

# *Caractérisation de la déformation active par l'Interférométrie Radar (InSAR): Failles sismiques aveugles et cachées de l'Atlas Tellien (Algérie) et du Rif (Maroc) le long de la limite des plaques Afrique-Eurasie.*

## Résumé

Le but de cette thèse est l'étude de la déformation crustale générée par les séismes forts et modérés dans les domaines géologiques de l'Atlas Tellien (Nord de l'Algérie) et du Rif (Nord du Maroc). Les travaux entrepris impliquent l'identification et la caractérisation des failles actives en utilisant notamment la méthode de l'Interférométrie Radar à Ouverture Synthétique (InSAR) couplée par l'analyse sismotectonique des zones actives. La déformation active en Afrique du Nord est concentrée essentiellement le long de la limite des plaques où les séismes forts à modérés sont dus à la convergence de la plaque Afrique vers l'Eurasie.

La déformation de surface induite par ces séismes est souvent difficilement observable sur le terrain particulièrement dans le cas des séismes à magnitudes modérées associés à des failles aveugles (séisme d'El Hoceima, 2004 Mw 6.4, séisme d'Ain Temouchent 1999, Mw 5.7) ou dans le cas des failles cachées en mer (séisme de Zemmouri, 2003). L'application de l'InSAR aux zones tectoniques complexes où les ruptures cosismiques sont difficilement visibles, permet d'obtenir le champ de déplacement à une échelle centimétrique et de déduire les paramètres de la rupture. Par ailleurs, il est également possible d'évaluer les limites de l'application de cette méthode aux séismes à magnitudes modérées liés à différents domaines tectoniques (en compression, en extension et en décrochement). Les données SAR utilisées sont celles des satellites européens ERS-1, ERS-2 et ENVISAT ainsi que le satellite canadien RADARSAT.

Le premier chapitre décrit les caractéristiques sismotectoniques de l'Atlas Tellien et du Rif. L'Atlas Tellien a été régulièrement affecté par des séismes historiques destructeurs (ex : Alger, 1365 Io = X et 1716 Io = X , Oran 1789 Io = XI-X ). Au cours du dernier siècle plusieurs séismes forts à modérés ont été enregistrés dans cette région du Nord de l'Algérie.

Les deux plus importants événements de l'ère instrumentale sont les séismes d'El Asnam du 10 octobre 1980 (Mw 7.3) et de Zemmouri du 21 mai 2003 (Mw 6.8). Au cours des trois dernières décennies, d'autres séismes de magnitude modérée ont néanmoins causé d'importants dégâts (séisme de Mascara du 10 août 1994, Mw 5.7 ; d'Ain Temouchent du 21 décembre 1999, Mw 5.7 ; de Beni Ourtilane du 10/11/2000 Mw=5.6). Dans le Rif marocain, la région d'El Hoceima a enregistré en 1994 et en 2004 des séismes de magnitude Mw 6.0 ; 6.4 respectivement. En Algérie du nord-ouest, cette sismicité est associée à des structures néotectoniques en plis et pli-failles de direction NE-SO et des mécanismes en failles inverses qui résultent d'une direction de compression NO-SE à NNO-SSE, avec un taux de raccourcissement de ~2mm/an lié à la convergence Afrique-Eurasie (Meghraoui & Doumaz, 1996). Cette sismicité principalement concentrée dans la partie ouest de l'Atlas Tellien montre que cette zone accommode une partie importante de la convergence Afrique Eurasie. Dans le Rif, cette sismicité est pratiquement toujours associée à des mécanismes en décrochement.

Le second chapitre présente les principes de base de l'interférométrie radar à ouverture synthétique (InSAR) et du code de modélisation Poly3Dinv. L'InSAR permet de mesurer la différence de phase entre deux images de la surface de la terre, prises à deux instants différents et correspondant au changement relatif du temps de trajet aller et retour du signal radar en un même point. Après avoir corrigé la phase engendrée par la topographie, les artefacts atmosphériques et la phase propre de chaque pixel, une image représentant un interférogramme est alors obtenue. L'interférogramme contient des franges qui traduisent le changement de l'état de la surface entre les deux prises de vues dans la ligne de visée du satellite avec une précision à l'échelle de la demi longueur d'onde du signal émis (bande C,  $\lambda/2 = 2.83$  cm dans le cas des satellites ERS et Envisat). Les données SAR ont été traitées en utilisant les programmes Sarscape et ROI\_PAC. Le code de modélisation Poly3Dinv qui est utilisé pour inverser les données de déformation de surface (InSAR et mesures de terrain) comporte une simulation de la dislocation sur des surfaces triangulaires (Thomas, 1993 ; Maerten et al., 2005). Ces surfaces permettent d'éviter les vides et les chevauchements inévitables lors de la modélisation par éléments rectangulaires (Okada, 1992). Par ailleurs cette méthode permet de construire des surfaces à géométries complexes et de mieux contraindre la modélisation des données géodésiques en champ proche (Maerten et al, 2005). Les résultats obtenus décrivent les caractéristiques physiques des failles sismiques et la répartition des déplacements cosismiques le long de la rupture.

Le troisième chapitre est consacré à la déformation active de l'Atlas Tellien et plus particulièrement au traitement et à l'analyse des interférogrammes du séisme de Zemmouri 2003, des séismes modérés d'Ain Temouchent 1999 et Mascara 1994. Le séisme de Zemmouri du 21 mai 2003, Mw 6.8 est le plus fort événement sismique enregistré dans la région d'Alger depuis 1716. Ce séisme de mécanisme inverse avec un épicode proche de la côte a induit un soulèvement côtier d'une moyenne de 50 cm sur environ 50 km de côte (Meghraoui et al., 2004). La position de la faille en mer responsable de ce séisme restait jusqu'alors sujette à débat mais les résultats liés au soulèvement côtier suggèrent une rupture NE-SO de 55 km de long, 17 km de large, située en mer entre 5 à 10 km de la côte, avec un moment sismique de  $2.8 \times 10^{20}$  Nm (Meghraoui et al., 2004). D'autres modèles proposent une faille située entre 15 et 30 km de la côte (Deverchère et al., 2005 ; Semmane et al., 2005).

Afin de déterminer les paramètres de ce séisme, j'ai traité les images SAR (IS2) du satellite ENVISAT et de celles du satellite RADARSAT (ST4). Malgré le nombre réduit d'images SAR de la zone épicode et du manque de cohérence, j'ai réussi à obtenir quatre interférogrammes cosismiques présentant des franges de déformation : Deux interférogrammes ENVISAT en mode ascendant et descendant couvrent la partie ouest de la zone épicode et deux autres interférogrammes RADARSAT en géométrie descendante couvrent entièrement la zone du séisme de Zemmouri.

L'analyse de ces interférogrammes a permis de déterminer l'étendue de la zone de déformation cosismique de manière plus précise. Par conséquent, la déformation de surface induite par le séisme de Zemmouri et observée par l'InSAR s'étend de Cap Matifou à l'Ouest jusqu'à la ville de Tighzirt à l'Est. Ces observations sont en accord avec les observations du soulèvement côtier. Le maximum de déformation qui se traduit par un fort gradient de franges est localisé dans la région de Boumerdes-Figuier. 14 franges peuvent être comptées sur cette zone de maximum de déformation sur les interférogrammes Radarsat et 16 sur les interférogrammes Envisat . Un autre fort gradient avec 9 franges, mais inférieur au précédent, est localisé dans la zone de Cap Djenet. Les interférogrammes RADARSAT plus sensibles aux mouvements horizontaux de par leur angle d'incidence de  $36^\circ$  ( $23^\circ$  pour Envisat IS2) montrent des franges décalées et inversées à l'Est de Boumerdes. L'interférogramme Envisat ascendant montre aussi deux franges décalées au Sud de Cap Matifou dans la même orientation que ceux observées sur les interférogrammes RADARSAT. Ces franges de déformation décalées et inversées sur les interférogrammes nous ont permis de mettre en

évidence des mouvements horizontaux dans cette partie ouest de la zone de déformation d'au moins 5.66 cm dans la ligne de visée. Les résultats de la modélisation sur 27 plans de failles placées régulièrement de la côte et jusqu'à 18 km en mer de l'épicentre suggèrent que la solution qui contraint au mieux les observations InSAR et les données du soulèvement côtier, est une faille courbe située à 8 km de la côte. Celle-ci est de 65 km de long et de direction N60°-65° à N95°-105° avec un pendage de 40° vers le Sud Est. Ce résultat corrobore celui de l'analyse des répliques du choc principal de 2003 (Ayadi et al., 2008). Le glissement inverse maximal en profondeur est de 5.7 m. Ce glissement est réparti autour de deux « patches » à l'Est et à l'Ouest de la faille et confirme une propagation bilatérale de la rupture suggérée par Yagi, 2004 et Delouis et al., 2004. Les mouvements horizontaux observés sur les interférogrammes s'expliquent par un glissement de 15 cm sur la faille de Thenia et qui aurait agit comme une barrière à la propagation de la rupture. Des études InSAR récentes sur des séismes côtiers tels que le séisme de Niigata-Ken Chuetsu-Oki (Japon, Mw 6.8) de San Simeon en Californie (2003, Mw 6.5) montrent la complexité du champ de déformation associé à ces séismes (Toda et al., in preparation; Wicks, 2006).

L'analyse et les résultats obtenus de cette étude ont été soumis au Journal of Geophysical Research (JGR).

Le séisme d'Ain Temouchent (Nord-Ouest de l'Algérie), de magnitude modérée (Mw 5.7) avec un mécanisme en faille inverse n'a pas induit de ruptures en surface et il n'existe pas d'enregistrements de répliques par un réseau local. L'étendue de la zone de déformation cosismique, l'épicentre ainsi que la faille sismogène ayant engendré ce séisme ont été jusque là mal connus. La magnitude modérée et la faible cohérence ne semblaient pas indiquer à priori une configuration idéale pour l'utilisation du SAR, cependant des exemples récents tel que le séisme d'Umbria-Marche de 1997 en Italie (Mw 5.7) ont montré l'efficacité du SAR pour des séismes modérés (Crippa et al., 2006). L'interférogramme cosismique d'Ain Temouchent montre des franges de déformation dans la zone épiscopentrale. Le champ de déplacement se présente comme un lobe de franges de direction NE-SO en accord avec le mécanisme au foyer. L'analyse de la forme du lobe de déformation dans sa partie sud caractéristique d'une proximité de la rupture a permis de définir une faille située au SE de ce lobe de franges de 20 km de longueur et 16 km de profondeur. Un pendage de 40° vers le NO, un moment sismique de  $5.1 \times 10^{17}$  Nm, et un glissement maximal inverse de 100 cm à 6km de profondeur. Les observations de terrain montrent un pli faille de direction NE-SO avec des dépôts Quaternaires récents déformés. La modélisation de l'interférogramme cosismique

suggère une rupture de 20km sur une faille aveugle de direction NE-SO avec un pendage de 40° vers le Nord-Ouest.

Le travail réalisé sur ce séisme est soumis à la revue Journal of Seismology.

Le séisme modéré de Mascara du 18 août 1994 (Mw 5.7) localisé dans les Mont des Beni Chouggrane (Nord Ouest de l'Algérie) n'a pas montré de failles de surface. Malgré la mauvaise cohérence dans cette zone, l'interférogramme calculé à partir des données ERS montre des franges orientées dans la direction NE-SO sous la forme d'un lobe de franges. La forme du lobe écrasée dans sa partie sud-est et circulaire dans sa partie nord-ouest suggère une rupture associée à une faille d'une longueur de ~20km orientée dans la direction NE-SO avec un pendage vers le NO.

Le chapitre quatre traite la séquence des séismes d'El Hoceima du 26 Mai 1994 (Mw 6.0) et du 24 Février 2004 (Mw 6.4). Le séisme d'El Hoceima du 24 février 2004 (Mw 6.4) est le plus fort événement enregistré dans le Rif marocain. Ce séisme qui n'a pas induit de traces de surface est associé à un mécanisme en décrochement avec un moment sismique de  $5.2 \times 10^{18}$  Nm (Global CMT). L'analyse et la modélisation des données SAR Envisat en mode ascendant et descendant permettent d'avoir une très bonne contrainte sur le plan de rupture. La solution qui explique au mieux les interférogrammes est une faille décrochante aveugle à coulissage dextre et d'une longueur de 21km, 16.5 km de profondeur avec un azimut N95° au sud avec un changement de direction N130° au Nord. Le moment géodésique obtenu est de  $6.8 \times 10^{18}$  N m avec un glissement maximum de 2.7 m à une profondeur de ~7km. L'analyse et les résultats obtenus de cette étude ont fait l'objet d'une publication au Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA) en 2006.

L'analyse et la modélisation des interférogrammes en mode ascendant et descendant des séismes de 1994 et de 2004 ont permis de mettre en évidence la relation entre deux séismes modérés et deux failles aveugles conjuguées dans le Rif. Le séisme de 1994 est associé à une faille de direction N 23° à coulissage sénestre alors que celui de 2004 à une faille à coulissage dextre de direction N 130° avec une composante inverse au SE de la faille. Le détail de l'analyse et des résultats de ce travail ont été publiés dans Earth and Planetary Science Letters (EPSL) en 2006.

Le cinquième chapitre traite l'application de l'InSAR aux séismes modérés associés à des plis failles actifs de la région ouest de l'Atlas Tellien. La corrélation des pli-failles actifs

et des franges des interférogrammes modélisées indique la dimension des ruptures et le moment sismique impliqué dans la déformation cosismique. D'autres pli-failles de l'Atlas Tellien qui ont généré des séismes et des ruptures de surface associées ont du produire un champ de déplacement comparable à celui observé sur les franges des séismes récents. L'analyse sismotectonique de cette région et la simulation du champ de déplacement des séismes d'El Asnam permet de mieux contraindre les caractéristiques physiques des pli-failles, avec ou sans rupture de surface.

En conclusion, même si les séismes traités dans ce travail n'étaient pas à priori des cas idéaux pour l'application de l'InSAR (faible cohérence, magnitude modérée, failles cachées ou aveugles, manque de données...etc), les résultats obtenus ont permis de connaître pour la première fois et avec précision le champ de déplacement induit par des séismes qui n'engendrent pas sur le terrain des évidences morphologiques claires. Par ailleurs l'InSAR a permis de mettre en évidence, pour le cas du séisme de Zemmouri associé à une faille cachée en mer, des complexités du champ de déplacement cosismique non observées auparavant. Dans le cas des séismes liés à des failles aveugles, l'InSAR a été d'un apport décisif quant à la localisation et l'identification de la rupture et de la déduction de ses paramètres en profondeur notamment quand la précision des enregistrements des répliques ne le permet pas. Les différents cas de déformation traités dans ce travail peuvent être utilisés comme étant une référence à des études futures de la déformation active dans cette région.

En perspective, cette thèse montre qu'il est essentiel de traiter systématiquement toutes les données SAR des séismes en Afrique du Nord. Les différents cas traités sur cette région montrent que même pour des séismes de magnitudes modérées ( $M_w < 6$ ) localisés dans des zones de faible cohérence il est possible de produire des interférogrammes montrant des franges de déformation. L'InSAR ayant déjà été efficacement utilisée pour l'étude de séismes de magnitude de 4.5 dans les montagnes de Zagros en Iran (Lohman & Simons, 2005) il serait donc nécessaire d'étendre l'utilisation de l'InSAR en Afrique du Nord à l'étude des séismes de magnitudes encore plus petites en particulier dans les zones semi-arides tel que l'Atlas Saharien en Algérie (caractérisées par une sismicité de magnitudes faibles à modérées mais avec une très bonne cohérence). Par ailleurs il serait utile d'entamer des études de PSInSAR (Permanent Scatterer InSAR) qui permettraient de suivre les déformations lentes en utilisant des réflecteurs au sol dans des zones urbaines ou des réflecteurs posés sur le terrain. Ceci permettrait d'évaluer les déformations post-sismiques et inter-sismiques qui peuvent exister

sur les structures actives de l'Afrique du Nord. Par ailleurs des mesures GPS en continu permettraient d'avoir des points de contrôle au sol qui aideraient à mieux contraindre et vérifier les mesures de PSInSAR.

En annexe je présente un article publié dans la revue Earth and Planetary Science Letters (EPSL) : (Cakir, Z., A. M. Akoglu, S. Belabbes, S. Ergintav, M. Meghraoui, 2005) m'avait permis de m'initier aux techniques de traitement SAR et d'aborder le cas des déformations lentes mesurées par interférométrie radar. Celui-ci traite de l'application de l'InSAR à une section en fluage sur le segment de Gerece de la faille Nord Anatolienne (Turquie). L'InSAR a permis d'observer des mouvements lents sur ce segment et d'en mesurer le taux de fluage qui est de  $8 \pm 3$  mm/an.