

## RESERVOIR MONITORING A PARTIR D'IMAGES SATELLITES APPLICATIONS POUR LES ACTIVITÉS AMONT DE SONATRACH EN ALGÉRIE

*Johanna GRANDA <sup>(1)</sup>, Alain ARNAUD <sup>(1)</sup> et Azzédine BOUDIAF <sup>(2)</sup>*

*<sup>(1)</sup> ALTAMIRA INFORMATION S.L., Córsega 381-387, 08037 Barcelone (Espagne)*

*Tél.: +34 93 183 57 50 , E-MAIL : johanna.granda@altamira.information.com*

**Résumé** – L'objectif de cet article est de présenter la technologie InSAR en prenant comme exemple la ville d'Alger et illustrer les applications de cette technologie InSAR aux activités AMONT de Sonatrach en Algérie.

La technologie InSAR (= Interférométrie par système de radar à ouverture synthétique) est une méthode de mesure, capable de détecter des mouvements du sol avec une précision millimétrique à partir d'images acquises par les satellites radar depuis 1992. Les mesures sont prises depuis l'espace et ne requièrent pas d'installation en surface.

ALTAMIRA INFORMATION a développé sa propre chaîne interférométrique différentielle nommée SPN «Réseau de Points Stables», capable de traiter simultanément de grandes séries d'images radar et obtenir ainsi des mesures millimétriques des déplacements du sol. Les résultats sont livrés en format SIG, et peuvent être analysés à distance par des ingénieurs de réservoir, sans qu'il soit nécessaire de visiter le site.

La technologie InSAR contribue de différentes manières aux activités AMONT des grandes sociétés pétrolières mondiales et pourra par conséquent être mise en œuvre pour l'entreprise Sonatrach:

- Pour des sites d'**EXTRACTION DE GAZ ET DE PÉTROLE**, la technologie InSAR permet de surveiller la subsidence ou le gonflement du terrain pour savoir si les infrastructures d'extraction de Sonatrach sont en sécurité. Les mesures peuvent également servir de premières alertes sur une probable compaction du réservoir.

La très haute précision de la mesure autorise la détection de mouvements des réservoirs profonds. De plus, la couverture des images satellites (100 x 100 km) permet de mesurer les effets de subsidence sur un grand rayon, bien au-delà des limites du réservoir.

- Dans le cas spécifique de **HAOUD BERKAOUI**, la technologie InSAR permet de mesurer avec une précision millimétrique l'avancée du cratère, avec des données historiques depuis 2003 à 2008. Cette technique permet également de suivre, dans le futur, l'évolution du phénomène d'effondrement souterrain et de vérifier s'il atteint les infrastructures de Berkaoui et des sites urbains environnants.
- Pour le suivi des sites de **STOCKAGE DE GAS/ CO<sub>2</sub>** : Les mesures de mouvement du sol contribuent à l'évaluation de la stabilité du site de stockage, puisque des gonflements ou des enfoncements millimétriques pourraient être des indicateurs de fuites potentielles.
- La **CARTOGRAPHIE**, en particulier la création de **MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN (MNT)** d'une précision verticale de 9 m avec des pixels de 2 m x 2 m. Le nouveau satellite radar TerraSAR-X permet de créer des MNTs avec des données actualisées.

Pour illustrer la valeur de cette technologie spatiale innovante avec des exemples concrets, la présentation inclura des études de cas qui illustrent l'expertise d'ALTAMIRA INFORMATION dans le domaine de l'InSAR. Les exemples porteront sur quelques projets menés en Algérie, et plusieurs autres projets conduits pour des compagnies internationales dans le domaine AMONT du gaz et du pétrole.

**Mots-clés** : Interférométrie Radar InSAR, SPN, Envisat, ERS, , Radarsat, TerraSAR-X, Alger, Berkaoui, MNT, subsidence du sol, élèvement du terrain, historique des mouvements, sécurité des installations, AMONT

## 1. INTRODUCTION A LA TECHNOLOGIE INSAR

La technologie appliquée pour le réservoir monitoring à partir d'image satellites est dénommée InSAR ou «interférométrie radar à ouverture synthétique».

Le «radar à ouverture synthétique» (ou Synthetic Aperture Radar, SAR en anglais) est un système imageur de très haute résolution. Les images satellites radar, contrairement aux images satellites optiques, permettent la mesure exacte de la distance entre le satellite et le sol.

« L'interférométrie » signifie qu'il y a superposition des ondes provenant de deux images afin de pouvoir détecter des différences de distance mesurée en fraction de longueur d'onde. Pour détecter des mouvements du sol, les images satellites, prises à des moments différents, sont comparées entre elles. Pour la cartographie en trois dimensions, des images prises sous des angles différents sont utilisées, afin de mesurer un effet stéréoscopique.

### 1.1. Les satellites radar

Un satellite radar orbite continuellement autour du globe, à une hauteur d'environ 800 km. Il fait le tour de la terre en 100 minutes environ durant lesquelles la terre est, également elle-même, en rotation. Au bout de 100 min le satellite ne revient pas à l'endroit exact du passage précédent, mais se déplace plus à l'est. Ainsi, les orbites du satellite couvrent entièrement la terre entre 11 et 45 jours en fonction du satellite.

Les satellites les plus utilisés par ALTAMIRA INFORMATION sont ERS, Envisat, TerraSAR-X, Radarsat-1 et Radarsat-2.

- Les satellites ERS et Envisat sont des satellites de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Grâce à leur archive de données, il est possible de conduire des études historiques depuis 1992 jusqu'à aujourd'hui. L'Europe et le Nord du Maghreb sont des zones particulièrement bien couvertes.



Fig. 1 : Les satellites radar de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) : ERS-2 lancé en 1995 et Envisat lancé en 2002

- Les zones peu ou mal couvertes par les satellites ERS et Envisat, sont complétées par les données des satellites canadiens Radarsat-1 et Radarsat-2.



Fig. 2 : Les satellites radar de l'Agence Spatiale Canadienne (CSA) : Radarsat-1 lancé en 1995 et Radarsat-2 lancé en 2007

- ALTAMIRA INFORMATION utilise également TerraSAR-X, de l'Agence Spatiale Allemande (DLR) dont les données sont distribuées par Infoterra GmbH (un consortium entre EADS et DLR), surtout pour des études de surveillance à partir de données programmées. Avec sa haute fréquence de revisite de 11 jours, il est possible d'actualiser les données mensuellement [1].

Fig. 3 : Le satellite radar TerraSAR-X de l'Agence Spatiale Allemande (DLR) lancé en 2007

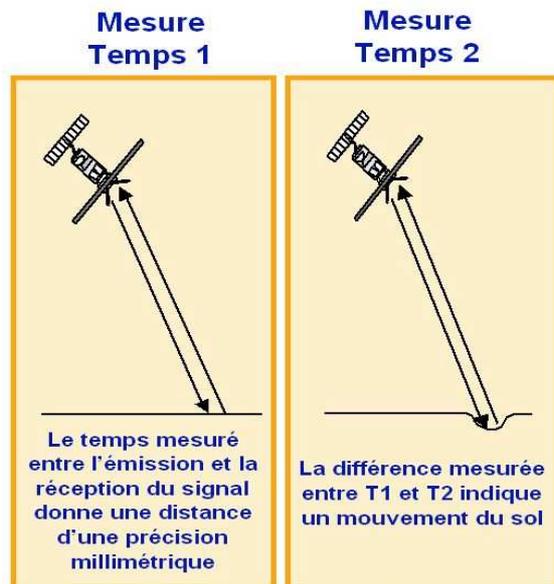


### 1.2. Les mesures du mouvement du sol

Pour mesurer les mouvements du sol avec une précision millimétrique, plusieurs images satellites acquises à des dates différentes sont comparées entre elles.

Les données acquises par les satellites contiennent la distance entre le satellite et le sol en fractions de longueurs d'onde. Les longueurs d'onde radar utilisées varient entre 2 et 6 centimètres. Cette mesure est extrêmement précise. Si, au cours du temps, plusieurs mesures sont comparées entre elles, la variation des fractions de longueurs d'onde indique le déplacement ou le mouvement du sol pendant cette même période de temps.

Fig. 4 : Fonctionnement de la technologie InSAR pour mesurer le mouvement du sol (schéma)



Cette explication est fortement simplifiée car des effets additionnels doivent être corrigés, comme par exemple la contribution des effets atmosphériques ou les changements de position du satellite.

Les résultats des mesures sont données sous forme de cartes de mouvement du sol, où chaque point de mesure indique en couleur la valeur annuelle de mouvement pendant la période d'analyse. Par exemple le rouge signifie 1 cm de subsidence annuelle, le bleu 1 cm de gonflement annuel et le vert indique que le terrain est stable.

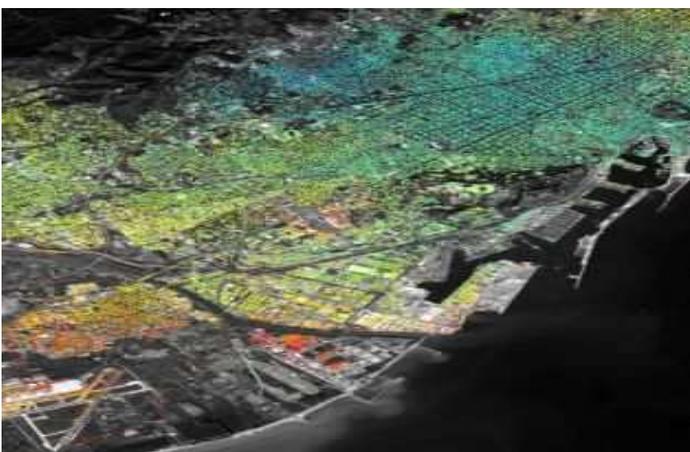


Fig. 5 : Carte de mouvement du sol moyen annuel pour la ville de Barcelone entre 2003 et 2008. Le rouge indique 1 cm de subsidence, le bleu 1 cm de gonflement et le vert indique un sol stable

Le radar peut mesurer deux types de points de mesures : Les « points naturels » existants et les « réflecteurs artificiels » qui doivent être installés.

Les « points naturels » sont des points existants sur le terrain qui reflètent le signal du radar, comme par exemple les toits des bâtiments, des structures métalliques ou des rochers en zones arides.

L'avantage des points naturels est que les mesures peuvent avoir lieu sans travaux d'installation du fait que des points pré-existants servent comme de points de réflexion du signal radar. Ces points naturels offrent également la possibilité de mesurer l'historique du mouvement du sol grâce aux archives d'images, principalement des satellites ERS, Envisat et Radarsat, disponible depuis 1992 sur une majeure partie des terres émergées.

En l'absence de points naturels, par exemples dans des forêts ou dans des zones de végétation sans constructions, le mouvement du sol se mesure à l'aide de réflecteurs artificiels à installer dans la zone d'intérêt. Ces réflecteurs sont des trièdres d'aluminium qui sont orientés vers le satellite pour garantir des points de mesures.



Fig. 6 : Réflecteur d'aluminium installé dans la zone d'intérêt pour garantir un point de mesure

### 1.3. La chaîne Stable Point Network (SPN) développée et brevetée par ALTAMIRA INFORMATION

Le traitement par Réseau de Points Stables (SPN) est une technique de traitement interférométrique différentiel avancé développée par ALTAMIRA INFORMATION. C'est le résultat de 5 ans de recherche dans le domaine de l'analyse des données D-InSAR réalisés en collaboration avec le CNES (Agence spatiale française) et l'ESA (Agence spatiale européenne). La chaîne SPN a été le premier processeur d'interférométrie avancé à être capable de fusionner les données de la mission Envisat avec l'archives existante ERS1/2 [2]. Le logiciel SPN utilise la chaîne d'interférométrie DIAPASON pour le traitement de toutes les données SAR, l'étape de coregistration et la génération d'interférogrammes. Le logiciel de traitement DIAPASON est devenu depuis sa création en 1992, l'un des outils de référence au niveau mondial.

A partir d'un jeu d'images radar, le traitement SPN génère trois produits principaux. La vitesse moyenne de déplacement qui peut être calculée à partir de 6 images. Le fichier d'erreur de MNT qui peut être généré à n'importe quelle résolution. Et pour finir, l'extraction de séries temporelles de déformation qui nécessite 15 à 30 images, en fonction de la vitesse de déplacement par rapport à l'intervalle de temps entre acquisitions. Dans tous les cas, plus le nombre de données est important plus la qualité de la mesure est améliorée.

Si un MNT de la zone est disponible, le logiciel est également capable de donner les coordonnées cartographiques exactes des points analysés avec une précision de localisation horizontale finale d'environ 2m.

Un point remarquable de la chaîne SPN réside dans sa flexibilité : le logiciel peut travailler à n'importe quelle résolution et à partir des données de tous les satellites radar actuellement disponibles.

## 2. CONTRIBUTION DE LA TECHNOLOGIE INSAR POUR LES ACTIVITÉS AMONT DE SONATRACH

La technologie InSAR fournit de nombreuses applications pour l'industrie du gaz et du pétrole [3].

Les applications ci-dessous mentionnées se limitent aux applications des activités AMONT.

### 2.1. Extraction de Gaz et de Pétrole

La technologie InSAR permet de surveiller la subsidence ou le gonflement du terrain pour savoir si les infrastructures d'extraction de Sonatrach sont en sécurité. Ces mesures peuvent également être interprétées comme de signes précurseur d'une possible compaction du réservoir.

La très haute précision de la mesure autorise la détection des mouvements de réservoirs profonds. De plus, la couverture des images satellites (100 x 100 km) permet de mesurer les effets de subsidence bien au-delà des limites du réservoir.

**Le premier exemple de projet** montre les résultats d'un **site d'extraction de Pétrole en Amérique de Sud**. L'intérêt principal dans cet exemple était de mesurer le mouvement du sol dans le passé. Pour cela des images d'archive acquises depuis 2002 ont été analysées.

Les points de mesure du résultat final correspondent entièrement à des « point naturels » sans installation de réflecteurs.

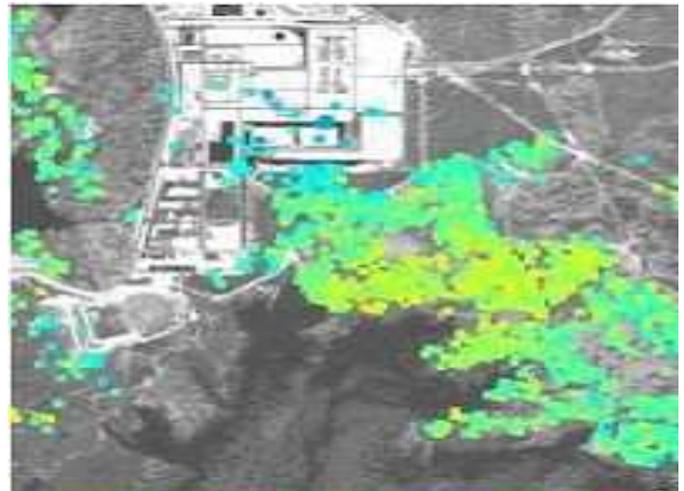


Fig. 7 : Carte de mouvement moyen annuel pour un champ d'extraction de pétrole en Amérique du Sud, mesuré avec des points naturels. Le bleu indique un gonflement de 0,5 cm, le rouge une subsidence de 0,5 cm et le vert indique un sol stable.

Les résultats montrent une légère subsidence dans la partie centrale (couleur jaune), près des installations. Grâce aux infrastructures dans la zone et à un sol rocheux, une haute densité de points de mesure a été obtenue. Par contre dans la zone du sud il n'y a pas suffisamment de points de mesure, car il s'agit d'une zone de végétation qui - pendant le période d'analyse - change trop pour refléter un signal cohérent, condition nécessaire pour pouvoir obtenir des mesures.

Cet exemple montre que des mesures millimétriques peuvent être conduites dans le passé, sans installation de réflecteurs, si les conditions de terrain sont favorables.

En Algérie, la majorité des terrains, surtout dans le sud de l'Algérie sont des terrains arides avec très peu de végétation. Ainsi, il est probable que la densité de points de mesure soit suffisamment haute, et puisse encore être améliorée par la présence de constructions et infrastructures pétrolières.

L'exemple suivant montre les **résultats de mesures dans un champ d'extraction de pétrole au Canada**. Ces mesures ont été prises exclusivement avec des réflecteurs pour garantir des points de mesure dans un terrain avec peu de points naturels.

Comme l'intérêt principal de ce projet était la surveillance avec des données actualisées plus qu'une analyse du passé, et qu'il s'agissait de mesurer des points très concrets, l'installation de réflecteurs était la solution la plus appropriée.

Dans une première phase du projet 60 réflecteurs doubles ont été installés sur le terrain. La combinaison de différentes orbites permet de prendre des mesures chaque 1 à 3 jours, avec des actualisations qui sont envoyées au client chaque mois.

Les résultats des mesures présentés ici, sont des isolignes, qui indiquent avec une précision millimétrique un gonflement du terrain en rouge et une subsidence en bleu :

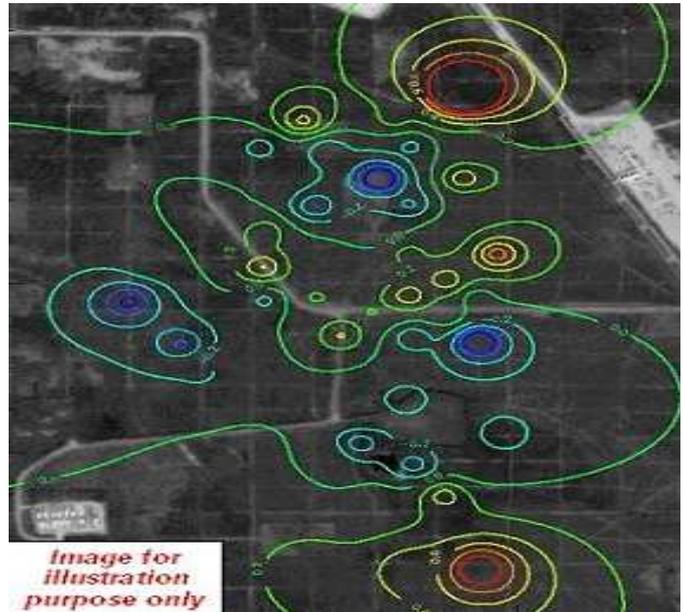


Fig. 8 : Carte de mouvement moyen annuel pour un champ d'extraction de pétrole au Canada, mesuré avec des réflecteurs. Le rouge indique 1 cm de gonflement, le bleu 1 cm de subsidence et le vert indique un sol stable

Ce projet a eu un grand succès au Canada de sorte qu'après cette première phase, les points de mesure ont été densifiés avec l'installation de nouveaux réflecteurs, et une extension des mesures sur le champ complet est actuellement en cours de planification.

Pour les projets d'extraction de gaz et pétrole en Algérie, il sera important d'évaluer si le mouvement de terrain peut être mesuré avec des points naturels (comme dans l'exemple en Amérique du Sud) ou si des réflecteurs doivent être installés pour garantir des points de mesure dans le futur (comme dans le cas du Canada).

## 2.2. Le cas de Haoud Berkaoui

La zone du cratère de Haoud Berkaoui pourrait bénéficier de la technologie InSAR. Formé en 1986 avec un diamètre de 200 m, le cratère s'est affaissé avec le temps.

Dans l'année 2001, ALTAMIRA INFORMATION a conduit une étude de basse résolution sur l'avancement du cratère. Cette analyse incluait 6 images satellite acquises entre les années 1991 et 1996 qui ont été comparées entre elles. L'affaissement du cratère se voit dans la quantité de franges de différentes couleurs, chaque frange représentant un affaissement de 2,8 cm. La technique InSAR qui permet de comparer deux images entre elles s'appelle « InSAR classique ».

Par exemple entre Juillet 1992 et Mai 1993, trois franges peuvent être observées dans l'analyse InSAR ce qui signifie un affaissement d'environ 8,4 cm.



Fig. 9 : Résultat d'une analyse InSAR classique de l'affaissement du cratère du Berkaoui, où 2 images de Juillet 1992 et Mai 1993 ont été comparées entre elles. Les deux franges de couleur dans la zone du cratère représentent un affaissement d'environ 5,6 cm pendant la période entre les deux images.

L'inconvénient de la technique d'InSAR classique est que les résultats d'affaissement ne sont pas corrigés des effets atmosphériques.

Pour filtrer ces effets qui peuvent amener à des résultats erronés, plusieurs images doivent être comparées entre elles simultanément, avec la méthode Réseau de Point Stables (Stable Point Network = SPN). Avec cette technique il faut au moins 20 – 25 images satellite pour atteindre des résultats d'une précision millimétrique.

Aujourd'hui il y a 25 images du satellite Envisat disponibles dans l'archive qui couvrent la période 2003-2007. L'illustration suivante montre que ces images ne couvrent pas seulement la zone du cratère et le champ pétrolier autour mais également la zone d'Ouargla.

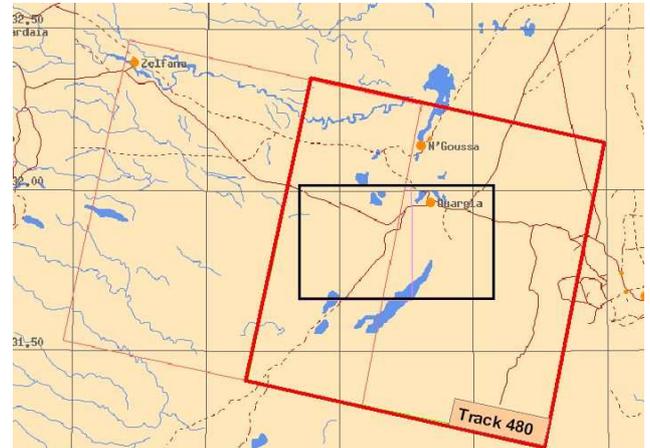


Fig. 10 : Couverture de Berkaoui et de ses alentours (Ouargla) par le satellite Envisat. Aujourd'hui 25 images sont disponibles pour conduire une analyse millimétrique de l'affaissement du cratère et ses alentours entre 2003 et 2007.

Une analyse SPN calculera le déplacement moyen annuel de la superficie pendant la période 2003-2007 avec une précision millimétrique. Les résultats seront présentés dans une carte de déformations du sol. Pour augmenter la densité de points de mesure, il est recommandé d'installer des réflecteurs.

## 2.3. Le stockage de gaz et CO<sub>2</sub>

La technologie de surveillance par satellite radar est utilisée pour évaluer la stabilité des zones de stockage souterrain, comme par exemple le stockage de gaz ou bien plus actuellement le stockage de CO<sub>2</sub>. Une surveillance continue de la zone d'intérêt peut détecter des gonflements de la superficie avec une précision millimétrique qui pourraient être des indicateurs de fuites potentielles. La connaissance d'un gonflement millimétrique aide à identifier préventivement les zones de fragilité pour pouvoir réagir à temps.

L'exemple suivant montre **une analyse historique d'une zone de stockage de gaz dans le sud de la France**, analysée grâce à l'archives 1992-2007, afin de connaître les tendances de mouvement du terrain.

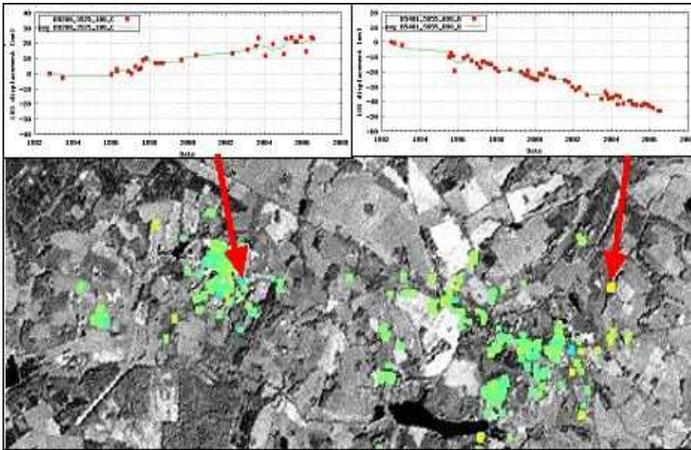


Fig. 11 : Carte de mouvement moyen annuel pour une zone de stockage de gaz souterrain au Sud de la France, qui couvre la période 1992-2007.

Il ressort que cette zone de stockage d'une profondeur de plus de 3.000 m présente des points de subsidence (points jaunes) et, dans d'autres parties, des points de léger gonflement (points bleus-verts). Dans certaines zones, il n'y a pas suffisamment de points de mesure.

Aussi, pour garantir des points de mesure dans le futur, des réflecteurs ont été installés, surtout près de puits où il y a un grand intérêt à connaître le mouvement du sol.



Fig. 12 : Réflecteurs installés dans la zone de stockage de gaz à proximité des puits pour garantir des points de mesure dans le futur

En Algérie la technologie pourrait s'appliquer aux zones de stockage de gaz, mais également aux zones qui seront utilisées pour la séquestration de CO<sub>2</sub>.

#### 2.4. La cartographie : Les modèles numériques de terrain (MNT)

Les images radar permettent différents types de cartographies telles que la détection de nappes d'huile, des images structurales, la cartographie de pentes ou la détection de changements. Par contre, un des produits les plus demandés de cartographie radar est le Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Avec le nouveau satellite TerraSAR-X, une précision verticale de 9 m avec des pixels de 2 m x 2 m peut être atteinte.

Comme (contrairement aux images optiques) les images radar peuvent se prendre de jour comme de nuit, et comme le signal radar n'est pas stoppé par les nuages, la réalisation d'un MNT est garantie. Ainsi, la création d'un MNT actualisé d'une zone d'intérêt peut se réaliser en 3 à 4 semaines.

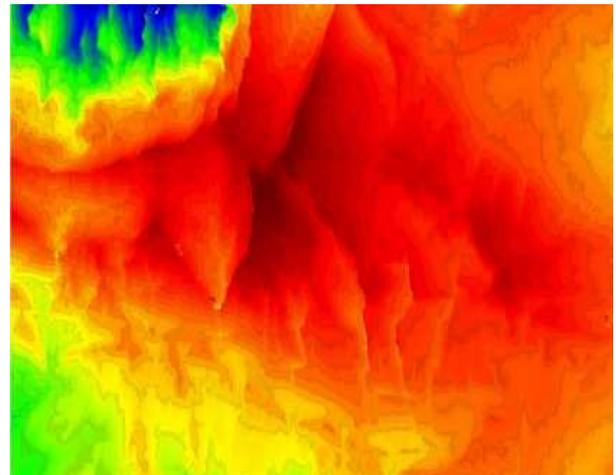


Fig. 13 : Modèle Numérique de Terrain (MNT) créée pour une zone d'exploitation de pétrole au Maghreb avec des images de TerraSAR-X

### 3. CONCLUSIONS

La technologie InSAR est de plus en plus utilisée pour les applications dans le domaine du gaz et du pétrole.

Le lancement de nouveaux satellites de haute résolution, le perfectionnement constant du logiciel et l'expérience acquise dans le domaine du gaz et du pétrole, contribuent à rendre l'InSAR plus pertinente dans les activités Amont des entreprises du secteur

Par ailleurs, de part sa proximité géographique avec l'Europe, l'Algérie bénéficie d'une bonne couverture des satellites européens, ce qui favorise la réalisation de projets autour de la technologie InSAR pour contribuer à la sécurité et à l'efficacité des activités Amont.

### REFERENCES

- [1] O. Mora, J. Granda, E. Biescas, A. Urdiroz : TerraSAR-X high resolution SAR data : Ground motion and mapping applications for infrastructure, oil & gas and public health domain. EUSAR 2008, Friedrichshafen (Germany), 02-05 June, 2008.
- [2] A. Arnaud, N. Adam, R. Hanssen, J. Inglada, J. Duro, J. Closa, M. Eineder: ASAR ERS interferometric phase continuity. IGARSS 2003, Toulouse (France), 21-25 July, 2003.
- [3] A. Arnaud, J. Granda, G. Cooksley, M. de Faragó : Reservoir Monitoring using radar satellite images . World Petroleum Congress 2008, Madrid (Spain), 01-05 July, 2008.