de la Francophonie, d'un projet de coopération financé par la Région wallonne et d'un programme de recherche du Ministère des sciences et technologies du Viêt-nam (projet 708606, KT09.11/06-10).

Références

- Ambraseys, N.N. (1995) The Prediction of Earthquake Peak Ground Acceleration in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 24, p. 467-490.
- Avouac, J.P., Ayoub, F., Leprince, S., Konca, O. and Helmberger, D. (2006) The 2005, Mw 7.6 Kashmir earthquake, rupture kinematics from sub-pixel correlation of ASTER images and seismic waveforms analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 249, n° 3-4, p. 514-528.
- Campbell, K.W. (1981) Near source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 74, p. 2039-2070.
- Campbell, K.W. (1997) Empirical near source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity and pseudo absolute acceleration response spectra. *Seismological Research Letters*, vol. 68, n° 1, p.154-179.
- Crippen, R.E. (1992) Measurement of sub-resolution terrain displacements using SPOT panchromatic imagery. *Episodes*, vol. 15, n° 1, p. 56-61.
- Dominguez, S., Avouac, J.P. and Michel, R. (2003) Horizontal co-seismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: implications for the seismic cycle along the western foothills of Central Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, n° B2, p. 8/1-8/17.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001) Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, n° 1, p. 8-20.
- Findlay, R. and Phan Trong Trinh (1997) The structural setting of Song Ma region, Vietnam and the Indochina - South China plate boundary problem. *Gondwana Research*, vol. 1, n° 1, p. 11-33.
- Hanks, T.C. and Kanamori, H. (1979) A moment magnitude Scale. *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, p. 2981-2987.
- Idriss, I.M. (1985) Evaluating seismic risk in engineering practice. P. 255-320, *in* Proceeding of the 11th International conference on soil mechanics and foundation engineering. San Francisco, 12-16 août 1985, A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, 390 p.
- Institut de Géophysique (1997) Données de tremblement de terre du Vietnam. Hanoi, Base de données sur ordinateur.
- Leloup, P.H., Lacassin, R., Tapponnier, P., Scharer, U., Zhong Dalai, Liu Xiaohan, Zhangshan, Ji Shaocheng and Phan Trong Trinh (1995) The Ailao Shan - Red river shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, vol. 251, p. 3-84.
- Leloup, P.H., Arnau, N., Lacassin, R., Kienast, J.R., Harrison, T.M., Phan Trong Trinh, Replumaz, A. and Tapponnier, P. (2001) New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan - Red river shear zone, SE Asia. *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, p. 6657-6671.
- Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F. and Avouac, J.P. (2007). Automatic, precise, ortho-rectification and coregistration for satellite image correlation, Application to ground deformation measurement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, n° 6, p. 1529-1558.

- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Pelzer, G., Feigl, K. and Rabaute, Th. (1993) The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, vol. 364, p. 138-142.
- Phan Trong Trinh (1994) Cenozoic stress field in the northwestern region of Vietnam. *Journal of Geology (Hanoi)*, série B, n° 3-4, p. 12-18.
- Phan Trong Trinh (1995) Influence des failles actives sur les réservoirs de Hoa Binh et de la rivière Chay (nord du Viêt nam). P. 31-42, in Dubois, J.-M.M., Boussema, M.R., Boivin, F. et Lafrance, P. (réd.) *Téledétection des ressources en eau*. Presses de l'Université du Québec et AUPELF-UREF, Sainte-Foy et Montréal, 304 p.
- Phan Trong Trinh, Tran Van Tri, Nguyen Can, Dang Van Bat, Pham Huy Tien, Van Duc Chuong, Hoang Quang Vinh, Le Thi Lai, Doan Van Tuyen, Tran Trong Hue, Nguyen Van Hung, Nguyen Dich Dzy, Tran Dinh To, Nguyen Tran Hung, Doan Kim Thuyen and Huynh Tuoc (1999) Active tectonics and seismic hazards in Sonla hydropower dam (North Vietnam). *Journal of Geology (Hanoi)*, série B, n° 13-14, p. 19-32.
- Phan Trong Trinh, Hoang Quang Vinh and Bui Thi Thao (2002a) Actual geodynamics of the Red river fault zone and surrounding areas. P. 18-27, in Ministry of Science and Technology (réd.) *Red River basin economic development & environmental protection*. Publishing House of Science and Technology, Hanoi, 250 p.
- Phan Trong Trinh, Closson, D., Ozer, A., Hoang Quang Vinh, Bui Thi Thao and Trinh Hai Doan (2002b) Optic images, DEM and radar interferometry for the study of active Dien Bien fault. P. 69-75, in V. Raghvan and Hoang Minh Hien (réd.) *Proceedings of the International symposium on geoinformatics for spatial infrastructure development in earth and allied sciences*, Hanoi, 16-18 septembre 2002, Geoinformatic Consortium, Hanoi, 494 p.
- Roger, F., Leloup, P.H., Jolivet, M., Lacassin, R., Phan Trong Trinh, Brunel, M. and Seward, D. (2000) Unravelling a long and complex thermal history by multi-system geochronology: example of the Song Chay metamorphic dome, North Vietnam. *Tectonophysics*, vol. 321, p. 449-466.
- Slemmons, D.B. (1982) Determination of design earthquake magnitude for micronation. P. 119-130, in University of Washington (réd.) *Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference*. Seattle, 28 juin-1^{er} juillet 1982, Earthquake Society, vol. 1., 805 p.
- Tapponnier, P., Meyer, B., Avouac, J.P., Peltzer, G., Gaudemer, Y., Guo Shunmin, Xiang Hongfa, Yin Kelun, Chen Zhitai and Cai Shuahua (1990) Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 97, n° 3-4, p. 382-403.
- Well, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994) New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, vol. 84, p. 974-1002.
- Winter, Th., Phan Trong Trinh, Lacassin, R., Nguyen Trong Yem and Costaz, J. (1994) Advantage of a deterministic approach of seismic risk for dam design: the Hoa Binh dam case (Vietnam). P. 249-254, in P. Taponnier and Nguyen Dinh Xuyen (réd.) *Proceedings of the International Workshop on Seismic Hazards in South East Asia*. Hanoi, 1^{er}-4 février 1994, UNESCO, Hanoi, 276 p.
- Woodward-Clyde Consultants (1983) Seismic exposure study, offshore, southern California. Report to Texaco USA, New Orleans, 178 p.
- Wyss, M. (1979) Estimating maximum expectable magnitude of earthquake from fault dimension. *Geology*, vol. 7, n° 7, p. 336-340.
- Xiang Jianguang and Gao Dong (1994) The strong ground motion records obtained in Langcang - Gengma earthquake in 1988, China, and their application. P. 94-99, in P. Taponnier and Nguyen Dinh Xuyen (réd.) *Proceedings of the International Workshop on Seismic Hazards in South East Asia*. Hanoi, 1^{er}-4 février 1994, UNESCO, Hanoi, 276 p.