

TECHNOLOGIE INSAR : TECHNIQUE SPN (Stable Points Networks) POUR L'ANALYSE HISTORIQUE DES INSTABILITÉS DU SOL DE LA RÉGION D'ALGER. INTÉRÊT DANS LA RECONNAISSANCE DES SITES STRATÉGIQUES PÉTROLIERS EN ALGÉRIE

Azzedine BOUDIAF ⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Consultant en GEORISQUES, Enseignant Associé à l'Université des Sciences Montpellier2 (France).*

42 rue du Moulin à vent 34200 Sète (France) - Tél : +33 673 76 83 81 ,

Email: azzedine.boudiaf@free.fr

Résumé - La technique 'réseau de points stables' ou SPN (Stable Points Network) InSAR développée par ALTAMIRA Information [1] permet la détermination de l'historique (1992-2008) des mouvements du sol et des structures avec une mesure variant selon la rotation du satellites : tous les 11-35 jours selon le satellite jusqu'à 1-3 jours en combinant différentes orbites. La SPN permet de mesurer les déplacements verticaux dans les zones urbanisées ou industrielles avec une précision millimétrique. Le principe est basé sur la localisation au sol de l'ensemble des objets à forte rugosité (falaises, rochers, cavités du sol etc.) ou anthropiques (habitations et usines) pouvant être réfléchis et retransmis au satellite. La SPN s'appuie sur l'analyse d'une longue série de données satellitaires SAR sur une période d'au moins 4 mois à 2 ans selon le satellite. Cette suite de données permet de reconstituer l'évolution lente ou brutale du mouvement des structures constituant des réflecteurs constants.

La SPN est une technique pouvant mesurer des mouvements à grande échelle, non visibles et non mesurables par les moyens géodésiques classiques. Elle permet d'expliquer ainsi certaines pathologies liées aux fondations des infrastructures des zones analysées (fuites d'eaux usées dans les fondations de constructions localisées sur des sols gonflables ou tassant, fuites de produits industriels dans les bacs de stockage situés sur des sols instables). La SPN est également applicable aux futures zones de développement urbain (villes nouvelles) ou industriel (usines, installations pétrolières ou autres équipements d'énergie). Les informations sur la stabilité du sol du futur site sont un critère déterminant pour le choix définitif et donc de la sécurité des futures installations. Elle peut être également être utilisée comme système de surveillance et de veille des installations stratégiques (en installant des réflecteurs artificiels complémentaires au réseau naturel). La SPN a été mise en œuvre dans plusieurs villes : Barcelone, Londres, Paris, etc. En Algérie, l'interférométrie Radar InSAR a été utilisée dans la Wilaya d'Alger pour la période 1992-2002 soit 10 années avant le séisme de Boumerdes-Zemmouri du 21 mai 2003. Une importante subsidence de 3 cm/an a été mise en évidence au sud d'Alger et un soulèvement de 2mm/an a été mis en évidence à l'ouest, dans le Sahel. Cette instabilité du sol est associée à la déformation tectonique asismique (10 années avant le séisme du 21 mai 2003) et à l'activité humaine (pompage de la nappe phréatique de la Mitidja durant la période de sécheresse 1992-2000).

La présente communication a pour objectif de montrer les différentes techniques d'interférométrie existantes ainsi que leurs applications spécifiques. Nous présentons également les résultats d'une analyse par interférométrie radar satellitaire réalisée en 2004 dans la région d'Alger pour la période 1992-2000 afin de :

- ◆ Montrer la capacité de cette secousse tellurique à déformer le sol de la zone épacentrale (Boumerdès, Ain Taya) et loin de l'épicentre (Alger).
- ◆ Localiser de potentiels déformations tectoniques associées à la faille offshore de Boumerdes-Zemmouri
- ◆ Localiser l'existence de potentielles instabilités du sols (glissements et de terrains, éboulements rocheux sur le piémont de l'Atlas tellien (piémont à l'Est de Boufarik).
- ◆ Mesurer l'état de la subsidence de la Mitidja et du soulèvement du Sahel durant la période 2001-2008 et les conséquences du séisme de Boumerdès sur ces instabilités à grande échelle.

Les conclusions tirées de cette étude permettent de faire un état des lieux sur les déformations du sol des sites des installations industrielles et pétrolières opérationnelles. De telles études peuvent également être mises en œuvre dans le choix des futures installations pétrolières stratégiques du pays. Une instrumentation complémentaire peut également être mise en œuvre pour la surveillance géodésique terrestre et spatiale (pose de réflecteurs artificiels) pour la surveillance de la déformation du sol de toutes les infrastructures pétrolières du pays.

Mots-clefs: Interférométrie Radar InSAR, SPN, Envisat, ERS, Alger, séismes, glissements de terrain, subsidence du sol, historique des mouvements, sécurité des installations, AVAL.

1. INTRODUCTION

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) lançait en 1992 le premier satellite radar ERS-1 (Earth Radar Satellite). C'était un des premiers satellites d'une famille de satellites qui observent la terre dans la bande des micro-ondes. D'autres satellites similaires existaient auparavant comme le canadien Radarsat, ou ont existé, comme le japonais Japsat. Contrairement aux autres institutions spatiales, l'agence spatiale européenne, a depuis 1992, systématiquement enregistré les données mondiales et s'est ainsi constituée une base de données historique complète depuis plus d décennies. Les travaux réalisés dans ce domaine reposent sur les données issues des orbites ERS. Depuis 1992, ERS-2 et ENVISAT sont venus rejoindre ERS-1 qui a, lui, cessé de fonctionner début 2002. Ainsi s'est créée une orbite de référence sur lequel tous les futurs satellites européens viendront se placer.

2. TECHNIQUES D'INTERFEROMETRIE DIFFERENTIELLE CLASSIQUE

2.1. Principe général

Un satellite d'observation radar est typiquement en orbite polaire à 800 Km d'altitude et vise la terre avec un angle de 23°; la trace de l'orbite fait un angle de 8,5° degrés avec le méridien. Avec ces paramètres d'orbite, il repasse tous les 35 jours au-dessus du même point du fait que pendant que le satellite tourne autour de la terre, celle-ci se déplace. Ainsi, le point visé au jour J se retrouve dans la ligne de visée du satellite au jour J +35. Le satellite émet une onde radar cohérente (d'une seule fréquence) et crée donc sur la surface terrestre un spot radar représentant une surface elliptique de l'ordre de 100 Km de diamètre.

La surface terrestre ainsi illuminée réémet le train d'onde vers le satellite par simple réflexion électromagnétique (voir lois de l'optique ou de la sismique). L'enregistreur radar mesure pixel par pixel le temps aller retour de l'onde et l'intensité de l'onde (1). Compte tenu de la définition de l'enregistreur et des paramètres d'orbite chaque pixel représente environ 40 m² de surface terrestre et un tir radar stocke les données de plus de 10 millions de pixel. Chaque pixel ne contient pas seulement

l'information d'amplitude et de fréquence (l'équivalent de l'intensité et de la couleur en lumière visible), mais tout le signal sur quelques dizaines de nanosecondes de manière à avoir une information complète sur le signal réémis et le comparer au signal émis.

Lorsque le même satellite repasse 35 jours plus tard au-dessus de la même zone, il se trouve au moment du tir radar à une distance B_n de la position qu'il occupait lors du premier tir ; cette distance est appelée ligne de base. Cette situation est la même si l'on a affaire à un autre satellite circulant sur la même orbite et passant un jour après le premier, ce qui était le cas lorsque les satellites ERS-1 et ERS-2 fonctionnaient en tandem. La longueur de cette ligne fictive B_n varie entre 1 et 1000 mètres. La distance peut être exprimée en se rapportant à la figure 1.

Le temps mis pour effectuer le trajet aller retour $2.R_1$ s'exprime de la manière suivante :

$$2.R_1 = N_1 \cdot \lambda + \frac{\phi_1}{2\pi} \lambda \quad (1)$$

$$\lambda = c/f \quad (2)$$

- R : distance entre un point éclairé par un satellite et ce satellite
- l : longueur d'onde
- c : vitesse de la lumière dans le vide ou l'atmosphère
- f : fréquence d'émission radar
- N_l : nombre entier
- j : angle de phase en radian

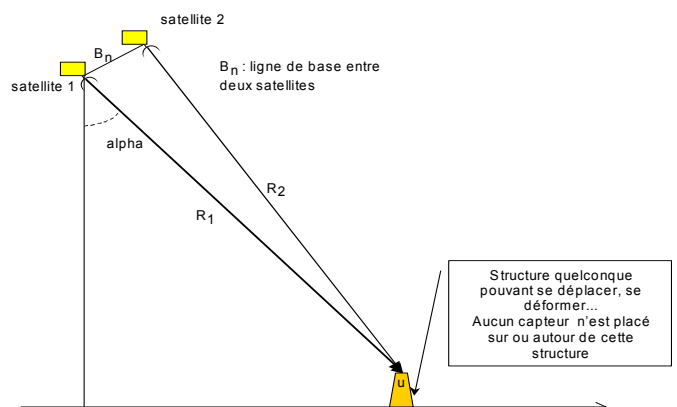


Fig.1 : Schéma du trajet des rayons lors de tirs radar

L'équation (1) exprime que la distance aller-retour de l'onde correspond à N fois la longueur d'onde plus une portion de cette longueur d'onde qui s'exprime par l'angle de phase.

Lorsque l'on travaille avec deux satellites on a deux fois la relation (1) et on obtient par soustraction ΔR : déplacement du réflecteur entre deux tirs radar

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \frac{\Delta N}{2} \lambda + \frac{\Delta \varphi}{4\pi} \lambda \quad (3)$$

En soustrayant deux images satellitaires on obtient une information qui correspond au deuxième terme de l'équation 3. On observe entre les différents pixels un "déroulement de la phase", c'est-à-dire une variation continue de j qui se marque par des franges d'interférence.

En admettant que la surface de la terre ne bouge pas entre deux passages du satellite, les franges d'interférence correspondent aux variations de relief. S'il y a mouvement de la surface terrestre, ces franges contiennent à la fois l'information de relief et de ce mouvement (1 frange = 2,8 cm). Avec deux mesures interférométriques, on décrypte le relief. Avec trois mesures interférométriques on dispose d'une information permanente : le relief, et une information variable : les éventuels mouvements du sol suivant la ligne de visée. Il suffit de connaître avec précision la ligne de base entre les satellites, leur position et l'angle de visée, d'utiliser les équations (3) et (2), et de remonter au DR, et de là aux déplacements verticaux et horizontaux.

Il faut appliquer successivement deux techniques :

- ◆ On lève d'abord l'ambiguïté de phase (détermination du ΔN) ; la technique est bien maîtrisée, puisque c'est la technique qui est utilisée continuellement pour le positionnement des satellites appartenant aux constellations GPS;
- ◆ On détermine ensuite le $\Delta \phi$ avec la plus grande précision possible. Celle-ci atteignant la seconde d'arc, la précision sur ΔR devrait être inférieure au millimètre.

Le passage du DR au DZ et au DX relève ensuite de techniques géométriques classiques qui dépendent de l'angle α de la ligne de base et de la direction du satellite lors des différents passages.

2.2. Précision de la technique d'interférométrie différentielle

Le premier problème est de déterminer précisément, la position et l'orientation des satellites au moment de l'émission du paquet d'ondes radar. Ce problème est commun à l'ensemble des satellites de positionnement, GPS et autres. Il est maintenant bien résolu et d'autant mieux que l'on utilise la position mesurée du satellite et non sa position calculée prévue avant son passage.

Pour le traitement interférométrique, c'est la ligne de base entre les deux satellites utilisés qui est finalement la variable géométrique prépondérante. Théoriquement plus la ligne de base entre les deux satellites sera petite, plus la résolution devrait être élevée sur DR. Sur le plan pratique, des lignes de base de l'ordre de 80 mètres sont satisfaisantes pour le traitement standard. Au-delà de 80 mètres, la ligne de base est trop grande car le trajet parcouru par l'onde est différent. De fait, il y a décohérence entre les signaux c'est-à-dire que leurs phases ne se corrélaient plus.

La précision sur l'estimation de la ligne de base et surtout sur la durée de traversée de l'atmosphère par l'onde électromagnétique sont les deux facteurs qui limitent la précision de la **technique interférométrique différentielle classique** (celle utilisant 2 images radar). La précision verticale est de l'ordre de 2 à 3 cm alors que la précision horizontale est de l'ordre de 10 m.

2.3. Exemple du séisme de-Zemmouri du 21/05/2003.

Les travaux de terrain que nous avons mené dans la région épacentrale un jour après le choc principal ont montré l'existence d'un important soulèvement cosismique de la côte allant de Ain Taya à Dellys. Ce soulèvement de 50 à 60 cm est a été attesté par la mise à l'air (surrection) de coquilles et algues marines qui normalement vivent et prolifèrent sous les premiers centimètres du niveau marin de la zone pélagique. Ces premières investigations géologiques de terrain nous ont permis de supposer que la déformation du sol n'était pas limitée à la côte méditerranéenne mais pouvait concerner une surface beaucoup plus grande s'étendant au-delà de la zone épacentrale. Cette déformation, probablement de grande amplitude et à grand rayon de courbure, localisée l'intérieur du continent ne pouvait pas être observée avec les seuls travaux et investigations de terrain où les marqueurs topographiques sont absents. La technique d'interférométrie Radar classique pouvait apporter une réponse assez claire sur l'étendue et la localisation précise de la déformation du sol à l'intérieur de la zone continentale.

Cette analyse post sismique ne pouvait se faire qu'à la condition d'avoir une acquisition de scène Radar avant et après le séisme. Or sur la zone de Boumerdes, l'acquisition post sismique n'a pu se faire que tardivement car aucune programmation de satellite avant la catastrophe n'a été mise en œuvre. En l'absence d'un programme de surveillance de la zone, il aura fallu attendre 69 jours (voir tableau ci-dessous) pour faire l'acquisition de la première scène radar post sismique et entamer les travaux d'évaluation de la déformation du sol à l'intérieur du continent.

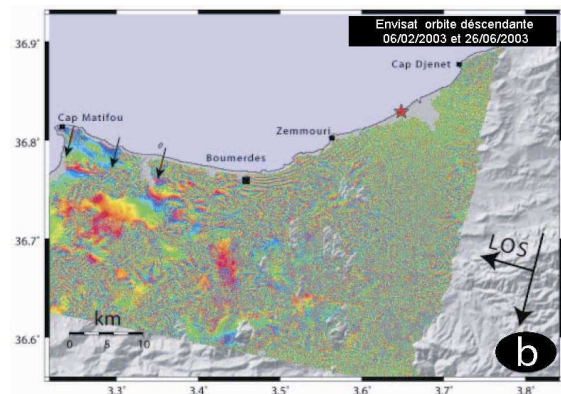
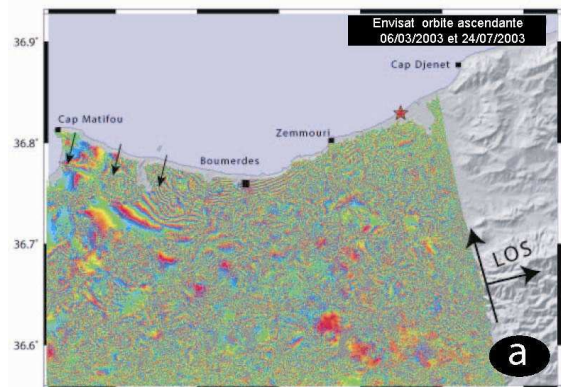
Satellites	Dates d'acquisition		Temps écoulé (jours)
	Avant le séisme	Après le séisme	
ERS-1 (Track-65D)	10/10/1997	Aucun	-
ERS-2 (Track-65D)	27/07/02	07/06/03	315
ERS-1 (Track-337D)	21/07/99	Aucun	-
ERS-2 (Track-337D)	28/03/02	22/01/04	303
Envisat (Track-65D)	Aucun	12/07/03	-
Envisat (Track-337D)	17/04/03	26/06/03	69
RadarSat-1	29/07/02	29/08/2003	395

TABLEAU 1 : Scènes radar satellitaire de la zone épacentrale

2.4. Travaux réalisés

L'une des plus importante étude d'interférométrie radar classique a été réalisée en avril 2008 dans le cadre d'une thèse de doctorat de l'université de Strasbourg [2].

La figure 2 montre l'existence des franges d'interférences concentriques autour de la zone épacentrale prouvant, comme nous l'avions suspectée, et de façon indéniable que la déformation cosismique a bien été enregistrée dans le sol comme le montre les franges d'interférence (chaque frange=2,8 cm de déplacement). Celles-ci sont très serrées à l'Est Zemmouri, à l'ouest de Boumerdes et au sud du lac de Reghaïa. Les causes des dégâts et dommages qu'a connues cette région sont amplement expliquées par le mouvement vibratoire lors de la secousse tellurique auquel vient se rajouter la déformation permanente et plastique du sol.



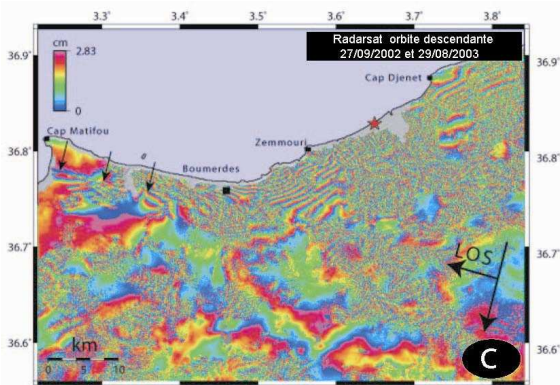


Fig.2 : franges d'interférences mesurées à partir d'images radar EnvisAT (ascendante et descendante) et RadarSAT montrant la déformation cosismique du sol lors du séisme du 21/05/2003 (D'après Bellabes S., 2008).

Bien que la technique d'interférométrie Radar différentielle apporte des réponses qualitatives quant à la déformation du sol suite à une importante modification instantanée de la topographie. Elle a l'avantage d'être économique car elle ne nécessite que deux images à traiter (une image avant l'évènement et une autre après). Elle ne permet en aucun cas d'asseoir des programmes de surveillance et de prévention des installations anthropiques (industrie, infrastructure et urbanisme). Les techniques d'interférométrie Radar Différentielle Avancée et SPN (Stable Points Network) développées par ALTAMIRA Information sont nettement plus adaptées et sont mises en œuvre à l'heure actuelle dans de nombreux pays.

3. TECHNIQUES D'INTERFEROMETRIE DIFFERENTIELLE AVANCEE

3.1. Principe général

Cette technique est identique à la technique différentielle classique sauf qu'elle utilise au moins 10 à 15 images. Elle permet l'observation et l'analyse de la déformation instantanée ou lente sur une période beaucoup plus longue. Comme cette technique, contrairement à la technique classique, prend en compte les corrections atmosphériques, la précision des mesures est meilleure. La précision verticale annuelle est de l'ordre de 0,2 cm et la précision de la verticale d'un point est de l'ordre du centimètre. La précision de localisation horizontale de 10 m reste inchangée.

Bien qu'utilisant plusieurs images, l'information sur la mesure de déformation reste qualitative et ne répond donc pas aux objectifs des programmes de prévention et de surveillance.

3.2. Exemple de la région de Hainan (Taïwan)

Taiwan est une des régions du globe unique par la rapidité des processus compressifs tectoniques mis en jeu où 1/8 de la sismicité annuelle du globe se situe dans cette zone. Malheureusement, l'étude des failles actives sur le terrain est impossible suite aux difficultés d'accès (jungle).

Dans la région de Tainan (Taïwan) située dans le Sud-Ouest de l'île, la technique d'Interférométrie Différentielle Avancée a permis la détection et la mesure de la croissance progressive d'un anticlinal sur lequel est la ville est érigée [3]. Le soulèvement de l'anticlinal atteint à son maximum 1,5 cm par an durant la période 1993-2000. La signature spatiale de la déformation a permis de proposer un modèle en "pop-up" pour expliquer le phénomène. Ainsi, l'interférométrie soulève la question du risque sismique dans cette ville de 1,2 millions d'habitants. Cependant, la comparaison entre les déformations à long terme et les déformations instantanées observées semble plutôt favoriser une déformation continue de l'anticlinal sur l'Holocène. Ceci montre que l'Interférométrie Différentielle Avancée est un outil opérationnel pour l'étude des déformations tectoniques actives à Taiwan. Les apports de la technique concernent à la fois la localisation, la caractérisation et la quantification des phénomènes.

Cette technique est complémentaire aux autres réseaux de surveillance (géodésiques ou sismologiques) déjà en place sur l'île dans la cadre des programmes de surveillance et prévention des risques sismiques et effets secondaires induits. L'ensemble des informations obtenues a permis de comprendre les phénomènes de déformations inter sismiques et surtout de surveiller toute accélération de la déformation pouvant être associée ou interprétée comme évènement précurseur d'un séisme majeur.

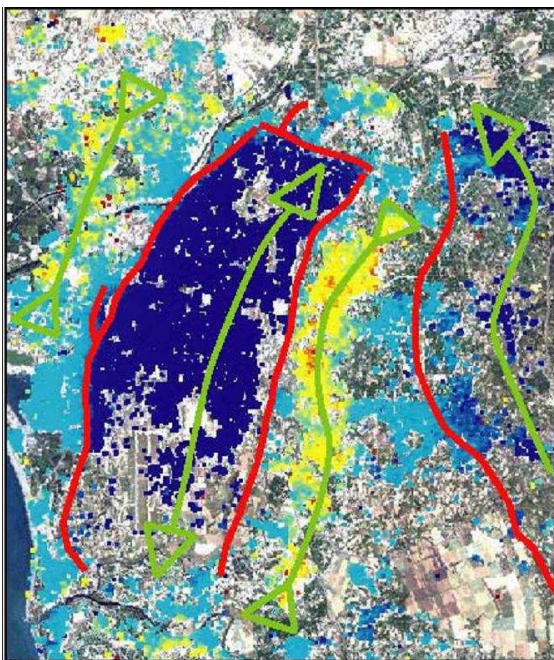
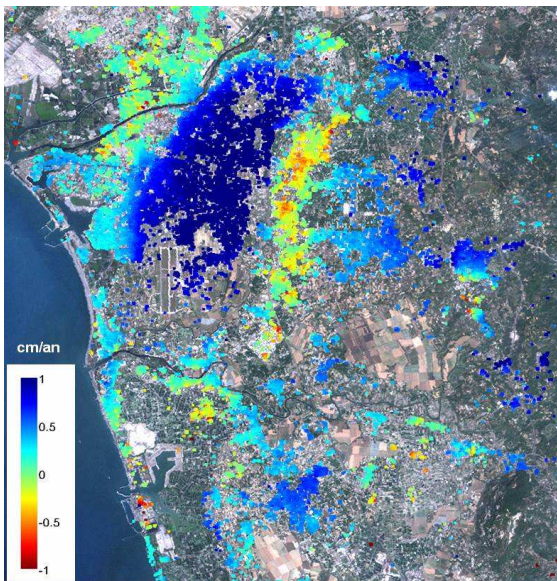


Fig. 3 : La technique Interférométrie Différentielle Avancée a permis la localisation précise de la déformation plicative active ainsi qu'une meilleure compréhension de la géologie complexe de cette zone (localisation précise et détermination de la géométrie des anticlinaux et synclinaux (flèches vertes))

4. TECHNIQUES SPN (Stable Points Network)

4.1. Principe général

La technique du réseau de points stables ou SPN a été mise au point par ALTAMIRA Information [1]. Elle est totalement différente des deux autres techniques classiquement décrites. Il n'y a plus de limitation de longueur de ligne de base et les corrections atmosphériques sont assez élaborées pour déterminer avec une grande précision des déplacements de l'ordre du millimètre.

La technique consiste à repérer sur des images radar un certain nombre de points réfléchissants qui se trouvent en permanence sur les différentes images et à utiliser ces *réflecteurs permanents* pour appliquer le traitement mathématique adéquat. La notion de réflecteurs "permanents" suppose le traitement d'au moins 15 images au minimum.

L'Ecole Polytechnique de Milan a également développé une technique similaire de réflecteurs permanent PS.

4.2. Exemple de la région d'Alger

La technique SPN est l'outil le mieux adapté pour l'analyse des déplacements de sols, tant sur le plan vertical qu'horizontal, dans les zones urbaines et peri-urbaines. Ces déplacements de sols peuvent être rapides et instantanés (séismes, glissements de terrain et effondrements souterrains) ou lents (fluage, tassements différentiels, subsidence induites par le rabattement des nappes phréatiques et mouvements tectoniques asismiques).

L'analyse des réflecteurs permanents de la Wilaya d'Alger [4], a été intégrée dans le projet de vulnérabilité de la Wilaya d'Alger aux catastrophes naturelles (inondations, glissements de terrain, inondations et pollution des sols et des nappes) mené entre 2044 et 2006 par un groupement de bureaux d'études pour le compte de la Wilaya d'Alger. Elle avait pour objectif de suivre les déplacements verticaux et horizontaux des constructions pour la période 1992- 2002 et de faire un état des lieux sur :

- les anciens glissements de terrain ayant affecté la zone urbaine et péri urbaine,
- les tassements de sols induits par une sécheresse et un pompage excessif dans les nappes phréatiques,
- les éventuelles déformations cosismiques du sol induites par le séisme de Ain Benian du 04/09/1996
- les éventuelles déformations du sol (soulèvements et/ou subsidence) probablement associées à une phase pré-sismique du tremblement de terre de Zemmouri-Boumerdès du 21/05/2003.

Pour appliquer cette technique, il a été nécessaire de traiter plusieurs images satellitaires SAR. Deux orbites ont été utilisées la 337 (39 images) et la 65 (41 images). Ce sont deux orbites Nord-Sud. La liste des images traitées est reportée dans les tableaux 2 et 3.

date	satellite	mps (jour)	date	satellite	mps (jours)
20/04/92	ERS-2	0	27/02/97	ERS-2	1774
16/11/92	ERS-1	210	08/05/97	ERS-2	1844
14/06/93	ERS-1	420	17/07/97	ERS-2	1914
23/08/93	ERS-1	490	21/08/97	ERS-2	1949
01/11/93	ERS-1	560	25/09/97	ERS-2	1984
29/03/95	ERS-2	1073	30/10/97	ERS-2	2019
03/05/95	ERS-2	1108	08/01/98	ERS-2	2089
17/08/95	ERS-2	1214	12/02/98	ERS-2	2124
25/10/95	ERS-2	1283	19/03/98	ERS-2	2159
26/10/95	ERS-2	1284	28/05/98	ERS-2	2229
30/11/95	ERS-2	1319	10/09/98	ERS-2	2334
03/01/96	ERS-2	1353	15/10/98	ERS-2	2369
04/01/96	ERS-2	1354	04/03/99	ERS-2	2509
07/02/96	ERS-2	1388	21/07/99	ERS-2	2648
08/02/96	ERS-2	1389	22/07/99	ERS-2	2649
22/05/96	ERS-2	1493	09/12/99	ERS-2	2789
23/05/96	ERS-2	1494	10/08/00	ERS-2	3034
05/09/96	ERS-2	1599	14/09/00	ERS-2	3069
10/10/96	ERS-2	1634	23/11/00	ERS-2	3139
14/11/96	ERS-2	1669	28/12/00	ERS-2	3174
23/01/97	ERS-2	1739			

TABLEAU 2 : Données traitées sur l'orbite 337

Les données traitées depuis l'orbite 337 couvrent la période du 24/04/1992 au 28/12/2000. Les images sont essentiellement issues des bases de donnée ERS-2, opérationnel en 1995, ce qui limite les effets des comportements différents entre satellites.

date	satellite	emps(jours)	date	satellite	emps(jours)
15/07/92	ERS-1	0	04/04/98	ERS-2	2089
19/08/92	ERS-1	35	09/05/98	ERS-2	2124
23/09/92	ERS-1	70	13/06/98	ERS-2	2159
28/10/92	ERS-1	105	18/07/98	ERS-2	2194
02/12/92	ERS-1	140	26/09/98	ERS-2	2264
21/04/93	ERS-1	280	05/12/98	ERS-2	2334
30/06/93	ERS-1	350	09/01/99	ERS-2	2369
17/11/93	ERS-1	490	24/04/99	ERS-2	2474
06/10/95	ERS-2	1178	07/08/99	ERS-2	2579
07/10/95	ERS-2	1179	20/11/99	ERS-2	2684
17/08/96	ERS-2	1494	25/12/99	ERS-2	2719
26/10/96	ERS-2	1564	13/05/00	ERS-2	2859
04/01/97	ERS-2	1634	17/06/00	ERS-2	2894
28/06/97	ERS-2	1809	22/07/00	ERS-2	2929
02/08/97	ERS-2	1844	26/08/00	ERS-2	2964
06/09/97	ERS-2	1879	30/09/00	ERS-2	2999
10/10/97	ERS-2	1913	04/11/00	ERS-2	3034
11/10/97	ERS-2	1914	09/12/00	ERS-2	3069
15/11/97	ERS-2	1949	13/01/01	ERS-2	3104
28/02/98	ERS-2	2054			

TABLEAU 4: Données traitées sur l'orbite 65

Les données traitées depuis l'orbite 65 couvrent la période du 15/07/1992 au 13/01/2000. Elles sont issues des bases de donnée de ERS-1 jusqu'en 1995 et de ERS-2 jusqu'en 2000. Un géocodage des données a été réalisée sur des images du satellite IKONOS.

La figure 4 montre le résultat obtenu après le traitement. La localisation horizontale des points réflecteurs a une précision de l'ordre de 1 mètre en Nord-Sud et de trois mètres en Est-Ouest. La précision des mesures des déplacements verticaux est de 1 millimètre.

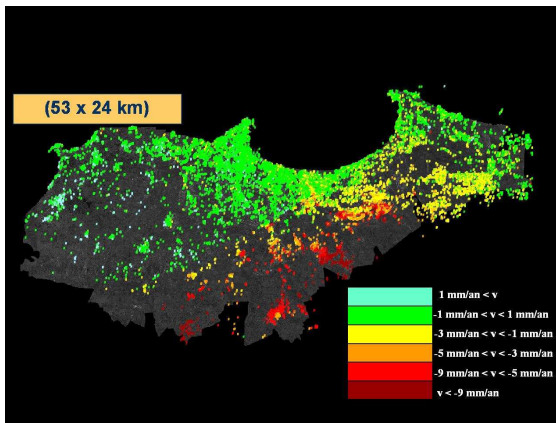


Fig. 4 : Résultat sur la déformation du sol de la Wilaya d'Alger

La figure 4 montre les déplacements du sol sur toute la zone d'étude (déplacements représentés par un code de couleur). Cette figure montre une stabilité relative de l'ensemble de la zone urbaine d'Alger (en vert et jaune). La zone au sud d'Alger (plaine de la Mitidja) montre une importante subsidence (en rouge) évaluée à 3 cm/an. Un soulèvement d'environ 1 à 2 mm/an du Sahel d'Alger à l'ouest de la Wilaya est probablement associé à des mouvements présismiques puisque la mesure couvre la dernière décennie avant la séisme de Zemmouri du 21 mai 2003.

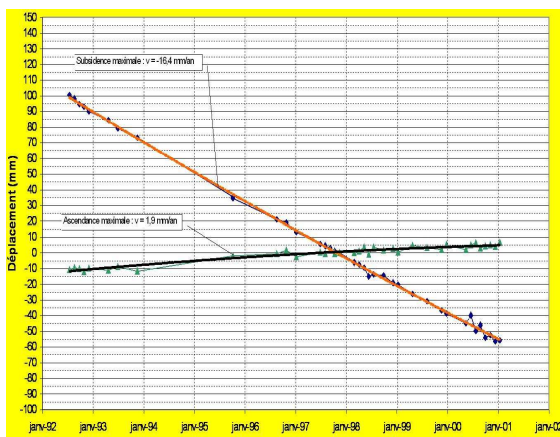


Fig. 5 : Série temporelle montrant une forte subsidence de la plaine de la Mitidja et un léger soulèvement du Sahel d'Alger

Comme cela est montré sur les figures 4 et 5, c'est toute la Mitidja qui apparaît en subsidence importante. Les points qui montrent la plus forte subsidence se trouvent tous sur la zone méridionale de la Wilaya (3 cm/an).

Le soulèvement constaté à l'ouest n'est pas un mouvement habituel ; il résulte de mouvements liés à la tectonique (sismique ou asismique) ou parfois au pied de loupe de glissement de terrain.

Si on ne garde que les points en soulèvement de plus de 3 mm/an, on constate qu'ils ont assez éparées avec une concentration à l'Ouest au niveau de Zeralda et trois points dans la zone urbaine d'Alger au niveau du glissement du Telemly (Parc Sfindja et rue Didouche Mourad). Le point qui se soulève le plus se trouve au niveau de la limite de Bordj El Kiffan et de Bordj El Bahri, dans le coude de l'oued, 1,6 Km avant qu'il ne se jette dans la mer. Une série d'autres points se trouve dans le même secteur.

On constate que globalement pour la Wilaya d'Alger :

- ◆ La plaine de la Mitidja s'enfoncé. Plus exactement, elle bascule vers le Sud avec un plan de décrochement correspondant pratiquement à la limite linéaire du contact du reliefs du Sahel avec la plaine entre Bab Ali Oued Karma et El Harrach .
- ◆ L'enfoncement se fait pratiquement suivant une charnière parallèle à la côte Nord-Est passant par Ain Taya.
- ◆ La zone de l'oued el Harrach entre la Mitidja et la Méditerranée présente également des subsidences notoires, liés au moins en partie à la nature des sédiments de l'oued.
- ◆ La ville d'Alger proprement dite, ne montre aucune subsidence notable. La ville est stable et présente quelques points ascendants. On peut noter que la corniche côtière est stable, ainsi que l'Aurassi. Toutefois quelques points montrent des subsidences notoires, mais sont isolés ; ce n'est pas pour autant que leur isolement en réduit leur signification

- ♦ La zone du Sahel entre Cheraga et l'oued Mazafran montre un soulèvement relatif. Il faut se rappeler que cette zone a été le siège d'un tremblement de terre le 16 septembre 1996 et que l'épicentre était localisé en mer non loin de cette côte. Plus à l'est entre Cap Matifou et l'oued Raghāia nous constatons des soulèvements probablement associés à une déformation présismique car cette zone a subi un important soulèvement cosismique de 50 cm environ suite au séisme de Zemmouri-Boumerdes du 21 mai 2003.

4.3. Application aux installations classées de la région d'Alger

Pour donner une idée sur les déformations du sol pouvant engendrer des déplacements ou mouvements des structures, nous avons traité trois exemples dont deux infrastructures pétrolières.

Les mouvements très lents de l'ordre du mm/an sont cumulés sur la période d'étude soit 10 années environ. Bien que impossible à mesurer par les méthodes classiques terrestres telle que les campagnes de nivellement topographique, les déplacements de ces structures être sérieusement endommagées et engendrer de graves problèmes de fuites surtout au niveau des conduites enterrées plus précisément au niveau de la liaison entre la conduite et le bac de stockage. Nous présentons deux exemples de la région d'Alger sur un fond d'image IKONOS de 1 m de résolution au sol.

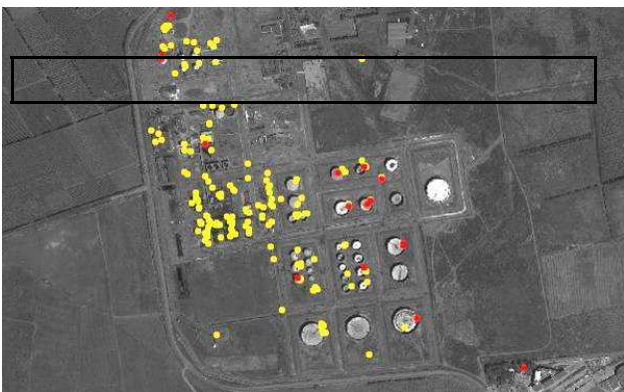


Fig 6. Raffinerie de Sidi Razine de Baraki

La figure 6, montre l'unité NAFTEC de Sidi Razine de Baraki située dans la partie septentrionale de la zone de la Mitidja où a été décelée une importante subsidence. Les installations pétrolières n'échappent pas à ce mouvement généralisé du sol puisque les réflecteurs en rouge sont situés sur les principaux bacs de stockage. Un seul bac de stockage ne montre pas de déplacement (bac en blanc situé à droite) qui serait soit réellement stable soit nouvellement construit c'est-à-dire après la période d'analyse 1992-2000).



Fig. 7. Centre de stockage NAFTAL du Caroubier

La figure 7 montre le centre de stockage NAFTAL du Caroubier. Les réflecteurs ne sont pas en rouge comme dans le cas de la raffinerie de Baraki mais les petits déplacements du sol (réflecteurs en jaune) peuvent également engendrer des fuites de produits au niveau de la jonction entre les bacs et les canalisations.

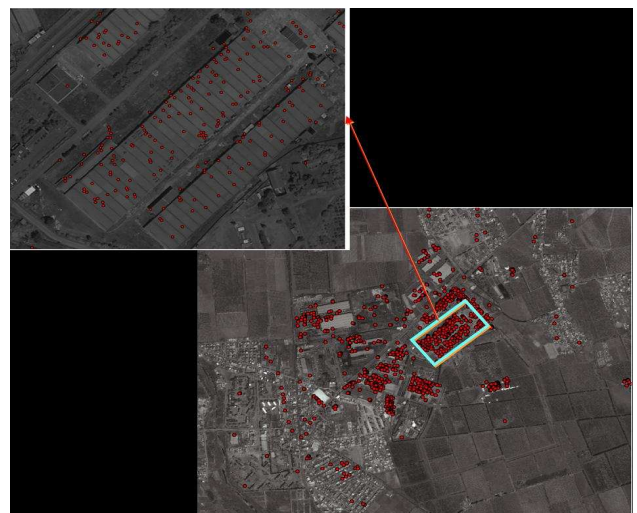


Fig.8. Unité industrielle dans la région de Sidi Moussa

Cet exemple est situé dans la zone rouge de la figure 4 où importante subsidence de 2 à 3 cm/an a été mise en évidence. Cette usine à la périphérie du village de Sidi Moussa présente plusieurs dizaines de réflecteurs. Nous ne connaissons pas l'activité de cette installation industrielle mais de sérieuses questions doivent être posées quant à la prise en charge d'un plan d'exposition au risque en zone urbaine type AZF.

5- Conclusion

La technique d'interférométrie radar satellitaire des réflecteurs permanents type SPN montre qu'elle est nettement plus adaptée que les deux autres techniques classiques d'interférométrie différentielle et Différentielle Avancée. Cette technique est bien adaptée à la couverture globale d'une zone urbaine, péri urbaine ou industrielle relativement étendue. Elle apporte une précision inégalée des mesures des déplacements au sol et peut être bien intégrée dans les plans de surveillance et de prévention pour la sécurité des installations.

Pour la région d'Alger pour la période 1992-2002, cette technique a clairement démontré l'existence d'une subsidence de la plaine de la Mitidja, la stabilité du site urbain de la ville d'Alger et le faible taux de surrection des zones du Sahel (Maximum vers Zeralda-Ain Benian) et de la région de Ain Taya Bordj el Bahri. **Ces importants phénomènes de déformation du sol étaient méconnus et l'interférométrie radar par réflecteurs permanents type SPN a été la seule technique à le démontrer.** L'oued el Harrach à son approche de la Méditerranée est caractérisé par des tassements parfois importants de structures fondées sur les alluvions récentes. Certains bâtiments sans doute anciens ou fondés sur pieux ne montrent pas de mouvement. L'interprétation finale a permis d'intégrer ces résultats pour l'élaboration des cartes des zones de risques associés à des phénomènes secondaires à subsidence tels que les effondrements de karsts souterrains ou de cavités induites par l'activité humaine et glissements de terrain.

Au vu des résultats que nous avons obtenus, toutes les études réalisées montrent que cette technique est adaptée aux conditions de très faibles déplacements associés à des phénomènes naturels rapides ou lents ou induits par l'homme. Ces déplacements de sols peuvent être des précurseurs de mouvements très violents tels que les séismes ou les glissements de terrain ou être simplement des déplacements qui pourraient, à long terme, causer de sérieux dégâts à des sites stratégiques telles que grandes villes d'Algérie ou les installations industrielles classées ou non.

REFERENCES

- [1] M. Crosetto M., E. Biescas, J. Duro, J. Closa, A. Arnaud : Quality assessment of advanced interferometric products based on time series of ERS and Envisat SAR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (Apr 2008)*.
- [2] S. Bellabes. 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. *Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg 1, Sciences de la vie et de la terre, Géophysique, 28 avril 2008*.
- [3] E. Pathier : Apports de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan ; *Thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée, 9 décembre 2003*.
- [4] A. Boudiaf; P. De Sloovere, A. Ferretti: L'Interférométrie Radar Satellitaire de Précision (IRSP) : une nouvelle conception de l'instrumentation des sols et des structures pour la gestion et prévention des risques liés au sol : cas de Toulouse et Gardanne (France) et de Ain Temouchent et Alger (Algérie). *Séminaire international ONU-ESA-ASAL sur l'utilisation des techniques spatiales pour la gestion et prévention des catastrophes, Alger, 22-26 mai 2005*.