

Liste des publications

1. Kaveh H.F., Fruneau B., Deffontaines B., Duro J. et Arnaud A., 2008. Apports de l'interférométrie radar (DINSAR ET PSI) à l'étude du retrait gonflement d'argile dans l'est du bassin Paris. *Symposium SEC 1,2 et 3 septembre 2008 Paris Marne la Vallée.*
2. Kaveh H. F., Deffontaines B., Fruneau B. 2007. Apports d'un Système d'Information Géographique et de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain induits par l'aléa sécheresse : Applications à l'Est de l'Île-de-France. *Revue Française Géotechnique* n°120-121, pp. 201-214.
3. Kaveh H.F., Fruneau B., Deffontaines B., Duro J. et Arnaud A., 2009. Swelling soils monitoring through PSI and DINSAR interferometry : Applications on eastern Paris surroundings (France), submitted to G15/NH11.4 Symposium EGU Vienne april 2009 egu2009@copernicus.org
4. Mehdi Ben Hassen, Heydar Frédéric Kaveh, Benoît Deffontaines, 2008. Contributions of interferometry radar for the study of the weak deformations generated by the behaviour of argillaceous materials under extreme climate: Application to the area of Lagny (East Paris,France), International Conference "URBISTICS AND DEVELOPMENT": Today's Challenges and Paths of the Future Hammamet, Tunisia, from March 9th until March 12th, 2008

Publications

1

APPORTS DE L'INTERFEROMETRIE RADAR (DINSAR ET PSI) A L'ETUDE DU RETRAIT GONFLEMENT D'ARGILE DANS L'EST DU BASSIN DE PARIS

CONTRIBUTION OF INTERFEROMETRY (DINSAR and PSI) FOR SWELLING SOILS MONITORING IN EAST OF THE PARIS BASIN

Heydar Frédéric KAVEH¹, Bénédicte FRUNEAU¹, Benoît DEFFONTAINES¹, Javier DURO^{1,2}, et Alain ARNAUD²

1 Université Paris-Est, Laboratoire de Géomatériaux et de Géologie de l'Ingénieur (G2I), 5 Bd Descartes, Champs-Sur-Marne, 77454 Marne-La-Vallée, Cedex 2, France.

2 Altamira information, Parc Technologique du Canal, 10, avenue de l'Europe - F-31520 Ramonville Saint-Agne, France.

Contacts : frederic.kaveh@univ-mlv.fr, benoit.deffontaines@univ-mlv.fr, fruneau@univ-mlv.fr, javier.duro@altamira-information.com, alain.arnaud@altamira-information.com

RÉSUMÉ – La présence d'argiles aux propriétés gonflantes peut conduire dans certaines conditions à des variations de volume des sols, susceptibles d'induire des déplacements en surface et affecter le bâti. La méthode d'interférométrie radar différentielle (DINSAR), qui permet de mesurer les déplacements de la surface du sol à partir de deux images radar acquises à des dates différentes, se révèle peu performante sur l'Est du Bassin de Paris. En revanche, la méthode de suivi de réflecteurs permanents (Interférométrie PSI) à partir d'un grand nombre d'images radar, permet de décrire précisément dans le temps les déplacements de points particuliers (favorables à la rétrodiffusion de l'écho radar), et présente un fort potentiel tout particulièrement sur l'Est du Bassin de Paris affecté lors des dernières sécheresses géotechniques.

Mots clef : *Sécheresse géotechnique, Retrait-gonflement d'Argile, Interférométrie, DINSAR, PSI, SIG, Noisy-le-Grand, Villiers-Sur-Marne, Est bassin de Paris.*

ABSTRACT –

Swelling soils may induce, under various climatic conditions, surface displacements that affect small buildings. The aim of this work is to monitor through new interferometric methods those small displacements. Radar differential interferometry (DINSAR) method which enables one to map surface displacements from two radar images acquired on a specific area gives poor results in the east Paris Basin highly affected by the recent dryness hazards. It contrasts with Persistent Scatterer Interferometry (PSI) revealing precisely the seasonal behaviour of the displacements above swelling soils from a huge amount of radar images. This new application

presents high potential to better understand the geologic processes and the natural hazard induced.

Keywords : *Geotechnic drought, swelling clays, Interferometry, DINSAR, PSI, GIS, Noisy-le-Grand, Villiers-Sur-Marne, East Paris basin.*

1. Introduction

Un sol, dont la composition minéralogique en argile gonflante est importante, est susceptible de retrait pendant une période de sécheresse, puis de gonflement lors du retour de l'humidité. Ce phénomène de Retrait Gonflement d'Argile (RGA ci-après) se traduit par des variations différentielles du volume des sols, qui provoquent des dommages importants à terme sur le bâti.

Les périodes récentes de sécheresse de 1989-1991, 1996-1997, 2003, puis dernièrement l'été de 2006, ont mis en évidence la vulnérabilité des constructions individuelles sur des sols sensibles à la sécheresse dans l'Est du bassin de Paris (figure 1). Ainsi, pour l'année 2003, ce risque naturel est devenu en France, dans le cadre du régime des catastrophes naturelles, le deuxième poste d'indemnisation de part les montants engagés (1343M€), derrière les inondations d'après compte rendu de la Caisse Centrale de Réassurance d'avril 2007.

Les périodes de sécheresse géotechnique sont étudiées à l'aide de données météorologiques telles que la température et les précipitations efficaces. Ces données mensuelles de MétéoFrance présentées à la figure 2 sont issues de la station de Melun (située à 30km au Sud Est de Paris). Elles permettent d'apprécier, de manière qualitative uniquement, les périodes sèches et humides, afin d'effectuer des comparaisons avec les valeurs de déplacements mesurés par interférométrie radar.

L'interférométrie différentielle radar est une technique exploitant l'information de phase de deux images radar complexes acquises à des dates différentes pour mesurer les déplacements de la surface terrestre entre ces deux dates. Afin d'étudier les mouvements liés au RGA, on combine des données radar acquises autour des périodes de sécheresse connues. Deux techniques sont mises en œuvre ici : l'interférométrie différentielle « classique » (Differential Interferometry SAR - DINSAR), et la technique plus récente dite des réflecteurs ou diffuseurs permanents (Persistent Scatterer Interferometry - PSI).

L'objectif de ce travail est de montrer les résultats et les limites de ces deux techniques appliquées à la problématique du retrait gonflement d'argile (RGA) et d'autre part de préciser ses mécanismes à l'aide de données thématiques spécifiques : occupation du sol (IAURIF), carte géologique (BRGM), images aériennes (BdOrthos IGN) et cartographie de l'aléa réalisée par le BRGM (www.argiles.fr).

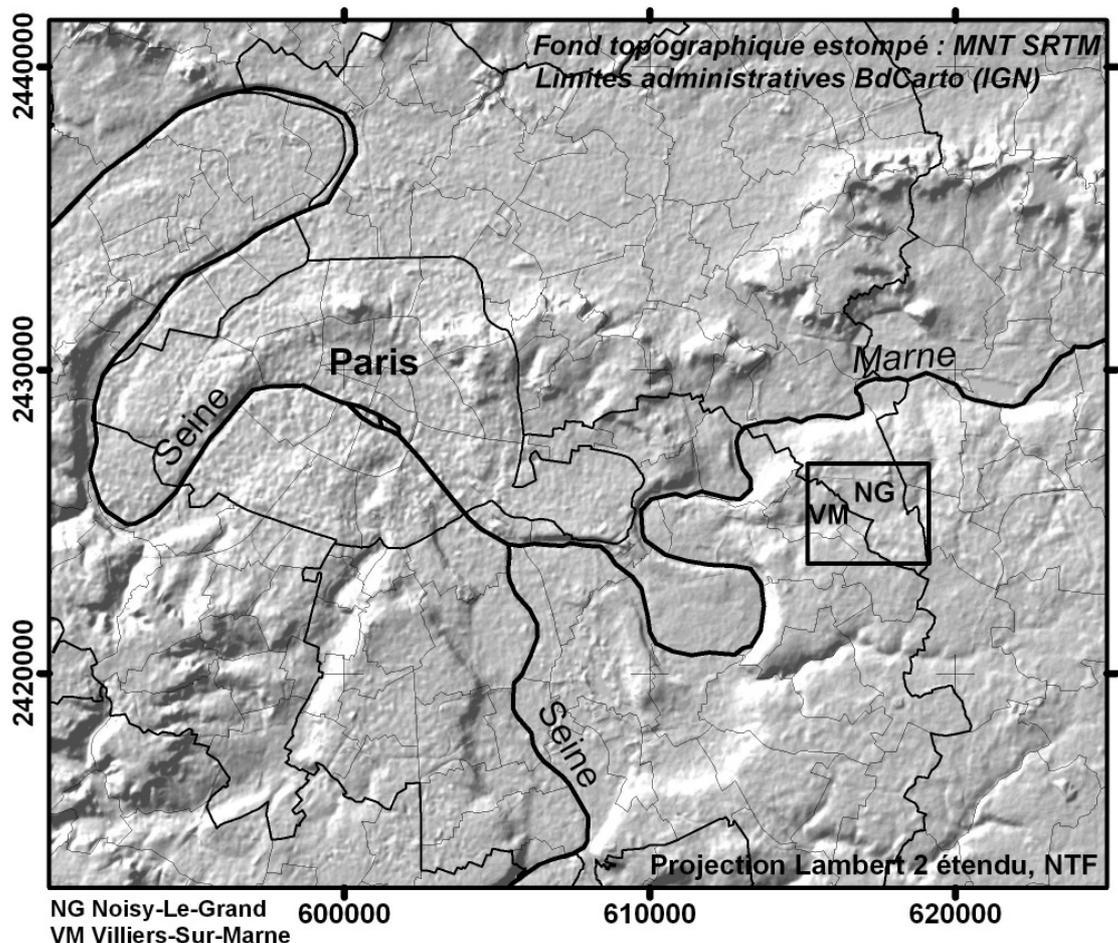


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude dans l'Est Parisien (cadre noir). Les villes de Noisy-le-Grand et Villiers-sur-Marne sont situées sur la terminaison occidentale du plateau de Brie sous tendue par deux formations d'argiles gonflantes (les argiles vertes de Romainville et les marnes blanches de Pantin) et entaillée par la Seine à l'ouest et la Marne au nord.

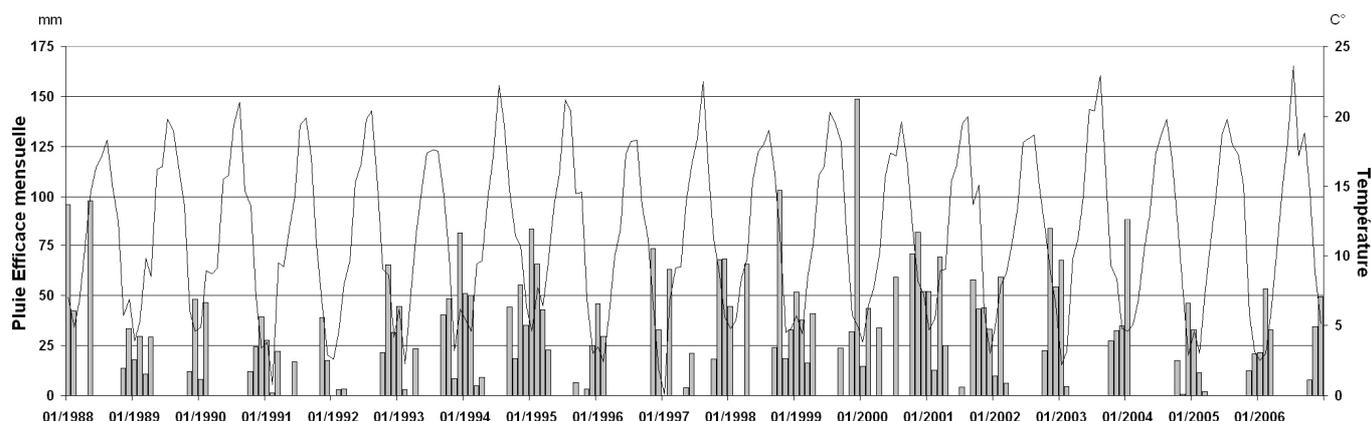


Figure 2 : Données climatologiques pour la station de Melun représentées par un histogramme de la Pluie Efficace (bâtonnet en grisé) corrigée en mm par mois et la courbe de températures en degrés C° par mois (*données sources : Météo France*). Les surfaces hachurées en rouge indiquent les périodes de sécheresse géotechnique d'après la sinistralité.

1. L'interférométrie différentielle DINSAR appliquée au suivi du RGA

1.1. Technique DINSAR

L'interférométrie radar, dont une définition très large est donnée par Bamler et Hartl (1998), regroupe l'ensemble des méthodes utilisant « au moins deux images radar complexes pour obtenir des informations supplémentaires sur les objets présents dans une seule image radar, en exploitant l'information de phase du signal ». Pour étudier les déplacements de la surface du sol, en particulier ceux causés par le RGA, le paramètre d'acquisition qui doit nécessairement varier est la date d'acquisition.

On calcule alors un interférogramme par différence de phase, pixel à pixel, des deux images radar acquises à deux dates distinctes, dans des conditions de prise de vue proches. Pour un pixel donné, la différence de phase (déphasage), possède plusieurs contributions décrites de la façon suivante :

$$(eq.1) \Delta\varphi = \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_{dc} + \Delta\varphi_r + 2k\pi$$

$\Delta\varphi$: différence de phase.

$\Delta\varphi_d$: différence de phase liée au déplacement éventuel du sol, mesuré selon la ligne de visée.

$\Delta\varphi_a$: différence de phase due au changement des conditions atmosphériques entre les acquisitions d'images

$\Delta\varphi_t$: différence de phase liée à la topographie du site.

$\Delta\varphi_{dc}$: différence de phase issue des décorrélatons géométriques et temporelles (engendrées par les variations d'état de surface, et par les variations de prise de vue).

$\Delta\varphi_r$: différence de phase résiduelle (bruit) issue des traitements (recalage, enregistrement SAR).

L'interférogramme est constitué de franges, car la phase n'est connue que modulo 2π . Afin de déterminer les déplacements, il est nécessaire de s'affranchir de la composante de topographie, à l'aide d'un modèle numérique de terrain par exemple : c'est le principe de l'interférométrie différentielle. La décorrélation géométrique, source de bruit dans les interférogramme, peut être réduite en ne gardant que les couples d'images pour lesquelles la distance inter-orbite (ligne de base) est faible. Quant à la décorrélation temporelle (perte de cohérence), qui apparaît lors de modifications de l'état de surface, elle constitue une des limites principales de la technique, notamment dans les zones à fort couvert végétal. Enfin, la composante atmosphérique est responsable de variations de phase (et donc d'artefacts) significatives, parfois difficiles à discriminer des variations de phase induites par les déplacements, car de même amplitude et étendue spatiale.

L'interférométrie DINSAR a montré des résultats pertinents pour décrire des déplacements liés à des évènements sismiques (Pathier *et al.* 2003), des glissements de terrain (Fruneau *et al.* 1995) (Manunta *et al.* 2006), de la subsidence liée à des activités anthropiques tels le pompage d'eau (Fruneau *et al.* 2005) (Tomás *et al.* 2005), affaissement minier (Guéguen *et al.* 2007). Quels sont les résultats obtenus par cette technique appliquée au phénomène RGA ?

1.2. Résultats

L'analyse d'interférogrammes consiste principalement à distinguer les différentes contributions de phases au sein de l'image pour isoler la seule composante $\Delta\varphi_d$ (mesure du déplacement). Une frange interférométrique, interprétée en terme de déplacement, représente un déplacement le long de la ligne de visée du radar dont la valeur vaut une demi longueur d'onde du radar, soit 2,8 cm pour le radar embarqué à bord des satellites ERS1&2, et Envisat. Après déroulement des franges, on peut ainsi estimer la composante du vecteur de déplacement de la surface du sol selon la ligne de visée du capteur.

Deux interférogrammes obtenus à partir de couples d'images ERS d'orbites 24502 et 19358 (22.03.1996 et 02.01.999) et ENVISAT d'orbites 8536 et 11041 (18.10.2003 et 10.04.2004) ont été choisis pour leur cohérence élevée et les faibles artefacts atmosphériques. La sélection des interférogrammes a été faite pour encadrer les périodes de sécheresse de mars/avril 1996 et de juillet/août 2003. Une des images est prise lors de l'événement de sécheresse, et la seconde lors du retour à l'équilibre des sols.

La cohérence du couple 8536/11041, ainsi que l'amplitude de l' image radar ENVISAT 8536 sont données en figure 3. L'image de cohérence (figure 3.2) montre clairement la forte cohérence du milieu urbain dense sur la ville de Paris (couleur claire), contrastant avec une cohérence relativement faible et éparse en milieu pavillonnaire dans l'Est Parisien (couleur sombre). Les milieux végétalisés sont bien identifiables visuellement car leur cohérence y est très faible.

La figure 4 présente les deux interférogrammes sélectionnés (figures 4.1 et 4.4), ainsi qu'un zoom sur la zone d'étude (figures 4.2 et 4.5). Enfin, on utilise un seuillage de la cohérence (seuil de 0.6) (figure 3.2), pour masquer les interférogrammes (figures 5.3 et figure 5.6) et éliminer les zones bruitées non interprétables.

Les couples sélectionnés (figure 4.1 et 4.4) ne font pas apparaître de déformations à l'échelle du 1/250.000. Seules de légères variations de teinte (bleu clair sur bleu sombre) apparaissent sur le couple 8536/11041 (figure 4.4) et sont sans doute liées à des légers effets de l'atmosphère.

Les extraits au 1/50.000 (4.2 et 4.5) laissent cependant apparaître des déphasages locaux, liés à l'atmosphère. Les déphasages liés au mouvement du sol sont quant à eux difficilement discriminables par rapport aux bruits liés à la perte de cohérence. En effet, ces probables déphasages liées au RGA sont non visibles une fois les masques de cohérence appliqués (figure 4.3 et 4.6). Une étude de ces anomalies a été réalisée sur des données ERS en mode ascendant et descendant (Kaveh *et al.* 2007) et complétée par l'analyse d'interférogrammes calculés avec des images ENVISAT, soit plus de 450 interférogrammes au total, tous modes confondus sur la période de temps 1995-2007. Ces anomalies localement liées à des modifications de la surface du sol induite par le RGA, mais l'emprise des déformations est trop local pour les discerner aisément au sein d'un interférogramme.

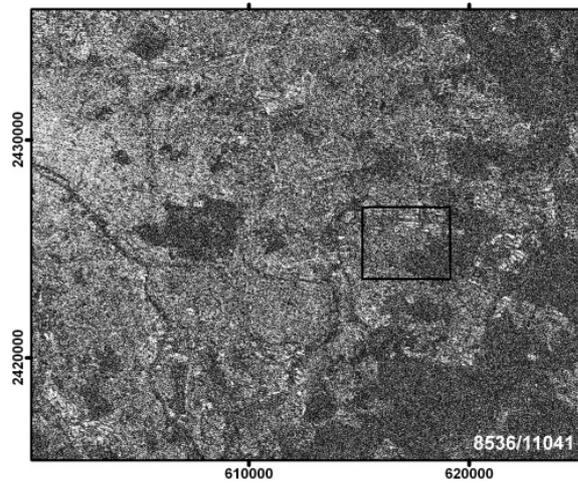
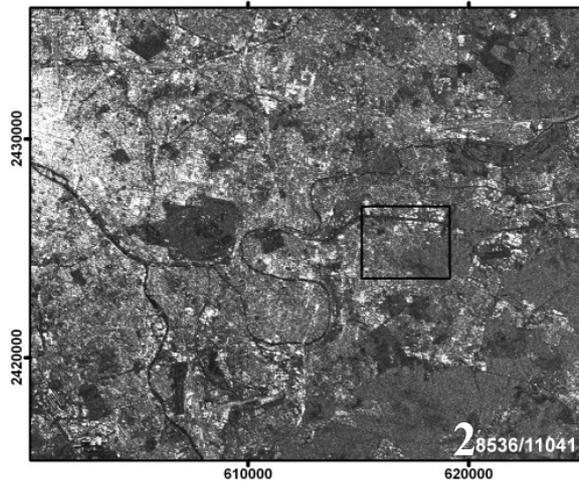
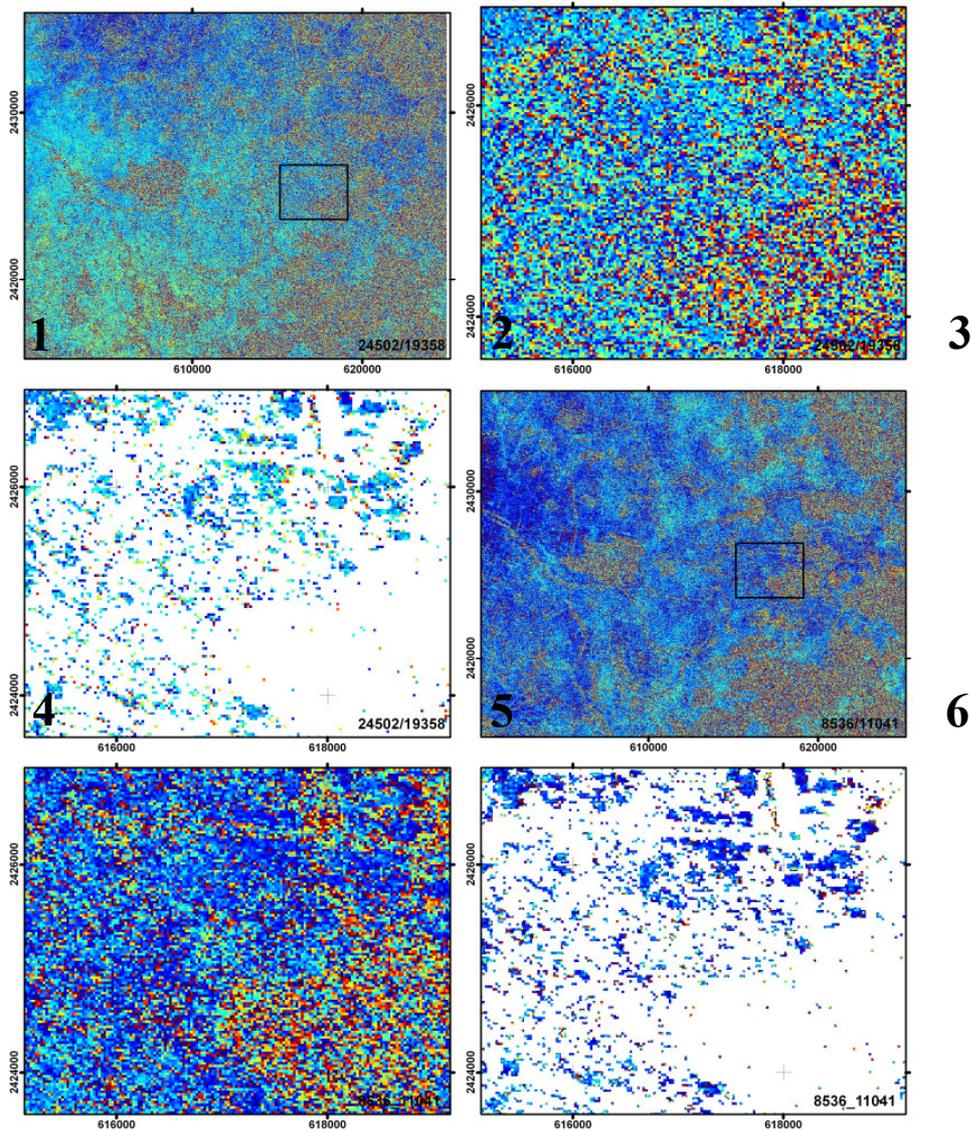


Figure 3 : Image d'amplitude (échelle 1/250 000) et image de cohérence (échelle 1/250 000) pour le couple 8536/11041 entre le 18.10.2003 et le 10.04.2004.



Rapprochement vers le capteur ← 2,8cm → Eloignement du capteur

Figure 4 : Interférogrammes différentiels. 1- Interférogramme au 1/250000 du couple ERS 24502/19358 (22.03.1996 et 02.01.1999). 2- .Extrait sur la zone d'intérêt (échelle 1/50000). 3- Extrait avec un masque de cohérence de 0.6. 4- Interférogramme au 1/250 000 du couple ENVISAT 8536/11041 (18.10.2003 et 10.04.2004). 5- .Extrait sur la zone d'intérêt (échelle 1/50000). 6.- Extrait avec un masque de cohérence de 0.6.

Ces six vignettes permettent de visualiser les résultats obtenus par interférométrie DINSAR. Une variation de couleur représente un déphasage soit lié à du déplacement, soit à des effets atmosphériques. Remarquez en 4.4 les effets ondoissants de l'atmosphère sur l'interférogramme.

Différentes limitations de cette technique apparaissent :

(1) La perte de cohérence en milieu urbain pavillonnaire, qui rend l'interprétation des interférogrammes difficile. En effet, la présence d'espaces arborés ou jardinés au sein des quartiers pavillonnaires, constitués de réflecteurs qui se modifient au cours du temps, entraîne une perte de cohérence dans le temps.

(2) Les déplacements liés au RGA sont faibles en amplitude (inférieurs au centimètre), mais également hétérogènes spatialement et de faible étendue spatiale (souvent localisé uniquement aux contours des bâtiments): ils sont donc en limite de détection par interférométrie. Il s'avère en effet difficile de séparer le signal de déplacement des effets différentiels de l'atmosphère (nuages...) susceptibles de provoquer des artefacts atmosphériques au sein des interférogrammes sous formes variables (globulaire, effilée ...). Seul un grand nombre d'interférogrammes montrant le même déphasage permet de démontrer l'existence d'une déformation, dans la mesure où l'atmosphère possède un caractère aléatoire. Par ailleurs, seuls des déplacements affectant un certain nombre de pixels peuvent être détectés et quantifier par interférométrie, ce qui est problématique pour des déplacements hétérogènes.

(3) Pour le suivi de faibles déformations, la technique DINSAR est bien adaptée lorsqu'il s'agit de déformations continues qui se cumulent au cours du temps. Elles peuvent être alors mesurées et suivies en les examinant sur de longues périodes de temps. Un possible phénomène de « vieillissement » ou de « fatigue » des matériaux argileux qui est observé en laboratoire (Gueremew *et al.* 2008) peut conduire à une dérive altitudinale au cours du temps. Cependant cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée. En considérant le mouvement lié au RGA non linéaire et plus ou moins cyclique de la surface du sol suite aux dessiccations-humectations en fonction des variations climatiques saisonnières, il ne peut être mesuré que des mouvements sur de courtes périodes avec des interférogrammes soigneusement choisis en fonction des périodes de sécheresse.

2. Interférométrie PSI appliquée au suivi du RGA

2.1 Principe de la mesure PSI

La technique interférométrique PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*) - interférométrie sur diffuseurs permanents - a été initialement développée par une équipe italienne du Politecnico di Milano, sous le nom de Permanent Scatterer TechniqueTM (technique brevetée) (Ferretti *et al.* 2000, 2001).

Elle vise à s'affranchir des limitations de l'interférométrie précédemment mentionnées, à savoir les problèmes de décorrélation temporelle et géométrique, ainsi que les artefacts atmosphériques. L'interférométrie PSI sélectionne des points particuliers, les réflecteurs permanents, appelés PS, dont la réponse radar est suffisamment forte sur tout le jeu de données : ce réseau de points exploitables est détecté à partir d'un nombre d'images important (typiquement supérieur à 20), en se basant sur l'amplitude des pixels, qui doit rester forte et stable sur toutes les acquisitions radar. Cela assure la sélection de points dont la phase reste stable dans le temps, donc non affectés par la décorrélation temporelle, et permet également la sélection de points isolés. Si ce réseau de points est suffisamment dense, les contributions de topographie, de déformation et d'atmosphère peuvent être alors séparées et estimées, en exploitant leur différence de comportement spatio-temporel.

Les mesures de déplacements sont ainsi obtenues sur la base de points, dont on peut suivre l'évolution dans le temps, avec un échantillonnage temporel correspondant aux dates d'acquisition des images. Par ailleurs, la composante

atmosphérique étant éliminée, la précision de la mesure s'en trouve ainsi nettement améliorée par rapport à l'interférométrie différentielle DINSAR.

L'interférométrie PS, développée depuis par d'autres équipes (Werner *et al.* 2003, Kampes, 2006) rencontre un succès incontestable en zone urbaine, pour laquelle le nombre de PS est important. Dans notre étude, nous avons utilisé la chaîne SPN (Stable Point Network) d'Altamira Information (Arnaud, 2003).

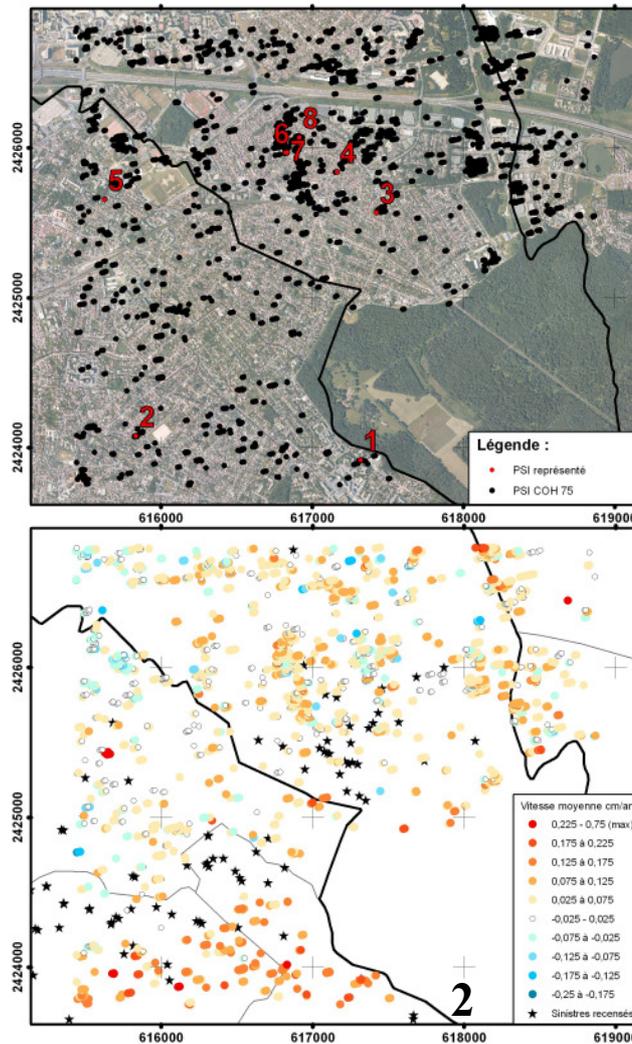
2.2 Applications

Les calculs des PS a été réalisé à partir d'images ERS en mode ascendant entre juin 1995 et juin 2006. La zone d'étude choisie est la même que précédemment, localisée sur les communes de Noisy-le-Grand et de Villiers-sur-Marne (figure 1) dans une zone urbaine pavillonnaire fortement soumise au retrait gonflement d'argile pendant les dernières périodes de sécheresse.

L'orthophotographie de la figure 5.1 permet de localiser différents réflecteurs permanents (points stables PS) obtenus sur la zone, ainsi que 8 PS particuliers numérotés de 1 à 8 dont l'évolution temporelle est donnée en figure 6. Ces graphiques illustrent les déplacements de ces PS, en centimètres, le long de la ligne de visée du capteur radar entre 1995 et juillet 2006, avec en vis-à-vis des données climatologiques (température et pluie efficace).

La figure 5.2 révèle les vitesses moyennes en cm/an ainsi que les sites reconnus sinistrés sous forme d'étoiles noires. Les PS 1 et 2 (figure 6) se localisent à Villiers-Sur-Marne. Les courbes montrent des variations cycliques, avec des fluctuations de l'ordre de 0,7 cm d'amplitude le long de la ligne de visée du capteur. Les maxima topographiques sont observés en hiver, période humide et froide ce qui suggère une reprise d'humidité des sols par gonflements et les minima topographiques sont observés en périodes estivales (chaudes et sèches). On constate aussi que la période entre 2001 et 2003 est délicate à interpréter du fait du manque d'images exploitables, lié à la perte des gyroscopes du satellite ERS2 (en février 2000). On constate que les trois autres courbes (figure 6) illustrent la similarité des comportements sur différents points PS choisis (PS 1 à 8).

Les mouvements enregistrés par la technique PS montrent donc des modifications annuels de la surface du sol de l'ordre du demi centimètre, mouvements liés au changement de conditions climatiques et d'ordre saisonnier. Remarquons qu'il existe des périodes sur lesquelles les déplacements observés sont non cycliques. Des calculs permettant de mieux connaître la position des réflecteurs dans l'espace sont en cours. Une mission de terrain devrait aussi préciser dans la mesure du possible l'origine des points réflecteurs radar mesurés.



1

2

Figure 5 :1- Ortho photographie IGN montrant la localisation des PS (seuil de cohérence à 0,75). 2- Carte des vitesses moyennes. Les valeurs de vitesses moyennes ne sont pas représentatives du phénomène de RGA car le phénomène est non linéaire. Seule ici une dérive altitudinale peut être révélée, dont l'origine est toujours en cours de recherche.

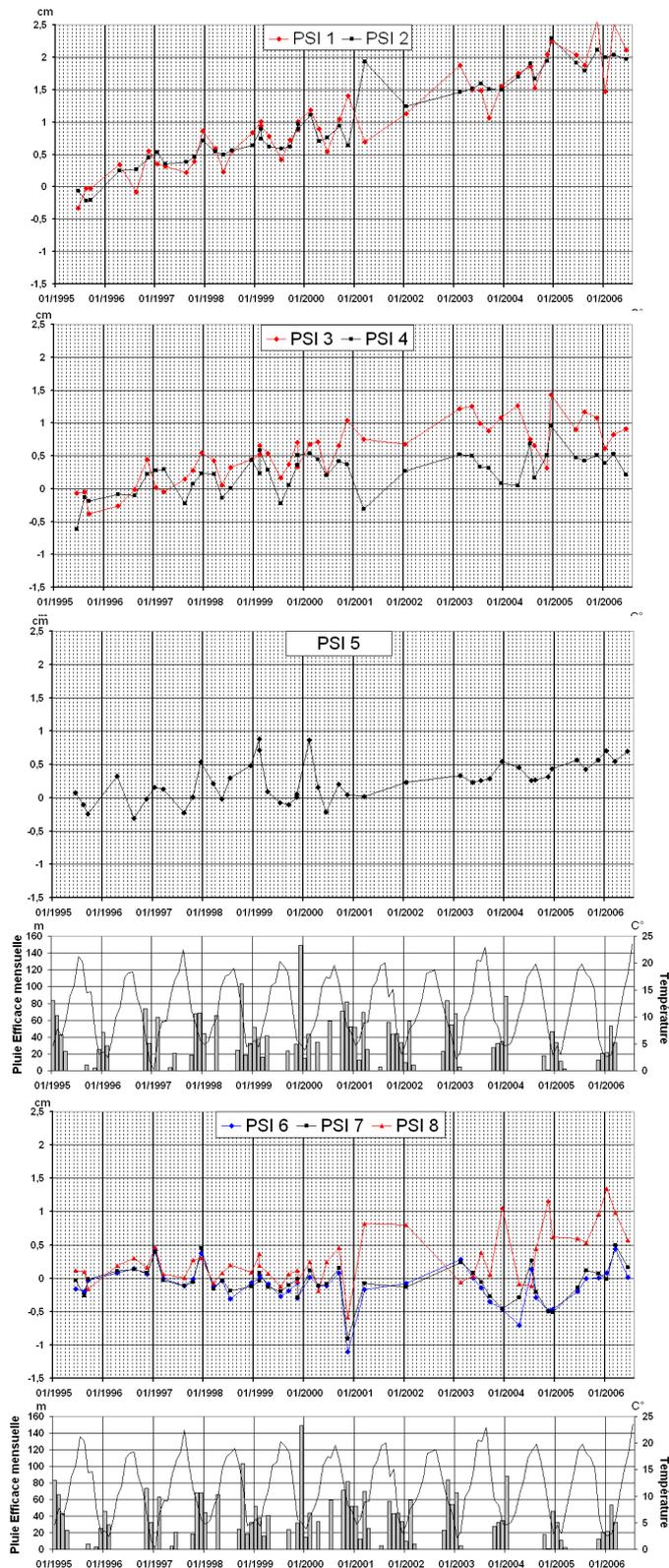


Figure 6 : Déplacements des PS numérotés 1 à 8 localisés en figure 6.1 avec le diagramme de données météorologiques (histogramme de pluviométrie en mm/mois et Température de C°/mois). Remarquer la saisonnalité des déplacements (soulèvement topographique en hiver : période pluvieuse et froide contrastant avec la période estivale chaude et sèche correspondant à un abaissement centimétrique de la topographie). Localement, l'acquisition

d'image radar trop espacée par rapport au phénomène RGA peut masquer cette cyclicité.

2.3 Données terrains

Les déplacements saisonniers observés en interférométrie PS (figure 6) sont confirmés par une mission de terrain réalisée en avril 2008 à Noisy-le-Grand et Villiers-sur-Marne. Les déformations observées sont généralement liées à des subsidences inégales du terrain avec l'apparition de fissures dans les coins des fenêtres et des portes (photo 1, 2 et 3), zones de moindres résistances du bâti. L'interprétation des fissurations montre des tassements différentiels de part et d'autre des propriétés, tassements consécutifs au phénomène RGA.

Les quartiers sinistrés de Noisy-le-Grand et de Villiers-sur-Marne ont été aussi visités afin de confirmer les sinistres déjà recensés. Il a été ainsi constaté une bonne adéquation entre les sinistres recensés et ceux observés sur le terrain (figures 7.4).

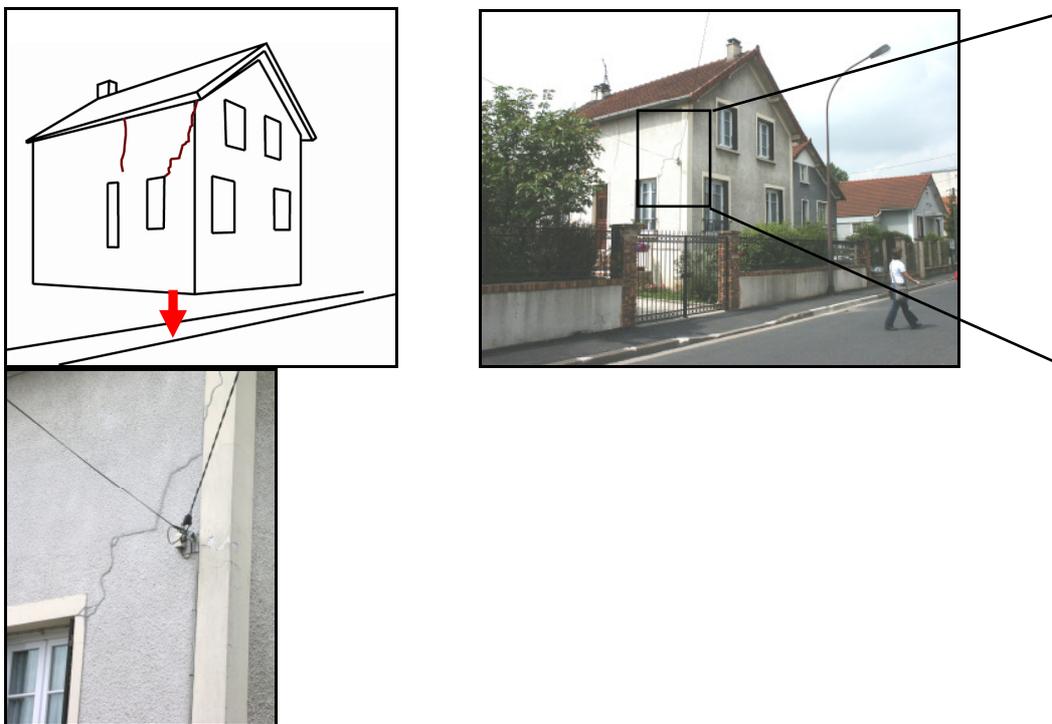


Photo 1 : Rue Roger Cailteux, Noisy-le-Grand, département de Seine Saint Denis (93160).



Photo 2 : Rue Roger Cailteux, Noisy-le-Grand, département de Seine Saint Denis (93160).

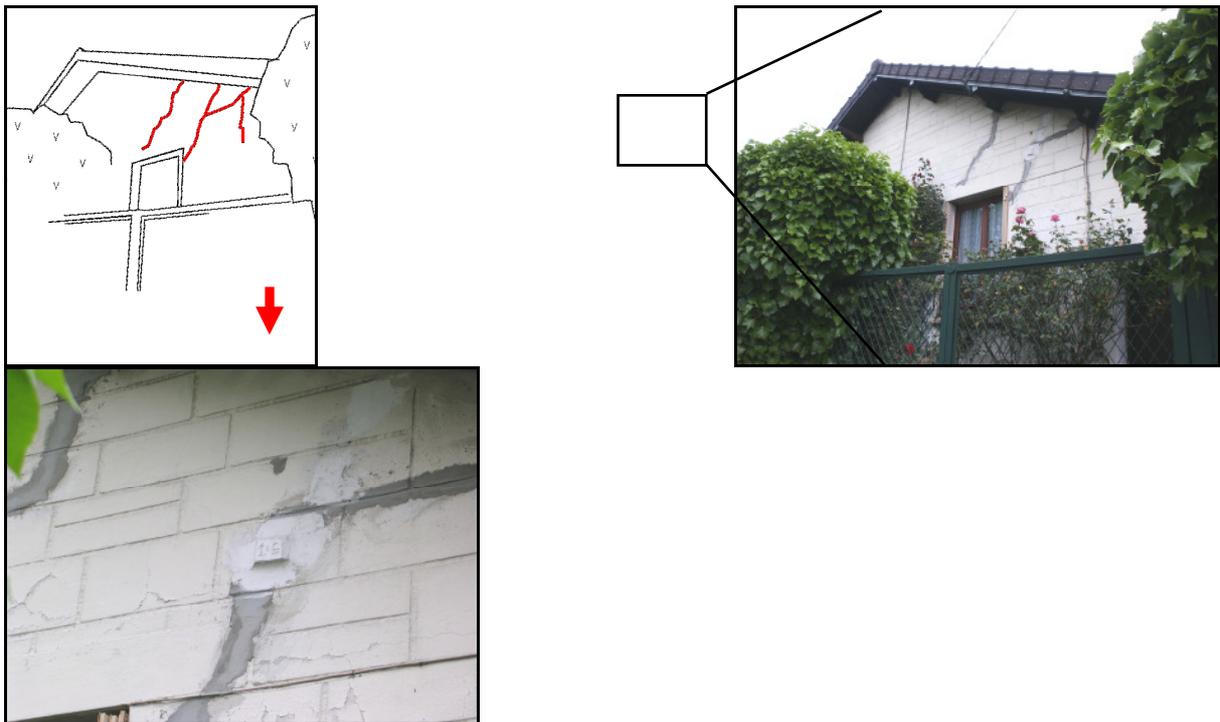


Photo 3 : Rue Paul vaillant Couturier, Noisy-le-Grand, département de Seine Saint Denis (93160).

3. Discussion

Afin de mieux analyser et donc comprendre les processus en action sur la zone d'étude, une base de données (BDD) géographique intégrée dans un système d'informations géographiques (SIG) a été créée (Kaveh et al., 2007). L'ensemble des documents de la figure 7 en sont extraits sur la zone d'étude de Noisy-le-Grand et Villiers-sur-Marne, ce qui facilite l'analyse et l'interprétation des résultats des déplacements obtenus par les PS.

Il s'agit de l'orthophotographie aérienne géoréférencée IGN 2002 sur laquelle sont superposés les PS (points noirs de la figure 7.1), d'une carte des pentes en degré (figure 7.2) issues du modèle numérique de terrain (BdAlti de l'IGN), de la topographie en teinte hypsométrique et estompée (Modèle numérique de terrain, figure 7.3), d'un extrait de la carte géologique du BRGM au 1/50.000ème, (figure 7.4, dont la légende est donnée dans le tableau ci après), de l'occupation du sol de l'IAURIF, avec en jaune les quartiers pavillonnaires individuelles (figure 7.5) et de la carte de l'aléa RGA réalisée par le BRGM (figure 7.6).

Tableau 1: Formations géologiques présentes à l'affleurement dans la zone d'étude. (Source Donsimoni et al. 2003)

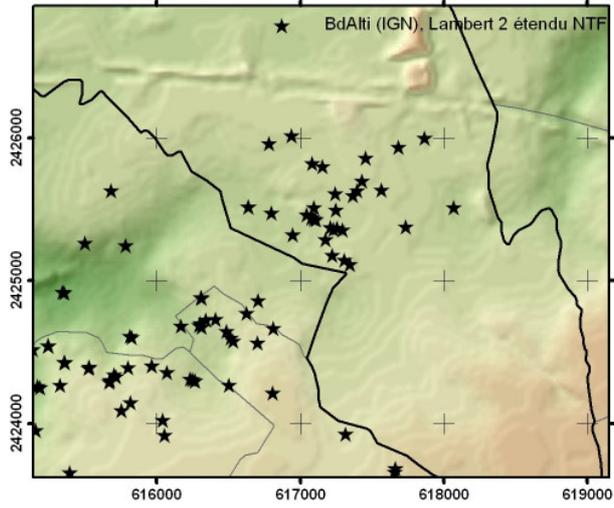
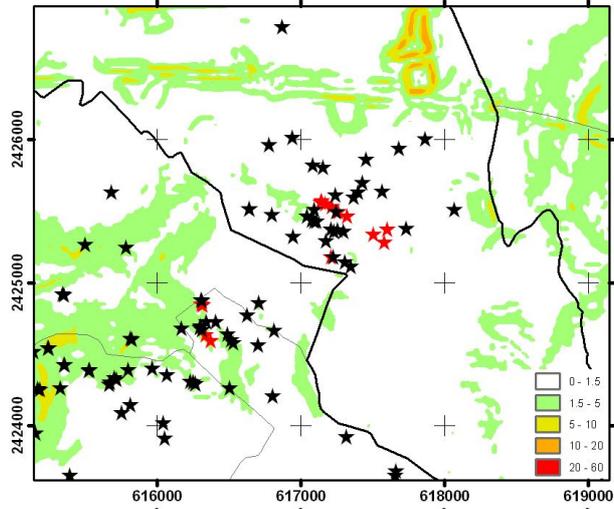
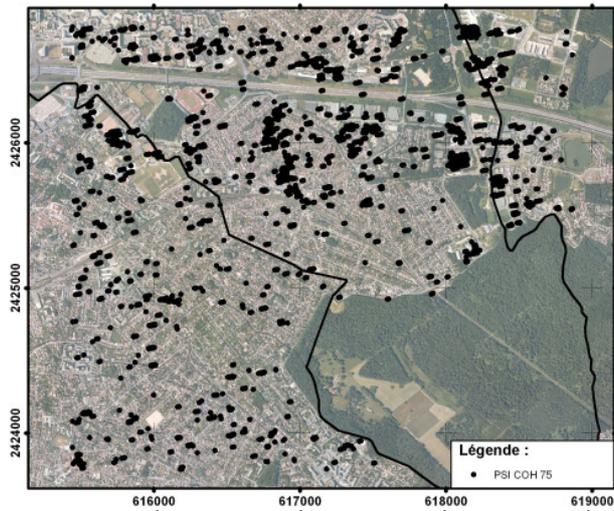
Abv.	Formations Epaisseurs	Ages	
e _{7b}	Marnes supragypseuses	Éocène supérieur à Ludien supérieur	8 à 11 mètres
g _{1a}	L'Argile verte de Romainville et les glaises à Cyrènes	Oligocène, Rupélien, Sannoisien inférieur	5 à 9 mètres.
g _{1b}	Calcaire de Brie	Oligocène, Rupélien, Sannoisien	10 mètres
LP	Limons des plateaux.	Quaternaire	1 à 5 mètres

La zone d'étude suivie par interférométrie PS regroupe essentiellement des quartiers d'habitation pavillonnaire à caractère individuel (figure 7.5) pour lesquels de nombreux points stables sont obtenus (figure 7.1). Les sinistres se concentrent principalement dans les zones qualifiées d'aléa fort par le BRGM (figure 7.6) avec cependant quelques sinistres répertoriés en aléa faible. On peut souligner également le fort contraste entre la zone d'aléa fort et faible, le passage de l'une à l'autre se faisant sans intermédiaire. On distingue d'une part les sinistres localisés à Noisy-le-Grand dans une zone à pentes faibles à nulles, généralement inférieures à deux degrés (figure 7.2), sur un sol sensible au RGA, l'Argile verte de Romainville (formation g_{1a}, figure 7.4) et d'autre part les sinistres de Villiers-sur-Marne qui se localisent sur des sols à faible pente (de 2 à 5 degrés, figure 7.2) où affleurent les limons de plateau et les formations sous jacentes, les argiles Vertes de Romainville (figure 7.4).

Le comportement cyclique des points stables (PS) décrit précédemment peut probablement s'expliquer par la présence d'argiles gonflantes, représentées notamment par les argiles vertes de Romainville (g_{1a}). Les quartiers d'habitations de Noisy-le-Grand et de Villiers-sur-Marne ont leurs fondations « ancrées » sur cette formation soumise à des variations altitudinales. Les battements de nappes d'eau

selon les saisons et les conditions d'humidité du sol sont probablement la cause des mouvements observés.

Remarquons que les bâtiments individuels dont les faibles fondations reposent sur ces types argileux, sont particulièrement exposés et soumis à des mouvements saisonniers de l'ordre de 0,6 cm (cf figure 67). Lors d'épisode de sécheresse intense, ces mouvements sont certainement d'amplitude supérieure à cette valeur mais surtout ce sont les sols, en profondeur, là où les fondations sont posées, qui voient leurs caractéristiques physiques se modifier fortement. Les pentes topographiques ne sont pas *a priori* en cause mais la proximité de végétation révélée par l'orthophotographie et la carte de l'occupation du sol (figure 7.1 et 7.5) est un facteur aggravant du phénomène RGA, ce qui peut expliquer localement la disparité des sinistres recensés.



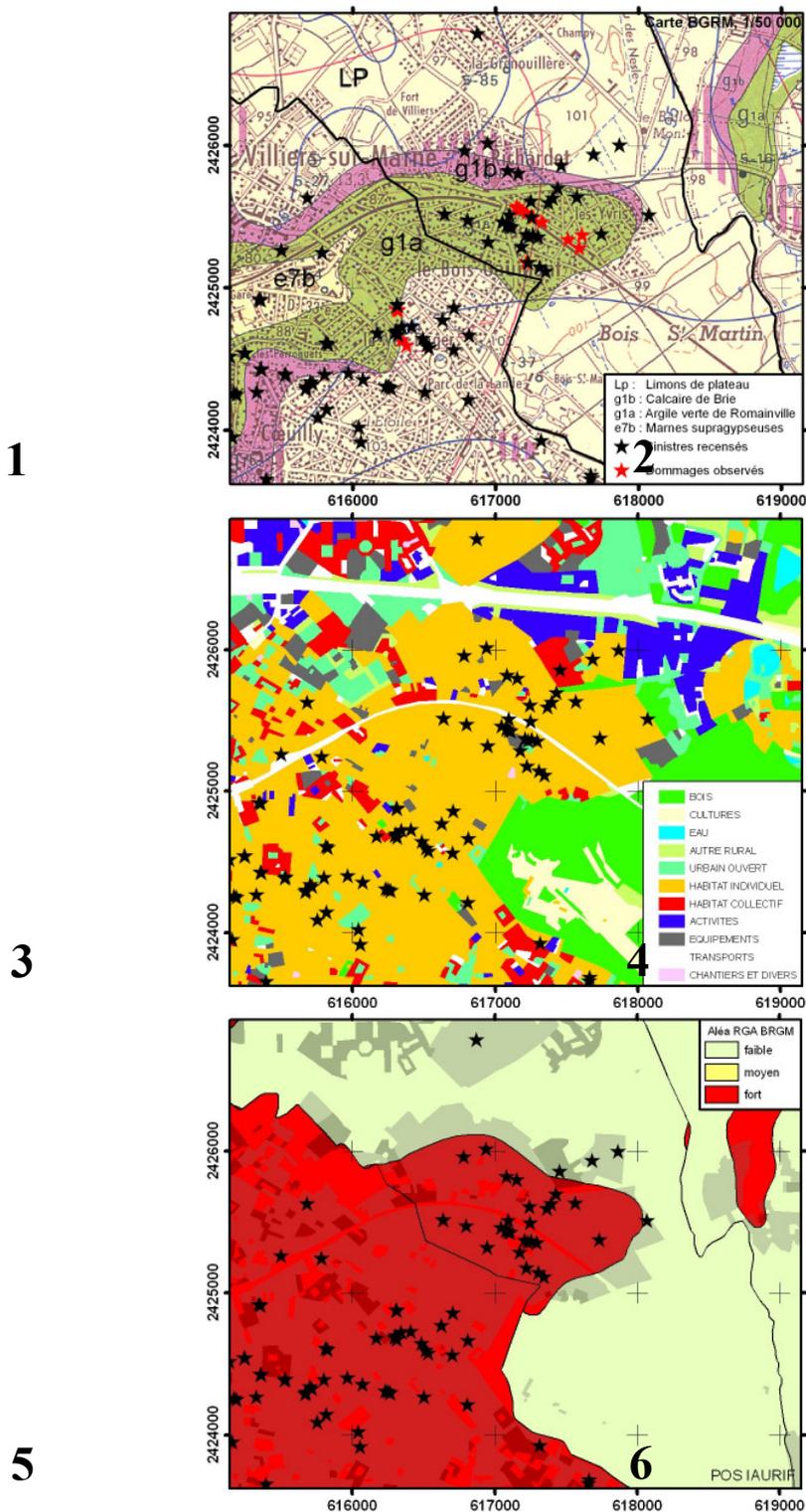


Figure 7 : Documents issus de la base de données thématiques RGA : 1- Orthophotographie aérienne 2002 et localisation des PS analysés. 2- Carte des pentes issues du MNT BdAlti (IGN). 3- Modèle Numérique de Terrain (BdAlti) en teinte hypsométrique sur lequel sont superposées les limites administratives municipales. 4- Carte géologique du BRGM (voir tableau 1 pour légende géologique). 5- Carte d'occupation du Sol effectuée par l'IAURIF : la couleur orange signifie l'importance de l'habitat pavillonnaire individuel. 6- Carte d'aléa Retrait Gonflement d'Argile effectuée par le BRGM (cf. argiles.fr) (en rouge aléa fort, en

jaune pale aléa faible), superposé à l'occupation du Sol - habitat pavillonnaire individuel effectué par l'IAURIF.
Sur toutes les cartes, la sinistralité est représentée par les étoiles noires.

Conclusions et perspectives

Le but de ce travail est de mesurer les faibles déplacements issus des phénomènes de retrait-gonflement engendrés par les argiles gonflantes des sols. Si les méthodes de géodésie de suivi classique sont à leurs limites pour des raisons évidentes de coût, de fort temps d'acquisition, de faible représentativité des mesures, l'interférométrie radar satellitaire (DINSAR et PSI) présente une alternative potentielle testée ici dans l'est du Bassin de Paris, région fortement sinistrée lors des sécheresses 1995-6 et 2003.

Notre travail confirme globalement les travaux préliminaires de Kaveh et al. (2007), soulignant notamment le faible intérêt de l'interférométrie différentielle (DINSAR) appliqué sur cette thématique car affecté (1) surtout par la faible cohérence spatiale liée à l'occupation du sol pavillonnaire (perte de cohérence sur la végétation du milieu pavillonnaire jardiné) ; (2) du faible nombre d'acquisitions radar entourant les périodes de sécheresse reconnue ; (3) de la non linéarité (cyclicité) des déplacements engendrés par le processus de retrait-gonflement des argiles (RGA) difficiles à mesurer en DINSAR; et (4) de la forte évolution spatiotemporelle du phénomène RGA transformant l'espace en une gigantesque mosaïque de déplacements différentiels, véritable puzzle difficile à décrypter. Insistons enfin sur les limites de l'interférométrie différentielle telles que les artefacts atmosphériques et la décorrélation temporelle liée à l'évolution de l'occupation du sol sur plusieurs décennies. Remarquons que la non linéarité du processus peut être appréhendée par une combinaison d'interférogrammes.

La nouveauté de ce travail réside dans l'application de la méthode des réflecteurs permanents (PSI) sur une zone test située à proximité de l'université Paris-Est, site de Marne-la-Vallée (Noisy-le-Grand et Villiers-sur-Marne). Si les vitesses moyennes ont peu d'intérêt et peu de signification géologique suite à la non linéarité du phénomène RGA, les quelques profils de déplacements en fonction du temps, extraits de la base de données, sur quelques points fortement rétro-diffusant, soulignent les très fortes potentialités de cette nouvelle méthode pour cette application.

Même s'il est actuellement difficile de connaître précisément quelle est la nature physique des PS, et de l'associer à un objet spécifique sur le terrain, il est intéressant d'examiner le comportement de tels PS, leur évolution et leurs déplacements pluri centimétriques globalement cycliques et saisonniers. Il est ainsi possible aujourd'hui de quantifier les faibles déplacements de plusieurs milliers de points situés sur la zone d'étude. Il est également envisageable, par regroupement de points voisins présentant des déplacements similaires de révéler et de délimiter des zones géographiques sensibles et affectées par le processus RGA, base de la modélisation et de la simulation.

Afin d'analyser et d'interpréter les bases de données issues des calculs interférométriques nous avons mis au point une base de données géologiques et géographiques incluant (1) la cartographie détaillée du mode d'occupation du sol de l'IAURIF, (2) la cartographie géologique du BRGM qui permet de localiser des affleurements d'argiles gonflantes, (3) le modèle numérique de terrain de l'IGN (BdAlti®) permettant d'extraire les pentes topographiques et enfin (4) l'imagerie aérienne (Bdortho® de l'IGN) sur la zone d'étude (cf. Kaveh *et al.* 2007). La zone de Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand qui est sous-tendue par des argiles gonflantes imperméable d'âge oligo-éocène, est affectée par la proximité d'espaces arborés, et de pentes topographiques plus fortes.

Par conséquent la méthode PSI ouvre enfin le champ complexe et indispensable de la localisation, de la caractérisation et de la quantification des faibles déplacements de surface qui affectent le bâti et donc les enjeux humains. Voici donc qui devrait fortement améliorer le suivi, la compréhension des déformations, et par conséquent agir sur les actions à mener en vue de la prévention des risques naturels non catastrophiques... De nombreuses applications sont prévisibles tout particulièrement dans le domaine du BTP et des assurances.

Remerciements

Les données radar sont issues du programme de recherche cat1-AO n°4362 soutenu par l'agence Spatiale Européenne. Les données climatiques de MétéoFrance ont été transmises par le Centre de Géologie et de l'Ingénieur (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris) dans le cadre du programme de recherche RGA sécheresse géotechnique. Les données de sinistralités et la carte de l'aléa de retrait gonflement d'argiles sont issues du site « www.argiles.fr » du BRGM. Les orthophotographies sont issues du site géoportail de l'IGN.

Nous tenons à remercier vivement (1) l'IAURIF pour avoir accordé l'utilisation du MOS 2003 ; (2) la Fondation MAIF pour son support dans le programmes de recherche RGA sécheresse géotechnique; (3) la région d'Île-de-France et le CNRS pour le contrat R2DS/R2D2 qui soutiennent l'activité de recherche du laboratoire pour l'étude des catastrophe naturelles en France.

Bibliographie

- Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., Laczniak R.J. (1999) Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, 27(6): pp.483-486.
- Arnaud A., Duro J., Inglada J., Eineder M., Adam N., Handssen R. (2003) ASAR/ERS interferometry over stable points network, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2003, Toulouse (France), 21-25 July, 2003*.
- Bamler et Hartl (1998) Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14(4): pp. R1 - R54.
- Donsimoni M., Clozier L., Motteau M., Vincent M. (2003) Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne. *BRGM/RP-52224-FR*, 133 p., 5 fig., 16 tabl., 2 ann., 4 planches. h.t.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000) Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 2002-2012.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 8-20.
- Fruneau B., Achache J., Delacourt C. (1995) Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, *Tectonophysics*, 265, p. 181-190.
- Fruneau B., Deffontaines B., Rudant J-P., Le Parmentier A-M. (2005) Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry. *Comptes Rendus Geosciences, Volume 337, Issue 13, pp. 1173-1183*.

- Guéguen Y., Deffontaines B., Al Heib M., Fruneau B., DeMichele M., Raucoules D., Guise Y., Planchenault J. (2007) Detection and characterisation of the topographic surface displacements using DINSAR and PS interferometry applied to the Nord/Pas-de-Calais Coalmine., *ESA FRINGE workshop 2007 - 26-30 novembre 2007, Frascati, Italie*
- Geremew Z., Audiguier M., Cojean R. (2008) Comportement de sols argileux soumis à des sollicitations hydriques cycliques. Symposium SEC 1,2 et 3 sept. 2008, Paris, France.
- Kampes B.M. (2006), *Radar interferometry : Persistent Scatterer technique*, ISBN: 140204576X, Springer Verlag edition.
- Kaveh H. F., Deffontaines B., Fruneau B. (2007) Apports d'un Système d'Information Géographique et de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain induits par l'aléa sécheresse : Applications à l'Est de l'Île-de-France. *Revue Française Géotechnique n°120-121, pp. 201-214.*
- Manunta M., Zeni G., Sansosti E., Lanari R., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F. and Reichenbach P. (2006) Ground deformation analysis in the Umbria region (central Italy) carried out via the SBAS DInSAR approach. *Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 10026, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-10026*
- Pathier E., Fruneau B., Deffontaines B., Angelier J., Chang C-P., Yue S-B., Lee C.T. (2003) Coseismic displacements of the footwall of the Chelungpu fault caused by the 1999, Taiwan, Chi-Chi earthquake from InSAR and GPS data. *Earth and Planetary Science Letters 212, p. 73-88.*
- Tomás R., Márquez Y., Lopez-Sanchez J.M., Delgado J., Blanco P., Mallorquí J., Martínez M., Herrera G. and Mulas J. (2005) Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment, Volume 98, Issues 2-3, pp. 269 - 283.*
- Vincent M. (2006) Prévention du risque sécheresse : cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles et établissement de plans de prévention des risques. *Revue géologue n°146, ISBN 0016.7916, pp. 43-47.*
- Werner C., Wegmüller U., Strozzi T., Wiesmann A. (2003) Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03, 21-25 July 2003, Toulouse, France, vol. 1, 221-223.*

Apports d'un Système d'Information Géographique et de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain induits par l'aléa sécheresse : Applications à l'Est de l'Île-de-France.

Contribution of GIS and remote sensing (optical and radar) for the swelling soils studies. Application to the East of the Paris basin.

Heydar Frédéric Kaveh ¹, Benoît Deffontaines ¹, Bénédicte Fruneau ¹

¹Université Paris-Est, Laboratoire Géomatériaux et Géologie de l'Ingénieur (G2i), - 5, Bd Descartes Champs-Sur-Marne F-77454 Marne-La-Vallée France -, Cedex 2, France.

Contacts : Frederic.kaveh@univ-mlv.fr, Benoit.Deffontaines@univ-mlv.fr, Benedicte.Fruneau@univ-mlv.fr

Résumé

Quels sont les apports de la télédétection (optique et radar) pour détecter et mesurer les déformations induites par l'aléa sécheresse et plus particulièrement le retrait-gonflement des sols argileux dans l'Est de l'Île-de-France? L'intégration des données dans un Système d'Information Géographique devrait favoriser l'analyse des principaux facteurs à l'origine de ces déformations. Ainsi un modèle numérique de terrain (BdAlti® de l'IGN) permet d'extraire les pentes topographiques, l'imagerie aérienne (photographie ortho rectifiée de l'IGN) révèle l'occupation du sol, et l'application de la méthode d'interférométrie radar DInSAR favorise la localisation, la caractérisation et la quantification des déformations. D'autres données numériques sont combinées, telles une cartographie détaillée du mode d'occupation du sol de l'IAURIF et la cartographie géologique du BRGM, qui permet de localiser des affleurements d'argiles gonflantes. Ce travail est comparé à l'approche cartographique de l'aléa du retrait-gonflement des sols argileux effectuée par le BRGM. En conclusion, la nature gonflante du sol, le type de tissu urbain, la topographie ou encore la présence de végétation arborée par exemple, sont autant d'éléments qui expliquent localement la sinistralité dans l'Est de l'Île-de-France.

Mots clefs : sécheresse géotechnique, retrait-gonflement, argile, interférométrie, SIG, Est parisien.

Abstract

What are the remote sensing (optical and radar wavelength) contributions to locate, characterize and quantify the deformations issued from the dryness hazard in the eastern part of the Paris basin? The data integration within a GIS helps to analyse the major parameters

which induce such low deformations. So a Digital Terrain Model (DTM) from BdAlti of IGN permits the extraction of the topographic slopes, the orthophotography (aerial photograph orthorectified) reveals the land use, and the Differential Interferometry DInSAR gives indication in coherent areas to locate, characterize and quantify the low deformations. Other data are superimposed such as the geologic map issued from BRGM mapping which helps to locate the outcropping clays submitted to the phenomena, and IAURIF map which helps to better characterize the land occupation. This work is compared to the one done by the BRGM. To conclude the presence of clays sensible to hygrometry, the type of land occupation such as the presence of trees is key points to explain the disorders that exist in the eastern Paris basin.

Keywords: drought hazard, swelling clays, interferometry, GIS, East Paris basin.

Introduction

La sécheresse est à l'origine de nombreux mouvements de la surface du sol. Le phénomène de Retrait-gonflement d'Argile (RGA ci-après) exacerbe ces mouvements dans les sols où des argiles sont présentes. Dure et cassante lorsqu'elle est desséchée, l'argile devient plastique et malléable à partir d'un certain niveau d'humidité. Les déplacements induits sont de faible amplitude en valeur absolue (du mm à 15 cm dans la zone d'étude), mais le phénomène de tassement différentiel est à l'origine d'importants dommages sur les bâtiments. Le but de ce travail est de mieux comprendre les facteurs à l'origine des déformations de la surface topographique urbanisée induite par le RGA en utilisant les données de télédétection optique et radar, intégrées au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG). Les données optiques sont des orthophotos géoréférencées et les données radars utilisées sont des interférogrammes obtenus par la méthode interférométrique différentielle DInSAR¹. En guise d'application, la région Île-de-France a été choisie car particulièrement affectée par le phénomène avec un cumul de 559 communes sinistrées sur 1300 (arrêté ministériel du 18.09.98) pour les périodes de sécheresse de 1989/92 et de 1996/1997, représentant une sinistralité de 43%. En particulier, deux départements de l'Est parisien, le Val-de-Marne (94) et la Seine-Saint-Denis (93) ont les taux de sinistralité parmi les plus élevés de France avec le second et le troisième rang respectivement, selon la Caisse Centrale de Réassurance. En effet, le fort taux d'urbanisation et le caractère pavillonnaire de leurs zones résidentielles situées sur des argiles gonflantes font de ces départements des territoires vulnérables au RGA. Plus récemment, la canicule de 2003 et la sécheresse de

¹ Differential Synthetic Aperture Radar interferometry (DInSAR)

l'année 2005 soulignent la récurrence du phénomène, dans le contexte de réchauffement climatique actuel selon l'étude de Hansen et al. (2006).

La compréhension du phénomène ainsi que sa cartographie est un objet de recherche d'actualité. D'après Vincent (2006), la délimitation des zones sensibles est la première étape d'une politique de prévention des risques. Elle permet d'appliquer des normes de construction plus sévères ou d'imposer des aménagements adaptés dans les zones à risque. Un premier travail d'inventaire des zones concernées par l'aléa RGA a été réalisé par le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) à l'échelle départementale en se basant sur la cartographie de la lithologie, la sinistralité et des paramètres géotechniques des formations issus des cartes géologiques au 1/50 000. A la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), ces travaux ont été transposés à l'échelle de la commune, afin d'établir des plans de prévention de risque. Cependant, compte tenu des incertitudes sur la lithologie des sols sub-affleurants et de la grande variabilité dans leur composition minéralogique, la cartographie de l'aléa réalisée par le BRGM reste imprécise à l'échelle d'un quartier d'habitation.

Localement, les analyses géotechniques du sol permettent de caractériser précisément le potentiel expansif du sol (Bigot et al., 2000). Cependant, les essais en laboratoire ont un coût et sont long à effectuer. Il est donc difficile de multiplier les échantillonnages pour un terrain donné et de couvrir ainsi une vaste zone géographique. La télédétection, en tant qu'outil de mesure directe à distance, permettrait d'avoir une vue synoptique du phénomène et pourrait être utilisée pour suivre dans le temps les déplacements induits et de préciser localement l'origine des désordres induits par la sécheresse. Les synthèses de Van der Meer (1999) et de Kariuki et al. (2004) exposent succinctement les méthodes et les techniques en télédétection optique utiles à la problématique du RGA. En télédétection optique, l'imagerie hyper spectrale a déjà permis de caractériser la minéralogie des sols affleurants [Chabillat et al. (2002), Ben-Dor et al. (2002), Kariuki et Van der Meer (2003)]. Cependant, si de bons résultats sont obtenus pour des milieux arides, faiblement végétalisés et peu urbanisés, la télédétection optique reste inadaptée en Île-de-France de par la forte urbanisation et l'abondance de la végétation.

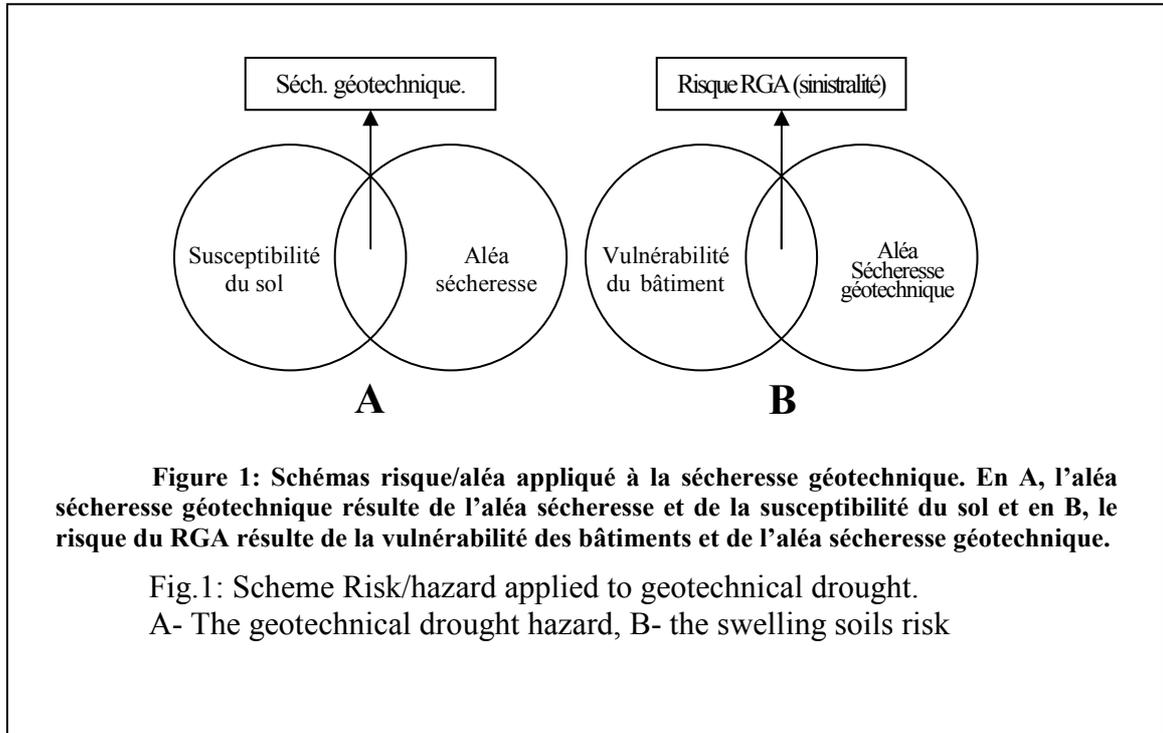
Dans le domaine de la télédétection radar, l'interférométrie différentielle radar permet dans certaines conditions de mesurer des déformations discrètes de faible amplitude avec, au mieux, une précision millimétrique, (Massonnet et Feigl, 1998). Cependant, à notre connaissance, cette technique n'a pas encore été appliquée aux mouvements induits par la sécheresse. L'objet de cette étude est donc d'évaluer la faisabilité de la technique DInSAR

pour l'étude des effets de la sécheresse géotechnique en vue de localiser, caractériser et quantifier les déformations de la surface du sol. Les résultats et les limites de cette technique appliquée au suivi du phénomène RGA sont précisés ci-dessous. Les traitements ont été réalisés avec des données d'archives du satellite ERS acquises entre les années 1991 et 2000, en particulier pour la sécheresse de 1996/1997, sur l'Est parisien. Après avoir exposé le phénomène RGA et les facteurs participants, la méthode interférométrique utilisée sera détaillée. On présentera les résultats d'une analyse effectuée à partir de l'imagerie aérienne, des cartes géologiques et de la cartographie de l'aléa réalisée par le BRGM, des cartes de pente et enfin des interférogrammes choisis sur les périodes de sécheresse étudiées.

1 Le Retrait-gonflement d'Argile (RGA)

1.1 Le Risque RGA

La définition du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux en terme d'aléa ou de risque est importante tant les facteurs environnementaux qui interviennent dans la problématique sont nombreux. Rappelons qu'un aléa se définit par la probabilité qu'un événement naturel se produise. Le risque est l'intersection de cet aléa avec un enjeu ou avec une vulnérabilité (Bourrelier et al., 2000) et se mesure par une intensité. La détection des mouvements de la surface du sol par l'interférométrie radar implique que l'on étudie les effets de la sécheresse en tant qu'aléa, qui croisé avec la susceptibilité du sol au retrait-gonflement donne la sécheresse géotechnique (Figure 1A). Cependant la problématique fait aussi intervenir un enjeu, tel que les zones urbaines mais aussi la vulnérabilité des bâtiments et les informations relatives à leurs dommages. Le retrait-gonflement des sols argileux est donc un risque, puisqu'il résulte de la combinaison de l'aléa sécheresse, de la susceptibilité du sol au retrait-gonflement et de la vulnérabilité des infrastructures (Figure 1B).



1.2 Le phénomène physique

Le cycle de tassement et du retour à l'équilibre d'un sol est un phénomène physique naturel qui se traduit par une variation de volume du sol, qui est étroitement liée à la variation de la teneur en eau. D'un point de vue granulométrique, la plupart des types de sols voient leur volume évoluer selon le retrait ou l'apport d'eau. Mais ce sont les propriétés minéralogiques des argiles qui font la particularité du phénomène de RGA : la surface spécifique élevée des feuillets argileux permet aux particules d'argile d'adsorber une quantité importante d'eau. Le potentiel de retrait-gonflement est ainsi particulièrement élevé pour les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (en particulier la montmorillonite) et, dans une moindre mesure, au groupe des interstratifiés, caractérisé par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes tels que les smectites/illites.

Quel est l'ordre de grandeur de ces mouvements susceptibles d'être détectés par la technique d'interférométrie radar ? Lors d'une sécheresse, la tranche la plus superficielle du sol argileux est soumise à l'évaporation sur plusieurs mètres de profondeur. Il en résulte un

tassement vertical et l'ouverture de fissures verticales superficielles. L'amplitude des mouvements verticaux est d'ordre centimétrique et peut dépasser 10cm en certaines circonstances. Une couche argileuse saturée de un mètre d'épaisseur qui subirait une diminution relative de la teneur en eau de 10%, générerait un tassement d'environ cinq centimètres (Barbier, 2004). Ces variations de volume, surtout lorsqu'elle donnent lieu à des tassement différentiels, ont des conséquences importantes sur l'état des bâtiments, en particulier sur ceux dont la conception n'est pas adaptée pour résister à ce type de mouvement.

1.3 Les facteurs

Pour décrire les facteurs influençant l'aléa RGA, on distingue les facteurs de prédisposition et les facteurs de déclenchement (Donsimoni et al., 2003). Cette nomenclature proposée par le BRGM a été reprise dans nos travaux.

Les facteurs de prédisposition sont ceux dont la présence fait que le phénomène de retrait-gonflement est possible, mais ne suffisent pas à eux seuls pour le déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement avec le temps. Ce sont : (1) la nature du sol, (2) le contexte hydrogéologique, (3) la présence d'une nappe phréatique, (4) le contexte géomorphologique et (5) les défauts de construction.

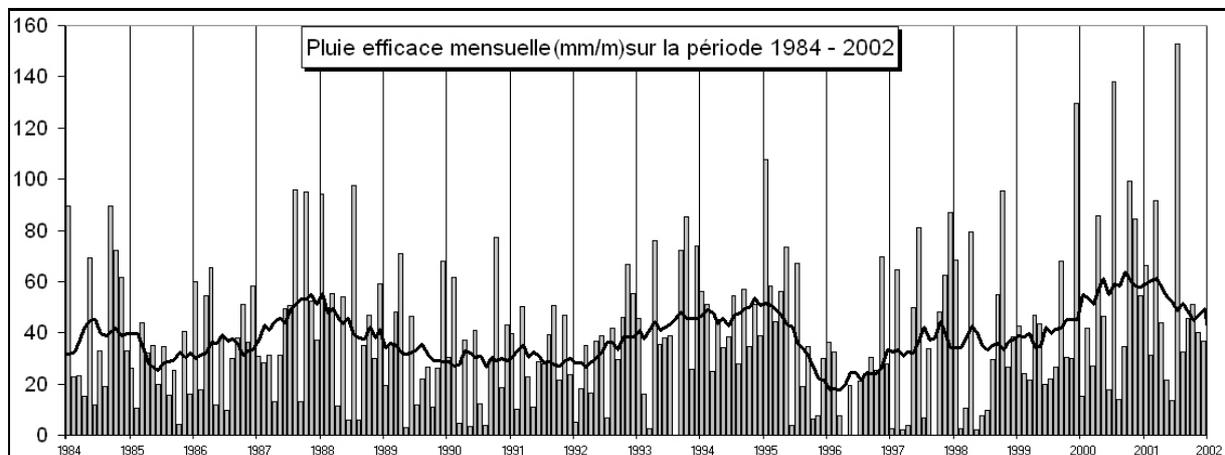
Les facteurs de déclenchement sont ceux dont la présence provoque le phénomène de retrait-gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. Ce sont : (1) les conditions climatiques, (2) les facteurs anthropiques et (3) la végétation.

Ces éléments doivent donc être théoriquement pris en compte lors d'une étude complète de l'impact d'une sécheresse. En effet, selon le processus considéré, l'extension spatiale du mouvement liée aux effets de la sécheresse est variable : la déformation de la surface du sol peut être très localisée pour le retrait-gonflement de sols argileux, mais aussi plus étendue dans le cas d'une déstabilisation des pentes ou dans le cas d'un tassement d'une formation géologique lié au battement du niveau de la nappe d'eau souterraine. Les facteurs de prédisposition selon le contexte environnant, comme la présence de végétation ou l'existence d'une nappe aquifère temporaire peuvent certainement modifier de manière relative l'extension spatiale de ces mouvements. Leurs influences doivent être prises en compte pour mieux décrire les signaux détectés dans les interférogrammes calculés.

1.4 Les périodes relatives de sécheresse

La détermination des périodes de sécheresse est un travail nécessaire pour l'étude des effets de l'aléa sécheresse sur le sol par interférométrie radar. Connaître ces périodes permet de sélectionner les données radar utiles et donne des repères temporels pratiques lors de l'interprétation des interférogrammes. La détermination d'une période de sécheresse consiste à identifier l'intervalle de temps pendant lequel les conditions hydriques sont déficitaires par rapport à des valeurs normales. Les seuils utilisés pour déterminer ces périodes dépendent largement des traitements statistiques et des normes utilisés, c'est pourquoi la définition d'une période de sécheresse peut fortement varier d'un pays à un autre.

Afin de déterminer une ou des périodes d'étude de sécheresse géotechnique, une étude simple des données de température et de précipitation a été réalisée à partir des données de Météo-France sur la région Est parisienne (Figure 2). Elle est basée sur l'analyse de la pluviométrie efficace mensuelle corrigée et de l'estimation d'une courbe de tendance par moyenne mobile centrée (période de 11 mois) pour lisser les disparités pluviométriques mensuelles. La courbe de tendance fait ainsi apparaître les débuts et fins des périodes de déficit hydrique susceptibles d'intéresser l'étude du RGA par interférométrie radar.



La Pluie Efficace brute est calculée à partir de la formule simplifiée : $PE = PP - ETP$, le bilan dans ce cas peut être négatif. On définit également la Pluie Efficace Corrigée PEc pour laquelle les valeurs négatives sont remplacées par zéro. Les histogrammes donnés ci-dessus sont des valeurs en mm par mois.

Précipitation – PP - : le terme précipitation recouvre toutes les eaux météoriques, il concerne la pluie, la rosée, le brouillard, la neige, la grêle, le givre. L'unité employée est le millimètre d'eau par surface unitaire de 1 m^2 .

Evapotranspiration – ETP - : elle désigne toutes les pertes d'eau par retour direct à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. L'évaporation étant le phénomène physique et la transpiration le phénomène biologique. Elle est qualifiée de potentielle puisque la valeur calculée correspond à la limite maximale d'évapotranspiration d'une zone lorsque celle-ci ne subit aucune restriction en eau.

Pluie Efficace – PE - : dans le cadre d'un bilan hydrologique, on définit la notion de pluie efficace qui correspond à la quantité d'eau infiltrée et ruisselée.

Figure 2 : Histogramme de pluviométrie efficace corrigée (PEc) entre 1984 et 2002 sur l'Est parisien et courbe de tendance à partir de la moyenne mobile calculée sur une période mobile de onze mois. Données sources : © METEO FRANCE

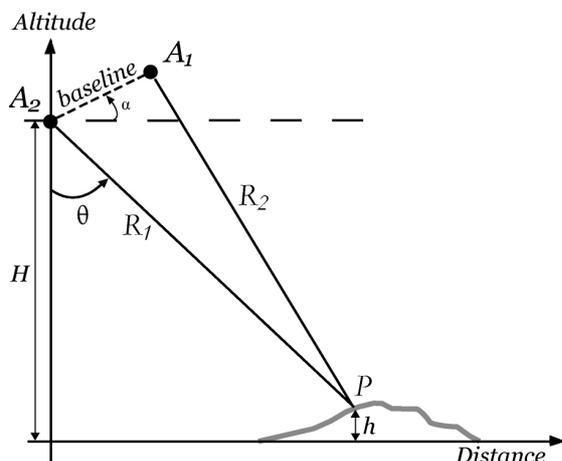
Fig.2: Rainfall histogram between 1984 and 2002 on the eastern Paris basin and the Moving average curve extracted with a period of 11 months. Data: © METEO FRANCE

On peut noter les périodes relativement humides juste avant les sécheresses de 1989 et de 1996. De même, la période 2001-2002 est relativement abondante en précipitations. Une explication possible de la sécheresse géotechnique serait un fort contraste météorologique (tant au niveau des températures que de la pluviométrie) qui fait que l'état hydrique des sols se situe hors de son état d'équilibre. Cette étude simple fixe deux périodes de sécheresse à étudier par interférométrie : la sécheresse de mars à juin 1996 et celle de 2003. Celle de 1989 ne peut être étudiée en raison de l'absence de données radar sur cette période.

2 L'interférométrie différentielle

2.1 Principe

L'interférométrie radar désigne l'ensemble des méthodes « qui utilisent au moins deux images SAR complexes afin d'obtenir des informations supplémentaires sur les objets présents dans une seule image SAR, en exploitant l'information de phase du signal SAR », (Bamler et Hartl, 1998). Pour apporter de l'information, un paramètre d'acquisition doit être différent entre la première et la deuxième image. Cela peut être soit l'instant d'acquisition, soit la position et l'orientation du radar (interférométrie simultanée, par exemple) soit la fréquence ou la polarité de l'onde, émise ou reçue, ou encore le mode d'acquisition.



Les deux capteurs A_1 et A_2 sont séparés par une distance, la ligne de base. Idéalement, cette distance doit être la plus courte possible. Une cible P est localisée dans la scène, à une hauteur h . R_1 et R_2 sont les distances respectives entre les capteurs et la cible.

The distance between the two sensors A_1 and A_2 is called the baseline which must be as short as possible. The target P is at a distance R_1 and R_2 and an elevation h .

Figure 3 : Géométrie d'acquisition en interférométrie

Fig.3: Geometry acquisition in interferometry

Pour l'étude des déplacements, le seul paramètre d'acquisition qui doit changer entre les deux images est la date d'acquisition entre les deux passages successifs. Dans ce type d'application, il est donc préférable que la géométrie d'acquisition entre les passages successifs du capteur soit identique autant que possible. Dans un cas idéal où le satellite repasse exactement au même endroit, on peut alors étudier la différence de phase entre les deux images (la répartition spatiale de ce déphasage) et étudier ainsi l'origine de ce déphasage. Cependant, la relative maîtrise du positionnement des satellites ne permet pas d'avoir des géométries d'acquisition strictement identiques. La distance entre les deux satellites est appelée la ligne de base du couple (baseline en anglais) qui est l'un des paramètres de sélection des images radar pour produire des interférogrammes exploitables.

Les interférogrammes calculés font apparaître des variations de phase sous forme de franges interférométriques colorées. Une différence de phase entre les deux images peut parfois se traduire par la présence de plusieurs franges. Chaque frange est équivalente à un déplacement dont l'amplitude est égale à une demi-longueur d'onde (2,8cm pour le capteur ERS1 et ERS2) selon la ligne de visée du capteur. Par déroulement des franges, on peut ainsi estimer une des composantes du vecteur de déplacement de la surface du sol.

La différence de phase (déphasage), résulte de plusieurs contributions décrites de la façon suivante :

$$\Delta\phi = \Delta\phi_d + \Delta\phi_a + \Delta\phi_t + \Delta\phi_{dc} + \Delta\phi_r + 2k\pi$$

$\Delta\phi$: différence de phase

$\Delta\phi_d$: différence de phase liée au déplacement du sol, mesuré selon la ligne de visée

$\Delta\phi_a$: différence de phase due au changement des conditions atmosphériques

$\Delta\phi_t$: différence de phase liée à la topographie

$\Delta\phi_{dc}$: différence de phase issue des décorrélations géométriques et temporelles

$\Delta\phi_r$: différence de phase résiduelle (bruit) issue des traitements (recalage, enregistrement SAR)

L'analyse d'un interférogramme consiste principalement à distinguer les différentes contributions des phases au sein de l'image pour isoler la seule composante $\Delta\phi_d$ (mesure du déplacement). La précision de mesure pour cette méthode interférométrique est de l'ordre du demi centimètre (Fruneau et al., 2005), pourvu que les données spatiotemporelles de la technique (répétitivité de mesure égale à 35 jours, mesure dans l'axe de visée) soient adaptées au phénomène étudié.

2.2 Limites de l'interférométrie

L'interférométrie DInSAR fonctionne si le décalage dans le temps n'est pas trop long (inférieur à dix ans), si la ligne de base est inférieure à un kilomètre, si l'atmosphère est comparable au moment des deux acquisitions de données. Sous ces conditions, les deux images radar forment un couple interférométrique performant et permettent d'obtenir des franges interprétables en terme de déplacement.

2.2.1 Perte de cohérence

En pratique, l'interprétation des franges interférométriques est rendue difficile par la perte de cohérence temporelle et/ou spatiale (ou géométrique) entre les deux acquisitions. La cohérence est une mesure du degré de corrélation de la phase entre les deux images radar prises sur une même zone avec un certain intervalle de temps. Plus la cohérence est élevée, plus l'interférogramme est lisible. Par exemple, la présence de végétation diminue ou annule la cohérence. A l'inverse, un milieu densément urbanisé favorise la concentration de réflecteurs RADAR et améliore la lisibilité de l'interférogramme. Cette cohérence peut être diminuée par (1) la décorrélation spatiale et (2) la décorrélation temporelle :

(1) La décorrélation temporelle est liée aux changements physiques de la surface entre les deux observations. Cela peut servir d'indicateur de l'état de la surface du sol et ses modifications entre les deux acquisitions. Une illustration de cette décorrélation est proposée à la Figure 4 : on peut observer que sur un interférogramme avec une faible période (ici un mois) entre les deux acquisitions sera plus cohérent, notamment au niveau des champs d'agriculture, qu'un interférogramme avec une période entre images radar de plusieurs années (3 ans pour le second couple).

(2) La décorrélation géométrique résulte des variations dans la géométrie d'acquisition des images. Dès lors que la ligne de base perpendiculaire entre les deux positions du radar aux

deux dates d'acquisitions des images est non nulle, il existe une différence d'angle d'incidence, qui fait que la mesure ne se répète pas exactement au même endroit. Cette décorrélation spatiale, est d'autant plus importante que la ligne de base perpendiculaire est élevée. Certains couples d'images, pour lesquelles la ligne de base dépasse la ligne de base critique, ne donneront pas des interférogrammes exploitables.

De même, ce type de décorrélation spatiale peut résulter de variations de l'angle de dépointage du radar, qui ne vise pas perpendiculairement à sa trajectoire, mais vers l'avant ou l'arrière. Une défaillance des gyroscopes qui contrôlent l'attitude d'ERS-2, à partir de février 2000 est à l'origine de fortes variations de cet angle de dépointage et donc du Doppler des images. Seuls les couples dont la différence de Doppler est inférieure à 400Hz sont donc calculés.

2.2.2 Les artefacts atmosphériques

Les artefacts atmosphériques viennent également perturber l'interprétation des interférogrammes et doivent donc être décrits. Les hétérogénéités atmosphériques locales (présence de nuages, pluie...) introduisent des franges atmosphériques et des anomalies de formes variables (globulaire, effilée ...) sur les interférogrammes et qui ne peuvent pas être facilement séparées des franges de déplacement. Une illustration à la Figure 5A montre les effets sur l'interférogramme de ce type d'artefact.

2.2.3 Les artefacts liés aux traitements

Enfin d'autres effets indésirables peuvent apparaître au sein des interférogrammes comme l'apparition d'une frange liée à une mauvaise connaissance de la géométrie orbitale lors de l'acquisition des images (voir Figure 5B). Il apparaît ainsi des franges résiduelles au sein des interférogrammes qu'il est possible de corriger.

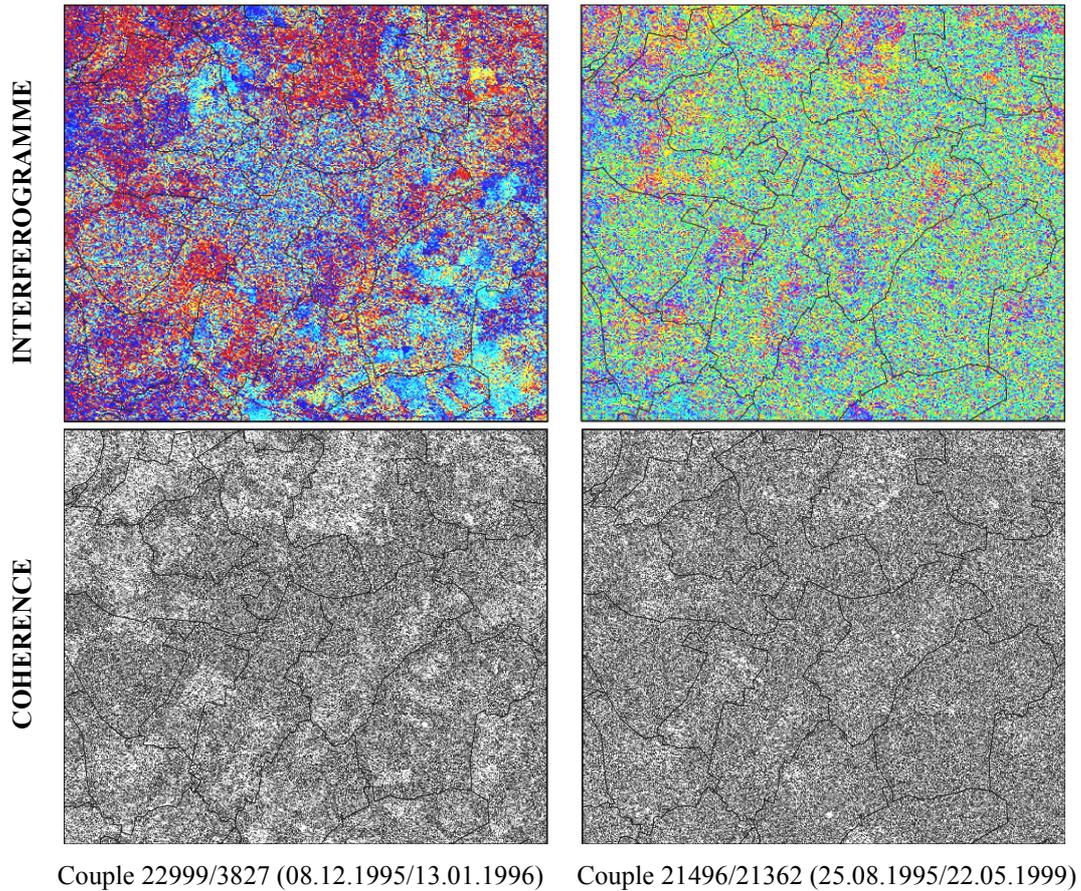


Figure 4: Illustration de la perte de cohérence temporelle.

Fig.4: Example of the temporal coherence loss.

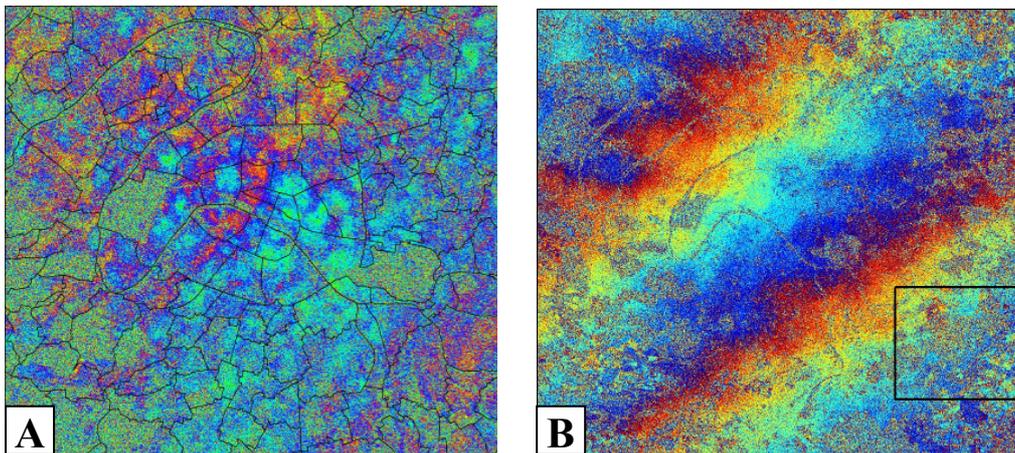


Figure 5 : (A) Exemple d'un interférogamme affecté par des artefacts atmosphériques.
(B) Exemple d'un interférogamme avec deux franges orbitales.

Fig.5 A- Example of an interferogram affected by atmospheric artefacts, B- Example of an interferogram characterized by two orbital fringes.

Figures disponibles en couleur sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>

2.3 Critères de sélection des couples interférométriques.

Trois critères de sélection interviennent dans le choix des images radar pour calculer un interférogramme de qualité. Ce sont les périodes de sécheresse, la ligne de base et la valeur du doppler. Selon que ces critères sont plus ou moins respectés, on peut juger de l'intérêt d'un interférogramme avant son calcul.

Les périodes de sécheresse sont un critère important de sélection dans ce type d'étude. Il motive le choix des couples et justifie de recalculer des interférogrammes même si les autres paramètres sont en limite de qualité. En effet, chaque interférogramme calculé implique deux images. Le fait que l'une ou les deux images appartiennent à ces périodes va déterminer l'interprétation qui en sera faite. En effet, certains mouvements sont attendus selon que l'interférogramme couvre ou non la période sensible de sécheresse. En dehors de ces périodes de sécheresse, il sera intéressant de suivre sur le long terme les effets consécutifs au tassement, jusqu'à deux ans après l'épisode climatique déclencheur. Enfin, il sera également intéressant d'observer le retour à l'équilibre des sols sur les interférogrammes.

La ligne de base ou « baseline » est un paramètre essentiel dans la sélection des données radar pour constituer des couples interférométriques. C'est une variable qui indique la qualité des interférogrammes produits. Une sélection avec une ligne de base de 200 mètres a été ici réalisée, même si dans la pratique, les interférogrammes facilement interprétables ont une valeur de ligne de base inférieure à 100 mètres.

Enfin, un paramètre lié aux traitements des données SAR, la valeur du doppler centroïde, a été pris en compte dans la sélection des images radar. En télédétection radar, la précision du doppler centroïde affecte directement la qualité des images radar. Sa connaissance est donc importante pour l'application interférométrique envisagée. En effet, les échos qui portent l'information de phase et d'amplitude sont enregistrés par le capteur radar en utilisant un effet doppler, qui est utilisé en traitement du signal pour reconstruire les images. Or, suite à une défaillance du satellite ERS-2 en février 2000, les valeurs du doppler centroïde ont des variations importantes, ce qui réduit le nombre d'interférogrammes à calculer. Ainsi, la sélection des images radar pour constituer un interférogramme exploitable est faite de telle sorte que la différence entre les doppler des deux images n'excède pas 400Hz en valeur absolue.

Donc, même après une sélection par la ligne de base et les dates, tous les interférogrammes ne sont pas exploitables. Avec les données des missions ERS-1 et ERS-2 en

mode ascendant et descendant et en appliquant les critères de sélection exposés plus haut, plus de 300 interférogrammes ont été calculés, mais principalement sur la période 1995 à 2000. Ces interférogrammes présentent des qualités variables, seuls certains étant réellement exploitables pour l'application envisagée.

3. Application de l'interférométrie à l'Est parisien

Cette partie décrit les résultats obtenus par l'interférométrie DInSAR appliquée à l'Est parisien pendant les périodes de sécheresse. En premier lieu une description de la zone d'étude est présentée, puis des planches illustrées d'interférogrammes et de documents thématiques sont décrits et analysés.

3.1 La zone d'étude

Une zone d'intérêt a été définie et deux sites ont été sélectionnés dans l'Est parisien. Après avoir précisé leur emprise géographique, une analyse géomorphologique et géologique est présentée, ainsi que l'analyse de la sinistralité effectuée pour caractériser l'ampleur spatiale du phénomène. L'ensemble de ces informations est essentiel pour la bonne réalisation des travaux en interférométrie radar.

3.1 Localisation et occupation du sol.

bâties édifiées pour la zone d'étude. La répartition des classes par ordre d'importance décroissante est donnée par le tableau suivant :

CODE	libellé	Surf. (km ²)	%
9	Habitat individuel	13,9	42,7
10	Habitat collectif	4,3	13,2
6	Parcs et jardins	3,1	9,5
20	Transports	2,6	8,0
12	Activités secondaires	1,8	5,5
1	Bois	1,4	4,4
7	Sport (espaces ouverts)	0,9	2,9
15	Equipement d'enseignement	0,8	2,4
8	Terrain vacant	0,7	2,1
4	Eau	0,7	2,1
18	Locaux, administration	0,5	1,5
13	Activités tertiaires	0,4	1,4
5	Autre rural	0,4	1,4
17	Cimetière	0,2	0,7
21	Chantiers et divers	0,2	0,5
14	Sport (construit)	0,1	0,4
2	Grandes cultures	0,1	0,4
16	Equipement de santé	0,1	0,3
11	Habitat autre	0,1	0,2
19	Grands équipements	0,0	0,1
3	Autres cultures	0,0	0,1
	TOTAL	32,6	100,0

Tableau 1 : Statistique d'occupation du sol sur les zones d'études à 21 postes, classés par ordre d'importance de la superficie (Source : MOS IAURIF).

Table1: Surface statistic of 21 land cover classes ranked in surface order of importance.

Pour une surface totale de 32,6 km², les bâtiments résidentiels représentent 55,5% de la surface urbanisée et c'est l'habitat individuel qui arrive en première position avec près de 42,7% d'occupation du sol urbanisé, suivi de très loin par l'habitat collectif (13,2%). On constate également l'importance des espaces arborés publics qui représentent 16% de la surface de la zone d'étude (parcs, forêts et plans d'eau). Ensuite viennent les transports et les activités secondaires avec respectivement 8,0% et 5,5%.

Ces chiffres traduisent d'une part le caractère majoritairement résidentiel du mode d'habitat dans les zones d'étude choisies et d'autre part le caractère individuel des bâtiments. Ce tissu urbain est caractéristique d'une zone périurbaine secondaire, avec de nombreux pavillons accompagnés de jardins privés.

2.2 Sinistralité

Une étude préalable de la sinistralité a été réalisée afin de développer des hypothèses sur les mouvements de la surface du sol lié au RGA. Pour cette courte analyse des désordres provoqués par le RGA, il est important d'évaluer l'évolution temporelle et l'extension spatiale du phénomène.

a) Evolution de la sinistralité au cours du temps.

Les déclarations des sinistres sur les biens privés auprès des assureurs et des collectivités ainsi que les constats d'experts permettent de dresser un premier bilan du phénomène. Ces données ont été rendues publiques par le BRGM pour un département voisin, la Seine-et-Marne (Donsimoni et al., 2006). Néanmoins, notons que les déclarations de sinistres peuvent intervenir plusieurs mois après la date effective du début du sinistre. Cela est en partie lié à une observation tardive ou à une déclaration différée. On notera qu'une à deux années peuvent s'écouler avant qu'une commune soit déclarée en état de catastrophe naturelle par l'Etat.

On observe généralement que les dommages se répercutent à long terme après un épisode de sécheresse (Figure 7). L'étude des dates de sinistralité montre que la sécheresse de 1989 précède des sinistres déclarés en 1991 et 1992 en saison humide. Le nombre de sinistres déclarés en 1989 est à peu près équivalent au nombre de sinistres survenus en 1991 et 1992. Il faut attendre l'année 2003 pour observer à nouveau une sinistralité comparable en nombre de déclarations à celle de 1989.

Cette étude montre que le RGA provoque des sinistres sur une période de plusieurs années, longtemps après l'épisode de sécheresse. La sécheresse, qui est un événement ponctuel à l'échelle d'une saison se traduit par un risque RGA sur plusieurs années en fonction de la susceptibilité du sol au retrait. La sécheresse provoque donc un retrait, qui est le moteur de la déformation. Cette phase initiale du RGA est suivie d'un gonflement qui intervient de manière inégale tant dans le temps que dans l'espace. On observe aussi sur la figure 7 que la sécheresse de 1996/1997 n'a pas apporté autant de déclarations de sinistres liés au RGA qu'en 1989 dans le département de la Seine-et-Marne (77).

Cependant, dans la mesure où les données radar d'archives ERS ne permettent qu'une étude à partir de 1993, seuls la sécheresse de 1996/97 et l'épisode caniculaire de 2003 seront donc étudiés.

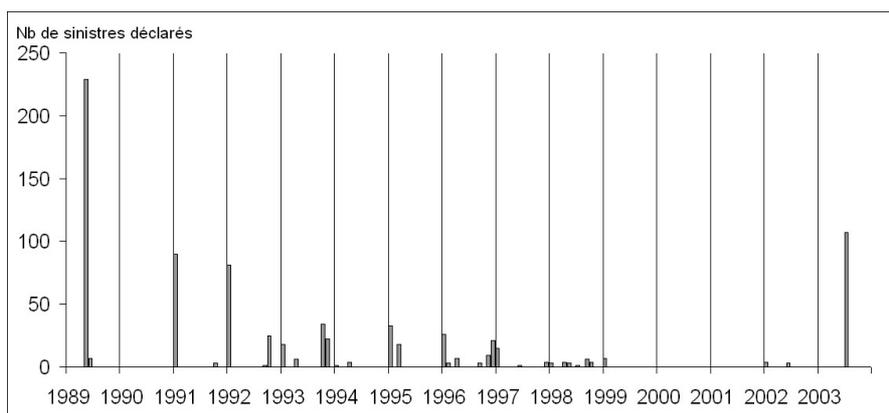


Figure 7 : Dates des déclarations de sinistres de bâtiments pour le département de Seine-et-Marne (77) entre 1989 et 2004 (données extraites de Donsimoni et al. 2006)

Fig.7: Date of the damaged houses declaration for the Seine-et-Marne District (77) between 1989 and 2004 (data coming from Donsimoni et al., 2006).

2.3 Eléments de Géologie/Géomorphologie

Le relief de la zone d'intérêt est constitué de trois principales unités : la plaine alluviale de la Marne, le plateau et ses versants (figure 9). Les flancs des plateaux présentent des pentes prononcées recoupant les formations géologiques subhorizontales. Au niveau des talwegs, les pentes sont plus douces et les formations sous-jacentes aux limons de plateau affleurent davantage. L'altitude de la plaine alluviale n'excède pas les 35 mètres. La plaine alluviale est composée d'alluvions quaternaires : sables et graviers recouverts par des limons d'inondation. Sur les flancs des versants affleurent les couches de la série éocène et oligocène avec de la base au sommet : calcaire de Champigny ou masses et marnes de gypse, marnes supra-gypseuse, argile verte de Romainville et glaise à Cyrènes, calcaire de Brie et argiles à meulières. Au sommet des plateaux, une couverture de limon des plateaux est présente (Figure 8, A).

Parmi ces formations citées plus haut, le calcaire de Brie (g_1b) par sa nature calcaire est peu sensible au phénomène RGA, bien qu'il puisse contenir à la base quelques niveaux marno-calcaires, voire argileux, et bien qu'il puisse présenter localement des poches de décalcification remplies de matériaux argileux. De même, les limons des plateaux (LP) sont peu sensibles au retrait-gonflement, car principalement constitués de matériaux limoneux, même si localement la distinction entre limons de plateaux et argiles à meulières sous-jacentes est délicate. Les autres formations géologiques, par leur nature marneuse ou argileuse, sont

potentiellement sujettes au retrait-gonflement. Il s’agit d’étudier le lien entre la sinistralité et l’extension des formations géologiques décrites cartographiquement par le BRGM.

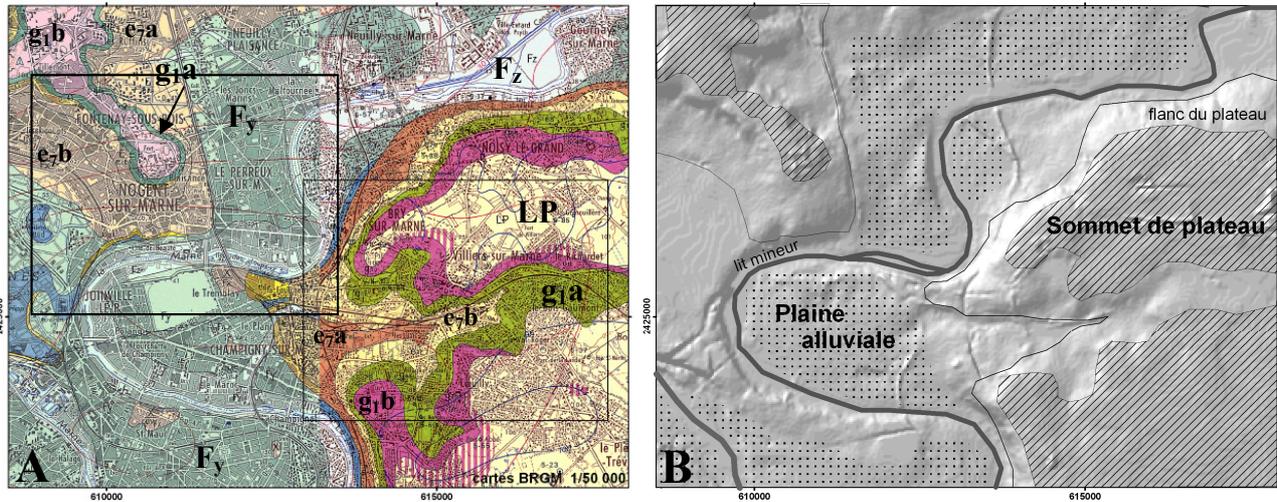


Figure 8: (A) Extrait légendé de la cartographie géologique du BRGM (Soyer et al., 1958) et (B) Descriptif géomorphologique simplifié sur le zone d’intérêt.

Fig.8 A- Detail of the BRGM mapping (Soyer et al., 1958), B- Simplified geomorphologic description of the test site.

- e7a : Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies indifférenciées (Eocène supérieur, Priabonien, Ludien inf. à Ludien moy.), Marnes ludiennes (faciès de transition) et Masses&Marnes du gypse (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien moyen).
- e7b : Marnes supragypseuses (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien supérieur) ; les Marnes bleues d’Argenteuil et les Marnes blanches de Pantin.
- g1a : L’Argile verte de Romainville et les glaises à Cyrènes (Oligocène, Rupélien, Sannoisien inférieur).
- g1b : Calcaire de Brie et argiles à meulière (Oligocène, Rupélien, Sannoisien)
- LP : Limons des plateaux.
- Fy : Alluvions anciennes.
- Fz : Alluvions modernes.

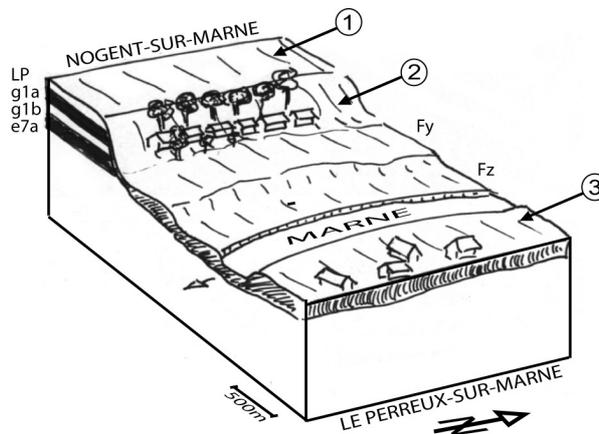


Figure 9 : Représentation 3D simplifiée de la zone d’étude de Nogent-Sur-Marne.

- (1)- Plateaux, soumis au RGA et retrait des nappes temporaires, (2)- Flanc de coteaux, sensible au fluage des sols et au RGA, (3)- Zone alluvionnaire humide soumise à l’aléa sécheresse par la baisse hydraulique de la nappe sous jacente.

Fig.9: 3D view of the Nogent-Sur-Marne area.

1- Plateau submitted to the drought, 2- Flank sensitive to the soil creep and drought, 3- Alluvial plain submitted to topographic movement due to the seasonal piezometric variation.

3.2 Analyses

Les planches en couleurs qui montrent les résultats des interférogrammes sont placées à la fin de l'article en noir et blanc et sont disponibles en couleur sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>.

La planche 1 présente une série de vignettes focalisées sur les villes de Nogent-sur-Marne et du Perreux-sur-Marne. Deux agrandissements A_1 et A_2 sont extraits de l'orthophotographie A. Les maisons qui ont été déclarées sinistrées pour le RGA entre 1989 et 2002 (étoiles noires) sur la commune de Nogent-Sur-Marne sont notamment alignées N/S perpendiculairement à la Marne sur une zone de forte pente (planche 1, A_1). Elles sont situées sur des roches argileuses gonflantes (g_{1a} et g_{1b}) d'âge éocène à oligocène supérieur (planche 1, C). Ces maisons individuelles sont encadrées par deux espaces arborés (planche 1, A et A_1). La combinaison des trois facteurs 'végétation arborée', 'forte pente', et 'sol gonflant argileux', est certainement à l'origine de cette forte sinistralité. Cette zone appartient bien à un aléa fort d'après la cartographie du BRGM (planche 1, B). L'interférogramme brut (planche 1, E) et l'interférogramme masqué (planche 1, F) à une cohérence de 0,6 soulignent et révèlent une forte cohérence sur les maisons et bâtiments et, à l'inverse, une faible cohérence sur les zones boisées. La présence de pixels contigus de différentes couleurs sur les interférogrammes souligne la disparité des amplitudes de déplacements des bâtiments, mais cela reste difficilement exploitable du fait du bruit important.

La seconde illustration (planche 1, A_2) est située sur la ville du Perreux-sur-Marne, dans la plaine alluviale de la Marne où se sont déposées les alluvions holocènes F_y et les alluvions récentes F_z (planche 1, C). Ces alluvions argileuses, qui ont des propriétés gonflantes, correspondent à des dépôts de plaine d'inondation. L'agrandissement de l'orthophotographie (planche 1, A_2) montre l'importance de l'habitat pavillonnaire et la présence d'arbres isolés. La sinistralité est caractérisée par des aléas faibles à moyens (planche 1, D). L'information délivrée par les interférogrammes (planche 1, E et F) révèle une faible cohérence liée à l'occupation pavillonnaire jardinée, rendant les interférogrammes difficilement exploitables. La sinistralité est très dispersée et difficile à interpréter.

La Planche 2 présente une série d'interférogrammes calculés à partir de couples d'images radar indépendantes sur la zone d'étude. Un rappel de la topographie (Planche 2, A) et de la géologie (Planche 2, B) est présenté en haut de la planche afin d'apprécier le contexte général.

Ces six interférogrammes révèlent des déformations soulignées par des flèches noires. Les numéros d'orbite et les dates d'acquisition des couples sont indiqués respectivement en bas à gauche et en bas à droite des vignettes. Les cinq premiers extraits d'interférogrammes révèlent un déphasage du signal radar au niveau de la transition entre la formation F_y et la formation e_{7b} . On peut observer la proximité de ce déphasage avec les sinistres localisés juste en amont, ainsi qu'avec une rupture de pente qui caractérise le changement lithologique entre les alluvions F_y et les marnes de l'Eocène supérieur e_{7b} . Ce déphasage est croissant (rapprochement du sol vers le capteur) entre les années 1996 et 1999 pour les quatre premières vignettes, et seul l'interférogramme 1515 5022 entre le 04.08.95 et le 05.04.96 présente un déphasage négatif (éloignement du sol dans la direction de visée du capteur radar). On montre ainsi un retrait à peine perceptible pendant la fin de l'année 1995 et avril 1996 de l'ordre de 0,3 cm et un gonflement des sols de 0,4 cm jusqu'en 1998 dans le sens de visée du satellite. Une discussion sur l'amplitude de ces valeurs est effectuée ci-après. La dernière vignette représentée par le couple 24695/17046 pour la période entre du 04.04.1996 au 24.07.1998, montre un déphasage positif interprété comme un gonflement sur la rive Est de du Perreux-Sur-Marne. Il coïncide également avec des sinistres sur une zone alluvionnaire. On note des signaux de déphasage positif également sur les berges de la Marne.

3.3 Discussion

Sur le terrain, les déplacements engendrés par le RGA affectent une zone comprise entre la dizaine de mètres carrés et plusieurs centaines de mètres carrés en planimétrie pour des mouvements verticaux de l'ordre au maximum de quinze centimètres. Cependant, les mouvements détectés par interférométrie sont bien inférieurs, car de l'ordre du demi-centimètre sur les surfaces urbaines de Nogent-Sur-Marne. Dans la mesure où la technique interférométrique DInSAR décrit principalement les mouvements liés aux réflecteurs des bâtiments, on parvient à expliquer cet écart. En effet, on mesure par interférométrie la réponse du bâtiment aux sollicitations des mouvements induits par le RGA.

Deux types de mouvement sont à distinguer : (1) celui des bâtiments en général, mesuré par interférométrie radar avec une amplitude de quelques millimètres et une surface de

plusieurs dizaines de m², et (2) les mouvements du sol caractérisés par une amplitude pluricentimétrique. Hanssen, (2001) définit le champ d'application de l'interférométrie différentielle en prenant en compte l'amplitude et l'extension spatiale des mouvements étudiés (Figure 10). Cette figure a été modifiée en ajoutant un bloc « RGA » avec les dimensions spatiales de ce type de mouvement observé. Ainsi, les déformations de la surface du sol observées et liées au RGA sont situées à la limite supérieure, du champ d'application de la méthode DInSAR (Figure 10, bloc RGA, coin haut gauche), tandis que les mouvements détectés sur le bâti (amplitude millimétrique et forte extension) se placent dans le champ d'application de l'interférométrie (Figure 10, bloc RGA coin en bas à droite).

Les calculs réalisés avec la technique interférométrique DInSAR appliquée à la sécheresse 1996/97 montrent donc des limites. La réponse des bâtiments aux déformations engendrées par le RGA n'est pas homogène dans le temps et dans l'espace. Quelques signaux détectés ont pu être mis en relation avec la sinistralité mais cela nécessite une confirmation terrain. Cependant, les déformations discrètes à l'échelle de petits bâtiments sont rarement décrites.

Parmi les facteurs environnants participant au phénomène RGA, les surfaces végétalisées et arborées, caractérisées par leur forte évapotranspiration sont souvent la source des nombreux désordres constatés. Or ces zones ont une très faible cohérence en interférométrie radar, et sont donc peu identifiables au sein des interférogrammes. La topographie, en particulier les pentes, est un facteur de prédisposition important, car il joue sur la stabilité du terrain pendant le cycle de dessiccation/hydratation du sol. A une échelle régionale, l'étude géomorphologique du paysage permet de mettre en évidence les zones à risque. A une échelle locale, des études de pentes précises sont nécessaires. Enfin, la nature du sol décrite par la carte géologique est certainement un point de départ dans l'étude de la susceptibilité au RGA. La méthodologie du BRGM est confirmée, la sinistralité étant globalement liée à l'aléa cartographié.

L'analyse des facteurs relatifs à la topographie, la végétation et le type de sol révèle que la description du tissu urbain et de son organisation est nécessaire. Le mode d'occupation du sol de l'IAURIF, permet de situer les zones urbanisées, c'est-à-dire l'enjeu et plus particulièrement les zones urbaines secondaires pavillonnaires. Les informations ainsi extraites, telles que la proximité d'espace arboré, la pente du terrain ou la présence d'un terrain sensible au RGA, sont traitées sous un système d'Information Géographique pour produire une cartographie du risque et des dommages liés au RGA.

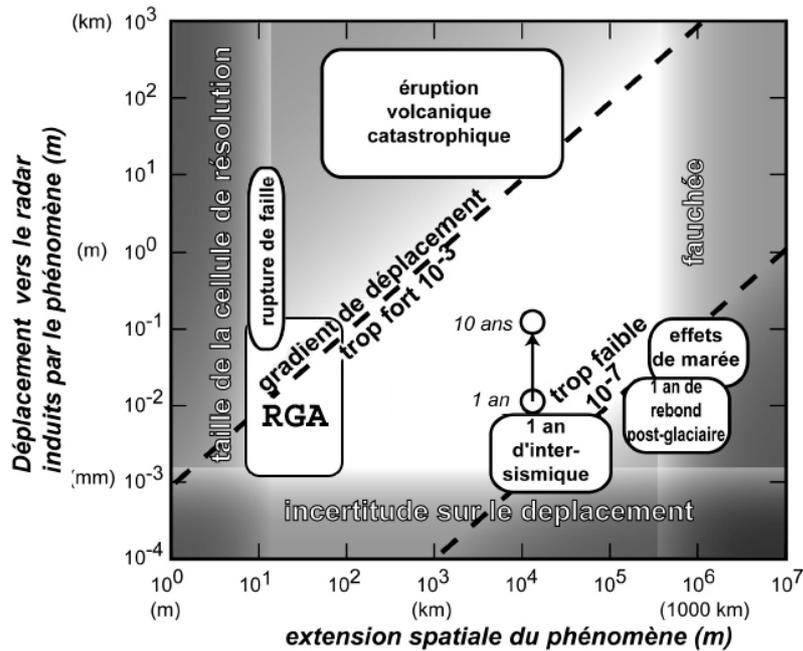


Figure 10: Domaine d’application de l’interférométrie radar [Massonnet et Feigl (1998), Hanssen (2001), Pathier (2005), modifié].

Fig.10: Radar interferometric application domain [modified from Massonnet et Feigl (1998), Hanssen (2001), Pathier (2005)].

Conclusions

Cette approche multisource et pluridisciplinaire permet de mieux comprendre les déplacements de la surface topographique dans les zones soumises au retrait-gonflement. Un Système d'Information Géographique (SIG) est utilisé ici afin de mieux comprendre les origines de la sinistralité liée au retrait-gonflement des sols argileux. Les résultats d’une cartographie optimisée du RGA à l'aide de la combinaison de données issues de la télédétection intégrée dans un SIG pourraient apporter des éléments concrets utiles aux gestionnaires et assureurs.

Plusieurs exemples sont issus de l'Est de l'Île-de-France, région fortement affectée par la sécheresse géotechnique. On constate que la proximité de zones fortement arborées, à forte pente et de formations géologiques argileuses gonflantes d'âge oligo-éocène sont autant de facteurs de prédisposition. L'interférométrie radar (DInSAR) est testée ici dans un but de localisation, de caractérisation et de quantification des amplitudes des déformations liées au RGA. Elle souligne des déplacements qui ne sont pas toujours facile à interpréter. En effet, les

résultats observés sont limités du fait (1) de la faible cohérence de la zone d'étude liée *pro parte* à la nature du tissu péri-urbain (habitat individuel, pavillonnaire disparate, jardiné et arboré); (2) du faible nombre d'images radar ERS et Envisat utilisées et actuellement disponibles sur les périodes de sécheresse et de déficit hygrométrique ; (3) de la non continuité des déplacements engendrés par le RGA dans le temps, et enfin (4) de la forte évolution spatiotemporelle du phénomène. Soulignons que les limitations d'usage sont nombreuses, du fait de la perte de corrélation géométrique, temporelle et des artefacts atmosphériques, qui limitent l'interprétation des anomalies dans un milieu péri-urbain présentant beaucoup moins de réflecteurs que le milieu urbain plus dense. Il semblerait que seules des déformations affectant une zone supérieurs à 1000 m² sont potentiellement analysables par cette méthode.

Il s'avère donc nécessaire maintenant d'effectuer cette étude en utilisant une autre technique interférométrique, plus adaptée à des objets ponctuels de la taille des bâtiments : la méthode des Points Stables (PS), dénommé Persistent Scatterers Interferometry (PSI) en anglais. L'interférométrie PSI, qui semble plus adaptée à la problématique du RGA permettrait de suivre l'évolution temporelle de réflecteurs fortement rétrodiffusant pourvu que l'on précise la nature du réflecteur et qu'il soit suivi dans le temps avec une référence stable correctement localisée et déterminée.

Légendes des Planches :

Planche 1 : Zone de Nogent-Sur-Marne – A, A1, A2 Orthophotographies, B – Carte d'aléa BRGM, modifié avec le bâti (MOS IAURIF) C- Carte géologique de la figure 8A, D - Carte de pente, E, F - Interférogramme 7334_20360 avec et sans masque de cohérence de 0,6. (disponible sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>)

Plate 1: Nogent-Sur-Marne area – A, A1, A2 Aerials photos, B – Risk map issued from BRGM, modified, and anthropic building area (MOS IAURIF) C- Geological map fig.8, D – Slope map, E, F - Interferogram 7334_20360 with and without a coherence mask of 0.6. (available on <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>)

Planche 2 : Extraits d'interférogrammes sur la zone d'étude de Nogent-Sur-Marne et (A) estompage de MNT révélant la topographie et (B) extrait de la carte géologique et de la sinistralité recensée par le BRGM (Donsimoni et al., 2003). (disponible sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>)

Plate 2: Extracts of interferogram on the study area of Nogent-Sur-Marne and A- Hillshaded DTM revealing the topography and B- Extract of the geological map and damage identified by the BRGM (Donsimoni et al., 2003) (available on <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>)

Remerciements

Nous tenons à remercier (1) l'IAURIF pour avoir accordé l'utilisation du MOS 2003; (2) la Fondation MAIF pour son aide financière; (3) l'IGN pour les extraits de la BDortho sur l'Île-de-France issue du Géoportail; et (4) le BRGM pour la carte géologique non vectorisée achetée, et la synthèse des données de sinistralité disponibles dans les rapports départementaux (cf. www.argiles.fr). Nous tenons également à remercier vivement les relecteurs pour les améliorations apportées au manuscrit.

Bibliographie

- Bamler, R. et Hartl P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14(4): pp. R1 - R54.
- Barbier P. 2004. Comprendre le phénomène de retrait-gonflement. *Qualité Construction*. N°87. novembre - décembre 2004, pp. 21-44.
- Ben-Dor E.; Patkin K.; Banin A.; Karnieli A. 2002. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data - a case study over clayey soils in Israel, [International Journal of Remote Sensing](#), Volume 23, Number 6, 30, pp. 1043-1062.
- Bigot G., Zerhouni M. I. 2000. Retrait, gonflement et tassement des sols fins, Notes Techniques. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* -229, NT 4252, pp. 105-114.
- Bourrelier P. H., Deneufbourg G., De Vanssay B. 2000. *Les Catastrophes Naturelles*, Editions OEM, 157p.
- Chabrillat S., Goetz A. F. H., Krosley L. and Olsen H. W. 2002. Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution *Remote Sensing of Environment*, Volume 82, Issues 2-3, pp. 431-445.
- Donsimoni M., Kerneis M., Giraud F. avec la collaboration de Imbault M. et Le Roy S., 2006. Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Seine et Marne. Rapport BRGM/RP-53212-FR, 38 ill., 3 ann., 3 pl. h.t., 1 CD-Rom, 114 p.
- Donsimoni M. avec la collaboration de Clozier L., Motteau M., Vincent M. 2003. Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne. BRGM/RP-52224-FR, 5 fig., 16 tabl., 2 ann., 4 pl. h.t., 133p.
- Fruneau B., Deffontaines B., Rudant J-P. and Le Parmentier A-M. 2005. Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry. *Comptes Rendus Geosciences*, Volume 337, Issue 13, pp. 1173-1183.
- Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lo K., Lea D.W., and Medina-Elizade M. 2006. Global temperature change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 006; 103; 14288-14293; originally published online Sep 25, 2006; doi:10.1073/pnas.0606291103.
- Hanssen, R. F. 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Remote Sensing and Digital Image Processing, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 308p.
- Kariuki P.C., Van der Meer F. 2003. Issues of effectiveness in empirical methods for describing swelling soils. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 4, Issue 3, pp. 231-241.
- Kariuki P. C., Woldai T. and Van der Meer F. 2004. The Role of Remote Sensing in Mapping Swelling Soils. *Asian Journal of Geoinformatics*, Vol. 5, No. 1, Published by ARSRIN, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand.
- Massonnet D., Feigl K. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Review of Geophysics*, Vol. 36, No. 4, pp. 441-500.
- Pathier E. 2003. Apports de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan. Thèse de l'Université Marne-la-Vallée, (école doctorale ICMS), France, 272p.

- Soyer R., Lemoine M., Goguel J. 1958. Carte géol. France (1/50 000), feuille LAGNY (type1922), 1^e édition – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières.
- Van der Meer, F. 1999. Can we map swelling clays with remote sensing? In: Van der Meer, F., Nieuwenhuis, G.J.A., Molenaar, M. & Woldai, T. (eds.), Operational remote sensing for sustainable development. Journal of Applied Geoinformation Management (special section), 1(1): pp. 27-35.
- Vincent M. 2006. Prévention du risque sécheresse : cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles et établissement de plans de prévention des risques. Revue géologue n°146, ISBN 0016.7916, pp. 43-47.

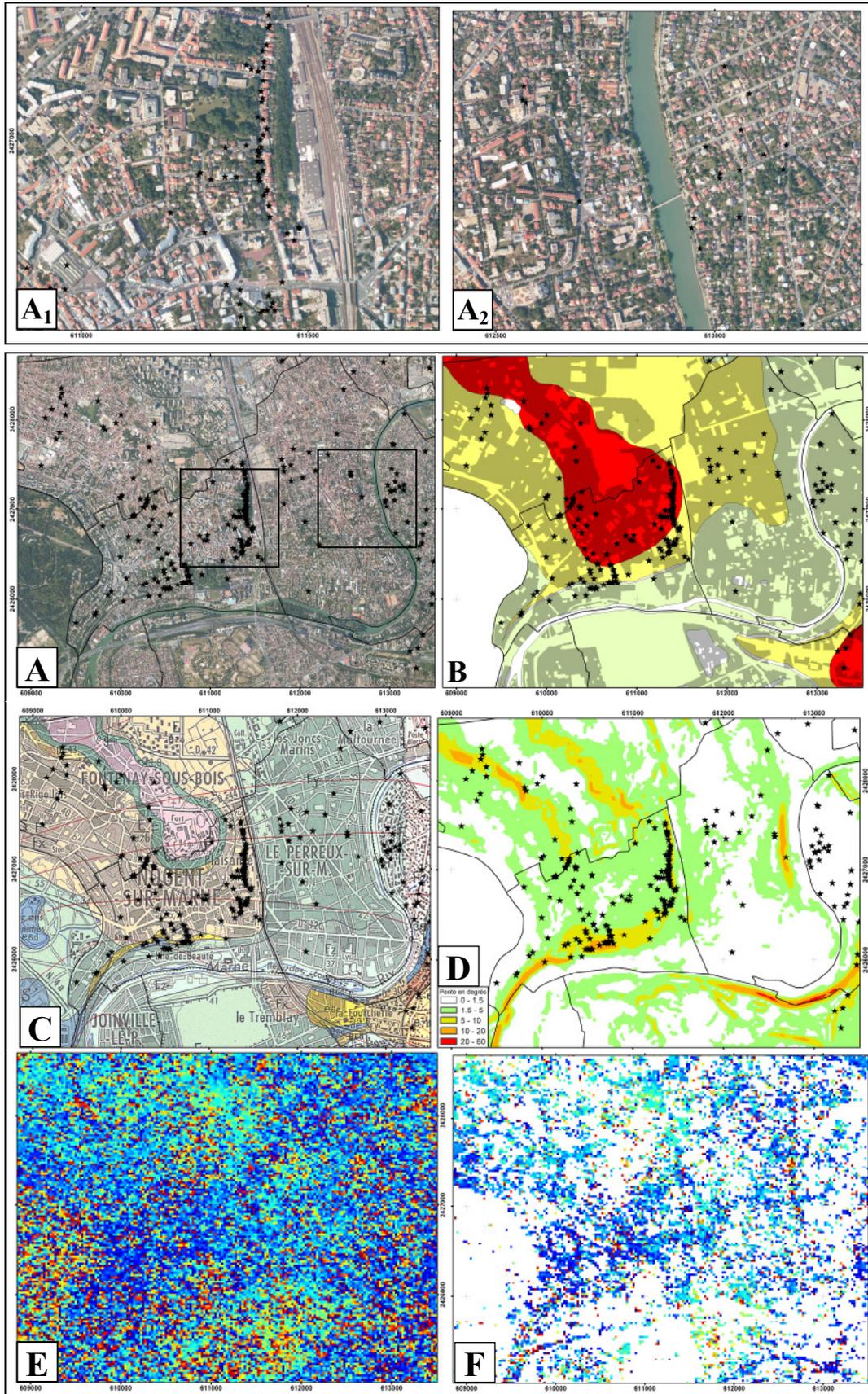


Planche 1: Zone de Nogent-Sur-Marne – A, A1, A2 Ortho photographie, B - aléa BRGM avec le bâti (MOS IAURIF) C- Carte géologique, D - Carte de pente, E, F - Interférogramme 7334_20360 avec et sans masque de cohérence de 0.6. (<http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>)

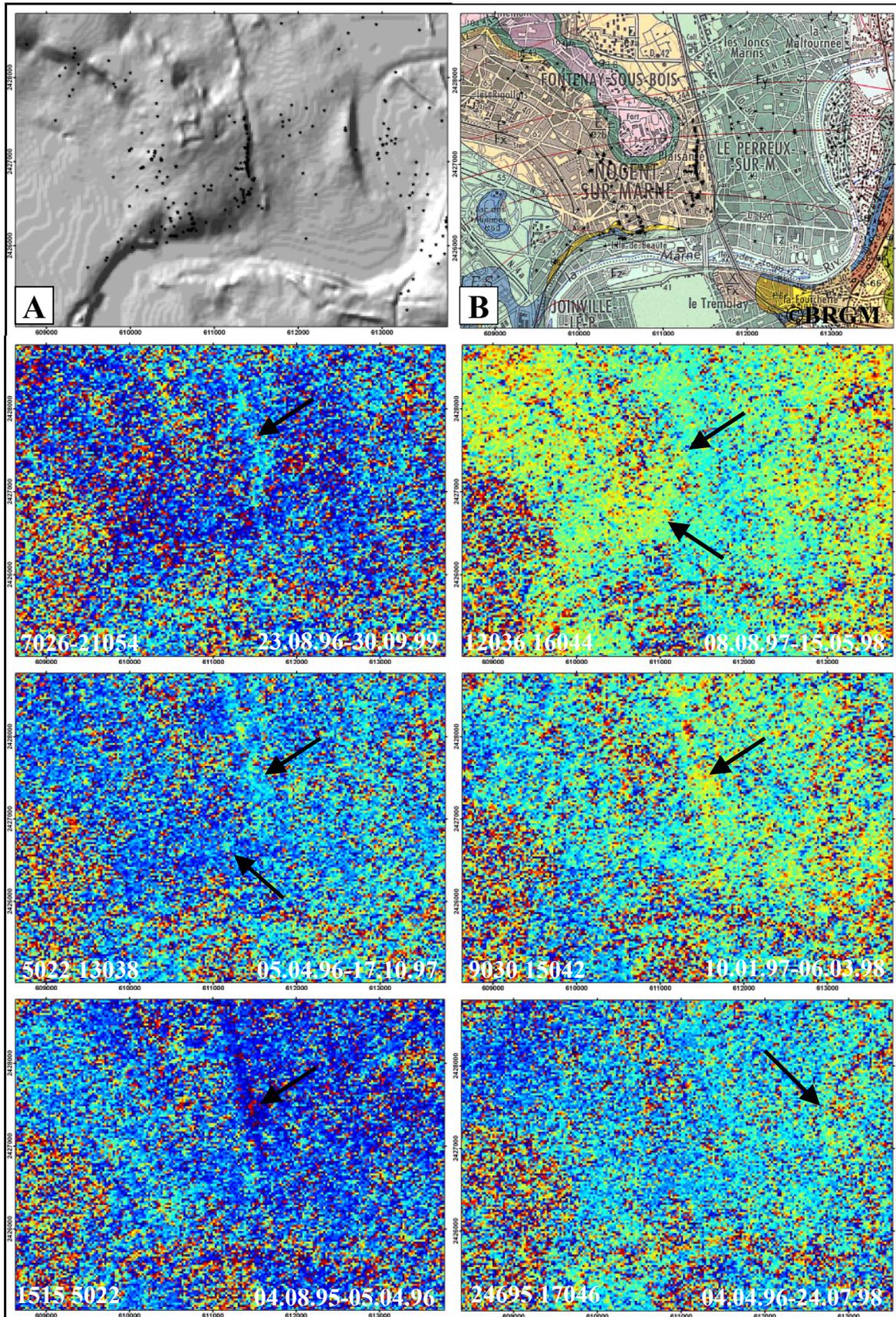


Planche 2 : Extraits d'interférogrammes sur la zone d'étude de Nogent-Sur-Marne et (A) estompage de MNT révélant la topographie et (B) extrait de la carte géologique et de la sinistralité recensée par le BRGM. (disponible sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>)

