



Potentiel de l'interférométrie radar satellitaire PSI pour la mesure des déformations de surface en relation avec le phénomène de retrait- gonflement des argiles Démonstration sur le secteur de Mormoiron (Vaucluse)

Rapport final

BRGM/RP-57935-FR

Décembre 2009





Potentiel de l'interférométrie radar satellitaire PSI pour la mesure des déformations de surface en relation avec le phénomène de retrait- gonflement des argiles Démonstration sur le secteur de Mormoiron (Vaucluse)

Rapport final

BRGM/RP-57935-FR

Décembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2009 09RISD22

C. Carnec, S. Le Roy, D. Raucoules, E. Plat

Avec la collaboration de

I. Iannicella (TRE), F. Resta (TRE), A. Tamburini (TRE)

Vérificateur :

Nom : C. Mathon

Date : 07/01/2010

Signature :

Approbateur :

Nom : T. Winter

Date : 08/01/2010

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : Interférométrie radar, aléa, retrait-gonflement, argile, sinistre, ENVISAT, Vaucluse, Mormoiron

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

CARNEC C., LE ROY S., RAUCOULES D., PLAT E. avec la collaboration de **IANNICELLA I. (TRE), RESTA F. (TRE), TAMBURINI A. (TRE)** (2009) – Potentiel de l'interférométrie radar satellitaire PSI pour la mesure des déformations de surface en relation avec le phénomène de retrait-gonflement des argiles Démonstration sur le secteur de Mormoiron (Vaucluse). Rapport BRGM/RP-57935-FR, 97 p., 60 ill., 2 ann.

Synthèse

L'étude avait pour objectif de tester, à l'échelle d'une agglomération, la faisabilité d'utiliser la technique des réflecteurs persistants par interférométrie radar pour suivre les déformations de surface induites par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Elle a été menée dans le cadre des missions de service public du BRGM à la demande du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM).

L'étude est réalisée dans le cadre d'une collaboration scientifique entre le BRGM et Tele-Rilevamento Europa - **TRE** – start-up issue de *Politecnico di Milano (POLIMI)*, Italie, qui a produit les mesures interférométriques.

Cette technique constitue, en fait, une amélioration essentielle par rapport aux techniques spatiales classiques d'interférométrie radar différentielle déjà largement utilisées pour le suivi des déformations au sol. Les PS (*persistent scatterers*) sont des "cibles radars" privilégiées qui ont des caractéristiques telles qu'elles permettent des mesures précises de leur distance au capteur. Dans un cas idéal, la technique PSI donne la possibilité d'apprécier des déplacements de terrain de l'ordre de quelques fractions de centimètre.

Cette étude, complémentaire de celle en cours sur le Val de Marne, a été réalisée dans le secteur de Mormoiron, département du Vaucluse (84). Le secteur d'étude disposant de mesures *in situ* (extensomètres et Humitub), ce site a été choisi dans le but de procéder à une série de comparaisons entre mesures PSI et mesures *in situ* à des fins de validation et d'interprétation en ce qui concerne le phénomène de retrait-gonflement.

Nous avons été confrontés à des limitations affectant les mesures PSI :

- le nombre d'images radar disponibles sur cette zone (19 images en mode ascendant sur la période 2005-2009) était sensiblement inférieur au nombre généralement recommandé (supérieur à 40 images) ;
- la zone d'étude est située en contexte rural, d'où une densité de PS relativement faible.

La compensation insuffisante de différents artefacts affectant la mesure PSI résultant de ces limitations et les difficultés en ce qui concerne les possibilités de comparaison avec les mesures au sol que cela entraîne réduisent fortement les possibilités d'interprétation des résultats de l'étude.

Néanmoins, des observations ont pu être produites. Ainsi, sur la série en mode ascendant, nous observons un bon phasage des phénomènes et une hiérarchie en termes d'amplitude saisonnière qui est cohérente avec les observations *in situ*. Par

ailleurs, les cartes de paramètres dérivés de la mesure PSInSAR (écart-type vitesse,...) sont potentiellement prometteuses car elles laissent apparaître des indices d'une corrélation avec la géologie.

Ces observations pourront être approfondies pendant la suite de l'étude en cours sur le site test du Val de Marne.

Sommaire

1. Introduction.....	13
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE	13
1.2. LE PHÉNOMÈNE DE RETRAIT-GONFLEMENT	14
1.2.1. L'aléa retrait-gonflement.....	14
1.2.2. Cartographie de l'aléa à l'échelle nationale : enjeux et opportunités	15
1.2.3. Les programmes de recherche.....	15
1.3. SITE DE MORMOIRON, VAUCLUSE	16
2. La technique DInSAR appliquée aux réflecteurs persistants.....	19
2.1. REFLECTEURS PERSISTANTS.....	19
2.2. LIMITATIONS - PERFORMANCES.....	20
3. La zone d'étude de Mormoiron.....	23
3.1. LIMITES GÉOGRAPHIQUES	23
3.2. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES	24
4. Analyse des séries	27
4.1. PRÉSENTATION DES SÉRIES	27
4.1.1. Première série : données 2003 – 2007 en orbite descendante	27
4.1.2. Deuxième série : données 2003 – 2009 en orbite ascendante	27
4.2. STRUCTURE DES RÉSULTATS	28
4.3. CORRECTION DES DÉPLACEMENTS	36
4.4. POINT DE RÉFÉRENCE.....	37
4.4.1. Définition du point de référence.....	37
4.4.2. Choix du point de référence	37
5. Résultats : premières observations.....	53
5.1. SÉRIE DESCENDANTE	53

5.2. SÉRIE ASCENDANTE	56
6. Comparaison avec les mesures <i>in situ</i> à Mormoiron	59
6.1. INSTRUMENTATION À MORMOIRON	59
6.1.1. Parcelle expérimentale pour le suivi du retrait-gonflement	59
6.1.2. Instrumentation d'une villa sinistrée	62
6.2. RELOCALISATION DES PS <i>IN SITU</i> A MORMOIRON	66
6.3. COMPARAISON DES PS AVEC LES MESURES IN SITU	69
7. Etude statistique sur la série ascendante.....	77
7.1. ANALYSE DE LA VITESSE DES DÉPLACEMENTS	77
7.2. ANALYSE DE L'ÉCART-TYPE DES DÉPLACEMENTS	78
7.2.1. Analyse de l'écart-type sur les vitesses	79
7.2.2. Analyse de l'amplitude des déplacements	83
8. Conclusion.....	85
9. Bibliographie	87

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation de la zone d'étude, aléa retrait-gonflement et divers risques (cavités souterraines et mouvements de terrain)	23
Illustration 2 – Caractéristiques normales des températures et précipitations à Carpentras (Météo France).....	24
Illustration 3 – Précipitations annuelles sur la période 1964-2008 à Carpentras (données Météo France).....	24
Illustration 4 – Précipitations mensuelles (en mm) sur la période janvier 2003-mai 2009 à Carpentras (données Météo France)	25
Illustration 5 – Pluie efficace mensuelle (en mm) sur la période janvier 2003-juin 2008 à Carpentras (données Météo France)	25
Illustration 6 – Précipitations mensuelles sur la période 2005 – 2008 sur le site expérimental de Mormoiron	26

Illustration 7 – Dates d'acquisition des images traitées (images ENVISAT en orbite descendante).....	27
Illustration 8 – Dates d'acquisition des images traitées (images ENVISAT en orbite ascendante).....	28
Illustration 9 – Localisation de PS sur Carpentras (série descendante) et altitude correspondante	29
Illustration 10 – Aperçu des bâtiments supportant les PS A06BW, A06B1 et A06B6 (à gauche) et A06CJ (à droite)	30
Illustration 11 – Extrapolation des altitudes issues de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU).....	30
Illustration 12 – Topographie de la zone d'étude (MNT IGN au 1/250 000).....	31
Illustration 13 - Extrapolation des écart-types sur l'altitude issue de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU).....	32
Illustration 14 - Extrapolation des vitesses issue de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU).....	33
Illustration 15 - Extrapolation des écart-types sur la vitesse issue de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU).....	34
Illustration 16 – Répartition des PS suivant les valeurs de leurs indices de cohérence (orbite descendante, référence A06CU).....	35
Illustration 17 – Géométrie d'acquisition du satellite (image TRE).....	36
Illustration 18 - Localisation de l'ancienne référence choisie arbitrairement (point A04PP, commune de Mazan)	37
Illustration 19 – Localisation de la nouvelle référence utilisée en orbite descendante (point A06CU, commune de Carpentras).....	38
Illustration 20 – Gendarmerie correspondant au PS A06CU (série descendante).....	39
Illustration 21- Localisation de la référence utilisée en orbite ascendante (point A1ERO, commune de Carpentras).....	40
Illustration 22 – Bâtiment correspondant au PS A1ERO (série ascendante)	41
Illustration 23 – Analyse de PS supposés stables (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite descendante, référence A06CU)	43
Illustration 24 - Analyse de PS supposés stables (déplacements suivant la LOS, orbite ascendante, référence A1EPX).....	46

Illustration 25 – Comportement de 30 PS correspondant à des bâtiments supposés stables (déplacements suivant la LOS, orbite descendante, référence A06CU)	47
Illustration 26 – Comportement du PS A06N0 (déplacements suivant la LOS, orbite descendante, référence A06CU)	48
Illustration 27 – Bâtiment retenu comme représentatif des bâtiments non soumis au retrait-gonflement des sols argileux	48
Illustration 28 – Position des PS des deux séries (descendante en rouge et ascendante en vert) sur le bâtiment retenu comme référence	49
Illustration 29 - Comportement des PS du bâtiment « référence » et de la référence obtenue par moyenne sur le bâtiment (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite ascendante, référence A1ERO).....	50
Illustration 30 – PS considérés ou localisés dans la zone test (encadrée) pour visualiser l'influence du changement de repère (série ascendante)	51
Illustration 31 – Résultats des PS de la zone test avant changement de référence (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, série ascendante, référence A1ERO).....	51
Illustration 32 - Résultats des PS de la zone test après changement de référence (déplacements suivant la ligne de visée du satellite série ascendante, référence moyenne)	52
Illustration 33 – Position et niveau d'aléa des PS considérés sur la commune de METHAMIS (orbite descendante)	53
Illustration 34 – Déplacements obtenus pour quelques PS sur la commune de METHAMIS (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite descendante, référence A06N0), les couleurs indiquant le niveau d'aléa (bleu = aléa nul ; jaune = aléa faible, orange = aléa moyen).....	54
Illustration 35 – Déplacements simulés par une modélisation couplée thermo-hydro-mécanique à différentes profondeurs sur le site de Mormoiron pour la période 2004-2005 (Hemmati, 2009)	55
Illustration 36 – Position et niveau d'aléa des PS considérés sur la commune de METHAMIS (orbite ascendante)	56
Illustration 37 – Déplacements obtenus pour quelques PS sur la commune de METHAMIS (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite ascendante, référence moyenne), les couleurs indiquant le niveau d'aléa (bleu = aléa nul ; jaune = aléa faible, orange = aléa moyen).....	57
Illustration 38 - Schéma d'implantation des reconnaissances et de l'instrumentation sur le site de Mormoiron	60

Illustration 39 – Vue d'ensemble du site instrumental de Mormoiron	60
Illustration 40 - Suivi de déplacements à 0,2 m de profondeur pluviométrie journalière – site de Mormoiron (période du 11/01/07 au 11/11/09).....	61
Illustration 41 – Déplacements extrêmes enregistrés au cours des différentes périodes saisonnières sur le site de Mormoiron entre janvier 2007 et octobre 2009 ...	62
Illustration 42 – Vue de la façade sud de la maison instrumentée	63
Illustration 43 – Variations d'ouverture des fissures fournies par les fissuromètres	64
Illustration 44 – Comportement des fissures, déplacements du sol comparé à la répartition des précipitations sur le site de Mormoiron	66
Illustration 45 –Localisation des points PS relocalisés dans le centre de Mormoiron (orbite descendante)	67
Illustration 46 – Identification des points PS observés d'après les images radar et in situ	69
Illustration 47 – Localisation des sites instrumentés et des PS en orbite descendante (en rouge) et ascendante (en vert)	70
Illustration 48 – Déplacements du sol à 0,2 m de profondeur réinitialisés au 10/04/2007 et pluviométrie enregistrés sur le site de Mormoiron entre janvier 2007 et novembre 2009	71
Illustration 49 – Comparaison entre les mesures expérimentales et 10 PS parmi les plus proches sur la même zone d'aléa (déplacements suivant la verticale, orbite ascendante, référence moyenne).....	72
Illustration 50 - Comparaison entre les mesures expérimentales à 1,70 m de profondeur et 10 PS parmi les plus proches sur la même zone d'aléa (déplacements suivant la verticale, orbite ascendante, référence moyenne)	73
Illustration 51 – Localisation des PS supposés correspondre à un sol nu, en aléa fort sur la commune de Mormoiron.....	74
Illustration 52 – Comparaison entre les mesures expérimentales et quelques PS supposés correspondre à un terrain nu en même zone d'aléa (déplacements suivant la verticale, orbite ascendante, référence moyenne)	75
Illustration 53 – Amplitude des mouvements au cours des différentes saisons pour quelques PS sur la formation des Sables et argiles vertes à smectites de Mormoiron	76
Illustration 54 – Répartition spatiale des valeurs de vitesse des points observés (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne) et aléa.....	77

Illustration 55 - Répartition spatiale de l'écart-type à la position moyenne (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne).....	78
Illustration 56 – Similitudes entre l'écart-type sur les positions et la carte géologique harmonisée sur la zone d'étude	79
Illustration 57 - Répartition spatiale de l'écart-type sur la vitesse (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne)	80
Illustration 58 – Similitudes entre l'écart-type sur les vitesses et la carte géologique harmonisée sur la zone d'étude.....	81
Illustration 59 – Identification des zones « mobiles » (hachures rouges) et « stables » ou essentiellement non linéaires (hachures vertes) à partir de l'écart-type sur la vitesse sur la commune de Carpentras et comparaison à la carte géologique	82
Illustration 60 - Répartition spatiale de l'amplitude totale des mouvements en ôtant la composante linéaire (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne)	84

Liste des annexes

Annexe 1 Présentation des bâtiments de grande hauteur utilisés pour définir la référence.....	89
Annexe 2 Légende de la carte géologique harmonisée départementale (extraite sur la zone d'étude)	99

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'étude a pour objectif d'évaluer la capacité de mesures issues de la technique des réflecteurs persistants par interférométrie radar pour le suivi des déformations de surface induites par le phénomène de retrait gonflement des argiles. La démonstration initiera la réflexion sur les possibilités qu'offrent ces données géodésiques en complément de la procédure de cartographie retrait/gonflement actuellement mise en œuvre par le BRGM.

L'étude est réalisée dans le cadre d'une collaboration scientifique entre le BRGM et Tele-Rilevamento Europa - **TRE** – start-up issue de *Politecnico di Milano (POLIMI)*, Italie, créée en 2000, qui assure le développement opérationnel des techniques de réflecteurs persistants par interférométrie radar (PSInSAR™ brevet Polimi 1999). TRE a produit les mesures PSInSAR™ utilisées dans le cadre de cette étude.

Ce type d'étude a néanmoins déjà été testée par différents opérateurs (Meisina *et al.*, 2006 ; Kaveh *et al.*, 2008) et permet effectivement d'identifier des mouvements verticaux du sol de périodicité annuelle (avec tassement en période estivale) et dont l'amplitude atteint quelques dizaines de millimètres dans le Val-de-Marne. Il reste néanmoins un travail important de validation de cette approche avant d'espérer pouvoir l'utiliser de manière opérationnelle pour ce type d'application.

Dans un premier temps, les efforts se sont concentrés sur la recherche dans la zone d'étude d'un point de référence stable qui permette d'envisager des tassements absolus du sol. En effet, les mesures PSI étant relatives à un des PS détectés sur la zone cartographiée, il est important qu'il ne soit pas lui-même affecté par un mouvement.

Dans un second temps, les deux séries d'images sont analysées de manière à rechercher une influence du phénomène de retrait-gonflement sur les mesures PS.

Les techniques complémentaires suivantes sont envisagées. Une première approche a consisté à essayer de corrélérer les mesures PS aux mesures enregistrées sur le site de Mormoiron. Par la suite nous avons comparé ce qui se passe dans des zones d'aléa fort et des zones d'aléa nul. Finalement nous avons vérifié si la hauteur des bâtiments avait une incidence sur les déplacements enregistrés (sachant qu'ils devraient être plus importants pour des petites maisons individuelles légères et ancrées peu profondément).

L'ensemble de ces tests sera une information sur le potentiel de la technique PSI ainsi que sur la façon de l'utiliser comme un élément de caractérisation de l'aléa retrait-gonflement.

Toutefois, le contexte de l'étude sur le site de Mormoiron est défavorable à l'utilisation de la technique PSI pour les raisons suivantes: la densité de PS est faible du fait de l'occupation du sol (terrains agricoles) et le nombre d'images disponibles est réduit (19 images au lieu d'une quarantaine habituellement requises pour ce type de traitements). Dans ces conditions (différentes de celles de l'étude sur le Val de Marne), les observations décrites dans ce rapport ne pourront être que partiellement concluantes.

1.2. LE PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT

1.2.1. L'aléa retrait-gonflement

Les mouvements différentiels de sols liés au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux ont engendré au cours de ces vingt dernières années de très nombreux sinistres sur le territoire national jusqu'à devenir désormais le deuxième poste d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles, derrière les inondations.

En période de sécheresse notamment, la dessiccation des sols argileux se traduit parfois par l'apparition de fissures de retrait en surface du sol, mais surtout par des tassements verticaux, peu visibles, mais qui sont à l'origine des désordres sur le bâti. En effet, ces mouvements verticaux du sol sont rarement uniformes, en relation avec les hétérogénéités locales concernant tant la nature du sol que son degré de dessiccation.

Au-delà de la nature géologique des terrains affleurant ou sub-affleurant qui constitue le principal facteur de prédisposition du phénomène, l'estimation de la susceptibilité au retrait-gonflement des argiles est complexe et requiert la prise en compte de nombreux critères dont nous ne ferons ici qu'un bref inventaire (Vincent *et al.*, 2007) :

- la lithologie ; l'hétérogénéité des formations, leur épaisseur, la présence de niveaux imperméables intercalés entre des termes argileux sont autant de paramètres qui vont influencer le potentiel de retrait-gonflement des sols argileux ;
- la minéralogie, et notamment la teneur en minéraux gonflants (smectites) ;
- le comportement géotechnique des sols, relativement à ses caractéristiques physiques, hydriques et mécaniques, déterminées à partir de résultats d'essais de laboratoire.

D'autres paramètres tels que l'occupation du sol (présence et nature de la végétation) et le contexte hydrogéologique (notamment les nappes perchées non pérennes) sont autant de facteurs qui influent la prédisposition des sites. C'est au final la combinaison de ces paramètres, affectée éventuellement de poids variables, corrigée en intégrant également la sinistralité recensée depuis 1989, qui permet de hiérarchiser la

susceptibilité globale de chacune des formations géologiques argileuses sur une base statistique qui tienne compte de cette variabilité locale.

Les périodes récentes de sécheresse (1976, 1989-1991, 1996-1997, puis dernièrement l'été 2003) ont mis en évidence la vulnérabilité des constructions individuelles sur certains sols argileux. Ainsi, entre 1999 et 2003, quelques 375 000 maisons auraient été touchées.

1.2.2. Cartographie de l'aléa à l'échelle nationale : enjeux et opportunités

Pour limiter les désordres liés à ce phénomène de retrait-gonflement des argiles, le ministère en charge de l'environnement (actuel Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, MEEDDM) a chargé le BRGM d'établir, d'ici fin 2010, une cartographie de cet aléa géologique sur l'ensemble du territoire métropolitain, à une échelle de validité correspondant au 1/50 000. Les cartes d'aléa ainsi établies, d'ores et déjà disponibles dans 65 départements français, peuvent servir de base à l'élaboration éventuelle de Plans de Prévention des Risques (PPR) spécifiques au risque retrait-gonflement.

Les procédures de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour une commune s'appuient actuellement à la fois sur des données météorologiques et sur des informations relatives à la susceptibilité du sol au retrait-gonflement. Une circulaire du Ministère de l'Intérieur, de l'Outre Mer et des Collectivités Territoriales, en date du 23 janvier 2008, a précisé les critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse utilisés par la Commission interministérielle pour les périodes postérieures à l'année 2003. Concernant la vérification de la présence potentielle de sol argileux sur la commune, la dernière circulaire du ministère de l'Intérieur ne fait que reprendre la pratique en vigueur depuis 2000, précisant toutefois que cette présence doit être déduite directement des cartes d'aléa retrait-gonflement publiées sur le site www.argiles.fr lorsqu'elles sont disponibles. Ensuite, la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour le retrait-gonflement des sols argileux se base sur des critères météorologiques, pour lesquels on dispose de longues séries et d'une couverture spatiale relativement dense. La prise en compte d'une information relative aux déformations de surfaces pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle n'avait pas été envisagée jusqu'à présent...

1.2.3. Les programmes de recherche

Les nombreux sinistres survenus en 2003 et attribués au retrait-gonflement des argiles ont mis en évidence les difficultés à appréhender d'une part l'aléa et d'autre part la vulnérabilité du bâti, particulièrement au cours de cette période exceptionnelle à l'origine de ces désordres. Ce constat a motivé le lancement, par le BRGM et en collaboration avec différents organismes, de plusieurs projets de recherche appliquée,

cofinancés par le Ministère en charge de l'environnement¹, le Réseau Génie Civil et Urbain² (RGCU) et l'Agence Nationale de la Recherche³ (ANR), en vue d'identifier plus précisément les mécanismes de déclenchement de ce phénomène naturel et de développer des méthodes de prédiction de son ampleur.

Dans ce cadre, deux sites expérimentaux ont été instrumentés avec des capteurs capacitifs de type Humitub, pour le suivi en continu, à différentes profondeurs, des variations de teneur en eau du sol, ainsi que par des extensomètres, pour enregistrer les déplacements verticaux en climat océanique (Mignaloux-Beauvoir, Vienne) et en climat méditerranéen (Mormoiron, Vaucluse).

Les résultats obtenus sur ces différents sites constitueront des éléments de comparaison à des fins de validation et interprétation pour les mesures de déplacements de surface issues de l'interférométrie radar. L'instrumentation utilisée et les résultats obtenus sont présentés de manière plus détaillée au paragraphe 6.1.

1.3. SITE DE MORMOIRON, VAUCLUSE

En complément de l'étude actuellement en cours sur Nogent-sur-Marne (Plat et. Al. 2009) et afin de tirer parti des mesures *in situ* disponibles, le MEEDDM a proposé d'étendre le projet de démonstration radar interférométrique sur points persistants (PSI) au site de Mormoiron. Il est à noter que le traitement PSI a été réalisé à partir d'une série d'images ASAR/ENVISAT sur la période 2003-2009 sur ce secteur. La connaissance a priori des points persistants est exclue.

Les mesures *in-situ* enregistrées sur le site de Mormoiron mettent en évidence les déformations importantes du sol liées au phénomène de retrait-gonflement sur la formation des *Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron*, formation cartographiée en aléa fort (cf § 6.1). L'amplitude des tassements a atteint plus de 5,1 cm à 20 cm de profondeur entre mai et septembre 2007 et le gonflement a atteint environ 6 cm entre septembre 2007 et juin 2008. En complément de ces mesures *in-situ* expérimentales, une villa sinistrée située sur la commune de Mormoiron a été équipée en avril 2008 de fissuromètres électroniques au niveau des murs de façade afin de comparer les déplacements de sol enregistrés sur le site avec des désordres sur le bâti. Entre avril et juin, la fissure de la façade Ouest s'est ouverte de plus d'un

¹ Programme cofinancé par le Ministère de l'Ecologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), lancé en 2004 pour permettre l'équipement de deux sites expérimentaux et dont la troisième phase (maintenance et interprétation) se poursuit jusqu'à fin 2008

² Projet de recherche cofinancé par le programme RGCU, réalisé en 2004-2006 en collaboration avec le LMSSMat (École Centrale de Paris), le LAEGO (Institut National Polytechnique de Lorraine), le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et le bureau d'études géotechniques CEBTP-Solen

³ Programme ARGIC, cofinancé par le programme ANR-RGCU, débuté en février 2006 pour 3 ans, coordonné par le BRGM et réalisé en collaboration avec le LCPC, l'INRA, Météo-France, le LMSSMat, le LAEGO, le CERMES, Armines, Insavalor, les Universités de Bordeaux 1 et Poitiers, l'INERIS et Fondasol

millimètre. Toutefois, la période d'observation est encore très courte et l'interprétation des résultats serait prématurée. A noter que l'instrumentation mise en œuvre ici concerne uniquement des fissures verticales sur les murs du bâtiment et ne permettent pas d'estimer précisément les déplacements verticaux susceptibles d'affecter le bâti.

2. La technique DInSAR appliquée aux réflecteurs persistants

2.1. REFLECTEURS PERSISTANTS

La technique des réflecteurs persistants (PSI - Persistent Scatterer Interferometry) est un algorithme issu du traitement des données acquises par les radars de type SAR (Synthetic Aperture Radar, i.e. RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture) embarqués sur des satellites en orbite polaire basse (p. e. Ferretti *et al.*, 2000; Ferretti *et al.*, 2001; Colesanti *et al.*, 2005). Elle constitue, en fait, une amélioration essentielle par rapport aux techniques classiques d'interférométrie radar différentielle déjà largement utilisées pour le suivi des déformations au sol (Gabriel *et al.*, 1989; Raucoules *et al.*, 2003; Simonetto *et al.*, 2005). La technique PSI permet l'observation des déformations superficielles du terrain et la reconstruction de séries temporelles de mouvements par rapport au satellite. Les PS sont des "cibles radars" privilégiées qui ont des caractéristiques telles qu'elles permettent des mesures précises de leur distance au capteur. Dans un cas idéal, la technique PSI donne la possibilité d'apprécier des déplacements de terrain de l'ordre de quelques fractions de centimètre.

Typiquement les PS correspondent à des infrastructures (par exemple bâtiments, ponts, pylônes, etc.) ou à des éléments géologiques naturels (par exemple roches exposées) déjà présents dans la zone à examiner, et caractérisés par une stabilité élevée du "signal de réponse" ou "signature radar" et une faible sensibilité à de petites variations d'angle d'observation. L'emplacement exact de ces réflecteurs ne peut pas être prédit avant le traitement mais en milieu urbain, leur densité dépasse 200/km² et peut atteindre 1 000/km².

L'approche PSI se base sur l'observation d'un petit sous-ensemble de cibles radar qui présente des caractéristiques idéales pour les observations interférométriques. Ces cibles préservent en effet l'information de phase dans le temps même après un changement de la géométrie d'acquisition. Ce n'est pas le cas par contre de la végétation dont l'aspect est par nature évolutif.

En utilisant des PS on peut estimer et enlever les contributions de phase atmosphériques, à partir des séries temporelles des acquisitions, et isoler la contribution due aux déformations superficielles. Plus précisément, une fois estimée la contribution atmosphérique, toutes les composantes qui constituent la phase interférométrique sont déterminées et isolées. Cela permet l'estimation, pour les différentes acquisitions, du terme qui décrit la variation de la longueur du chemin optique suivi par l'onde radar, c'est-à-dire le mouvement de la "cible" dans l'intervalle temporel entre la première et la dernière donnée disponible.

2.2. LIMITATIONS - PERFORMANCES

Il est important de souligner les limites de la technique PSI : celle-ci ne permet d'apprécier des déformations que le long de la direction de visée (LOS – Line of Sight), c'est-à-dire approximativement proche de la verticale (l'angle d'incidence pour les satellites ERS et ENVISAT est de 23° ; pour le satellite ENVISAT – d'angle de visée variable – le même angle est généralement utilisé pour des raisons de compatibilité avec ERS). Par ailleurs, il est nécessaire que la zone d'étude ait une densité suffisante de PS (nécessitant au moins une urbanisation légère, ou bien la présence de roches exposées).

De plus, pour les analyses des phénomènes de déformations à évolution particulièrement rapide (par exemple des phénomènes de subsidence rapide), le problème lié au déroulement de phase⁴ (Wegmuller *et al.*, 2002) peut compliquer considérablement l'interprétation des résultats. En effet, l'interférométrie SAR ne permet d'évaluer avec une précision millimétrique que les variations de la distance capteur-cible égales à une fraction de la longueur d'onde (5,6 cm pour les satellites ERS-1 et 2 et ENVISAT), mais lorsque le déplacement du point par rapport à son plus proche voisin identifié comme PS auquel s'ajoute le bruit sur la mesure correspond à une différence de phase supérieure à π radians, il n'est pas possible de lever l'ambiguïté sur le déplacement. A la limite, si la cible se déplaçait exactement d'une demi-longueur d'onde (2,8 cm pour l'instrument SAR du satellite ERS) il ne serait pas possible de mesurer la variation de phase par rapport au cas d'une cible stable. En outre, la fréquence de revisite des satellites - 35 jours - ne permet pas d'identifier des situations de danger, qui nécessiteraient une surveillance en temps réel.

La précision du traitement PSI est aussi limitée par la quantité d'images utilisées et par la densité spatiale des cibles radar stables. En fait, une quantité importante des données d'archive SAR (disponible depuis 1992) est nécessaire pour estimer les composantes atmosphérique et topographique de la différence de phase globale, ce qui permet de mesurer des déformations millimétriques. Si l'Europe est largement couverte, l'archive peut s'avérer moins conséquente ailleurs. Pour le traitement PSI, un nombre minimum d'images variant entre 30 et 35 selon les cas est requis. La plupart des études font état de traitement sur des bases de 50 à 100 images. La précision sur la vitesse moyenne est d'environ 0,5 mm/an dans un cas idéal. Par ailleurs, de récents résultats sur la technique PSI ont été obtenus dans le cadre du projet 'Persistent Scatterers Interferometry Codes Cross-Comparison and Certification' (PSIC-4). Raucoules *et al.* (2005) démontrent que dans des conditions de déformations

⁴ Un interférogramme est obtenu à partir de l'acquisition de 2 signaux SAR acquis par le satellite suivant deux passages orbitaux. La différence de phase $\Delta\Phi$ entre ces 2 signaux complexes (module et phase) est proportionnelle en première approximation à l'altitude du point imagé par le satellite. Cette phase ne peut être mesurée que modulo 2π , et le déroulement de phase consiste à retrouver la phase réelle φ à partir de la phase mesurée Φ .

faiblement linéaires à rapides (plusieurs cm/an), la précision obtenue peut être de l'ordre de 0,5 cm/an avec une base de données comprise entre 73 et 103 images.

La précision spatiale absolue (X,Y) PSI est d'environ 15 m, alors que la précision spatiale relative est environ +/- 5 m dans la direction est-ouest et +/-2 m dans la direction nord-sud. Le pixel (ou cellule de résolution radar) pour ERS / Envisat est d'environ 20 mètres en est-ouest, et 4 m en Nord-Sud. La précision spatiale est améliorée dès lors que l'on dispose d'une image ortho-rectifiée précise comme image de référence pour le géocodage.

L'analyse PSI repose sur des modèles de déplacements linéaires (i.e. détection de taux de déformation relativement constants au cours de la période d'observation). Pour autant, jusqu'à un certain degré, des déformations non-linéaires peuvent être détectées dès lors que la plupart d'entre elles sont modélisables. TRE a développé un traitement spécifique appelé PSInSAR™ Analysis (APSA) qui repose précisément sur des modèles de déplacement non-linéaires et permet de s'affranchir de cette limitation.

3. La zone d'étude de Mormoiron

3.1. LIMITES GEOGRAPHIQUES

La zone géographique retenue (Illustration 1) a été sélectionnée de manière à répondre à 4 critères :

- couvrir le site expérimental de Mormoiron ;
- regrouper le maximum d'espaces bâtis (certaines zones étant très peu urbanisées, notamment à l'est de Mormoiron) ;
- englober un grand nombre de sinistres liés au phénomène de retrait-gonflement (sinistres avérés sur des maisons individuelles) ;
- ouvrir des pistes sur l'identification et la compréhension des différents niveaux d'aléa (nul à fort).

Le site retenu présente une superficie de 292 km² et s'étend de Loriol-du-Comtat (à l'ouest) à Mormoiron (à l'est). Ce secteur présente en outre l'intérêt de couvrir d'autres aléas recensés : des cavités souterraines (au sud-est de la zone mais dans des zones non construites) et des zones de mouvement de terrain (Illustration 1).

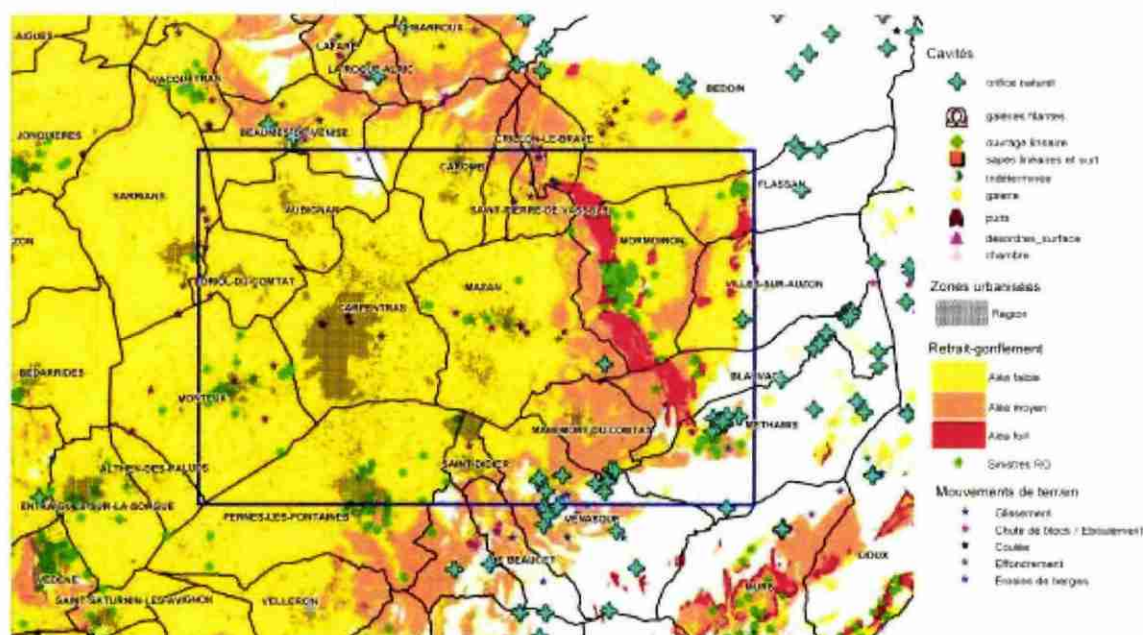


Illustration 1 – Localisation de la zone d'étude, aléa retrait-gonflement et divers risques naturels (cavités souterraines et mouvements de terrain)

Les coordonnées en Lambert II Carto – Paris (Méridien de Paris (V7.8)) de la zone d'étude sont les suivantes :

$X_{\min} = 812\,035,9\text{ m}$	--	$X_{\max} = 833\,354,3\text{ m}$
$Y_{\min} = 1\,891\,833,0\text{ m}$	--	$Y_{\max} = 1\,905\,540,0\text{ m}$

3.2. DONNEES METEOROLOGIQUES

Données Météo France

Du point de vue des précipitations météorologiques, le Vaucluse présente 2 caractéristiques : des pluies concentrées sur le printemps et des orages en fin d'été.

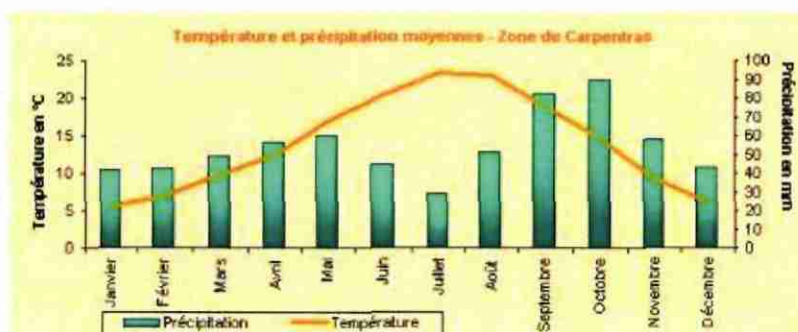


Illustration 2 – Caractéristiques normales des températures et précipitations à Carpentras (Météo France)

Sur l'ensemble de la période de disponibilité du suivi des précipitations à Carpentras par Météo France, l'année 2003 présente une pluviométrie moyenne, proche de la normale (656,9 mm), alors qu'entre 2004 et 2007, la pluviométrie a été relativement faible. A l'inverse, les années 2002 et 2008 ont été particulièrement pluvieuses.

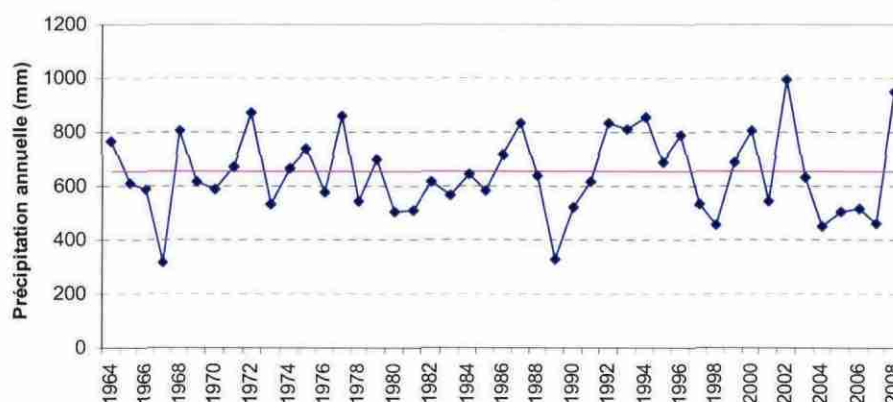


Illustration 3 – Précipitations annuelles sur la période 1964-2008 à Carpentras (données Météo France)

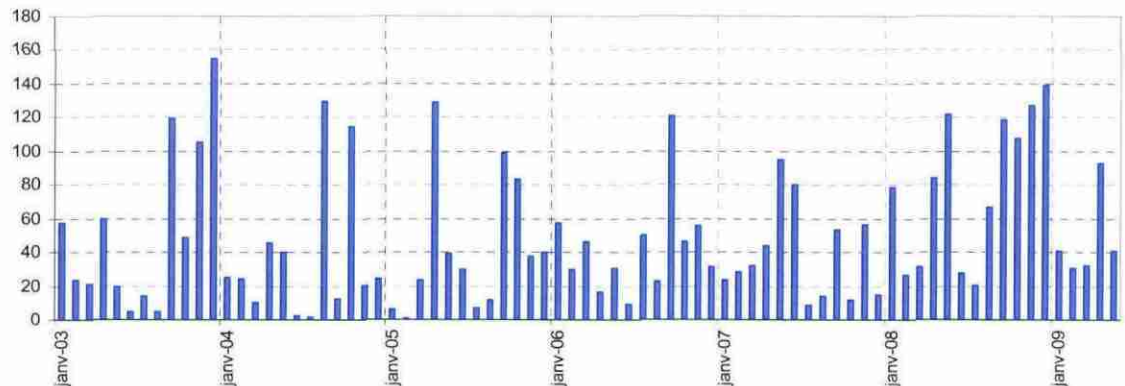


Illustration 4 – Précipitations mensuelles (en mm) sur la période janvier 2003-mai 2009 à Carpentras (données Météo France)

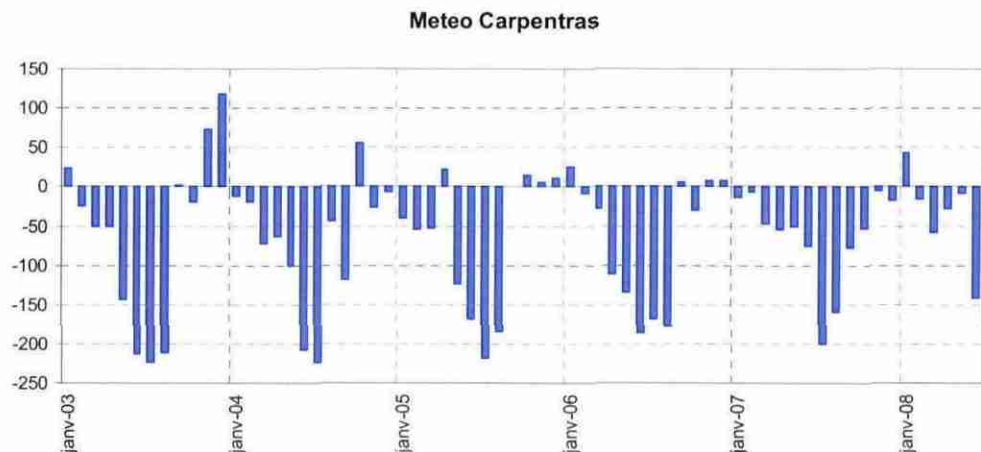


Illustration 5 – Pluie efficace mensuelle (en mm) sur la période janvier 2003-juin 2008 à Carpentras (données Météo France)

Dans le détail, le début de l'année 2003 a été caractérisé par de très faibles précipitations ; toutefois, à partir de septembre 2003, les précipitations ont été plus importantes, avec 120 mm en septembre, plus de 100 mm en novembre et près de 160 mm en décembre. La fin de l'année 2003 est la seule période ayant présenté un net excédent d'eau sur la période 2003-2008.

L'année 2004 a quant à elle été caractérisée par l'absence de précipitations abondantes au printemps mais a connu une fin d'été relativement pluvieuse (autour de 130 mm en août et 118 mm en octobre).

L'année 2005, malgré un léger déficit hydrique, reste une année normale avec de fortes précipitations au printemps concentrées au mois d'avril (130 mm) et de fortes précipitations à l'automne, en septembre et novembre.

L'année 2006 a présenté de faibles précipitations tout au long de l'année, à l'exception du mois de septembre.

Les précipitations de l'année 2007 ont été relativement bien réparties tout au long de l'année, mai et juin ayant été légèrement plus arrosés (95 et 80 mm respectivement). L'année 2007 est la seule année ayant présenté un net déficit des apports d'eau dans le sol par l'extérieur sur la période 2003-2008.

L'année 2008 a été très arrosée avec environ 950 mm de précipitation sur l'année (soit 30 % supérieur à la normale sur 1971-2000). Seuls les mois de février, mars, juin et juillet ont présenté des précipitations inférieures aux normales sur 1971-2000, la fin de l'année ayant été particulièrement pluvieuse.

c) Pluviomètre installé sur la parcelle expérimentale

Le site expérimental de Mormoiron a été équipé en décembre 2004 d'un pluviomètre à augets permettant de mesurer les précipitations à un pas de temps de 3 h.

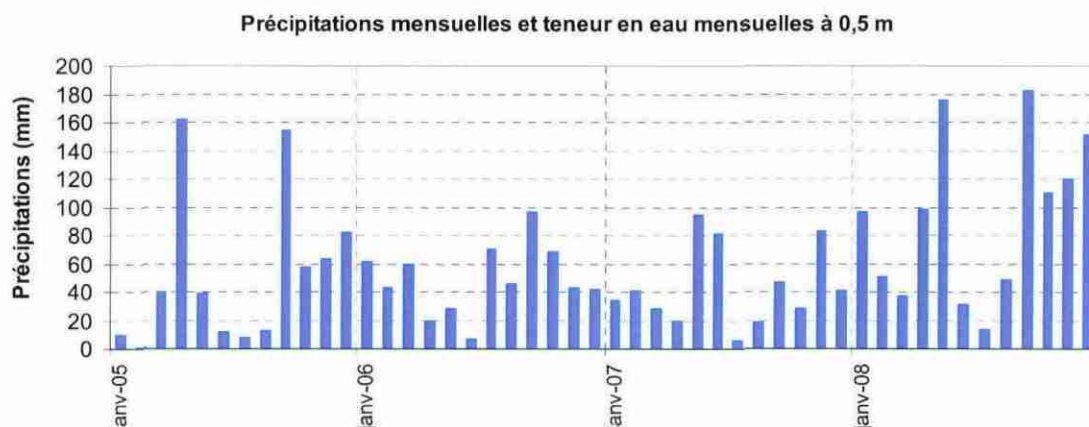


Illustration 6 – Précipitations mensuelles sur la période 2005 – 2008 sur le site expérimental de Mormoiron

A Mormoiron, les précipitations sont légèrement différentes de celles obtenues à Carpentras. Notamment, les précipitations mensuelles atteignent couramment 160 mm d'eau sur le site expérimental entre janvier 2005 et décembre 2008 alors que celles-ci s'étaient limitées à 140 mm au niveau de la station météo France de Carpentras.

4. Analyse des séries

4.1. PRESENTATION DES SERIES

4.1.1. Première série : données 2003 – 2007 en orbite descendante

Un premier traitement a été réalisé en avril 2009 sur 18 images issues du satellite ENVISAT qui ont été prises entre février 2003 et mars 2007 (images descendantes). Cependant, les deux dernières images (prises en février et mars 2007) ont été écartées par TRE en raison de perturbations atmosphériques. Les dates des images concernées par ce premier traitement sont indiquées à l'illustration 7.

Id	Date	Remarque
1	06 /02 / 2003	
2	22 /01 / 2004	
3	26 /02 / 2004	
4	01 /04 / 2004	
5	28 /10 / 2004	
6	02 /12 / 2004	
7	06 /01 / 2005	
8	10 /02 / 2005	
9	04 /08 / 2005	Image de référence
10	08 /09 / 2005	
11	17 /11 / 2005	
12	22 /12 / 2005	
13	03 /02 / 2006	
14	15 /06 / 2006	
15	20 /07 / 2006	
16	28 /09 / 2006	
	15 /02 / 2007	Perturbations atmosphériques
	22 /03 / 2007	Perturbations atmosphériques

Illustration 7 – Dates d'acquisition des images traitées (images ENVISAT en orbite descendante)

Ce traitement a permis d'identifier 8 165 PS sur l'ensemble de la zone d'étude.

4.1.2. Deuxième série : données 2003 – 2009 en orbite ascendante

Un deuxième traitement a été réalisé en octobre 2009 sur 19 images issues du satellite ENVISAT qui ont été prises entre avril 2005 et octobre 2009 (images ascendantes).

Id	Date	Remarque
1	05/04/2005	
2	10/05/2005	
3	27/09/2005	
4	10/04/2007	
5	28/08/2007	
6	29/04/2008	
7	03/06/2008	
8	08/07/2008	
9	16/09/2008	
10	21/10/2008	
11	30/12/2008	Image de référence
12	03/02/2009	
13	10/03/2009	
14	14/04/2009	
15	19/05/2009	
16	23/06/2009	
17	28/07/2009	
18	01/09/2009	
19	06/10/2009	

Illustration 8 – Dates d'acquisition des images traitées (images ENVISAT en orbite ascendante)

Ce traitement a permis, quant à lui, d'identifier 8 844 PS.

Pour chacune de ces séries et compte-tenu du bruit sur les séries temporelles, le nombre d'images est insuffisant pour réaliser un traitement par série de Fourier comme cela a été réalisé sur le secteur de Nogent-sur-Marne (Plat *et al.*, 2009).

4.2. STRUCTURE DES RESULTATS

La structure des résultats fournis par TRE est ici illustrée à partir des résultats de la première série (orbite descendante).

Code

Il s'agit de l'identifiant du PS considéré.

Height

Il s'agit de la hauteur résultant du traitement PS InSAR (par rapport à l'ellipsoïde de référence) du point considéré. D'après TRE (2009), cette donnée présente une résolution verticale de 1,5 m, et peut servir à préciser la localisation d'un PS (au niveau du toit du bâtiment ou au niveau du sol).

Des essais ont été effectués en ce sens, mais n'ont pas permis de valider cette méthode. L'ortho-photo de l'illustration 9 présente un site reconnu sur le terrain, avec les PS de la série descendante et les hauteurs correspondantes déterminées par le traitement (en m).



Illustration 9 – Localisation de PS sur Carpentras (série descendante) et altitude correspondante

La reconnaissance de terrain a permis de vérifier l'absence de dénivelé significatif sur ce secteur et la nature des bâtiments. Ainsi, le bâtiment sur lequel se situe le PS A06CK correspond à un immeuble de 4 étages (Annexe 1), en revanche, le bâtiment sur lequel se trouvent les PS A06BW, A06B1 et A06B6 correspond à un petit bâtiment de plain-pied et celui supportant le PS A06CJ correspond à une maison individuelle (Illustration 10). Il ne semble donc pas réaliste que les hauteurs qui leur soient attribuées soient supérieures à celle de A06CK (c'est également le cas pour certains PS situés visiblement sur la chaussée).



Illustration 10 – Aperçu des bâtiments supportant les PS A06BW, A06B1 et A06B6 (à gauche) et A06CJ (à droite)

Une extrapolation (réalisée automatiquement sous Mapinfo) à partir des données d'altitude fournies est présentée en Illustration 11. Cette représentation issue de données ponctuelles (PS issus du traitement) se révèle néanmoins parfaitement cohérente avec le MNT IGN au 1/250 000 (Illustration 12).

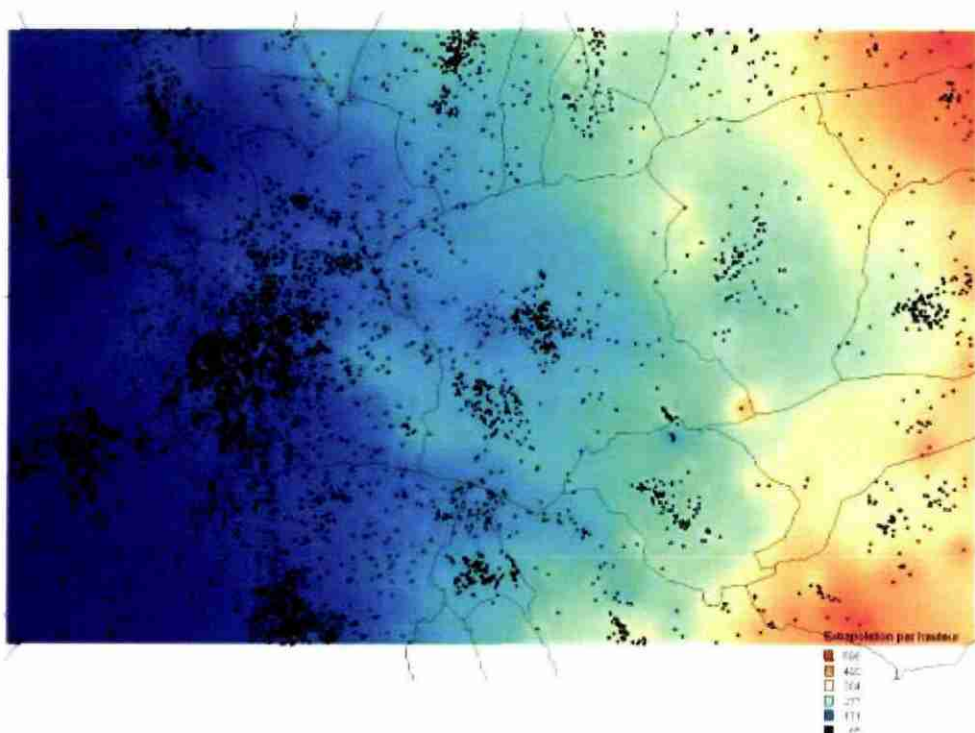


Illustration 11 – Extrapolation des altitudes issues de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU)

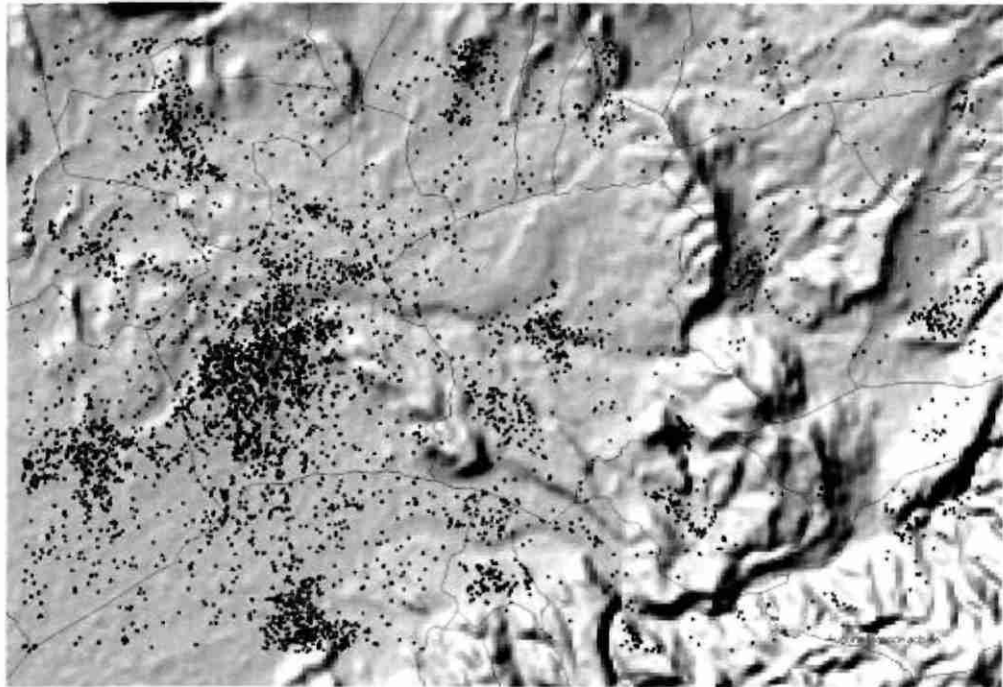


Illustration 12 – Topographie de la zone d'étude (MNT IGN au 1/250 000)

H_stdev

Il s'agit de l'écart-type sur l'estimation de la hauteur du point considéré effectuée à partir du traitement PS-InSAR. La hauteur est estimée à partir de la pente de la régression linéaire de la phase interférométrique en fonction de la valeur de la composante perpendiculaire de l'écart orbital entre une acquisition et l'acquisition choisie comme référence.

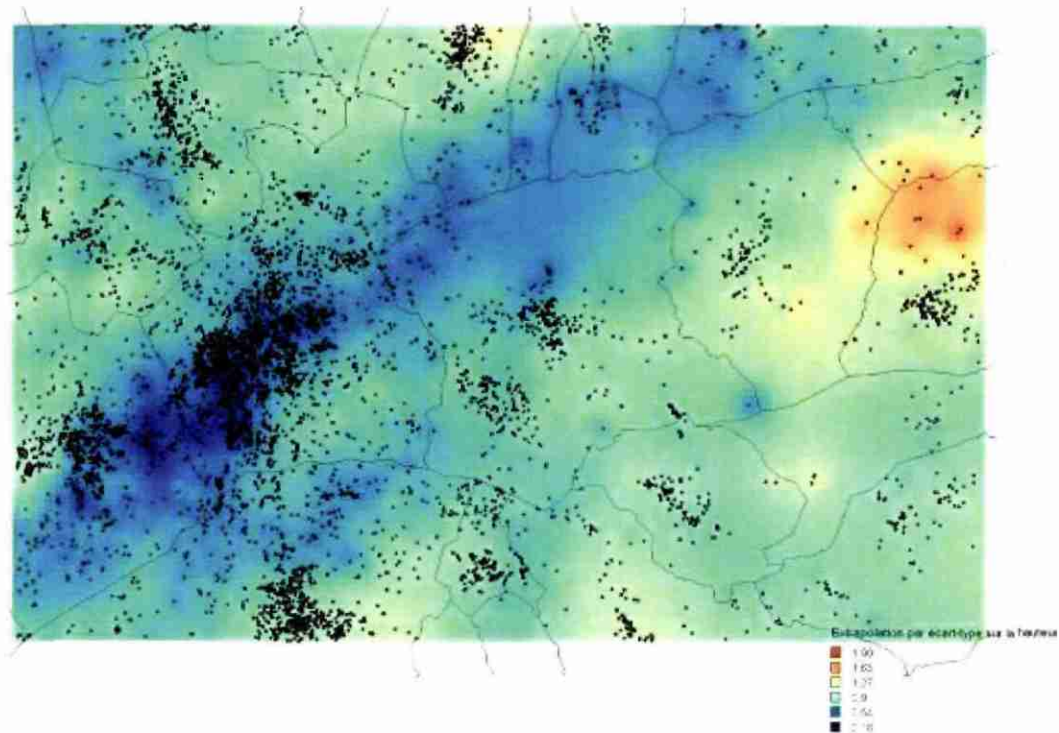


Illustration 13 - Extrapolation des écart-types sur l'altitude issue de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU)

Vel

Il s'agit de la valeur de la vitesse moyenne obtenue pour chaque PS sur la période d'étude. La vitesse moyenne est ici définie comme la pente de la régression linéaire de la série temporelle, et caractérise donc la composante linéaire des mouvements.

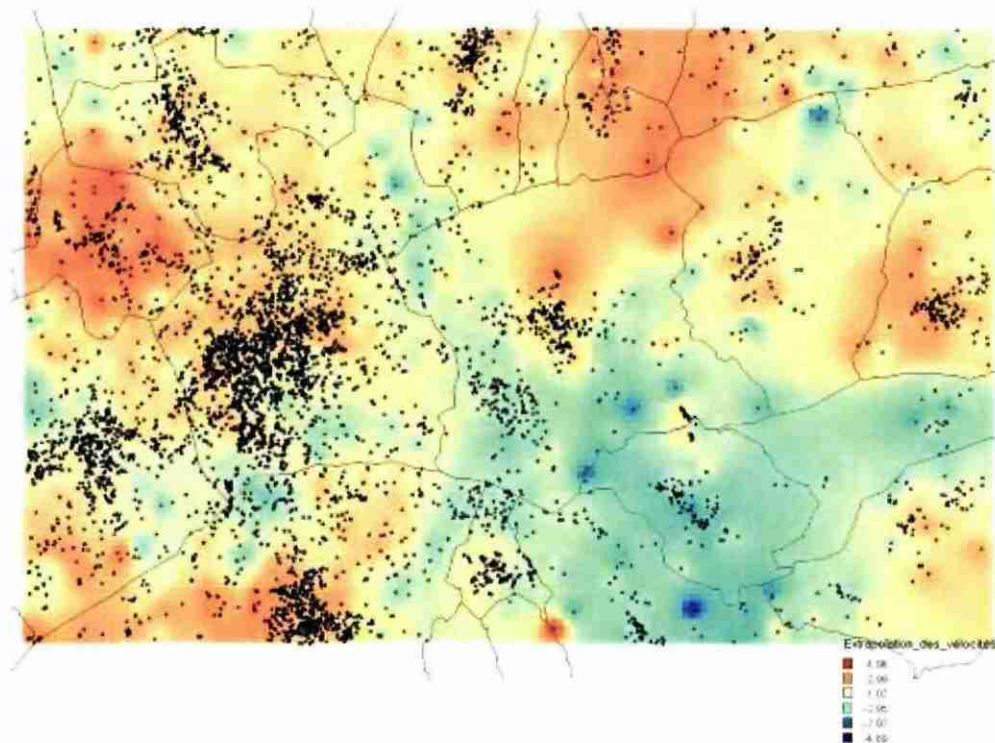


Illustration 14 - Extrapolation des vitesses issue de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU)

V_stdev

Il s'agit de l'écart-type sur l'estimation de la vitesse moyenne du point considéré effectuée à partir du traitement PS-Insar. On notera une similitude avec l'écart-type sur les hauteurs, ces deux paramètres étant couplés.

En effet la mesure de base (la phase interférométrique) est une combinaison linéaire d'une composante topographique (proportionnelle à l'altitude et l'écart orbital) et d'une composante de déformation linéaire (proportionnelle à la vitesse et à l'écart temporel), en plus d'autres composantes. La régression utilisée pour séparer ces deux paramètres introduit un lien entre les écart-types (une incertitude sur l'estimation d'un des paramètres se répercute sur l'autre).

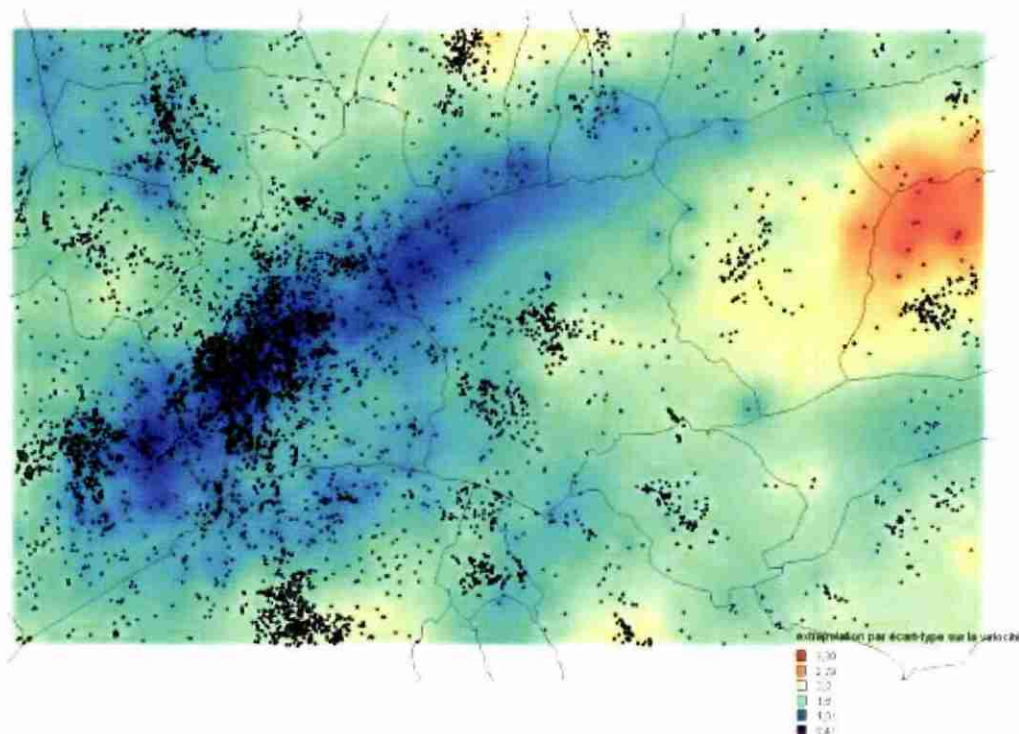


Illustration 15 - Extrapolation des écart-types sur la vitesse issue de l'analyse des PS (orbite descendante, référence A06CU)

Cohérence

Cet indice, parfois appelé aussi indice de qualité, reflète la qualité des mesures. Sa valeur est comprise entre 0 et 1, la valeur étant d'autant plus élevée que la qualité est jugée bonne. Cependant, d'après Raucoules *et al.* (2007), plusieurs définitions de la cohérence peuvent exister suivant les équipes, ce qui conduit à utiliser des filtres différents pour éliminer les points jugés peu fiables. De plus, d'après Agudo et Crosetto (2006), les valeurs de ces indices de qualité seraient meilleures en milieu urbain du fait de l'importance de la densité des PS dans le calcul.

Il a par ailleurs été remarqué que le changement de référence (paragraphe 4.4.2) provoquait des modifications des valeurs des indices de cohérence. La carte de l'illustration 16 représente la répartition des PS suivant les valeurs de leurs indices de cohérence sur la zone d'étude.

Ces résultats montrent que la plupart des PS sur la zone d'étude présentent des cohérences comprises entre 0,8 et 0,9. De plus, la carte confirme que les valeurs les plus élevées de la cohérence sont obtenues dans la moitié Ouest de la zone d'étude, plus urbanisée (agglomérations de Carpentras, Pernes-les-Fontaines...), alors que la moitié Est de la zone, plus rurale, présente de moins bonnes valeurs de la cohérence du fait d'une densité de PS moindre. Sur la commune de Mormoiron, en particulier, les valeurs de la cohérence sont globalement moyennes à faibles par rapport à l'ensemble

de la zone d'étude, un seul PS de la commune présentant une cohérence supérieure (0,95).

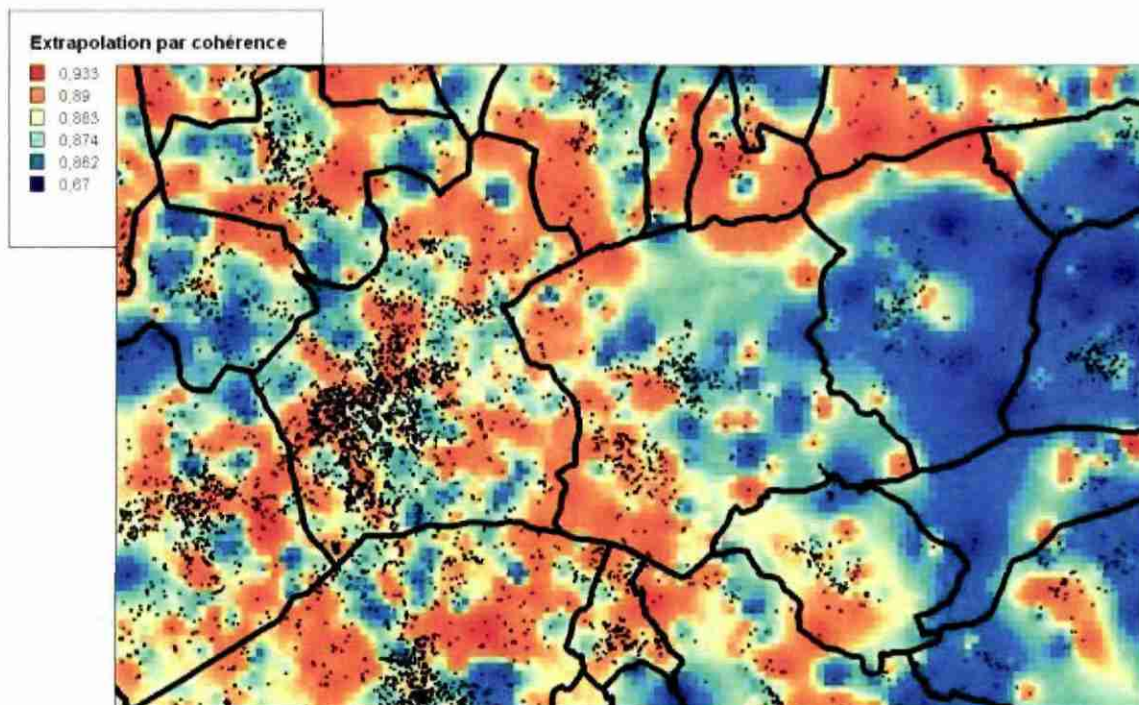


Illustration 16 – Répartition des PS suivant les valeurs de leurs indices de cohérence (orbite descendante, référence A06CU)

D20030206...D20060928

Il s'agit des résultats à proprement parler : chaque champ correspond à une date (i.e. à une image) et exprime en millimètres le déplacement du PS par rapport à la position initiale correspondant à la première image (06 février 2003). Il convient toutefois de noter que ces résultats ne sont pas exprimés sur une verticale absolue, mais suivant l'axe de visée du satellite (LOS : line of sight), c'est-à-dire avec un angle correspondant à l'orientation de l'antenne du satellite (Illustration 17).

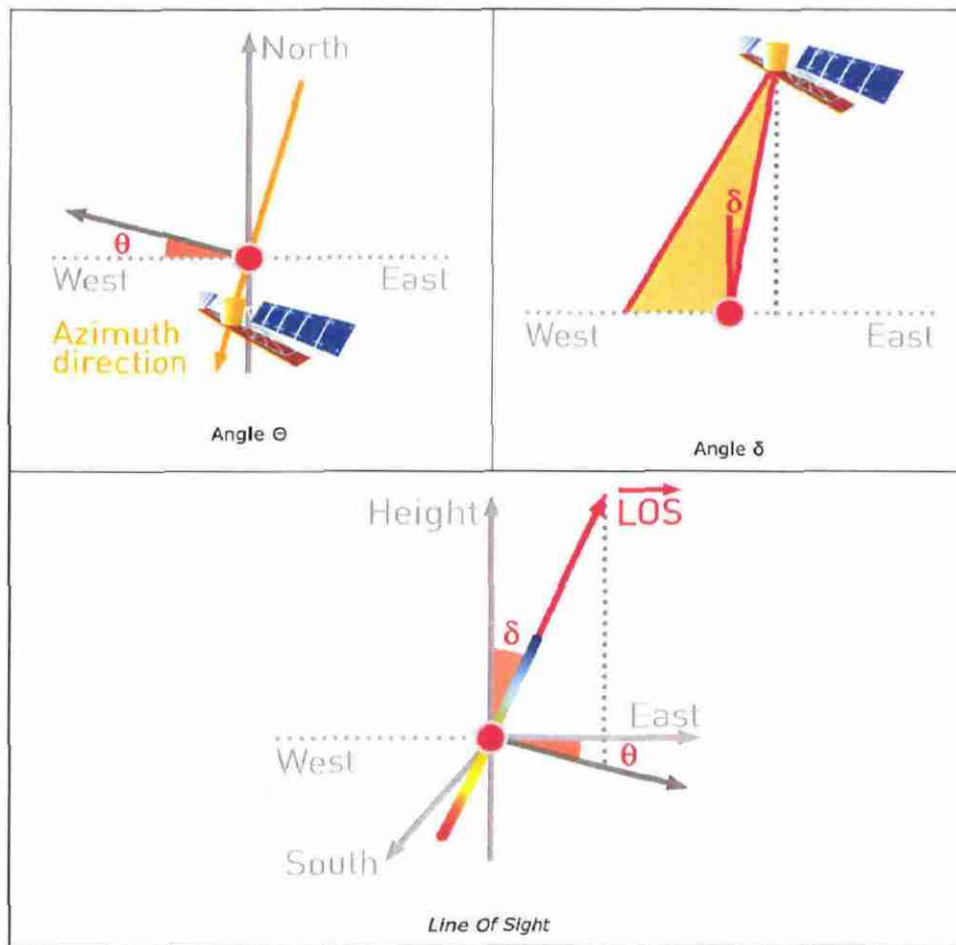


Illustration 17 – Géométrie d'acquisition du satellite (image TRE)

4.3. CORRECTION DES DEPLACEMENTS

Afin d'améliorer la significativité des mesures, l'ensemble des déplacements issus du traitement, et donc exprimés suivant la ligne de visée du satellite (Illustration 17), ont été ramenés à des déplacements verticaux d'après :

$$\Delta H = \Delta L \times \cos(\delta)$$

où ΔH désigne le déplacement suivant la verticale, ΔL le déplacement suivant la ligne de visée du satellite et δ l'angle de vue du satellite (Illustration 17), supposé constant à l'échelle de la zone d'étude et valant $21,78^\circ$ en orbite descendante et $21,15^\circ$ en orbite ascendante, ce qui se traduit par un coefficient correcteur de 0,929 en orbite descendante et de 0,933 en orbite ascendante. On fait l'hypothèse, compte tenu du contexte, que le déplacement des PS est principalement vertical. Si cette hypothèse est globalement raisonnable, il peut y avoir des exceptions (PS ayant un mouvement propre indépendant du déplacement de la surface, notamment). Les angles de visée

sont par ailleurs relativement faibles, ce qui a pour effet d'atténuer l'influence de la composante horizontale du mouvement sur le résultat de la mesure.

4.4. POINT DE REFERENCE

4.4.1. Définition du point de référence

Le point de référence est un réflecteur permanent (PS) pour lequel les déplacements sont considérés comme nuls. Les déplacements de l'ensemble des autres réflecteurs permanents sont alors fournis par rapport à ce point de référence. Par convention, à une date donnée, un déplacement négatif correspond à un abaissement du point par rapport à ce point de référence et un déplacement positif à une élévation de ce point.

Dans le but d'observer des phénomènes cycliques saisonniers par mesures sur point uniques, le choix de ce point de référence est primordial : il faut absolument que ce point corresponde à un point stable pour éviter que toutes les mesures ne contiennent, dans leur série, les déplacements de ce point de référence.

4.4.2. Choix du point de référence

Référence initiale arbitraire sur la série descendante

Lors de l'analyse de la série descendante, un premier point de référence a été initialement choisi par TRE, de manière arbitraire, au centre de la zone d'étude. Ce point de référence, qui correspond aux résultats présentés dans le rapport de TRE (TRE, avril 2009), a été analysé à partir des ortho-photos de l'IGN (Illustration 18).



Illustration 18 - Localisation de l'ancienne référence en orbite descendante choisie arbitrairement (point A04PP, commune de Mazan)

Sélection d'une nouvelle référence à partir des ortho photos

1. Série descendante

Compte tenu des incertitudes qui pesaient sur cette première référence (zone d'aléa faible, bâtiment manifestement léger, sans fondation, de type garage), il a été demandé à TRE de recalculer les résultats à partir d'une nouvelle référence, choisie d'après les ortho photos comme étant suffisamment imposante pour ne pas subir de mouvements sensibles liés au retrait-gonflement des sols argileux. Le choix s'est arrêté sur un immeuble (Illustration 19) situé en zone d'aléa faible, rue John Fitzgerald Kennedy à Carpentras. D'un point de vue géologique, ce bâtiment est situé dans des éboulis cryoclastiques post-würmiens (notés Ez), à éléments gélifractés de l'Urgonien (souvent crayeux).

Un choix en zone d'aléa nul n'a pas semblé judicieux en raison d'une part de la présence de phénomènes karstiques dans ces zones calcaires (les affaissements éventuellement induits pourraient fausser l'ensemble des résultats), et d'autre part de l'absence de bâtiments à plusieurs étages dans ces zones.



Illustration 19 – Localisation de la nouvelle référence utilisée en orbite descendante (point A06CU, commune de Carpentras)

Ce changement de référence a été réalisé par TRE et a fait l'objet de la remise d'un second jeu de résultats en juin 2009.

La comparaison des deux séries de résultats fournies par TRE (respectivement avec l'ancienne référence et avec la nouvelle) à partir de quelques points répartis en bordure de la zone d'étude confirme la validité du changement de référence. Il a

également été remarqué qu'un certain nombre de champs changeaient de valeur suivant la référence (et en particulier le champ de cohérence, qui traduit la qualité de la donnée).

Une rapide reconnaissance de terrain, réalisée le 30 juillet 2009, a permis d'identifier ce bâtiment utilisé en référence de la série descendante comme étant un édifice public (gendarmerie) de 2 étages (probablement sur sous-sol), surmontées de 2 grandes antennes (Illustration 20). Il est malheureusement probable que le point de référence retenu corresponde à une de ces antennes.

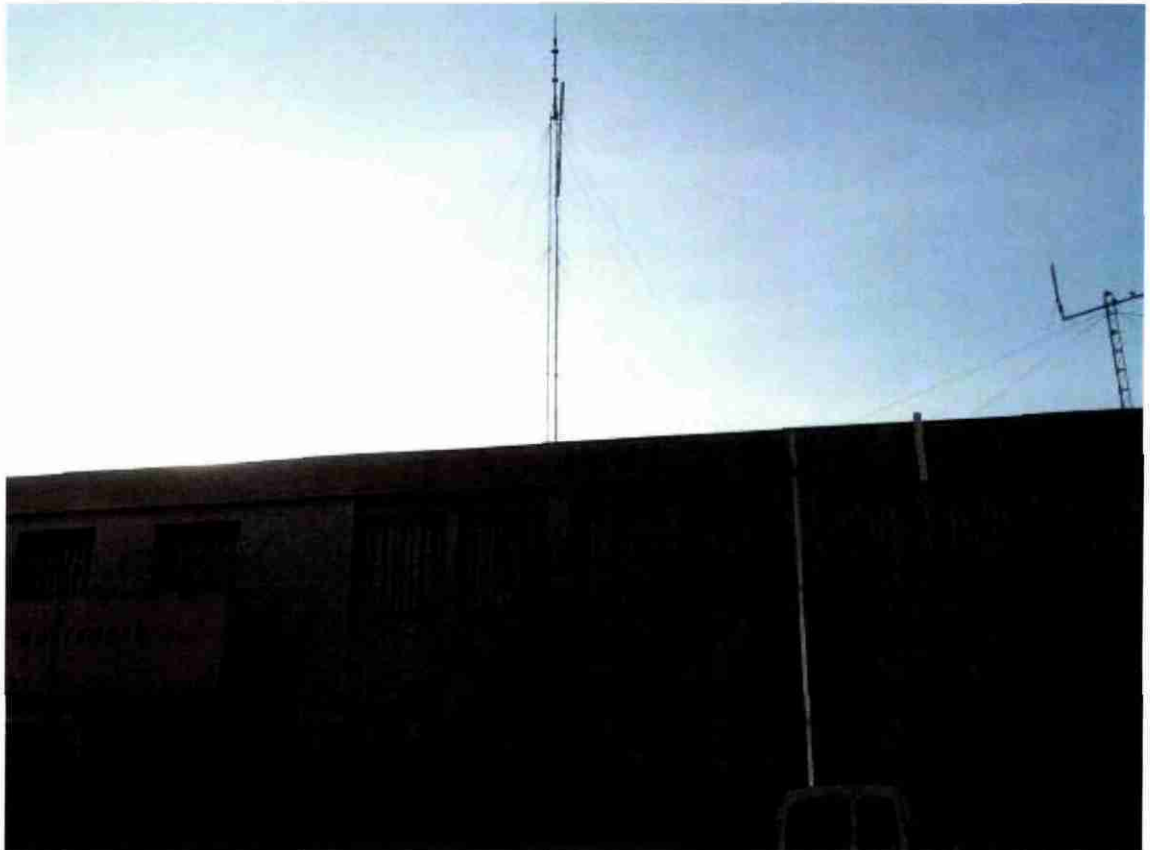


Illustration 20 – Gendarmerie correspondant au PS A06CU (série descendante)

2. Série ascendante

Lors du traitement de la seconde série de données (orbite ascendante), les PS étant nécessairement différents de la première série, TRE a choisi une nouvelle référence située à proximité immédiate de celle de la première série (PS A1ERO, Illustration 21).



Illustration 21- Localisation de la référence utilisée en orbite ascendante (point A1ERO, commune de Carpentras)

Ce bâtiment utilisé en référence de la série ascendante correspond à un immeuble assez haut (4 étages), qui pourrait être considéré comme suffisamment stable pour servir de référence (Illustration 22).



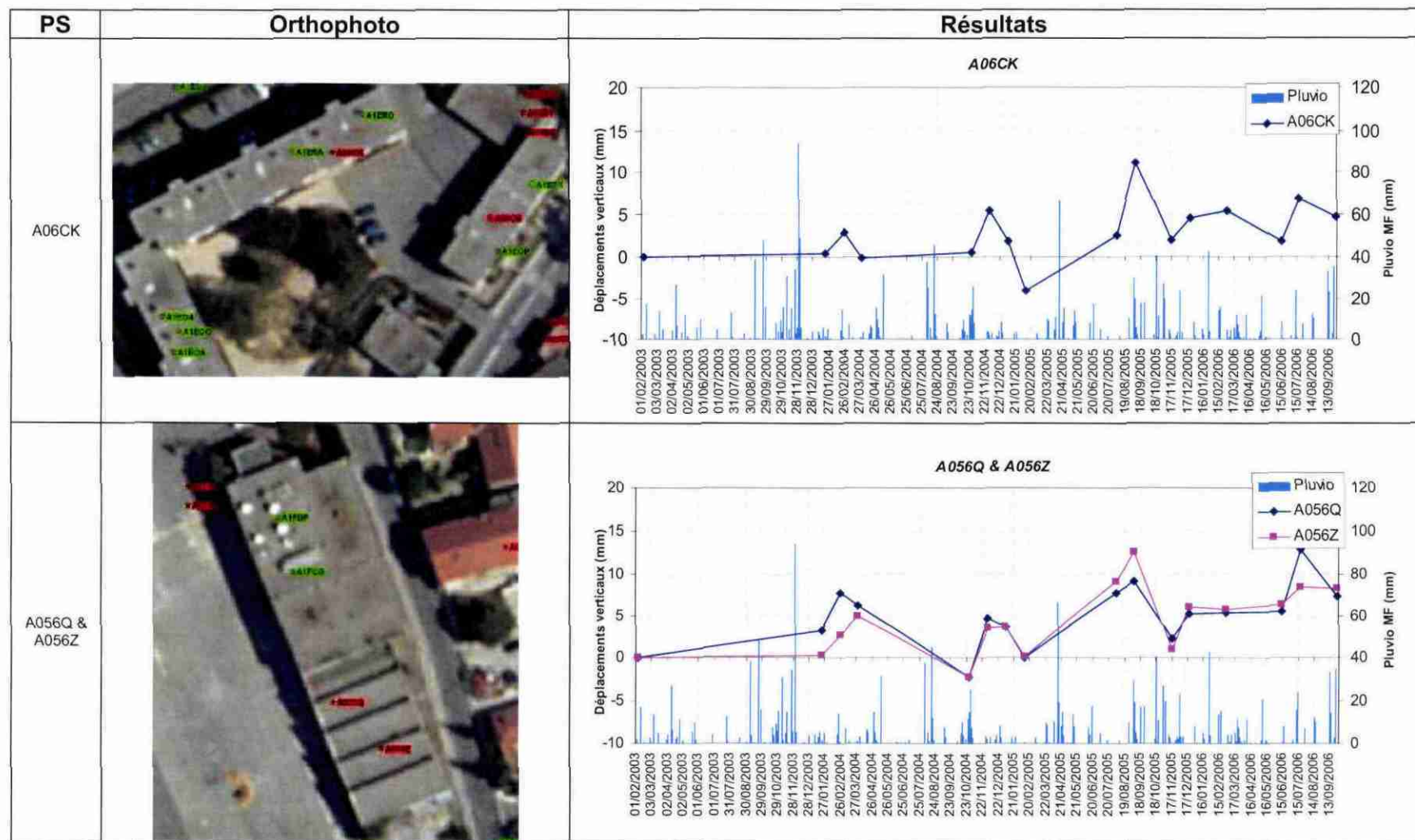
Illustration 22 – Bâtiment correspondant au PS A1ERO (série ascendante)

Premières observations

1. Série descendante

Une première étape a consisté à vérifier que les bâtiments susceptibles d'avoir des fondations les plus profondes, et donc supposés non soumis au phénomène de retrait-gonflement du sol, ne présentaient pas de déplacements significatifs.

Un certain nombre de PS, localisés sur des bâtiments imposants, ont donc été analysés en série descendante (Illustration 23).



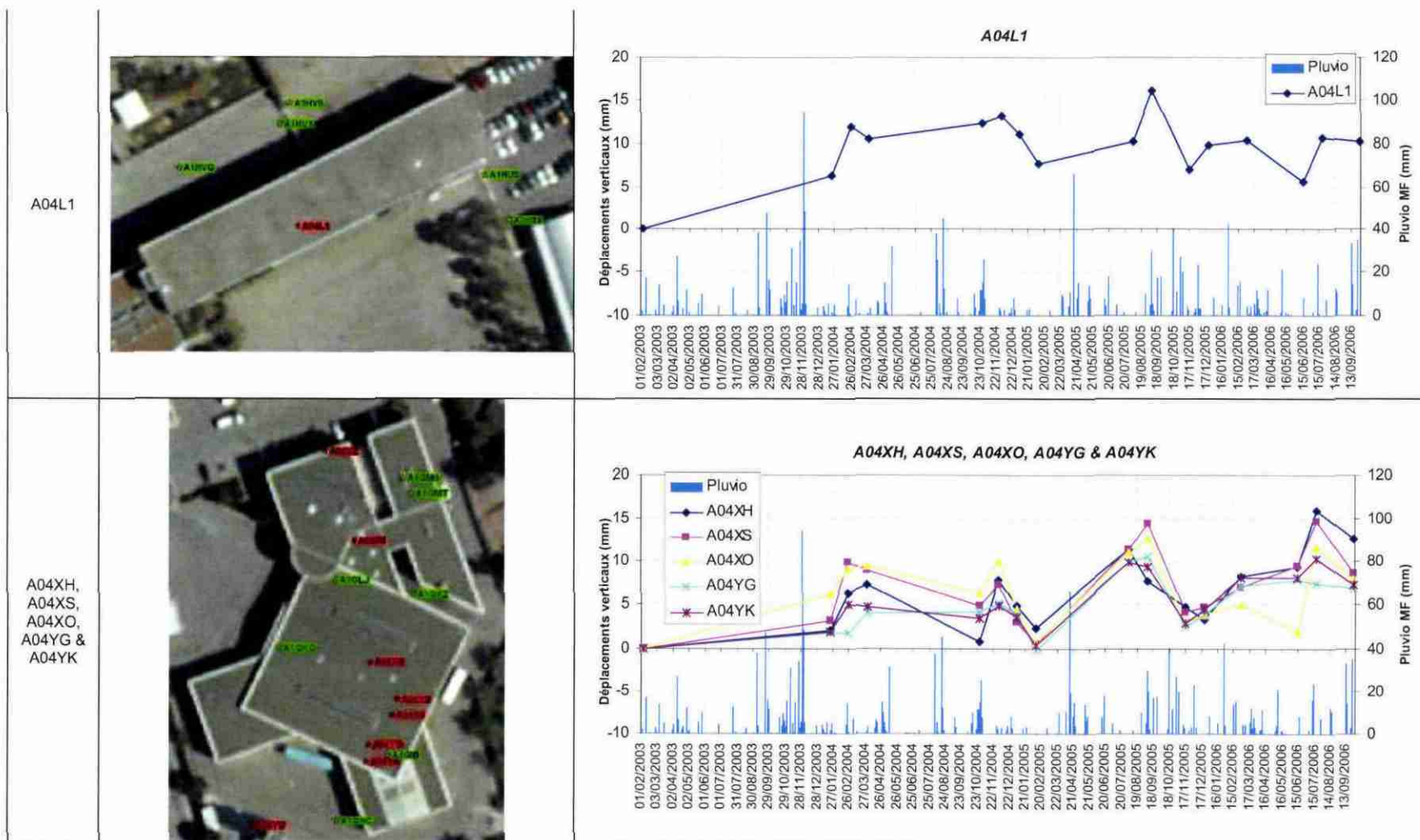
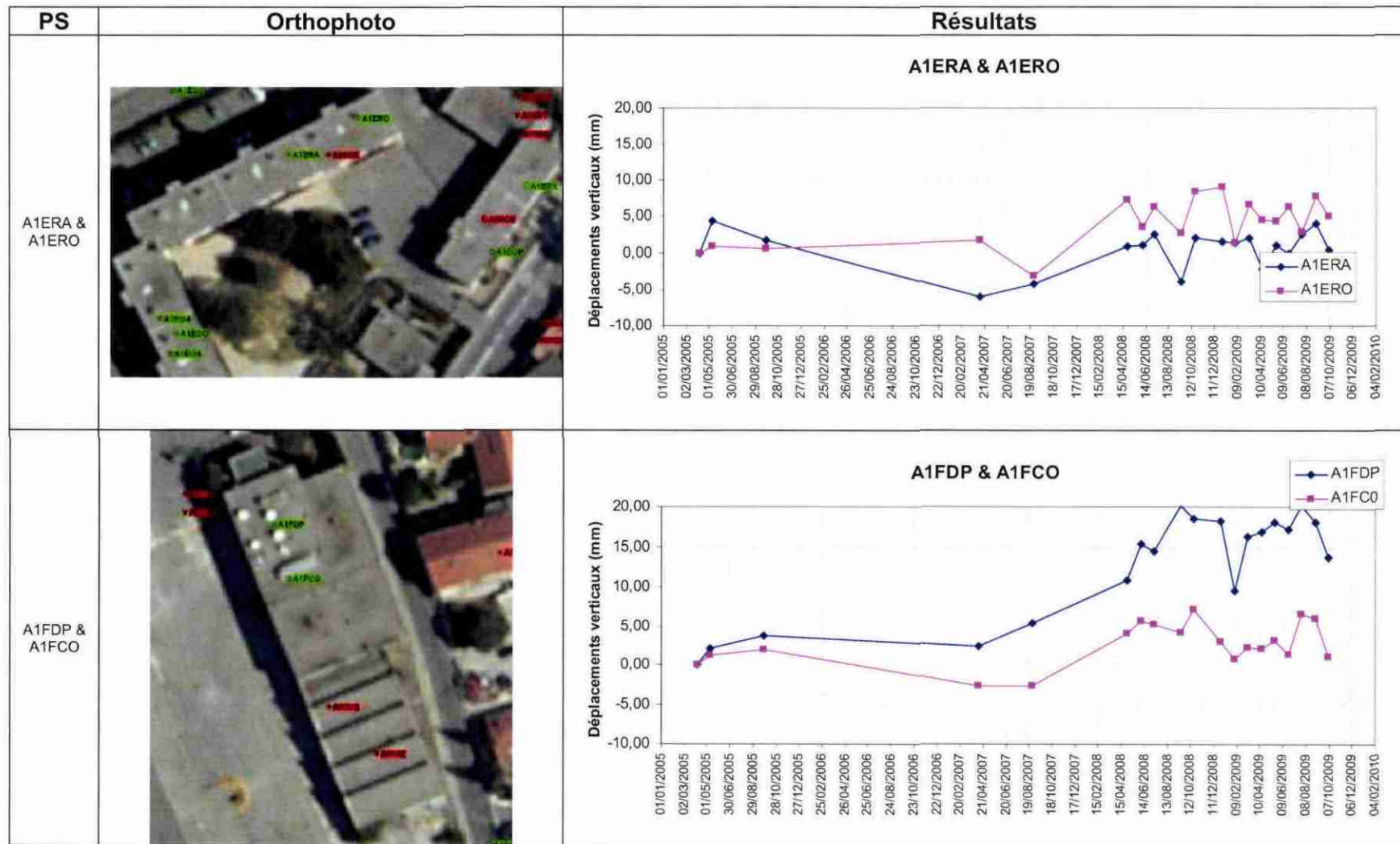


Illustration 23 – Analyse de PS supposés stables (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite descendante, référence A06CU)

L'étude de ces PS, qui correspondent à des bâtiments de grande hauteur, a montré que ces points, supposés immobiles, présentaient d'importants déplacements et qu'il convenait d'identifier une référence par une autre méthode (d'autres bâtiments lourds ont été testés en référence pour cette série, dont celui servant pour la série ascendante, mais n'ont pas donné de meilleurs résultats).

2. Série ascendante

La même démarche a été suivie pour les deux séries. Afin de pouvoir comparer les résultats (orbites ascendante/descendante), les mesures ont été ramenées à une nouvelle référence, localisée sur la gendarmerie (A1EPX, Illustration 21). Les observations obtenues sur les bâtiments supposés fixes sont présentées en Illustration 24.



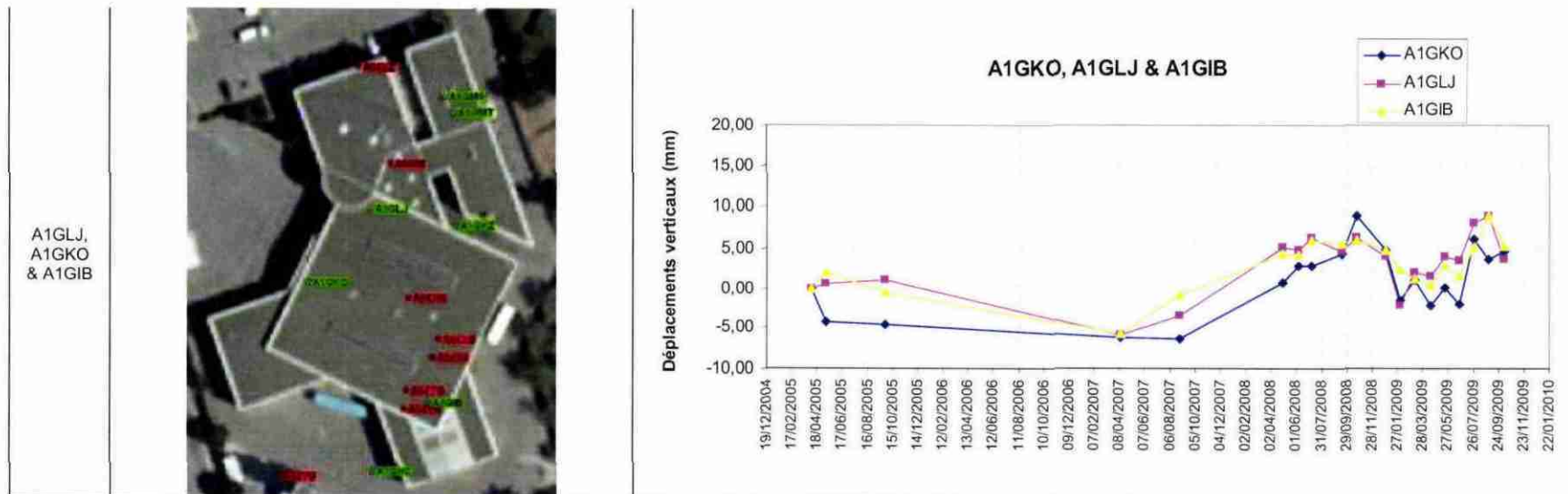


Illustration 24 - Analyse de PS supposés stables (déplacements suivant la LOS, orbite ascendante, référence A1EPX)

Les résultats ainsi obtenus sont donc assez similaires à ceux obtenus sur la série descendante, dans le sens où ces bâtiments, supposés non soumis au retrait-gonflement des sols argileux, présentent toujours des déplacements significatifs, même si ces derniers semblent légèrement moins importants que dans la série descendante.

Détermination d'une référence statistiquement représentative

Devant l'impossibilité de sélectionner un point jugé fixe, il a été choisi de recourir à une méthode plus statistique afin de déterminer un bâtiment de référence.

Une sélection de bâtiments de grande hauteur présentant des réflecteurs permanents a été réalisée à partir des ortho photos et d'observations de terrain (l'annexe 1 montre les points identifiés). L'idée était de vérifier que ces points avaient des comportements similaires dans un référentiel donné et de choisir l'un de ces points ou une moyenne de ces points comme référence aux deux séries de mesures.

1. Série descendante

Le comportement des PS identifiés en série descendante est présenté sur l'illustration 25.

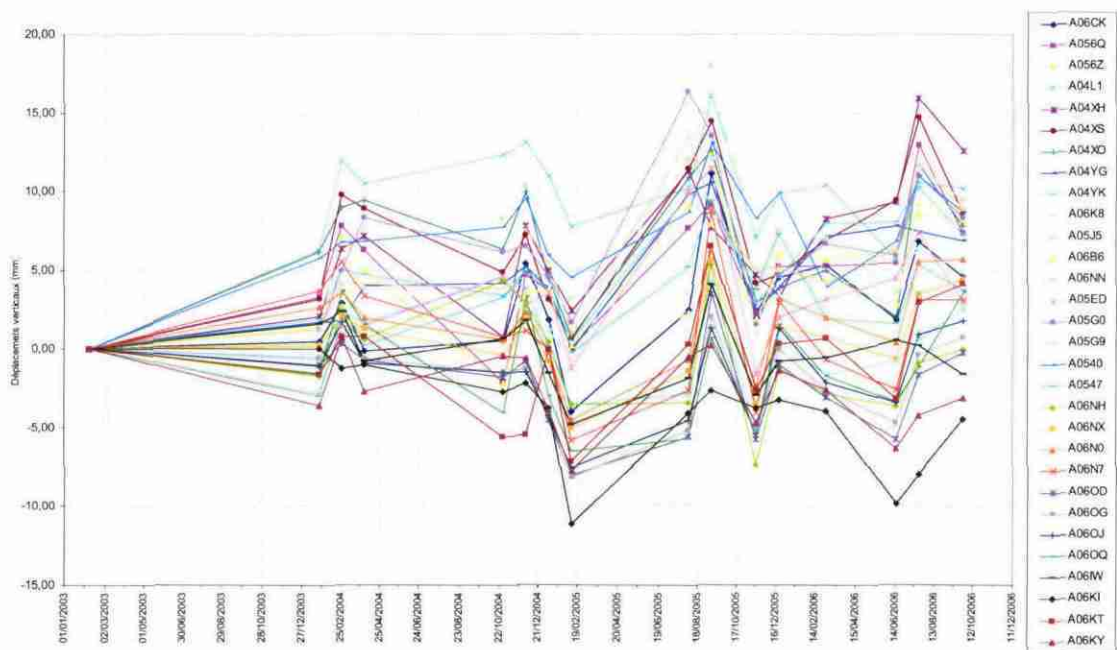


Illustration 25 – Comportement de 30 PS correspondant à des bâtiments supposés stables (déplacements suivant la LOS, orbite descendante, référence A06CU)

L'ensemble de ces points semble donc montrer un comportement assez similaire, avec toutefois une dispersion significative. Afin de prendre en compte l'ensemble de ces

comportements, il a été décidé de sélectionner un point correspondant au comportement « moyen » de ces bâtiments supposés fixes. Le PS retenu est le point A06N0, dont le comportement par rapport à la référence initiale A06CU est rappelé dans l'illustration 26.

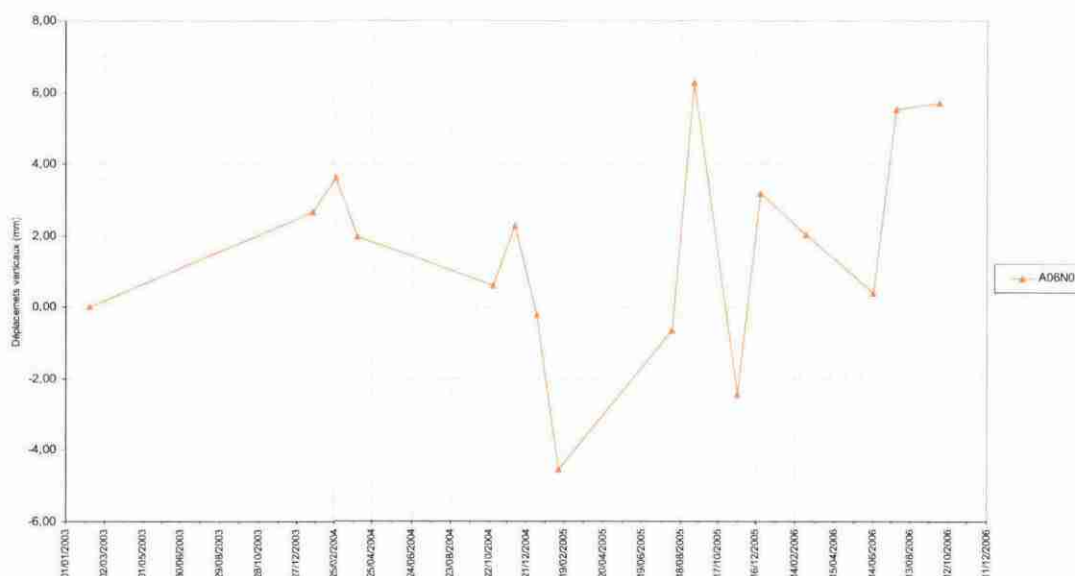


Illustration 26 – Comportement du PS A06N0 (déplacements suivant la LOS, orbite descendante, référence A06CU)

Le bâtiment concerné a été reconnu sur le terrain (Illustration 27), ce qui a permis de confirmer ce choix comme représentatif des bâtiments non soumis au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.



Illustration 27 – Bâtiment retenu comme représentatif des bâtiments non soumis au retrait-gonflement des sols argileux

Ce point A06N0 a donc été jugé représentatif du comportement moyen des bâtiments supposés stables, et a donc été choisi comme nouvelle référence pour l'analyse de la série de données issues de l'orbite descendante.

2. Série ascendante

Dans la continuité de la démarche exposée ci-dessus, il a été décidé de conserver le même bâtiment de référence pour les deux séries. Cependant, les deux séries d'images ont été acquises avec des modes différents, et les PS de l'orbite descendante ne correspondent pas a priori à ceux de l'orbite ascendante. L'illustration 28 montre la position de PS sur le bâtiment retenu dans les deux configurations orbitales.



Illustration 28 – Position des PS des deux séries (descendante en rouge et ascendante en vert) sur le bâtiment retenu comme référence

La série ascendante ne présentant pas de PS superposé au PS A06N0 de la série descendante, il a été choisi de retenir comme position de référence, non pas un PS précis de la série ascendante, mais la position moyenne des 4 PS jugés localisés sur le bâtiment (A1CUI, A1CU1, A1CTZ, A1CQ7). L'illustration 29 présente le comportement de ces 4 PS et du « point moyen » (par rapport à la référence initiale choisie par TRE sur la série ascendante, A1ERO). Cette référence sera par la suite appelée « référence moyenne ».

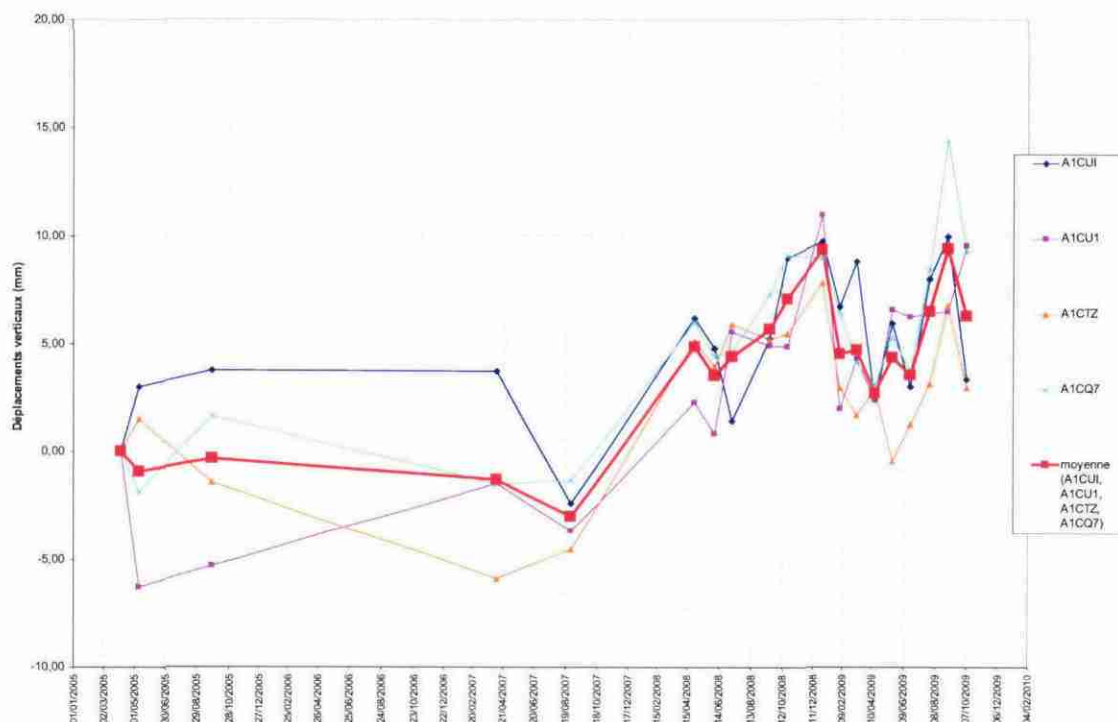


Illustration 29 - Comportement des PS du bâtiment « référence » et de la référence obtenue par moyenne sur le bâtiment (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite ascendante, référence A1ERO)

Effet du changement de référence

L'influence du changement de référentiel a alors été visualisée sur les points situés à proximité du site expérimental de Mormoiron, en zone d'aléa fort, et est ici illustrée à travers les résultats obtenus sur la série ascendante.

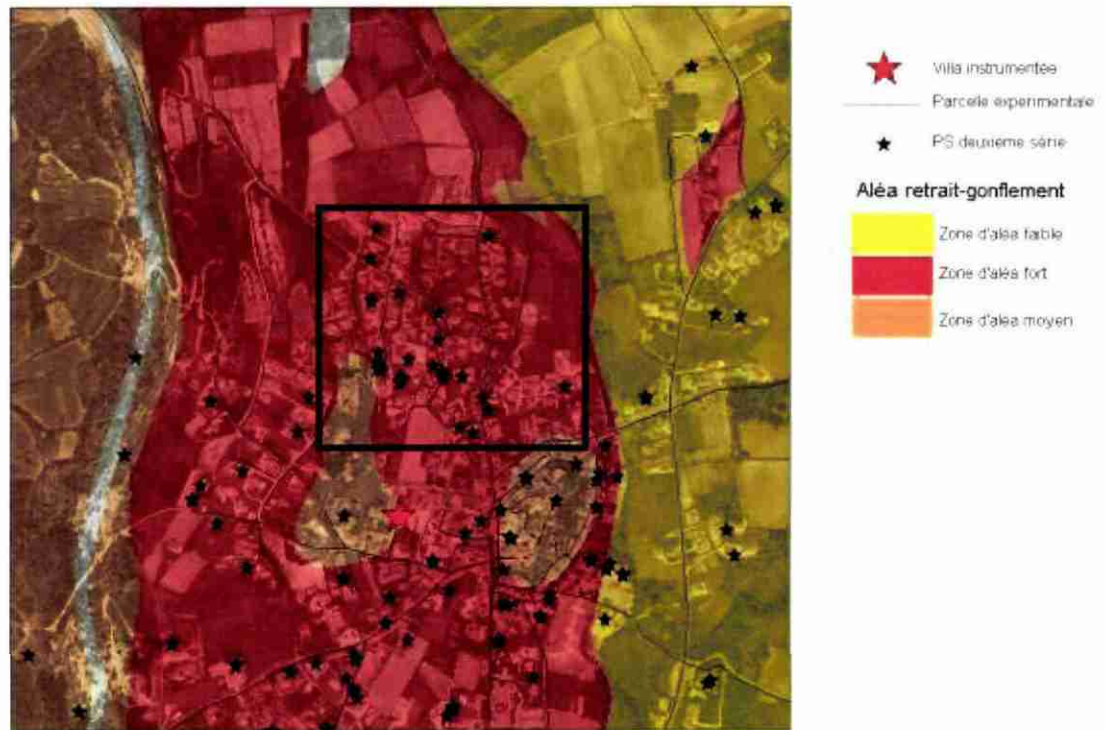


Illustration 30 – PS considérés ou localisés dans la zone test (encadrée) pour visualiser l'influence du changement de repère (série ascendante)

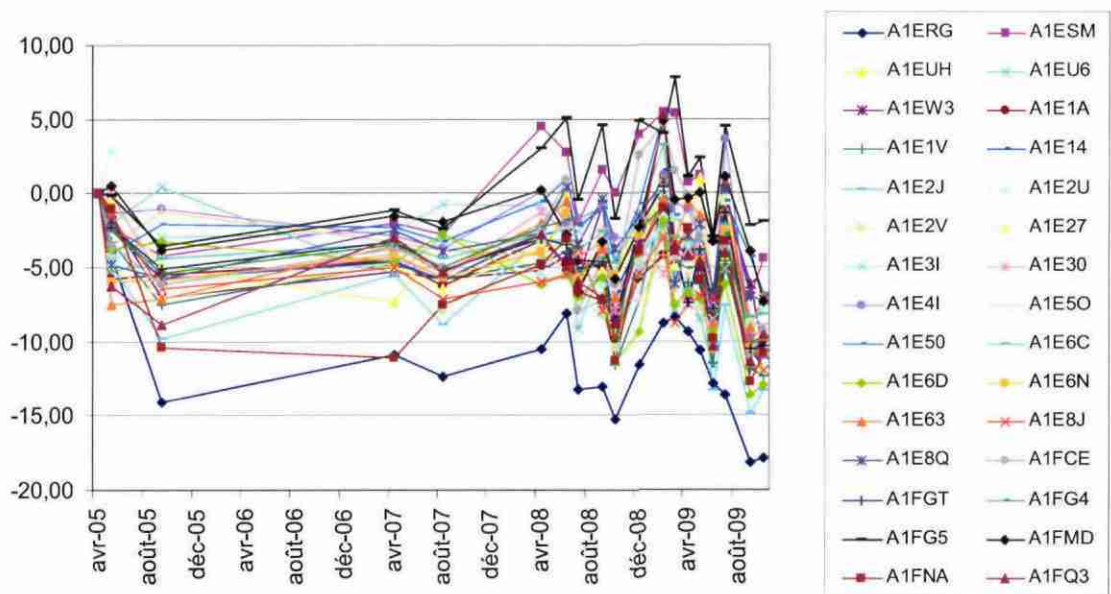


Illustration 31 – Résultats des PS de la zone test avant changement de référence (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, série ascendante, référence A1ERO)

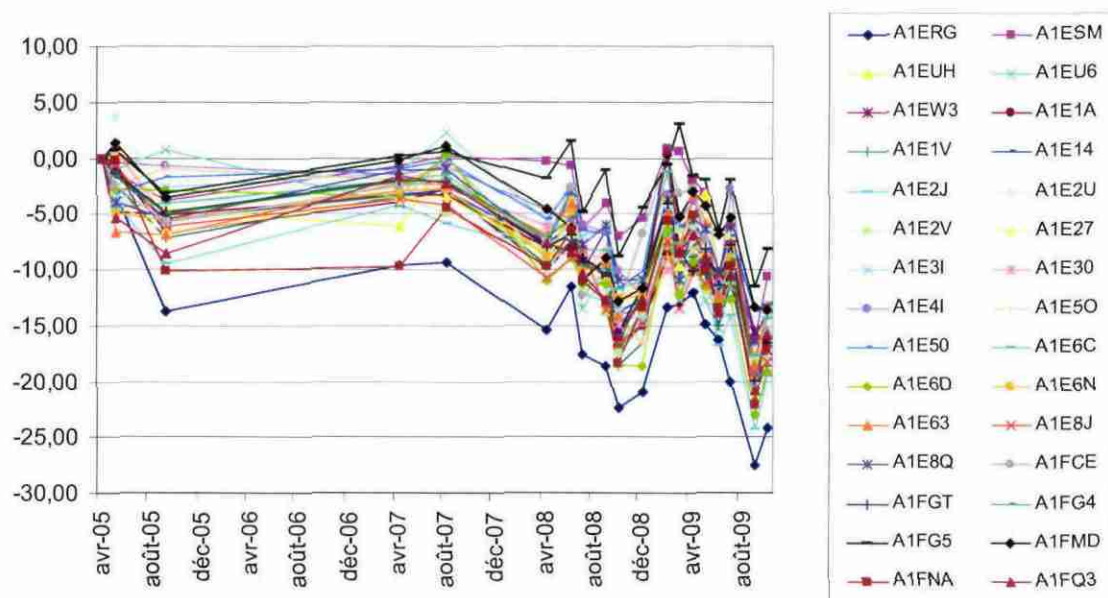


*Illustration 32 - Résultats des PS de la zone test après changement de référence
(déplacements suivant la ligne de visée du satellite série ascendante, référence moyenne)*

La comparaison des déplacements avant et après changement de référence illustre bien l'importance de l'influence de ce choix sur la qualité des résultats, puisque des corrections très significatives (jusqu'à 1 cm) apparaissent dans la démarche présentée. Il convient par ailleurs de conserver à l'esprit la difficulté rencontrée sur les deux séries exploitées en ce qui concerne le choix d'une référence pour juger de la représentativité et de l'exploitabilité des résultats obtenus.

5. Résultats : premières observations

Cette première observation des résultats est réalisée sur les communes de METHAMIS, intéressante car présentant une zone en aléa nul, et de MORMOIRON. Les résultats présentés ici sont exprimés suivant la ligne de visée du satellite (Illustration 17) et calés par rapport au bâtiment de référence jugé statistiquement représentatif.

5.1. SERIE DESCENDANTE

Divers essais ont été menés sur les résultats obtenus par la série descendante sans qu'il soit possible de mettre en évidence l'exploitabilité de la méthode. En effet, sur cette série (qui, rappelons-le, ne correspond qu'à un nombre limité de 16 images radar), les résultats obtenus n'ont pas permis de visualiser des mouvements de sol imputables à des tassements en période estivale ou à du gonflement en période hivernale. L'illustration 34 présente les déplacements obtenus pour quelques PS situés sur la commune de METHAMIS, à des niveaux d'aléa variés.



Illustration 33 – Position et niveau d'aléa des PS considérés sur la commune de METHAMIS (orbite descendante)

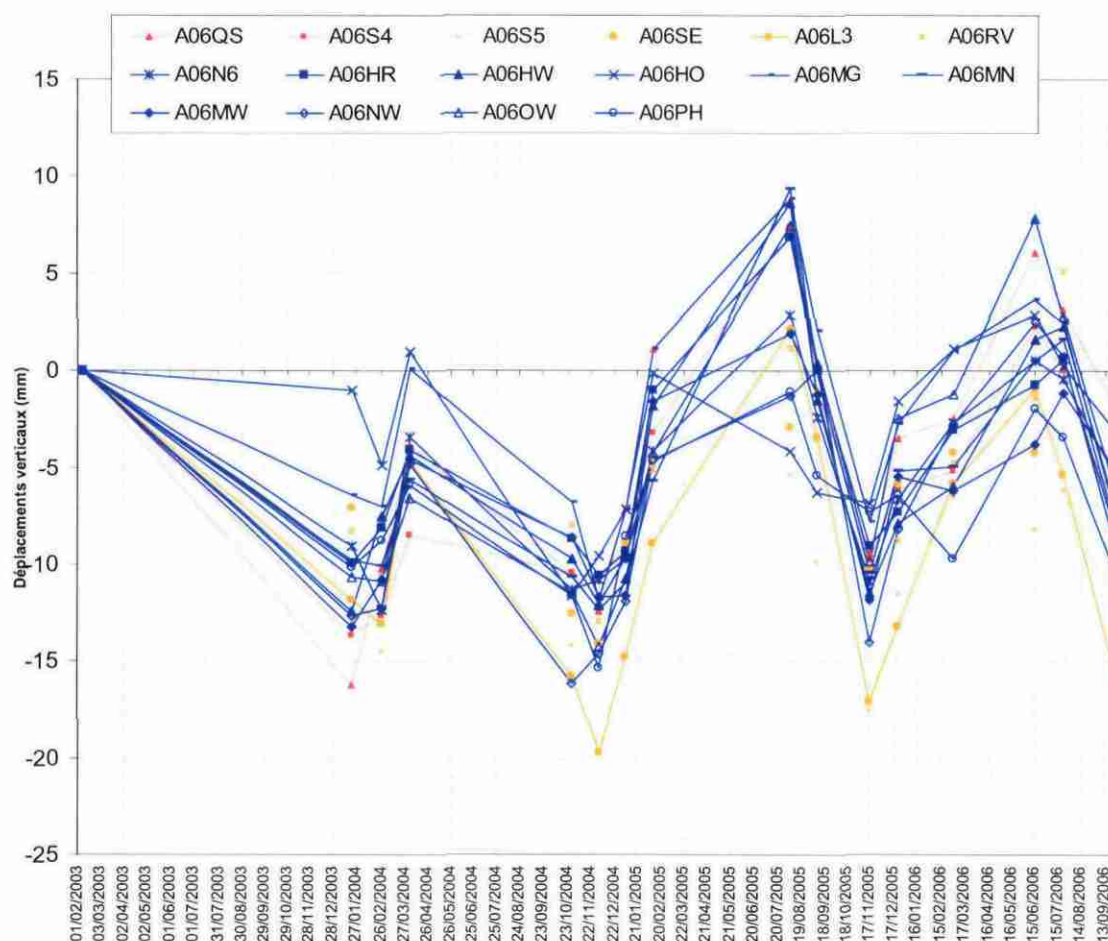


Illustration 34 – Déplacements obtenus pour quelques PS sur la commune de METHAMIS (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite descendante, référence A06N0), les couleurs indiquant le niveau d'aléa (bleu = aléa nul ; jaune = aléa faible, orange = aléa moyen)

Ces résultats ne permettent pas de mettre en évidence une corrélation entre les données interférométriques et la connaissance du phénomène dont on dispose dans le secteur :

- les PS en zone d'aléa nul semblent montrer une amplitude de mouvements tout à fait similaire à celle obtenue sur des zones d'aléa faible ou moyen ; ces mouvements cycliques ne semblant pas liés à d'autres phénomènes (affaissement lié à des cavités souterraines), on peut supposer que les données sont perturbées par un ou des éléments extérieurs (effet de l'atmosphère...) qui n'ont pas pu être compensés du fait du faible nombre d'images accessibles pour l'étude.
- ces PS (et plus largement, l'ensemble des points observés sur la zone d'étude) ne montrent pas de cohérence globale avec la phénoménologie connue du retrait-gonflement des sols argileux : le mécanisme du phénomène et les observations disponibles montrent que les périodes estivales s'accompagnent

d'une dessiccation du sol qui engendre des tassements, dont le maximum en surface semble intervenir en général au mois de septembre, alors que les périodes hivernales s'accompagnent d'une humidification du sol entraînant des phénomènes de gonflement, dont le maximum semble intervenir en général lors du premier semestre de l'année (entre mars et mai). Les mesures interférométriques sur cette première série aboutissent quant à elles à des mouvements « positifs » (assimilables à du gonflement) sur la plupart des PS considérés entre janvier et avril 2004, puis un état plus « tassé » à fin octobre 2004, et un nouveau mouvement « négatif » (type tassement) jusqu'au début décembre, puis des mouvements à nouveau « positifs » en janvier et février pour arriver à un état particulièrement « haut » (« gonflé ») en août 2005. Des mouvements de compaction importants se manifestent alors jusqu'en septembre, puis jusqu'en novembre, avant de nouveaux mouvements « positifs » en décembre 2005, mars et juin 2006. Enfin, au mois de septembre 2006, le sol apparaît dans un état plus « bas » (« tassé »). Les « tassements » observés entre octobre et décembre 2004 et entre septembre et novembre 2005, et l'état particulièrement « gonflé » du mois d'août 2005 semblent donc incohérents avec les mécanismes du phénomène, bien que les éléments de calage manquent pour cette période (le suivi du site de Mormoiron n'a débuté qu'en décembre 2005). L'illustration 35 ci-dessous présente à titre indicatif les déplacements simulés sur le site de Mormoiron pour la période 2004-2005. Ces résultats ne font également apparaître aucune des particularités observées ci-dessus au niveau des dates des minima et maxima et de l'amplitude du mouvement.

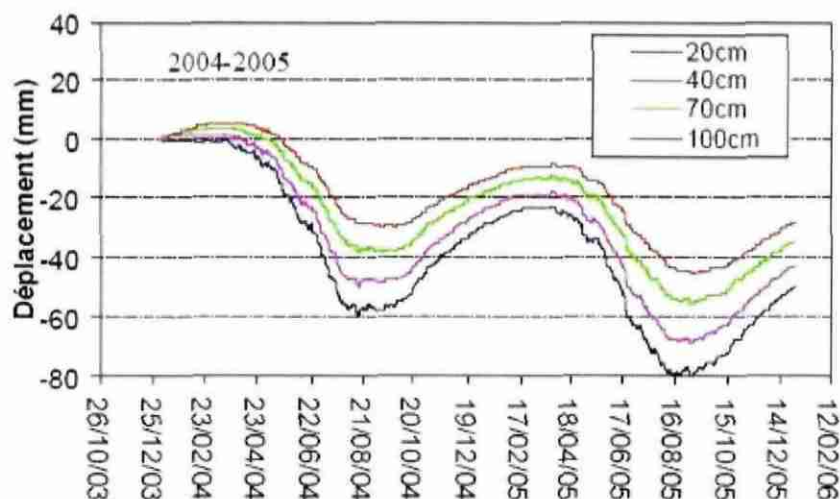


Illustration 35 – Déplacements simulés par une modélisation couplée thermo-hydro-mécanique à différentes profondeurs sur le site de Mormoiron pour la période 2004-2005 (Hemmati, 2009)

5.2. SERIE ASCENDANTE

Les résultats sur la série ascendante sont illustrés ici sur la base des PS observés dans le même secteur que précédemment, sur la commune de METHAMIS.

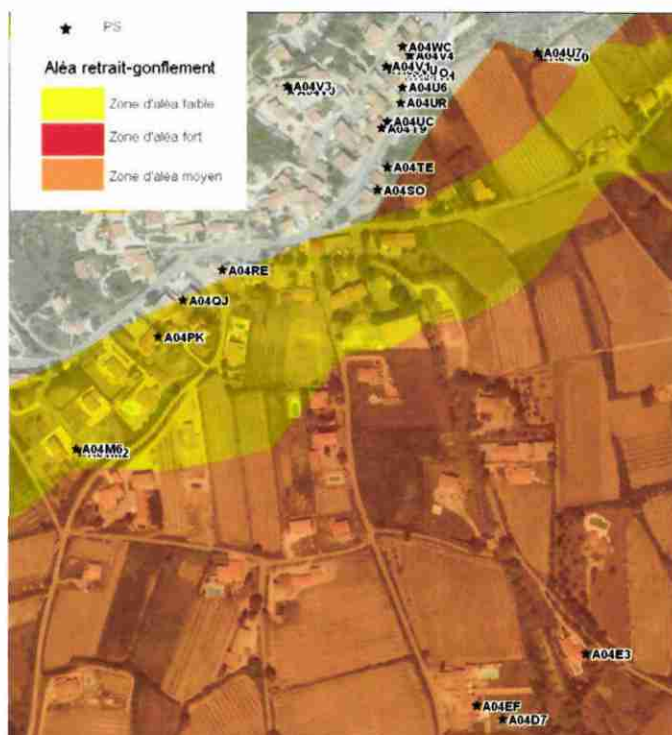


Illustration 36 – Position et niveau d'aléa des PS considérés sur la commune de METHAMIS (orbite ascendante)

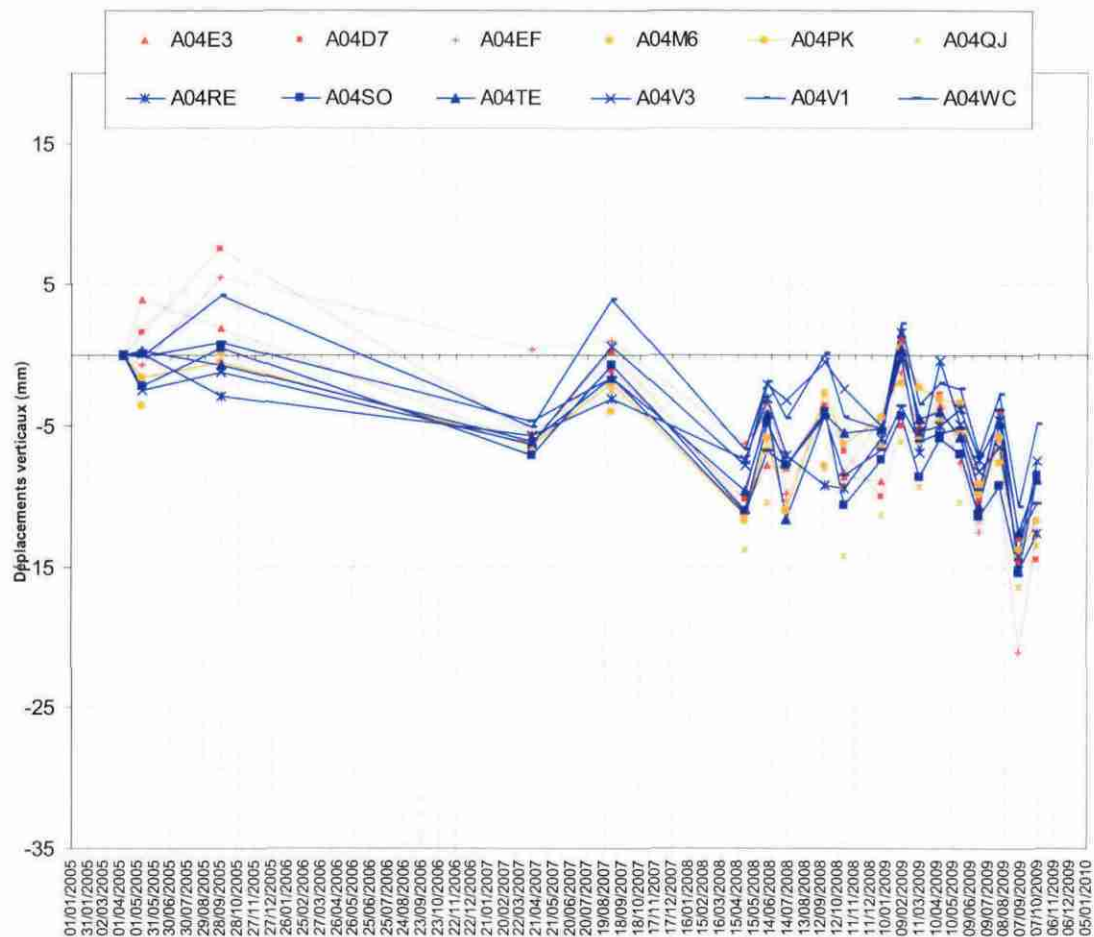


Illustration 37 – Déplacements obtenus pour quelques PS sur la commune de METHAMIS (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, orbite ascendante, référence moyenne), les couleurs indiquant le niveau d'aléa (bleu = aléa nul ; jaune = aléa faible, orange = aléa moyen)

Les séries PS observées sur le secteur de METHAMIS semblent montrer une première période entre mai 2005 et septembre 2005 pendant laquelle certains réflecteurs permanents semblent se rapprocher du satellite (pente positive), une seconde période entre septembre 2005 et mars 2007 où l'ensemble des PS présentent une pente négative, une troisième période entre avril et septembre 2007 où la pente est à nouveau positive, une quatrième période (septembre 2007-avril 2008) pendant laquelle la pente, la plus forte observée sur toute la série, est négative et une dernière période de fluctuations mensuelles pendant laquelle le signal est à peu près stable. Ainsi, les déplacements observés à METHAMIS ne semblent pas pouvoir être attribués au phénomène de retrait-gonflement des sols.

Ceci explique également qu'aucune distinction ne puisse être faite entre les points situés en zone d'aléa faible et en zone d'aléa moyen. En revanche, le fait que l'ensemble des points présentent le même type de déplacement peut être expliqué par la formulation de plusieurs hypothèses :

- le mouvement d'ensemble peut être lié à des biais de type effet atmosphérique (compensation insuffisante lors du traitement).
- l'ensemble des déplacements observés sont liés à une instabilité du point de référence.

Il convient toutefois de remarquer qu'indépendamment de cette question d'un mouvement d'ensemble, les déplacements obtenus diffèrent suivant la localisation dans la zone d'étude, et semblent potentiellement attribuables à des phénomènes de retrait-gonflement (les déplacements rencontrés à Mormoiron, par exemple, et présentés à l'illustration 32, sont en accord avec des phénomènes de tassements en période estivale et de gonflement en période hivernale).

6. Comparaison avec les mesures *in situ* à Mormoiron

6.1. INSTRUMENTATION A MORMOIRON

6.1.1. Parcelle expérimentale pour le suivi du retrait-gonflement

Présentation succincte du site expérimental

Le site est localisé sur un terrain communal à Mormoiron, dans le Vaucluse. La parcelle instrumentée correspond à la formation géologique des *Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron*.

Le dispositif d'instrumentation mis en place par le BRGM en décembre 2004, à l'initiative du ministère en charge de l'environnement dans le cadre de la première phase d'un projet de suivi de la propagation du front de dessiccation en profondeur (Vincent et al. 2006a) est constitué d'un pluviomètre à augets et de 24 capteurs d'humidité Humitub. Ces derniers sont répartis en deux cannes cylindriques verticales, l'une en prairie et la seconde à proximité d'un arbre isolé, et placés respectivement à 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m, 4 m, 4,5 m, 5 m, 6 m et 7 m de profondeur.

Le dispositif a été complété par la mise en place en décembre 2006, dans le cadre du projet ARGIC, cofinancé par l'ANR, de 3 capteurs extensométriques installés en forage, scellés à 6 m de profondeur et mesurant les déplacements respectivement à 0,2 m, 0,5 m et 1 m de profondeur en prairie (Vincent et al, 2007). Ensuite, en décembre 2007 puis en juillet 2009, respectivement 3 autres capteurs extensométriques et 3 sondes ThétaProbe y ont été installés dans le cadre d'un autre projet financé par le ministère de l'environnement. Au total, 4 extensomètres mesurent les déplacements à 0,2, 0,5, A et 1,7 m de profondeur au niveau de sol nu (entre ces profondeurs et le point d'ancrage supposé fixe et situé à 7 m de profondeur) et 2 extensomètres enregistrent les déplacements à 0,5 et 1 m de profondeur sous une géomembrane.

Les capteurs sont tous reliés, via une série de multiplexeurs, à une station d'acquisition, qui permet de les interroger au pas de temps choisi (toutes les trois heures en l'occurrence) et d'enregistrer les mesures. Les résultats, exprimés en intensité comprise entre 4 et 20 mA (en raison de la présence d'un convertisseur 4-20) sont stockés par une centrale Osiris et peuvent ensuite être téléchargés à distance toutes les semaines via un modem GSM. Les caractéristiques des différents appareils de mesure sont décrites dans le paragraphe 5.1.2.

L'illustration 38 présente le schéma d'implantation des différents capteurs du site.

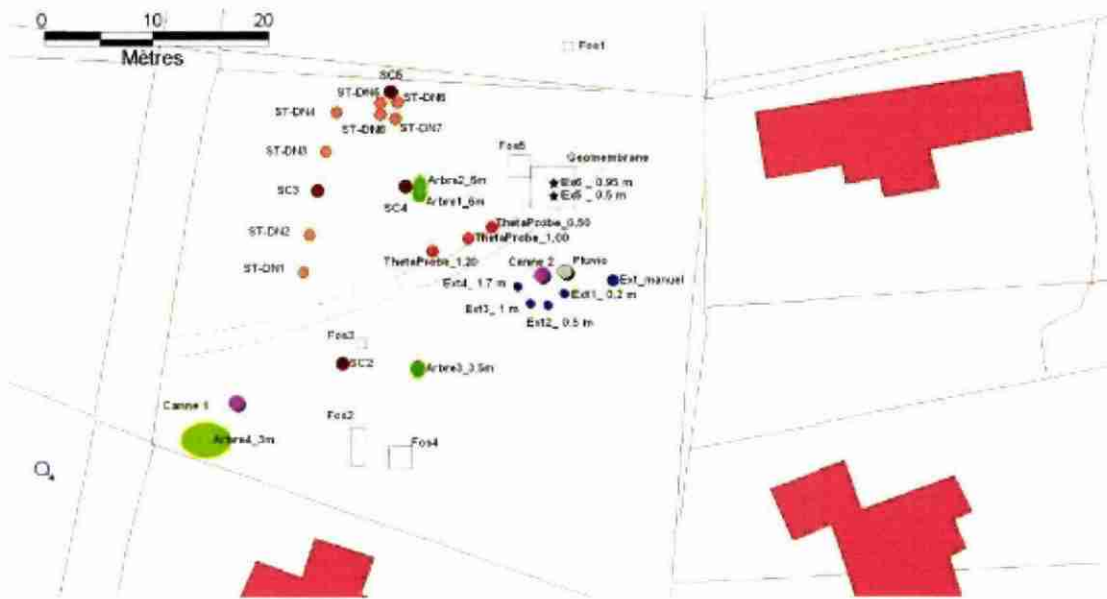


Illustration 38 - Schéma d'implantation des reconnaissances et de l'instrumentation sur le site de Mormoiron



Illustration 39 – Vue d'ensemble du site instrumental de Mormoiron

Résultats obtenus sur le site depuis janvier 2007

Cette partie présente les principaux résultats enregistrés sur la parcelle expérimentale de Mormoiron et susceptibles de fournir des informations utiles à l'interprétation des données issues de l'interférométrie radar PSI. Ainsi, ne sont pas repris les résultats concernant l'humidité des sols qui sont présentés par ailleurs (Plat *et al.*, 2008 ; Le Roy *et al.*, 2009).

L'Illustration 40 présente les déplacements enregistrés au niveau du sol nu pendant la période comprise entre janvier 2007 et novembre 2009.

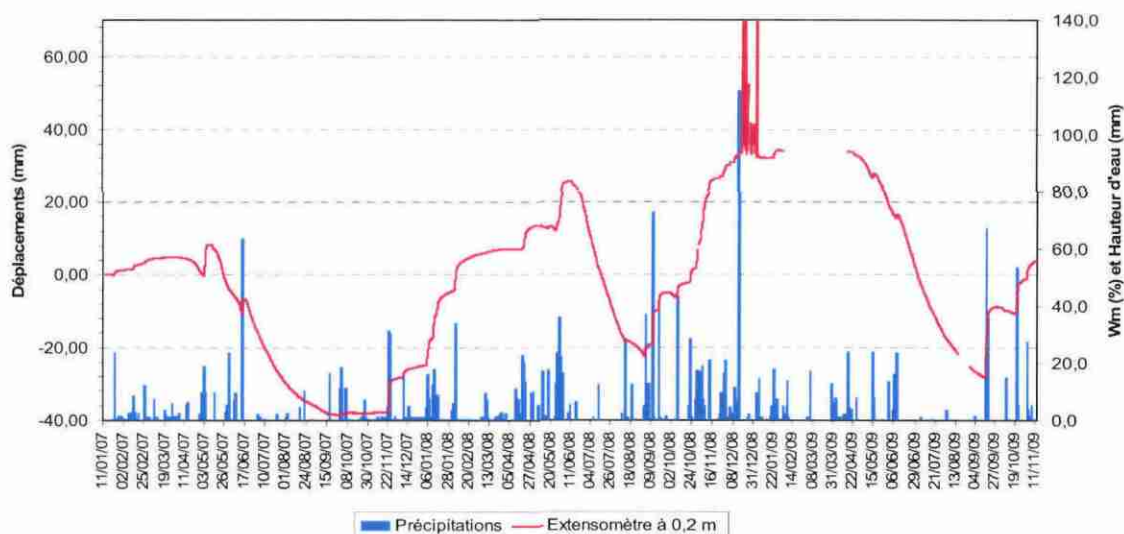


Illustration 40 - Suivi de déplacements à 0,2 m de profondeur pluviométrie journalière – site de Mormoiron (période du 11/01/07 au 11/11/09)

Les mesures disponibles à ce jour montrent une excellente corrélation entre les mouvements verticaux du sol, au moins en surface et jusqu'à quelques dizaines de centimètres de profondeur, et les conditions météorologiques. Les phénomènes de gonflement consécutifs aux épisodes pluvieux s'avèrent particulièrement rapides et le retrait du sol est plus progressif. Le phénomène semble réversible, les périodes hivernales étant accompagnées du gonflement du sol (entre septembre/novembre et mai/juin à Mormoiron) et les périodes estivales de retrait du sol, les dates auxquelles s'enclenchent les différentes phases étant variables d'une année sur l'autre parce fonction de la météo. Les valeurs extrémales obtenues pendant les saisons successives sont présentées dans le tableau de l'Illustration 41.

	Déplacement initial (mm)	Déplacement final (mm)	Amplitude du déplacement (mm)
été 2007	8,4	-38,5	-46,9
hiver 2007-2008	-38,5	25,4	63,9
été 2008	25,4	-22,5	-47,9
hiver 2008-2009	-22,5	34,2	56,6
été 2009	34,2	-28,1	-62,2

Illustration 41 – Déplacements extrêmes enregistrés au cours des différentes périodes saisonnières sur le site de Mormoiron entre janvier 2007 et octobre 2009

Sur le site de Mormoiron, les périodes pendant lesquelles le phénomène a été de plus grande ampleur en termes de déplacement extrêmes au cours de la période d'instrumentation (entre janvier 2007 et octobre 2009) ont été l'hiver 2007-2008 (environ 6,4 cm de gonflement) et l'été 2009 (environ 6,2 cm de tassements).

6.1.2. Instrumentation d'une villa sinistrée

Présentation de l'instrumentation

Afin d'évaluer l'impact des mouvements différentiels engendrés sur une maison individuelle par le phénomène de retrait-gonflement affectant les *Sables et Argiles à Smectites de Mormoiron*, des fissuromètres électroniques ont été posés sur les façades d'une villa sinistrée située à proximité immédiate du site et implantée dans la même formation géologique, d'après la carte géologique à 1/50 000.

La villa étudiée est située à environ 400 m de la parcelle instrumentée, au lieu dit « le Mourre de la Ville », parcelle BK 264. La maison, de type Phenix (assemblage sur une structure métallique de panneaux de béton préfabriqués), a été construite en 1974 et aurait subi ses premiers désordres une dizaine d'années après son achèvement. Une première visite en mars 2008 a permis de constater l'ampleur des dommages sur la maison et ses dépendances, malgré les nombreuses tentatives de réparation entreprises par le propriétaire.

Une seconde visite, le 2 avril 2008, a permis d'équiper la villa de 4 fissuromètres électroniques, permettant un suivi automatisé de l'ouverture des fissures. Ces derniers sont des capteurs résistifs avec rappel de la tige par ressort intégré ; ils présentent une résolution de 0,01 mm et permettent d'enregistrer simultanément les déplacements et la température. Leur implantation a été réalisée comme suit :

- 1 fissuromètre sur une fissure verticale à la base du mur de la façade nord (à environ 0,2 m de hauteur) ;
- 1 fissuromètre sur une fissure verticale à la base du mur de la façade sud à environ 0,2 m de hauteur (Illustration 42) ;
- 2 fissuromètres superposés sur une importante fissure verticale sous une fenêtre de la façade ouest (l'une à 0,42 m et l'autre à 1,1 m de hauteur).

Un cinquième fissuromètre sur une fissure horizontale située en façade nord a été mis en place en juillet 2009.



Illustration 42 – Vue de la façade sud de la maison instrumentée

Principaux résultats obtenus sur le site instrumenté

Un premier traitement pour corriger les effets de la température est mis en œuvre sur les mesures brutes enregistrées par les fissuromètres (Illustration 43).

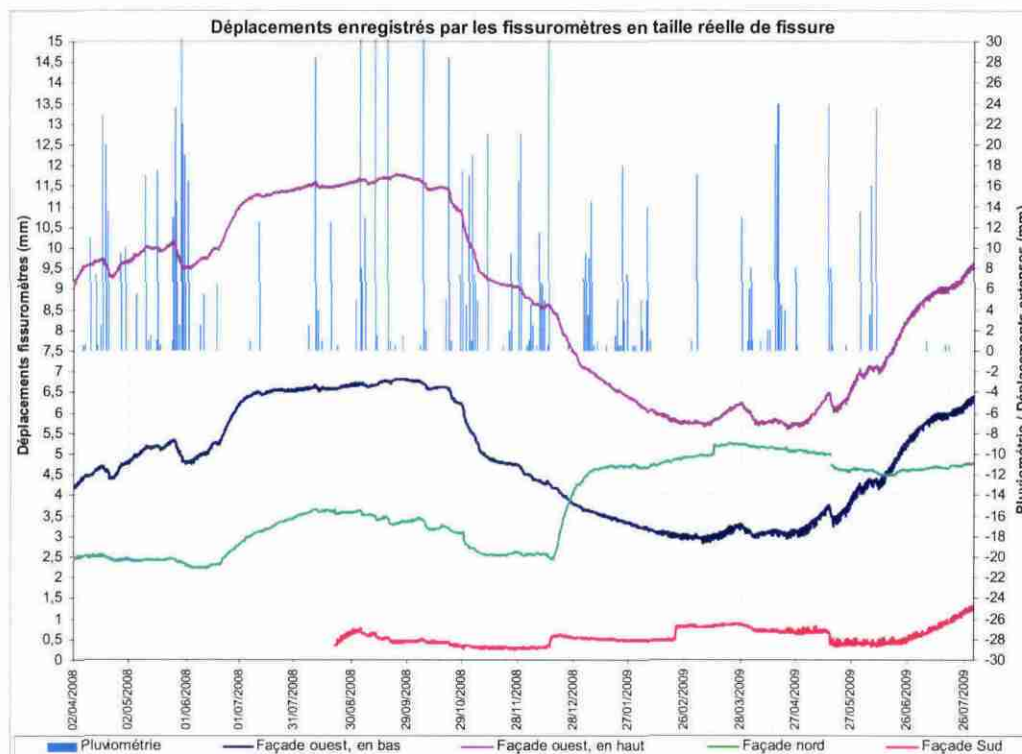


Illustration 43 – Variations d'ouverture des fissures fournies par les fissuromètres

Interprétations

Les fissures suivies en façade ouest sont plus ouvertes que celles observées sur les deux autres façades instrumentées, mais cette différence est due en partie au fait que les capteurs sont placés plus haut (au niveau des murs) que sur les côtés nord et sud (au niveau du sous-bassement).

Les mesures réalisées sur une même fissure de la façade ouest montrent une ouverture plus importante à 1,1 m qu'à 0,4 m de hauteur, ce qui est conforme aux mécanismes identifiés pour expliquer la sinistralité d'un bâtiment en cas de sécheresse. Il faut toutefois noter que cette observation reste incomplète, car il existe d'autres fissures sur cette même façade qui n'ont pas été instrumentées et dont l'effet peut compenser ou s'ajouter aux déplacements de la fissure instrumentée.

Depuis avril 2008, les mesures montrent des comportements assez similaires pour les différentes fissures suivies (aucune mesure pour la façade sud en raison d'une défaillance du capteur pendant les premiers mois). On peut distinguer 5 phases successives principales :

- les deux premiers mois montrent des « fluctuations », succession d'ouvertures et de fermetures ; en façade ouest, la fissure présente plutôt une tendance à l'ouverture (+0,5 mm), alors qu'en façade nord la tendance est plutôt à la fermeture (-0,2 mm) ;
- entre juin et mi-août 2008, les trois fissures subissent une ouverture sensible et rapide (+1,7 mm en bas de la façade ouest, +1,9 mm en haut de la façade ouest, +1,2 mm en façade nord) ;
- entre mi-août et fin-septembre, on retrouve une phase de « fluctuations », avec toujours une tendance à l'ouverture sur la façade ouest (+0,2 mm) et une tendance à la fermeture en façade nord (-0,2 mm) ; cependant, le fissuromètre en façade sud (de nouveau opérationnel depuis le 21 août) continue à enregistrer une ouverture significative et rapide jusqu'à fin août avant de connaître la phase de « battements », avec une tendance à la fermeture légèrement plus marquée que sur la façade nord (-0,3 mm) ;
- à partir d'octobre, la fissure de la façade ouest se referme significativement et ce jusqu'en mars 2009 alors que le sol a gonflé jusqu'à début décembre (série incomplète). En revanche, au nord et au sud, la fermeture se poursuit au même rythme qu'avant (-0,1 mm au sud et -0,25 mm au nord) et la fermeture se produit jusqu'en décembre 2009. Ensuite les deux fissures des façades Nord et Sud s'ouvrent brutalement à la suite des importantes précipitations de fin novembre 2009 ;
- à partir d'avril 2009, le sol se rétracte, ce qui est synchrone avec l'ouverture des fissures qui se referment légèrement, mais très rapidement lors des différents épisodes pluvieux. Cette réouverture a lieu avec du retard sur le fissuromètre de la façade Nord. Le retrait du sol, quasi-linéaire, entraîne une ouverture quasi-linéaire des fissures de la villa instrumentée.

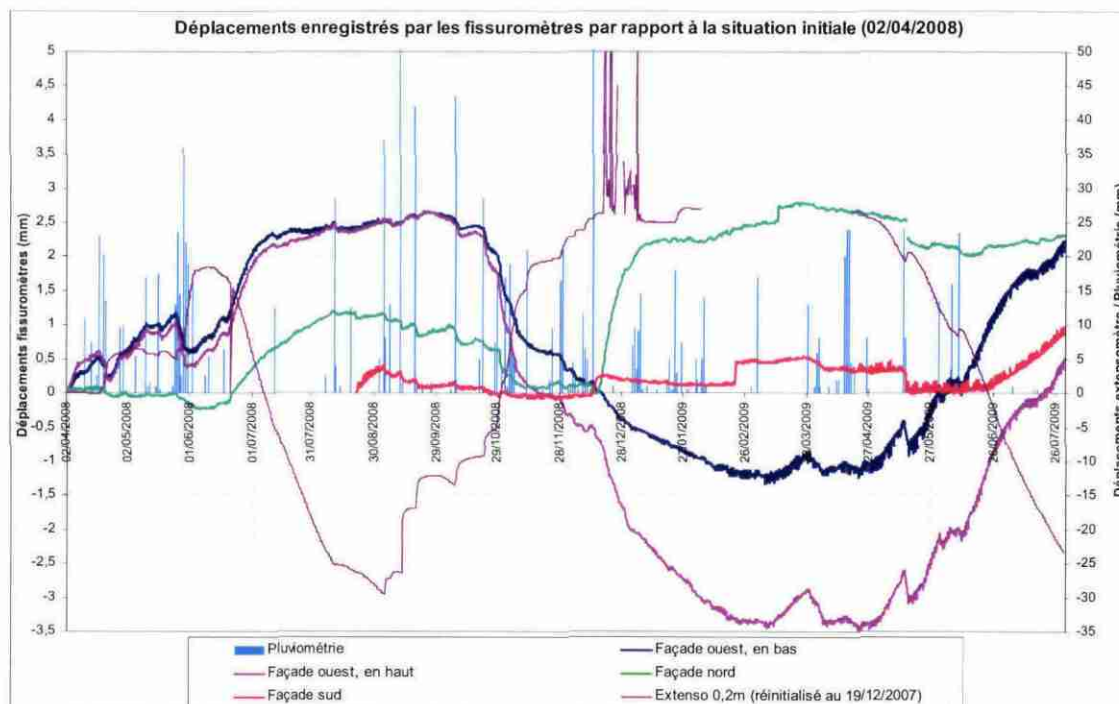


Illustration 44 – Comportement des fissures, déplacements du sol comparé à la répartition des précipitations sur le site de Mormoiron

Les précipitations enregistrées tant au printemps (mi-avril et surtout fin mai), qu'à l'automne (à partir de début septembre) engendrent des phénomènes de gonflement du sol, s'accompagnant d'une fermeture des différentes fissures de la maison. Inversement, pendant les périodes sèches intermédiaires, le sol tasse, ce qui se traduit par une ouverture des fissures de la maison (les variations d'humidité et donc les déplacements restant moindres sous le centre de la maison).

A ce stade des observations, le phénomène de sinistralité semble réversible vis-à-vis des déplacements enregistrés sur le terrain nu : en effet, d'une année sur l'autre, les fissures de l'habitation semblent s'ouvrir puis se refermer.

6.2. RELOCALISATION DES PS *IN SITU* A MORMOIRON

En plus des tentatives de relocalisation réalisées à Carpentras dans le but de déterminer un point de référence fixe, l'ensemble des PS présents dans le centre de Mormoiron ont été relocalisés sur le terrain afin de visualiser à quoi ils correspondent. Les PS examinés correspondent tous à la première série (orbite descendante), la seconde série n'étant pas encore remise lors de la campagne de terrain. Ces PS sont présentés sur l'illustration 45.



Illustration 45 – Localisation des points PS relocalisés dans le centre de Mormoiron (orbite descendante)

Dans la plupart des cas, il est très difficile d'identifier avec certitude la localisation précise du PS, d'autant que celle fournie par le traitement reste assez imprécise (d'après TRE, l'erreur est de ± 7 m en longitude et de ± 2 m en latitude). De nombreux points semblent correspondre à des bordures de bâtiments, ce qui en complique encore l'identification (impossibilité de savoir si les mouvements correspondent au bâtiment ou au sol).

Cependant, dans certains cas, l'observation de terrain conduit à identifier précisément la nature et la localisation du PS, lorsque des éléments particuliers se distinguent. Il s'agit en particulier du cas de PS correspondant à des éléments sur toiture (antennes, velux, cheminées...).

Points PS étudiés sur l'image radar	Photos d'identification du point in situ	Observations
A026Q, A026T, A026U		PS identifiés comme correspondant à des antennes et cheminées alignées sur le toit
A027Y		PS identifié comme correspondant à une cheminée sur un toit
A026K		PS non identifié (nombreux éléments potentiels : lampes, marquise de porte, cheminée, antenne, barrières)
A025J		PS non identifié (présence d'une fontaine, mais peu probable car couvert végétal dense)



Illustration 46 – Identification des points PS observés d'après les images radar et in situ

Dans tous les cas, la distance entre le PS identifié par radar et la localisation in situ dépasse rarement quelques mètres.

Ainsi, pour une analyse fine des résultats issus de l'interférométrie dans un but de rechercher des mouvements cycliques, il peut être intéressant d'identifier au préalable les points in situ pour s'assurer de leur position et s'affranchir d'éventuels mouvements autres que ceux recherchés, mais cette identification s'avère le plus souvent délicate.

6.3. COMPARAISON DES PS AVEC LES MESURES IN SITU

L'analyse de la position des PS identifiés sur les deux séries montre que malheureusement aucun point ne correspond parfaitement aux sites expérimentaux, que ce soit la parcelle instrumentée ou la villa sinistrée.



Illustration 47 – Localisation des sites instrumentés et des PS en orbite descendante (en rouge) et ascendante (en vert)

De plus, compte tenu des dates disponibles, seule la série ascendante peut être comparée aux observations *in situ*, le suivi de la parcelle instrumentale ayant débuté en décembre 2005 (suivi d'humidité uniquement, les mesures de déplacement en surface datant de janvier 2007) et celui de la villa sinistrée en avril 2008.

Afin de pouvoir comparer les mesures *in situ* du site expérimental de Mormoiron aux données interférométriques en série ascendante, l'ensemble des données a été réinitialisé à la date du 10 avril 2007, première date commune aux deux séries de mesure. Les observations effectuées sur le site expérimental ainsi réinitialisées sont reportées sur l'illustration 48.

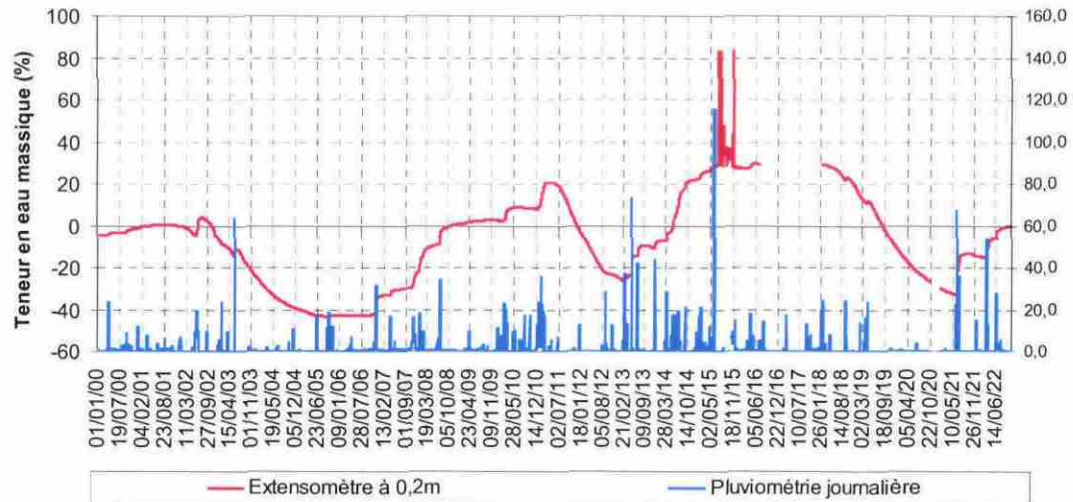


Illustration 48 – Déplacements du sol à 0,2 m de profondeur réinitialisés au 10/04/2007 et pluviométrie enregistrés sur le site de Mormoiron entre janvier 2007 et novembre 2009

Ces résultats ont tout d'abord été comparés aux PS de la série ascendante les plus proches (géographiquement parlant) du site expérimental, tout en restant sur la même formation géologique classée en aléa fort. La comparaison est présentée sur l'illustration 49, les PS pouvant être localisés sur l'illustration 47.

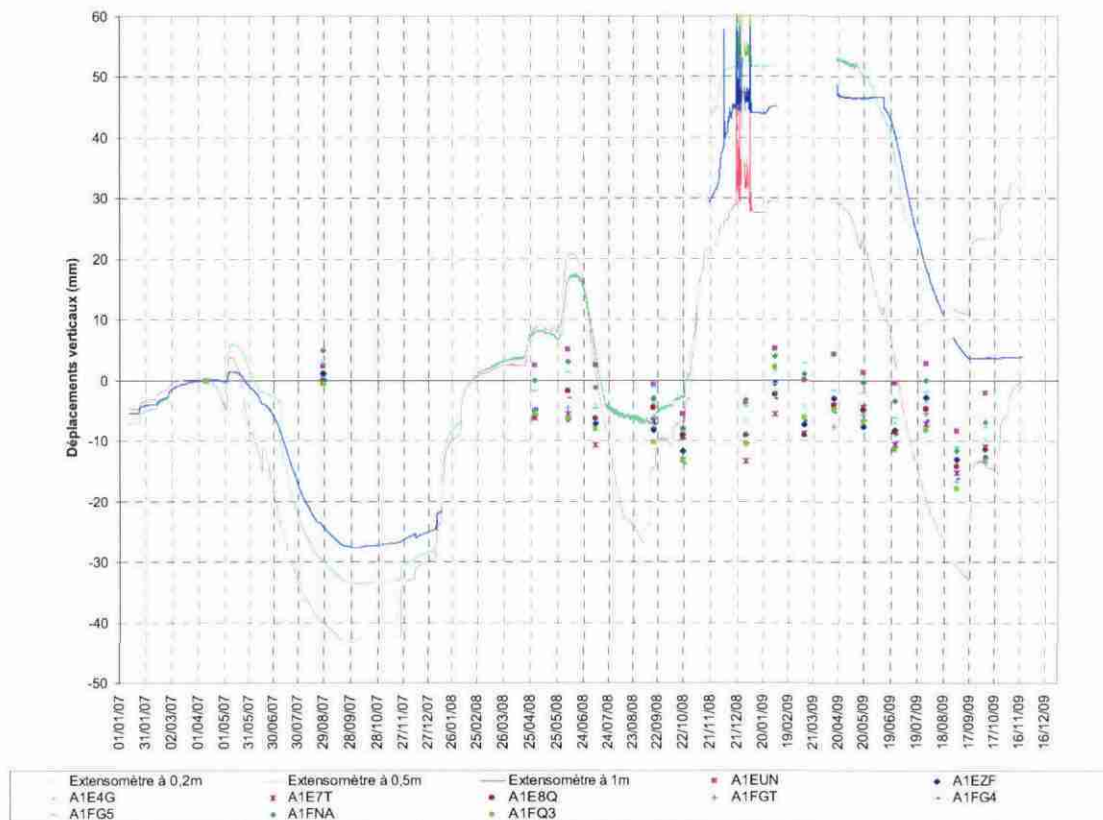


Illustration 49 – Comparaison entre les mesures expérimentales et 10 PS parmi les plus proches sur la même zone d'aléa (déplacements suivant la verticale, orbite ascendante, référence moyenne)

Les résultats obtenus montrent une certaine corrélation entre les déplacements observés sur le site et ceux obtenus par interférométrie : les mouvements cycliques détectés sont relativement en phase, avec toutefois un léger retard sur les données interférométriques lors de la dessiccation de l'été 2008 (les mesures enregistrées à 0,5 m de profondeur semblent d'ailleurs un peu plus en phase avec les données interférométriques que celles à 0,2 m). A titre indicatif, l'illustration 50 présente une comparaison entre les mêmes PS et les déplacements enregistrés sur le site instrumenté à 1,7 m de profondeur (la durée d'observation est plus courte, l'installation du capteur sur le site datant de décembre 2007, la première date commune aux 2 jeux de données étant donc au 29/04/2008). On constate que les mesures enregistrées à 1,7 m de profondeur semblent plus en phase avec les données issues de l'interférométrie, ce qui pourrait s'expliquer par la nature des PS (souvent des bâtiments) qui induirait un retard sur le phénomène amenant à cette simultanéité (par la charge exercée sur le terrain, la profondeur des fondations...).

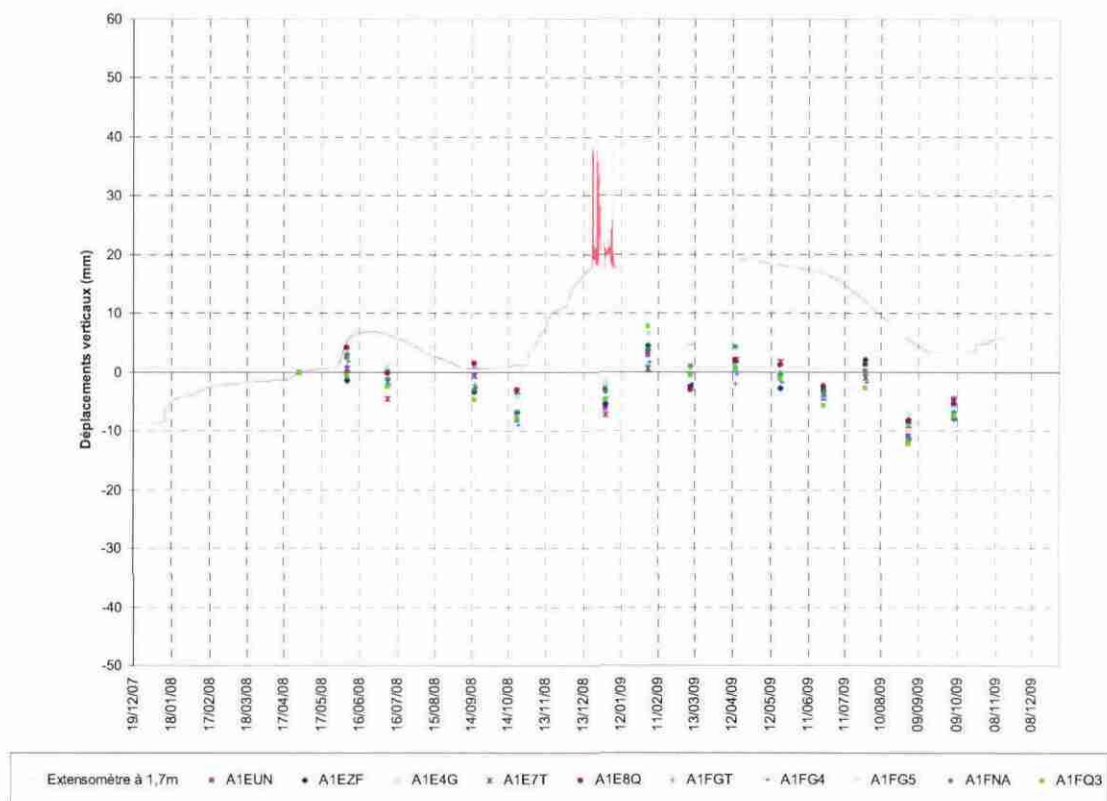


Illustration 50 - Comparaison entre les mesures expérimentales à 1,70 m de profondeur et 10 PS parmi les plus proches sur la même zone d'aléa (déplacements suivant la verticale, orbite ascendante, référence moyenne)

Il faut cependant noter que les amplitudes des mouvements observés par les 2 méthodes (suivi *in situ* et interférométrie) sont assez différentes, les mesures *in situ* faisant état de mouvements saisonniers de l'ordre de 5 à 6 cm, alors que les déplacements saisonniers observés par interférométrie sont de l'ordre de 1 à 2 cm.

Cette différence pourrait s'expliquer en particulier par le fait que tous les PS considérés correspondent a priori à des toits de bâtiments, alors que le déplacement observé *in situ* correspond à un sol nu, à une profondeur de 0,2 m. La présence du bâtiment, en effet, aura tendance à atténuer les mouvements du sol par plusieurs facteurs : isolation du massif de sol sous-jacent de l'évapotranspiration, charge exercée sur le sol, profondeur des fondations induisant des mouvements moindres...

A titre indicatif, le suivi de la villa Paget avait permis d'estimer, d'après le comportement des fissures, que l'ordre de grandeur des tassements différentiels pouvant expliquer le comportement des fissures pouvait être d'environ 1 à 2 cm.

Dans cette hypothèse, il a été choisi de comparer les mesures *in situ* à des mesures d'interférométrie semblant correspondre à un sol nu (du moins non chargé), tout en

restant sur la même formation en aléa fort. Une sélection de points a donc été réalisée sur la commune de Mormoiron (Illustration 51), et les déplacements correspondants sont présentés en Illustration 52.

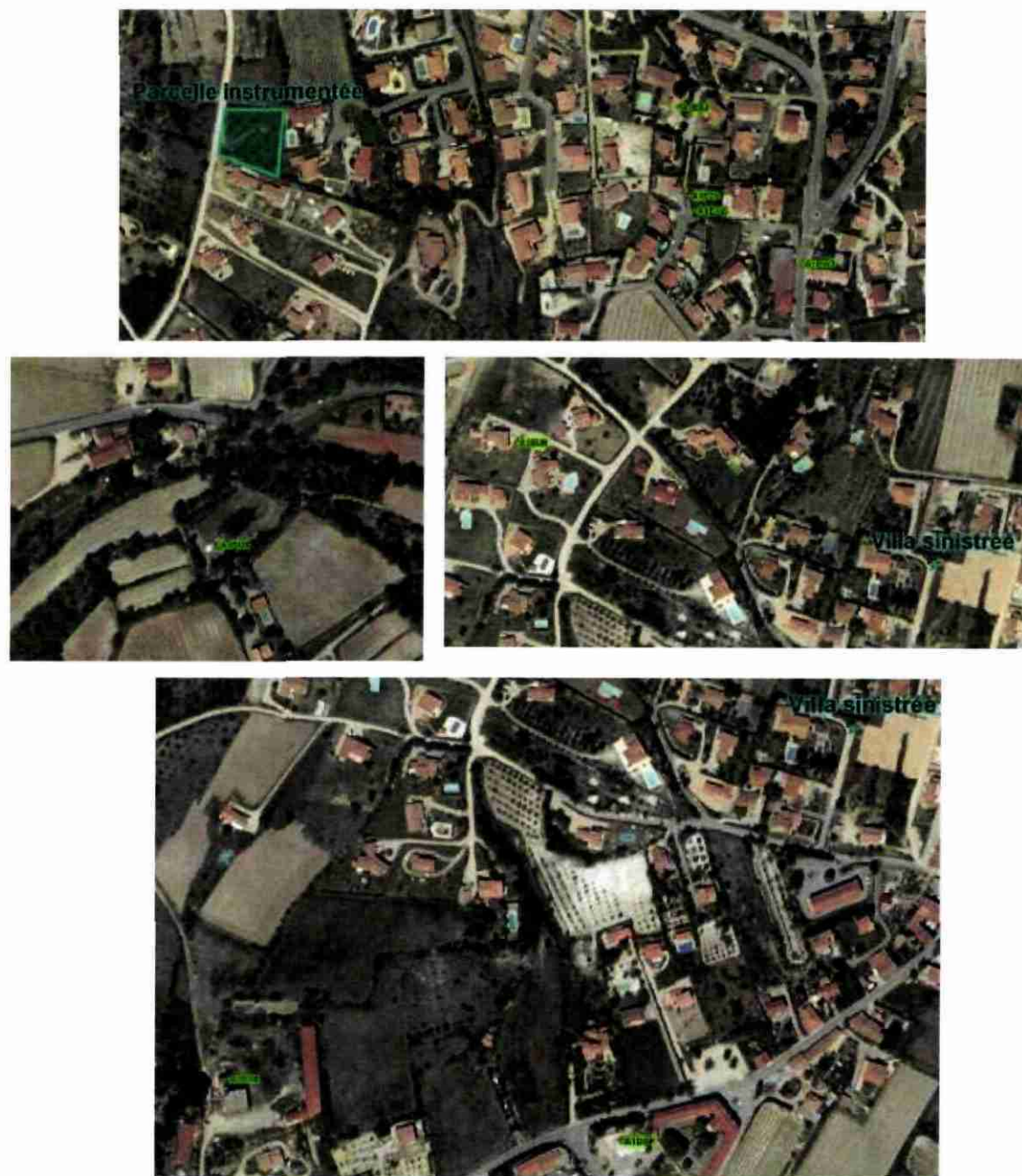


Illustration 51 – Localisation des PS supposés correspondre à un sol nu, en aléa fort sur la commune de Mormoiron

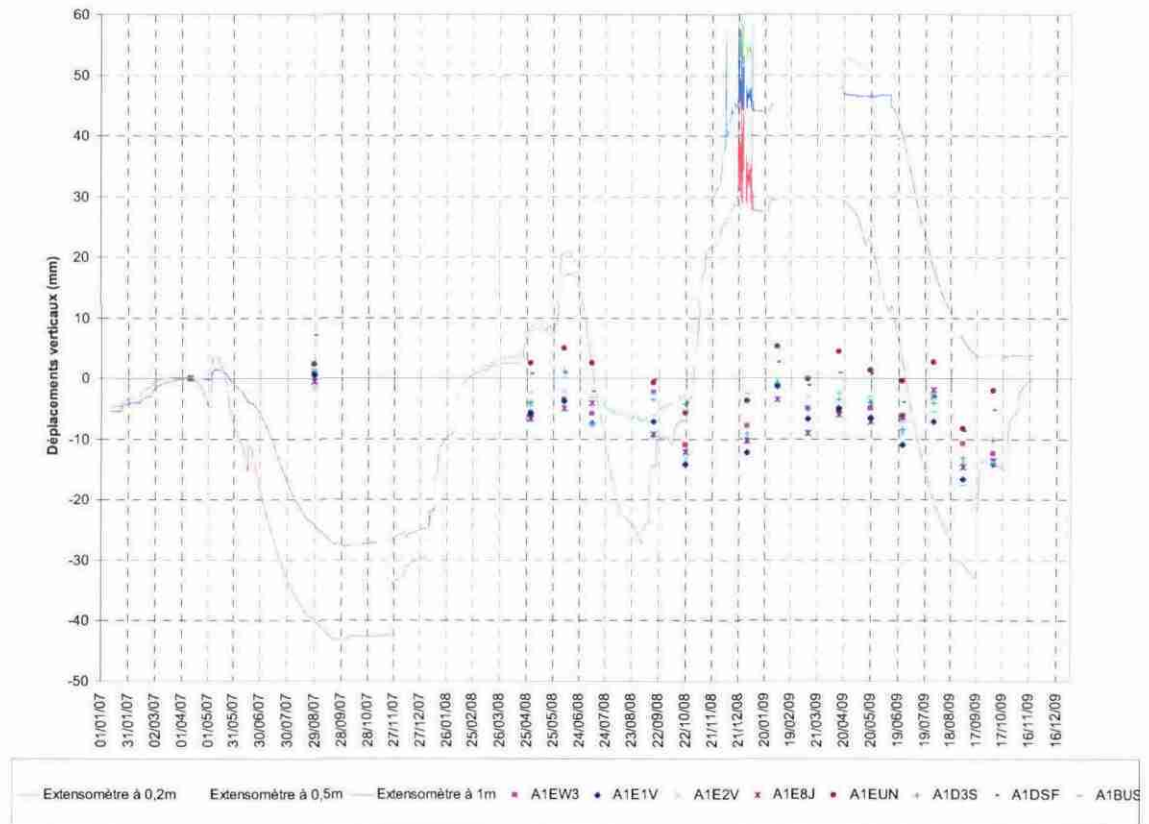


Illustration 52 – Comparaison entre les mesures expérimentales et quelques PS supposés correspondre à un terrain nu en même zone d'aléa (déplacements suivant la verticale, orbite ascendante, référence moyenne)

L'observation des PS supposés correspondre à un terrain nu n'apporte pas d'éléments complémentaires : l'amplitude des phénomènes est similaire à celle obtenue précédemment, à savoir de l'ordre de 1 à 2 cm.

Cette sous-estimation apparente des déplacements correspond par ailleurs aux observations effectuées lors du projet PSIC-4 (Raucoules *et al*, 2007), qui tendaient à montrer que les déplacements de grande amplitude (comme c'est le cas ici) étaient d'autant plus sous-estimés par la méthode que le nombre d'images analysées était faible (les 19 images analysées en orbite ascendante constituant un nombre particulièrement faible).

Afin de visualiser au mieux les périodes de tassement et de gonflement, il a été décidé de les quantifier à partir des données interférométriques pour des périodes données. Ces résultats sont présentés, pour tous les PS de Mormoiron exploités ci-dessus, à l'illustration 53.

CODE PS	tassement été 2008 (mm)	Gonflement hiver 2008-2009(mm)	tassement été 2009 (mm)
A1EUN	10,70	10,94	13,58
A1EZF	6,82	11,22	12,54
A1E4G	7,47	10,67	13,48
A1E7T	5,03	6,57	11,12
A1E8Q	7,30	6,67	11,89
A1FGT	8,13	10,80	14,80
A1FG4	10,78	10,67	13,09
A1FG5	9,66	11,10	13,67
A1FNA	11,01	12,40	15,93
A1FQ3	7,70	15,50	20,05
A1EW3	7,44	9,75	11,19
A1E1V	10,45	12,86	15,29
A1E2V	11,02	12,67	13,41
A1E8J	7,20	8,61	10,99
A1EUN	10,70	10,94	13,58
A1D3S	5,47	3,48	12,27
A1DSF	4,91	6,63	11,44
A1BUS	5,31	10,13	22,43
moyenne	8,17	10,09	13,93
<i>In situ</i> 0,2m	47,9	56,6	62,2

Illustration 53 – Amplitude des mouvements au cours des différentes saisons pour quelques PS sur la formation des Sables et argiles vertes à smectites de Mormoiron

Ces données montrent que même si les amplitudes des déplacements enregistrés par interférométrie sont très atténuées, on retrouve globalement la même hiérarchie saisonnière que sur les mesures *in situ*, avec un gonflement lors de l'hiver 2008-2009 ayant largement compensé le tassement enregistré lors de l'été 2008, et des tassements lors de l'été 2009 largement supérieurs.

Ces données interférométriques sont toutefois à considérer avec prudence, car elles résultent d'un échantillonnage des observations, et non d'un suivi en continu, et peuvent donc potentiellement ne pas être totalement représentatives des extrema des phénomènes.

7. Etude statistique sur la série ascendante

7.1. ANALYSE DE LA VITESSE DES DEPLACEMENTS

Suite au changement de référence effectué (§ 4.4), les vitesses ont été recalculées comme étant la pente de la droite de régression linéaire sur les mesures interférométriques (en tenant compte du temps). Ces vitesses ont été exprimées en mm/an.

L'illustration 54 présente la répartition spatiale des ces vitesses (extrapolées sous MapInfo© par l'intermédiaire d'une grille).

La comparaison entre la carte des vitesses et la carte d'aléa ne fait pas apparaître de corrélation particulière. Ceci s'explique en particulier par le fait que les vitesses ainsi calculées traduisent finalement la dérive du signal, et donc la composante linéaire du mouvement, et sont donc plutôt représentatifs de mouvements globaux (type affaissement / surrection), et non de phénomènes cycliques comme le retrait-gonflement.

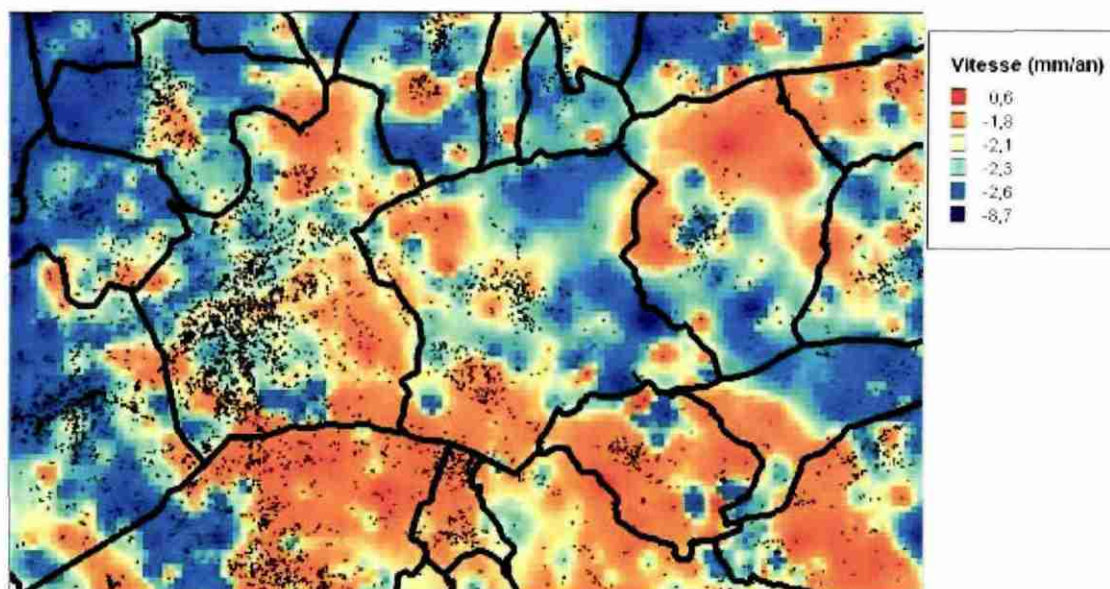


Illustration 54 – Répartition spatiale des valeurs de vitesse des points observés (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne) et aléa

7.2. ANALYSE DE L'ECART-TYPE DES DEPLACEMENTS

Afin de caractériser la variabilité des déplacements, la carte présentée en Illustration 55 montre la répartition spatiale de l'écart-type sur les déplacements enregistrés sur les PS. Cette carte illustre donc la dispersion du signal autour de sa valeur moyenne.

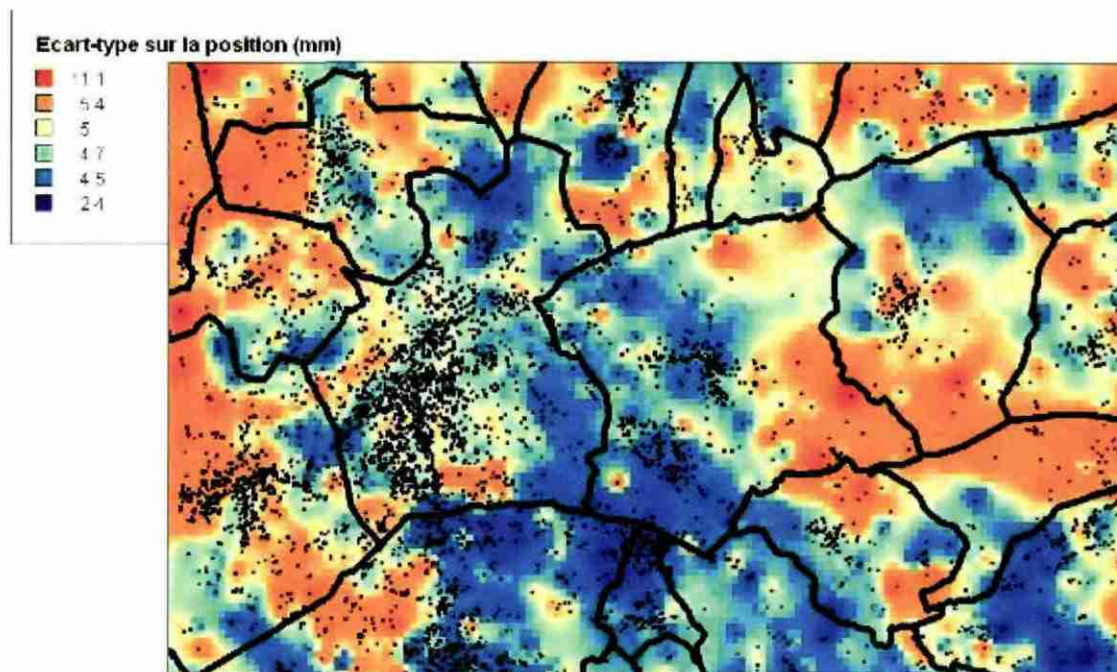


Illustration 55 - Répartition spatiale de l'écart-type à la position moyenne (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne)

La comparaison entre la carte d'aléa et cette carte de répartition de l'écart-type à la position moyenne semble mettre en évidence quelques corrélations, en particulier au niveau de l'aléa moyen à fort à l'Est de la zone, qui se traduit, en présence de PS, par des écart-types significatifs. Cependant, de nombreux secteurs (en particulier à l'Ouest de la zone) présentent des écart-types tout aussi significatifs, alors qu'ils n'ont été reconnus qu'en aléa faible. Ceci pourrait toutefois être lié à certaines incertitudes sur les niveaux d'aléa, d'autant que l'ouest de la zone correspond essentiellement à des formations alluviales, par nature hétérogènes.

Si l'on compare cependant la répartition de l'écart-type sur la position à la carte géologique harmonisée (Illustration 56, légende en annexe), il semble que l'on puisse retrouver certaines structures géologiques, bien que l'interprétation soit très délicate (faible densités de PS, présence de formations alluviales potentiellement hétérogènes...).

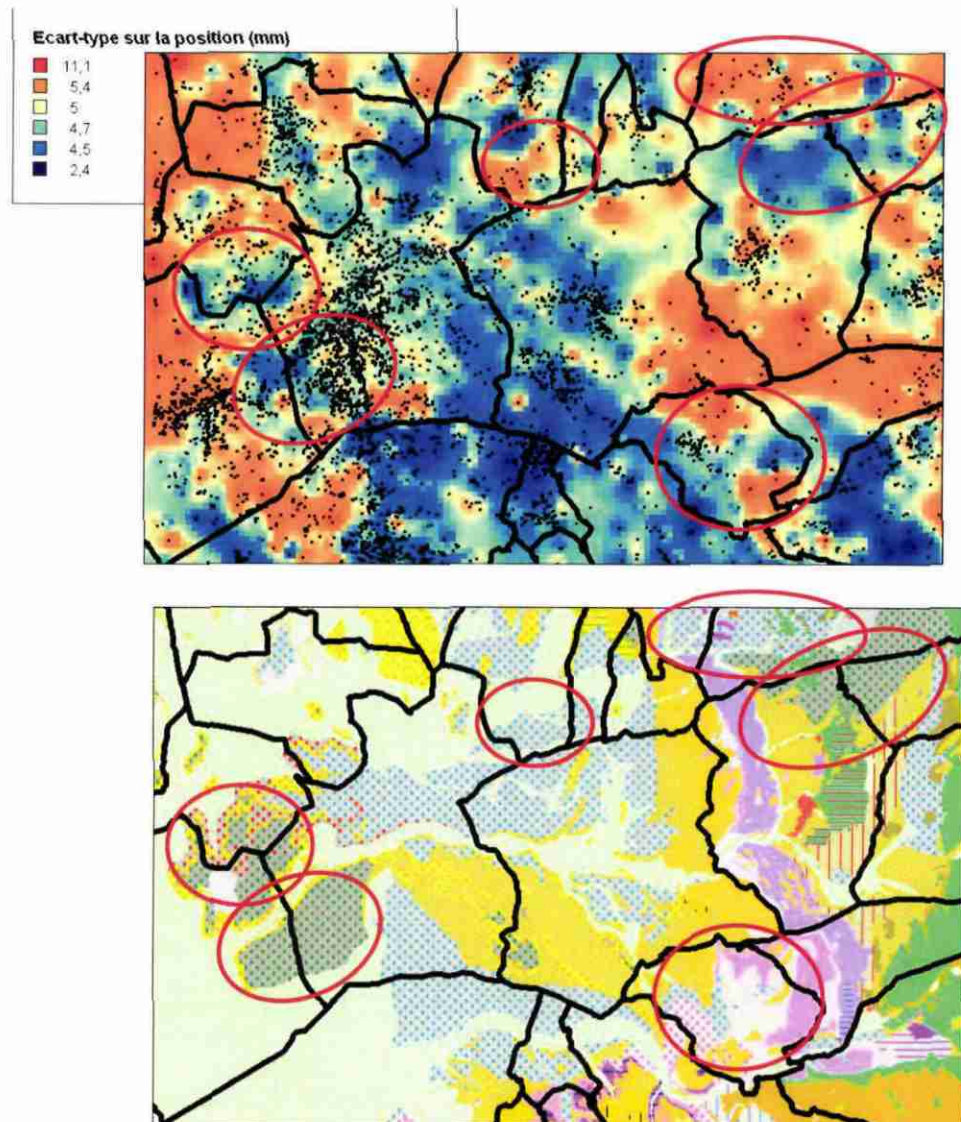


Illustration 56 – Similitudes entre l'écart-type sur les positions et la carte géologique harmonisée sur la zone d'étude

7.2.1. Analyse de l'écart-type sur les vitesses

L'écart-type sur la vitesse a été estimé sous Excel, à partir d'une régression linéaire par la méthode des moindres carrés. L'écart-type sur la vitesse a été retenu comme étant la valeur de l'erreur type sur la pente de régression sur la position de chacun des PS. Outre l'information sur la qualité de la mesure, du fait qu'il indique la dispersion autour de la vitesse moyenne, l'écart-type pourrait fournir une information sur la présence de mouvement non linéaire (p.e. cyclique). On peut noter que les valeurs obtenues diffèrent légèrement de celles obtenues par la méthode de TRE, mais que ces paramètres sont bien corrélés et traduisent la dispersion sur la vitesse du PS.

Ces écart-types ont été ainsi recalculés par rapport à la référence moyenne, et la distribution géographique des résultats est présentée à l'illustration 57.

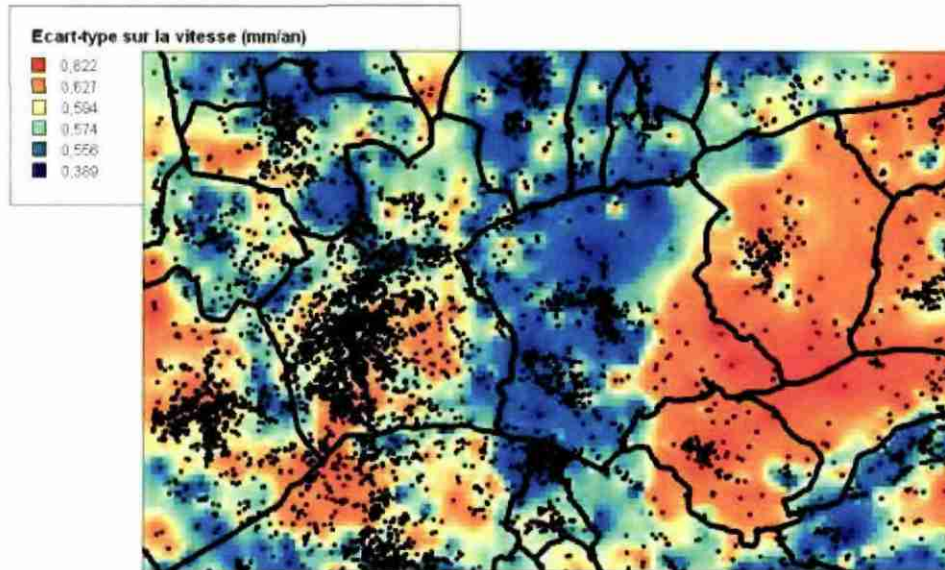


Illustration 57 - Répartition spatiale de l'écart-type sur la vitesse (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne)

Ce résultat montre de nouveau une corrélation avec la carte d'aléa (dans le sens où il semble y avoir plus de mouvements non linéaires détectés dans la moitié ouest de la zone, où sont rencontrés les aléas moyen à fort). Toutefois, on retrouve également des phénomènes significatifs dans la moitié est de la zone, classée de manière uniforme en aléa faible.

Afin de développer ces comparaisons, l'illustration 58 souligne un certain nombre de similitudes entre la carte de répartition des écart-types (dont le contraste a été accentué pour plus de lisibilité) et la carte géologique harmonisée.

L'interprétation reste cependant délicate, pour les mêmes raisons que précédemment (faible densité de PS, variabilité des formations alluviales...), mais afin d'illustrer les potentialités de la méthode, un zoom a été effectué sur la commune de Carpentras (où la densité de points est la plus importante dans la zone d'étude), en identifiant les zones les plus mobiles et les moins mobiles. Le résultat est présenté à l'illustration 59.

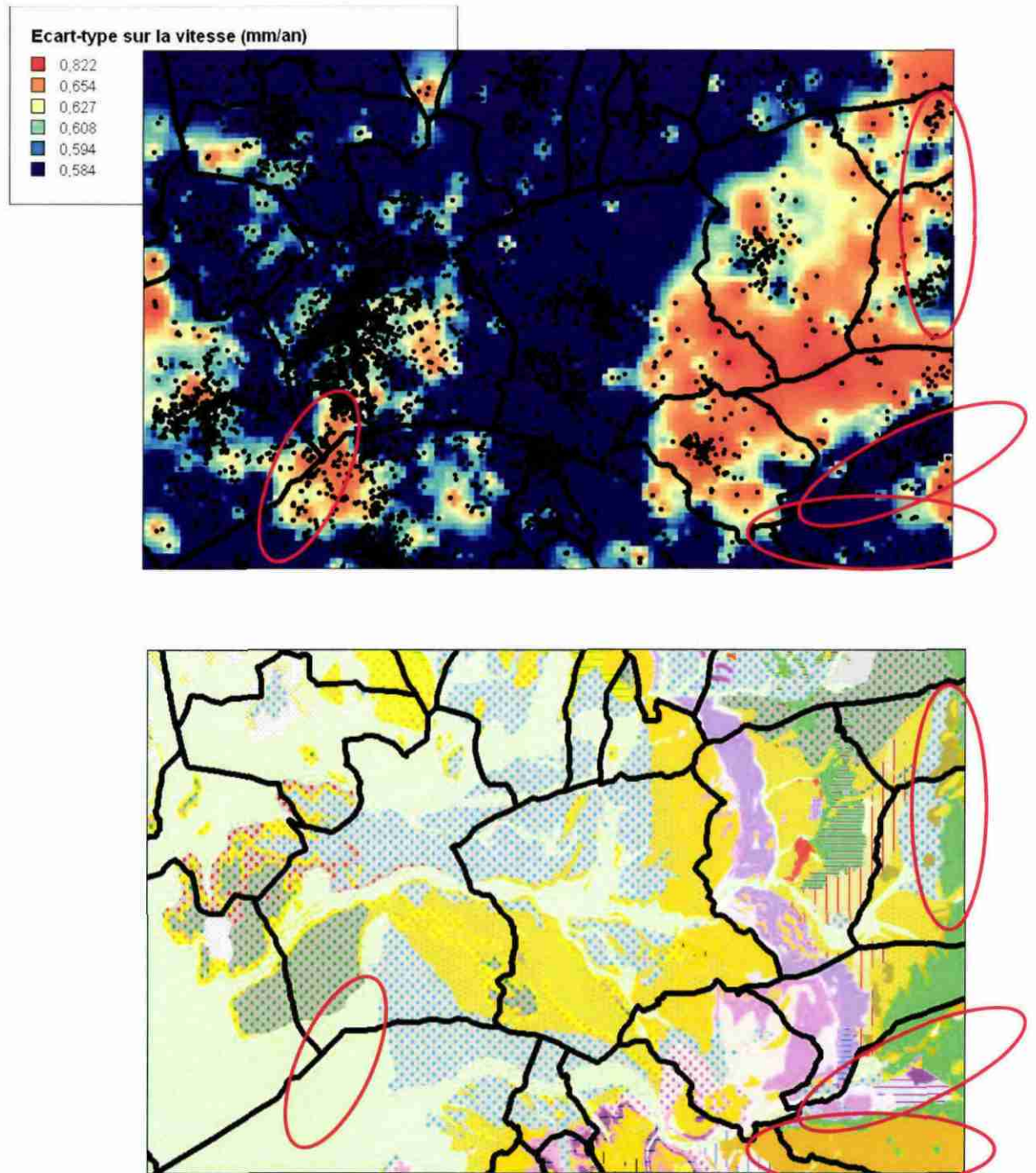


Illustration 58 – Similitudes entre l'écart-type sur les vitesses et la carte géologique harmonisée sur la zone d'étude

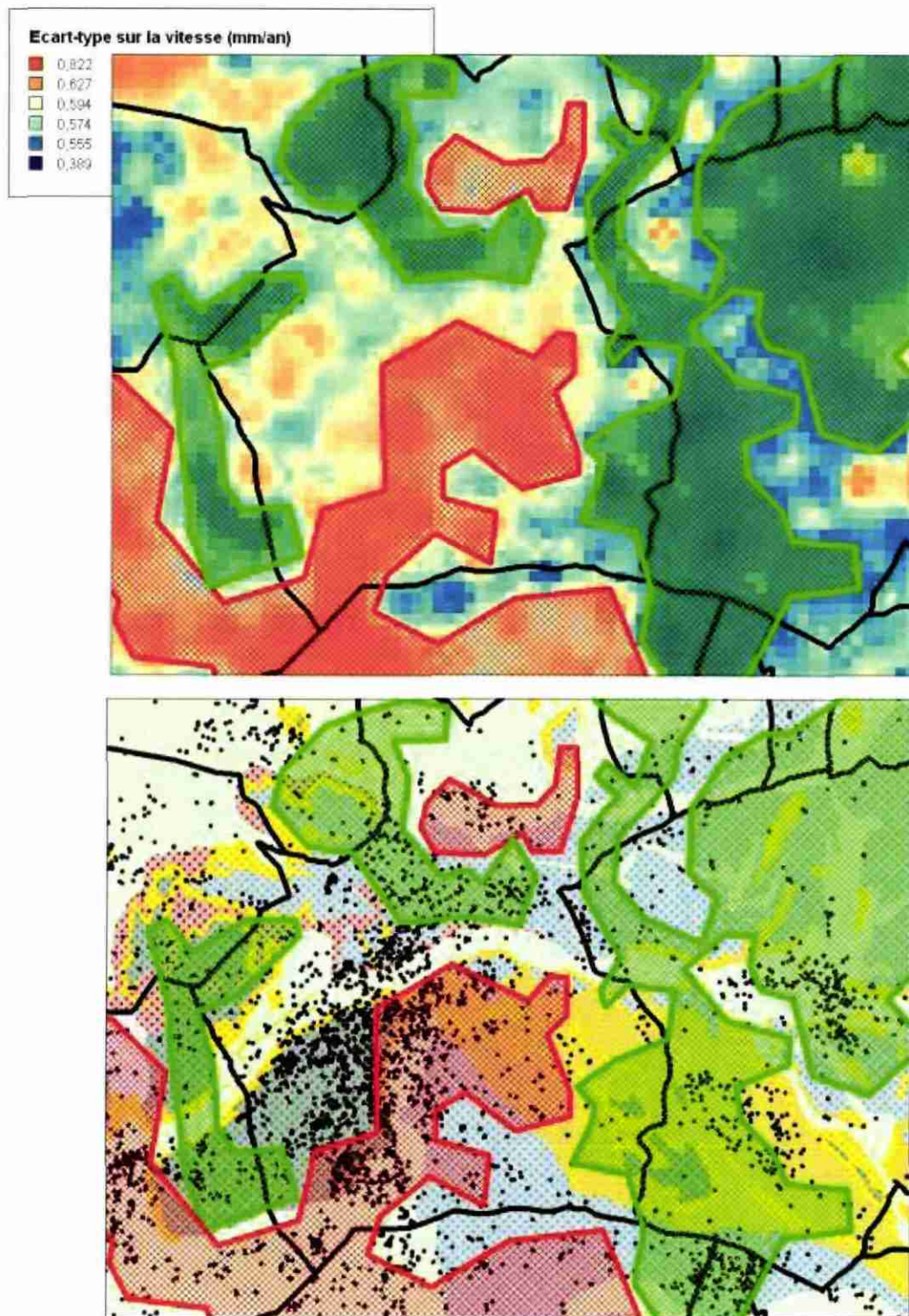


Illustration 59 – Identification des zones « mobiles » (hachures rouges) et « stables » ou essentiellement non linéaires (hachures vertes) à partir de l'écart-type sur la vitesse sur la commune de Carpentras et comparaison à la carte géologique

La comparaison de la carte des écart-types sur la vitesse et de la carte géologique sur la commune de Carpentras montre un certain nombre de corrélations. Les alluvions récentes Fz, par exemple (bleu clair), semblent globalement caractérisées par des écart-types significatifs sur l'ensemble de la commune, alors que les alluvions du Mindel Fw (figuré point bleu sur fond gris-foncé au sud-ouest de la commune) correspondent à des écart-types inférieurs. Les alluvions du Riss Fy (figuré point bleu sur fond gris-clair au sud-est et au nord de la commune), semblent quant à elles correspondre essentiellement à des écart-types faibles, mais il faut noter que la densité de PS sur cette formation est très hétérogène.

Cette analyse permet d'illustrer les potentialités de la méthode, mais nécessite toutefois d'être confirmée par des résultats interférométriques plus explicites (nécessité de zones urbanisées pour de bonnes densités de PS, nombre d'image radar plus conséquent...).

7.2.2. Analyse de l'amplitude des déplacements

Afin de visualiser l'amplitude des phénomènes détectés par interférométrie, un calcul a été réalisé pour chaque PS afin de déterminer l'amplitude maximale des phénomènes tout en s'affranchissant de la composante linéaire du mouvement :

$$Amplitude = (D_{\max} - D_{\min}) - |V| \times (t_{\max} - t_{\min})$$

où $D_{\max}$ et $D_{\min}$ désignent respectivement les positions maximales et minimales du PS par la méthode interférométrique, V la vitesse du PS déterminée comme présenté au § 7.1 et $t_{\max}$ et $t_{\min}$ respectivement la dernière date et la première date des données.

Cette méthode de calcul présente toutefois l'inconvénient de caractériser un point à partir de seulement deux positions, qui peuvent donc être bruitées et non représentatives des mouvements du PS.

Les résultats ont été interpolés sous MapInfo (Illustration 60).

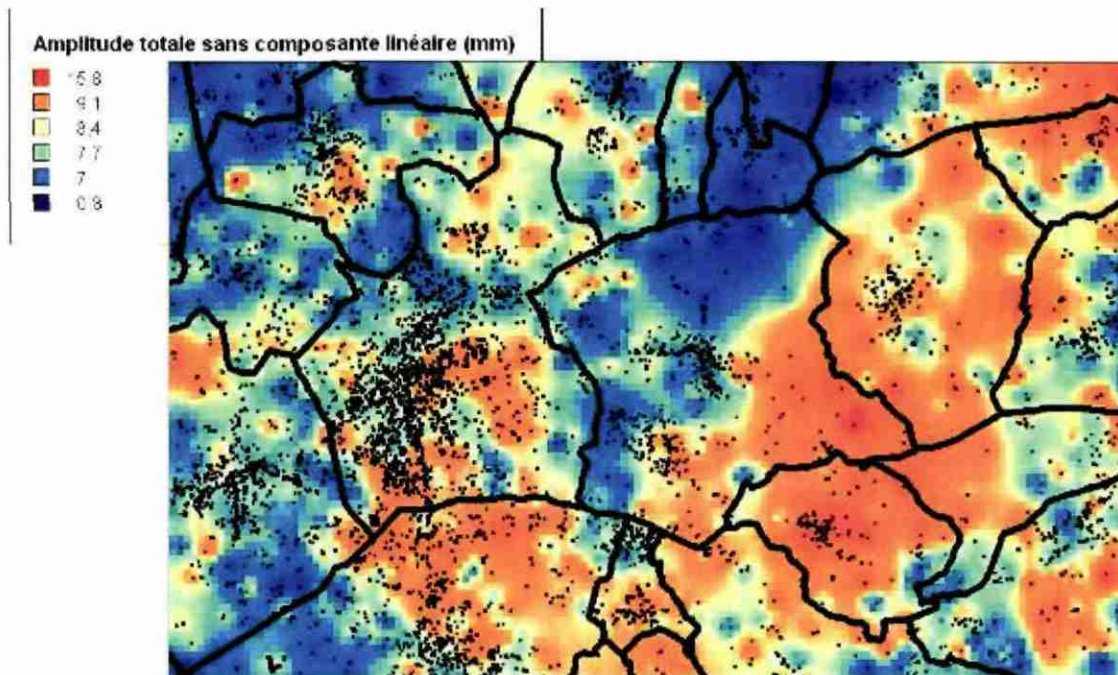


Illustration 60 - Répartition spatiale de l'amplitude totale des mouvements en ôtant la composante linéaire (déplacements suivant la ligne de visée du satellite, référence moyenne)

Ce résultat se révèle très proche de celui obtenu avec l'écart-type sur la vitesse (Illustration 57), ce qui s'explique logiquement par le fait que ces deux paramètres caractérisent la mobilité des PS. La comparaison de cette carte avec la carte d'aléa ou la carte géologique aboutit donc aux mêmes observations.

8. Conclusion

Cette étude de démonstration s'inscrit dans le cadre d'un projet financé par le MEEDDM et le BRGM, en collaboration avec l'entreprise Tele Rilevamento Europa (TRE). Elle avait pour objectif de tester, à l'échelle d'une commune, la faisabilité d'utiliser la technique des réflecteurs persistants par interférométrie radar pour suivre les déformations de surface induites par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et son éventuelle utilisation en tant qu'indicateur en termes d'aléa.

Cette technique, si elle se révélait pertinente et sous réserve d'en évaluer plus précisément le coût et les contraintes de mise en œuvre, présenterait en effet de multiples avantages liés à son approche globalisante. Elle pourrait permettre de préciser ou compléter, dans des secteurs très urbanisés et à forts enjeux, les cartes d'aléa retrait-gonflement établies par le BRGM sur la base de la connaissance géologique actuelle et d'un ensemble de données ponctuelles. Elle pourrait notamment aider à identifier les périodes et les secteurs soumis à des mouvements de tassement et de gonflement d'amplitude exceptionnelle,

Le site test de Mormoiron a été choisi afin de tirer parti d'une instrumentation *in situ* (extensomètres, Humitub) existante, à des fins de validation et d'interprétation. L'étude est complémentaire de l'étude en cours sur le département du Val de Marne visant à comparer le déplacement causé par le phénomène de retrait-gonflement mesuré par PSI à des mesures de nivellement.

Toutefois, le contexte - en ce qui concerne la mesure PSI - de l'étude s'est avéré différent et plus délicat que celui de l'étude sur le site test de Nogent-sur-Marne (Plat *et al.*, 2009).

Nous avons, en effet, été confrontés aux limitations suivantes :

- le nombre d'images radar disponibles sur cette zone (19 images en mode ascendant sur la période 2005-2009) était sensiblement inférieur au nombre généralement recommandé (supérieur à 40 images) ;
- la zone d'étude est située en contexte rural, d'où une densité de PS relativement faible.

Ceci a eu pour conséquences:

- du point de vue traitement interférométrique PS : une compensation incomplète des différents artefacts (atmosphériques et erreurs de déroulement) réduisant la qualité des mesures produites.
- du point de vue interprétation : une difficulté à extraire le comportement temporel du mouvement (due au faible nombre d'acquisitions) et une

difficulté à associer la mesure obtenue aux observations au sol. En effet, une faible densité de PS est obtenue alors que le phénomène de retrait gonflement se traduit par une forte variabilité spatiale de la déformation. Par conséquent, les PS peuvent ne pas être représentatifs (en termes de déformations de la surface) de points au sol situés à seulement quelques mètres d'eux.

Néanmoins, des observations intéressantes ont pu être faites. Ainsi, sur la série en mode ascendant (celle comprenant le plus d'images radar), un bon phasage des mesures avec le phénomène de retrait gonflement a pu être observé, dans le sens où les périodes estivales semblent correspondre à des phénomènes de tassement, alors que les périodes hivernales peuvent traduire des phénomènes de gonflement, conformément à ce qui est observé *in-situ*.

De plus, on retrouve la même hiérarchie interannuelle en termes d'amplitude saisonnière entre les mesures *in-situ* et les mesures interférométriques (à savoir, à proximité du site expérimental, un tassement à l'été 2009 supérieur au gonflement de l'hiver 2008-2009, lui-même supérieur au tassement de l'été 2008).

Par ailleurs, les cartes de paramètres dérivés de la mesure PSInSAR (écart-type, vitesse...) sont potentiellement prometteuses dans le sens où elles semblent laisser apparaître un certain nombre d'indices d'une corrélation avec la carte géologique. Ces indices de corrélation restent toutefois légers, compte-tenu du fait que la corrélation avec la carte d'aléa ne soit pas flagrante et du fait de la faible densité des PS et de la disparité de leurs natures (bâtiments lourds, maisons individuelles, sol nu) sur la zone considérée.

Il est à noter, du fait de mouvements ne présentant pas de corrélation spatiale à l'échelle de la dizaine de mètres et n'étant pas réguliers dans le temps, que le choix d'un point de référence stable peut s'avérer déterminant. Il a fait l'objet d'une attention particulière (modification de la référence initiale après analyse des premiers résultats et identification sur terrain) au cours de cette étude dans la mesure où un éventuel mouvement de la référence peut fortement modifier l'interprétation que l'on pourrait faire de ces mesures. Dans le cas de mouvements plus réguliers temporellement et spatialement (glissements, subsidence, etc ... où la technique PSI a fait ses preuves) ce problème serait moins sensible. Cette remarque peut donc être importante dans le cadre de l'étude du retrait-gonflement puisqu'elle concerne tout particulièrement des caractéristiques des mouvements qui lui sont associées.

Ces aspects seront approfondis dans la suite de l'étude en cours sur le Val de Marne qui, se situant en zone plus fortement urbanisée et bénéficiant d'une bonne couverture en termes d'images Envisat/ASAR, est moins affectée par les difficultés présentées ci-dessus.

9. Bibliographie

Agudo M., Crosetto M. (2006) - Cross Check of the Validation and Intercomparison Results, BRGM/RP-55637-FR.

Colesanti C., Le Mouelic S., Bennani M., Raucoules D., Carnec C., Ferretti A., (2005) -Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique - A case study in the East of France. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 1, p 201-207.

Donsimoni M., Clozier L., Vincent M., avec la collaboration de **Motteau M., Gallas J.-C.** (2001) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de Seine-Saint-Denis. Rapport BRGM/RP-51198-FR, 125 p., 7 fig., 13 tabl., 2 ann., 5 planches h.-t.

Ferretti A., Prati C., Rocca F., Brevet Italie n°01312826 (25/05/1999)

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*, Vol. 38, N. 5; pp. 2202 – 2212.

Ferretti A., Prati C., Rocca F., (2001) – Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Volume: 39 Issue: 1 pp. 8-20.

Gabriel A., Goldstein R., Zebker H. (1989). – Mapping small elevation changes over large areas - differential radar interferometry. *Journal of geophysical research-solid earth and planets*, volume: 94, issue: b7, pp. 9183-9191.

Hemmati S. (2009) - Etude de l'Interaction Sol-Végétation-Atmosphère avec une approche couplée Thermo-Hydro-Mécanique – *Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.

Kaveh H. F., Fruneau B., Deffontaines B., Duro J., Arnaud A. (2008) – Apports de l'interférométrie radar (DINSAR et PSI) à l'étude du retrait-gonflement d'argile dans l'est du bassin de Paris. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 97-102

Le Roy S., Plat E., Vincent M. (2009) – Projet ARGIC (module B, tâches 11 et 14) – Suivi expérimental in-situ de l'évolution dans le temps des teneurs en eau et des déplacements verticaux dans les sols argileux sur deux sites. Rapport BRGM/RP-56990-FR, 72 p., 67 ill.

Marçot N., Gonzales G., Fournel S., Simplet L. (2004) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de Vaucluse. Rapport BRGM/RP-53187-FR, 221 p., 49 illustrations, 7 annexes et 4 planches hors-texte.

Marçot N. (2007) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles et établissement de propositions de PPR dans le département de Vaucluse – Rapport complémentaire de mise à jour. Rapport BRGM/RP-55468-FR, 62 p., 25 ill., 2 ann. et 3 pl. h.-t.

Meisina C., Zucca F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J. (2006) – Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology* 88. pp.240–25.

Plat E., Le Roy S., Vincent M. avec la collaboration de **Sulcas E., Lecat L., Hemmati S., Surdyk N., Dubus I.** (2008) – Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 3. Rapport BRGM/RP-56886-FR, 111 p., 98 ill.

Plat E., Carnec C., Raucoules D. avec la collaboration de **Vincent M., Iannicella I., Novalli F., Fumagalli A.** (2009) – Projet de démonstration : suivi des déformations induites par le phénomène de retrait gonflement des argiles à partir d'interférométrie radar PSI – Site de Nogent-sur-Marne. Rapport final. Rapport BRGM/RP-56832-FR, 64 p., 45 ill.

Raucoules D., Maisons C., Carnec C., Le Mouélic S., King C., Hosford S., (2003) - Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry - The case of Vauvert (France). *Remote Sensing of Environment*, vol 88, n°4, p 468-478.

Raucoules D., Bourguin B., de Michele M., Le Cozanet G., Closset L., Bremmer C., Veldkamp, H., Tragheim D., Bateson L., Crosetto M., Agudo M., (2007) - Persistent Scatterers Interferometry; Independent Validation and Intercomparison of Results – Final Report, Rapport BRGM/RP-55649-FR (<http://earth.esa.int/psic4/Documents.html>)

Simonetto E., Raucoules D., Carnec C., Thierry P., King C. (2005). – Urban subsidence seen by DiffInSAR: temporal deformation series derived from a least-squared technique, *EARSeI Symposium and Workshops - 25th - Porto - Portugal - 6-11/06/2005*.

TRE (2009) - Historic analysis of ground movement of Mormoiron area in Vaucluse, France using PSInSAR™. *Tele-Rilevamento Europa, Doc. Ref. 09.OP0037-REP1.0*.

Vincent M., Plat E., Le Roy S. (2008) – Cartographie de l'aléa Retrait-Gonflement et Plans de Prévention des Risques. *Revue Française de Géotechnique*, n°120-121, pp 188.

Wegmuller U., Werner C., Strozzi T., Wiesmann A. (2004) - Monitoring mining induced surface deformation, *IGARSS' 04*, vol 3, pp 1933-1935, *Anchorage*, 20-24 sept 2004

Annexe 1

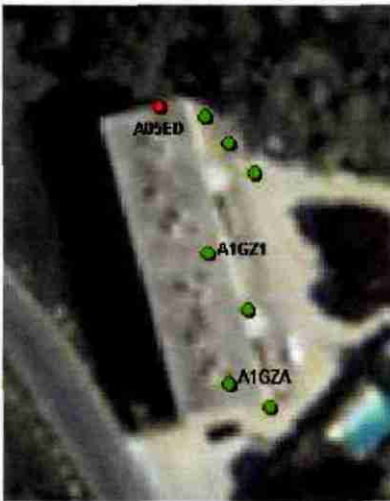
Présentation des bâtiments de grande hauteur utilisés pour définir la référence

PS Série descendante	PS Série ascendante	Commune	Niveau d'aléa	Orthophoto	Validation
A06CK	A1ERA	Carpentras	faible		
A056Q et A056Z	A1FDP et A1FCO	Carpentras	faible		

PS Série descendante	PS Série ascendante	Commune	Niveau d'aléa	Orthophoto	Validation
A04L1	-	Carpentras	faible		-
A05J5	A1F5X A1F5M A1F57	Carpentras	faible		-

PS Série descendante	PS Série ascendante	Commune	Niveau d'aléa	Orthophoto	Validation
A04XH A04XS A04XO A04YG A04YK	A1GKO A1GLJ A1GIB	Carpentras	faible		
A06K8	-	Carpentras	faible		-

PS Série descendante	PS Série ascendante	Commune	Niveau d'aléa	Orthophoto	Validation
A06B6		Carpentras	faible		
A06NN A06NH A06NX A06N0 A06N7 A06OD A06OG A06OJ A06OQ	A1CUI A1CU1 A1CTZ A1CQ7	Carpentras	faible		

PS Série descendante	PS Série ascendante	Commune	Niveau d'aléa	Orthophoto	Validation
A05ED	A1GZ1 et A1GZA	Carpentras	faible		
A05G0 et A05G9	-	Carpentras	faible		

PS Série descendante	PS Série ascendante	Commune	Niveau d'aléa	Orthophoto	Validation
A0540 et A0547	A1FF1	Carpentras	faible		
A06IW	-	Carpentras	faible		

PS Série descendante	PS Série ascendante	Commune	Niveau d'aléa	Orthophoto	Validation
A06KI A06KT A06KY	A1C8H A1C73 A1C7B	Carpentras	faible		

Annexe 2

Légende de la carte géologique harmonisée départementale (extraite sur la zone d'étude)

Formations géologiques harmonisées	
Q7a	Alluvions récentes : cailloux, graviers, sables et limons (Quaternaire)
Q6	Colluvions d'âge indéterminé : limons ; cailloux (Quaternaire)
Q6b	Cône de déjection récent (Quaternaire)
Q6c	Éboulis récents (Quaternaire)
Q6Q	Cailloux récents (Quaternaire)
Q6a	Worm : graviers de la basse terrasse de cailloux, graviers, sables
Q6b	Worm : épanchés locaux, colluvions (cailloux, limon)
Q6c	Worm : colluvions
Q6d	Worm : alluvions de la moyenne terrasse
Q6e	Mandel : haute terrasse
Q6a_4_1g	Mocenne moyen : sables et grès molasseux ("sables molasseux")
Q6a_4_1gC	Mocenne moyen : grès rose du Comtal
Q6a_10	Ménétien supérieur : marnes sablonneuses, grès, sables fins jaunes, rouges ou gris bleus
Q6a_10b	Burdigalien : marnes bleues
Q6a_10c	Burdigalien : calcaires grossiers bioclastiques à Calappa
Q6a_10d	Burdigalien : molasse calcaire
Q6a_10e	Burdigalien : calcaires argileux consolidés
Q6a_10f	Burdigalien : marnes et calcaires argileux gris beige
Q6a_10g	Burdigalien : molasse inférieure de Saumane, en blocs
Q6a_11a	Burdigalien : marnes sablonneuses et molasses calcaires et sables calcaires
Q6a_12	Châtellain : calcaires massifs à Mésolampont
Q6a_13	Stampien : marnes et calcaires de Vénasque
Q6a_14a	Stampien : calcaires de l'Isle-sur-Sorgues et de Villaver, niveau typique
Q6a_14b	Stampien : sables et grès verts de la Vallée de Pernes
Q6a_15a	Stampien : calcaires à Bréha laurie
Q6a_15b	Stampien : calcaires et argiles de la Tour-de-Pinot
Q6a_15c	Stampien : calcaires massifs du Vieux de la Trinité
Q6a_16a	Stampien : calcaires bréchiques des Fâges
Q6a_16b	Stampien : conglomérats à galets urgoniens
Q6a_17a	Ludien (Eocène supérieur) : marnes et dolomites blanches à dépouille de Stauvex
Q6a_17b	Ludien (Eocène supérieur) : grès
Q6a_17c	Ludien (Eocène supérieur) : calcaires blancs de Saint-Jacques
Q6a_17d	Ludien (Eocène supérieur) : calcaires à algues et lignites des Gardies
Q6a_17e	Ludien (Eocène supérieur) : calcaires à Plantes de Douvres
Q6a_17f	Ludien (Eocène supérieur) : calcaires massifs du Vieux
Q6a_17g	Ludien (Eocène supérieur) : argiles et calcaires de Orançon
Q6a_17h	Ludien (Eocène supérieur) : argiles et calcaires de Mathamus
Q6a_17i	Ludien (Eocène supérieur) : marnes jaunes et calcaires à Lammes de Mathamus
Q6a_17j	Ludien (Eocène supérieur) : sables et argiles verts à sables de Mormoiron
Q6a_17k	Ludien (Eocène supérieur) : conglomérats de Collet-le-Duc
Q6a_18	Barrois : marnes sablonneuses marmorisées et encroûtements porphyrisés de la Font du Loup
Q6a_19a	Barrois : quartzites de Lure
Q6a_19b	Barrois : argiles vertes à dépouilles de Mormoiron
Q6a_19c	Barrois : sables rouges à granitose méridionale
Q6a_19d	Barrois : argiles de la Rouquette
Q6a_19e	Eocène indifférencié : sables ferrugineux à débris de coquilles latéales
Q6a_19f	Cénomane : grès et sables calcaires, passées argileuses, marnes
Q6a_19g	Cénomane inférieur : grès et sables, calcaires grossiers, marnes sablonneuses
Q6a_19h	Cénomane inférieur : sables, faibles d'altération
Q6a_19i	Cénomane inférieur : grès et sables consolidés à l'aval de Pied-Boussaut
Q6a_19j	Albien : sables creux
Q6a_19k	Albien : marnes bleu-rose
Q6a_19l	Bédoulien terminal : calcaires massifs
Q6a_19m	Bédoulien : calcaires à Rudistes, Ugonien sensu stricto, récifs
Q6a_19n	Bédoulien : calcaires bioclastiques supérieurs
Q6a_19o	Bédoulien : calcaires bioclastiques inférieurs, récifs
Q6a_19p	Bédoulien : calcaires argileux
Q6a_19q	Bédoulien : calcaires fins (facès urgonien), récifs, calcaires bioclastiques, sables
Q6a_19r	Paléozoïque : Niveau hydrographique



Centre scientifique et technique
Service Risques Naturels et Sécurité du stockage du CO₂
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34