



Apport de l'interférométrie radar (DinSAR et PSI) pour l'étude des effets de la sécheresse géotechniques : applications à l'Est de la région Île-de-France

Heydar Kaveh

► To cite this version:

Heydar Kaveh. Apport de l'interférométrie radar (DinSAR et PSI) pour l'étude des effets de la sécheresse géotechniques : applications à l'Est de la région Île-de-France. Autre [cs.OH]. Université Paris-Est, 2010. Français. NNT : 2010PEST1029 . tel-00601244

HAL Id: tel-00601244

<https://theses.hal.science/tel-00601244>

Submitted on 17 Jun 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École doctorale "Mathématiques et sciences et techniques de l'information et de la communication"

THÈSE

Pour obtenir le grade de :

Docteur de l'Université de Marne-La-Vallée – Paris Est
Spécialité: Sciences de l'Information Géographique

Présentée et soutenue publiquement par :

Heydar Frédéric KAVEH

Le 14 /12 / 2010

à l'Institut Francilien des Sciences Appliquées,
Noisy-le-Grand.

**Apport de l'interférométrie radar (DinSAR et
PSI) pour l'étude des effets de la sécheresse
géotechnique.**

Applications à l'Est de la région Île-de-France.

Devant le jury composé de :

Rapporteurs :	Alain Tabbagh	<i>Professeur à l'Université Paris 6</i>
	Jean Chorowiz	<i>Professeur émérite à l'Université Paris 6</i>
Examineurs :	Roger Cojean	<i>Professeur Mines Paris Tech, Centre Géosciences</i>
Membres invités :	Bénédicte Fruneau	<i>Maître de conférences à l'Université Paris Est.</i>
	Alain Arnaud	<i>Docteur, Directeur général ALTAMIRA</i>
	Marc Vincent	<i>Docteur Ingénieur</i>
Directeur thèse	Benoît Deffontaines	<i>Professeur à l'Université Paris Est</i>

Résumé

RÉSUMÉ – La sécheresse géotechnique est à l’origine de nombreux désordres urbains dans la région d’Île-de-France. La présence d’argiles continentales Eocène-Oligocène aux propriétés gonflantes parmi les dépôts actuels les plus récents de la série géologique du Bassin Parisien entraîne, sous l’influence des contrastes climatiques liés à des événements climatiques « extrêmes » (alternances sécheresse et période humide) des variations importantes du volume des sols. Les variations sont susceptibles d’induire des déplacements de la surface du sol qui affecte le bâti. Deux méthodes d’interférométrie radar y sont appliquées afin de suivre ces déplacements relatifs au cours du temps : si la méthode différentielle (DINSAR), qui permet de mesurer les déplacements relatifs de la surface du sol à partir de deux images radar acquises à des dates différentes se révèle peu performante sur l’Est du Bassin de Paris devant la faible cohérence de l’habitat pavillonnaire individuel, la seconde méthode, la technique de suivi des réflecteurs permanents, appelé Persistant Scatterer Interferometry (PSI) permet de décrire précisément dans le temps les déplacements absolus de points à forte rétrodiffusion radar permettant donc la localisation, la caractérisation et la quantification des faibles déplacements de la surface du sol à partir d’un grand nombre d’images radar à ouverture de synthèse (RSO). Des déformations liées au RGA observées sur les profils de pavillons sinistrés ont été mises en évidence et corrélées avec les périodes de sécheresse. Cette méthode présente un fort potentiel pour l’étude du risque naturel sécheresse géotechnique tout particulièrement sur l’Est du Bassin de Paris affecté lors des dernières périodes de sécheresses dans un contexte de changement climatique mondiale.

Mots clés : *Sécheresse géotechnique, Retrait, Gonflement, Argile, Interférométrie, DINSAR, PSI, Est bassin de Paris, France.*

ABSTRACT – Swelling soils may induce, under various climatic conditions such as drought or humid periods, surface displacements that affect small houses and buildings. The aim of this PhD work is to monitor through new interferometric methods those small displacements. Radar differential interferometry (DINSAR) method which enables one to map surface displacements from two radar images acquired on a specific area gives poor results in the east of the Paris Basin highly affected by the dryness hazards. It contrasts with Persistent Scatterer Interferometry (PSI) revealing precisely the seasonal behaviour of the displacements above swelling soils from a huge amount of radar images. Dryness events are correlated with swellings soils effects on damaged buildings thanks to the PSI profiles interpretation. This new application presents high potential to better understand the geologic processes and the natural hazard induced by swelling soils.

Keywords: *Geotechnic drought, shrinkage, swelling, clay, Interferometry, DINSAR, PSI, East Paris basin, France.*

Table des matières

RESUME	3
LISTE DES TABLEAUX &.....	12
PLANCHES.....	12
CHI LA SECHERESSE GEOTECHNIQUE	19
I.1 LE RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES	21
1.1 <i>Le phénomène RGA</i>	21
1.1.1. Définitions et origines des argiles.....	21
1.1.2. La minéralogie des argiles (structure des minéraux)	23
1.1.3. De la microstructure à la macrostructure des sols argileux.....	27
1.1.4. Interaction eau-argiles	31
1.2 <i>Caractérisation du retrait gonflement</i>	33
1.2.1. Essais géotechniques	33
1.2.2. Essais mécaniques en laboratoire.....	35
1.3 <i>La gestion du risque sécheresse géotechnique</i>	35
1.3.1. Notion d'aléa et de risque, risque géotechnique.....	36
1.3.2. Gestion du risque naturel en France.....	37
1.3.3. Critères de reconnaissance de la sécheresse en France	40
I.2 L'ALEA SECHERESSE	42
2.1 <i>Généralités sur la sécheresse</i>	42
2.1.1. Définitions.....	42
2.1.2. Historique de la sécheresse en France	43
2.2 <i>Les indices de sécheresse</i>	44
2.3 <i>Les périodes de sécheresse retenues</i>	47
I.3 LE RISQUE SECHERESSE GEOTECHNIQUE	49
3.1 <i>La susceptibilité du sol au RGA</i>	50
3.1.1. La sinistralité lié au RGA	50
3.1.2. Les formations argileuses affleurantes.....	55
3.1.3. Cartographie de l'aléa retrait gonflement par le BRGM.....	59
3.2 <i>Les facteurs intervenants</i>	64
3.2.1. La végétation	65
3.2.2. La topographie et la géométrie du terrain.....	69
3.2.3. Les erreurs d'aménagement et défauts de construction	70
3.2.4. Les variations du niveau des nappes, hydrogéologie.....	70
3.2.5. Les actions de l'homme.....	70
CONCLUSIONS.....	72
CHII METHODES ET DONNEES.....	74
II.1 LES DONNEES SAR.....	74
1.1 <i>Introduction</i>	74
1.2 <i>Les satellites SAR</i>	76
1.3 <i>L'imagerie SAR</i>	78
1.3.1. De l'optique au radar	78
1.3.2. L'acquisition des données brutes	81
1.3.3. Le traitement SAR.....	82
II.2 LES TECHNIQUES DINSAR ET PSI.....	84
2.1 <i>Principe de l'interférométrie</i>	84
2.2 <i>L'interférométrie différentielle (DINSAR)</i>	87
2.3 <i>L'interférométrie des points stables</i>	96
2.3.1. Origine et développement de la technique.....	96
2.3.2. Principe.....	97
2.3.3. Caractéristiques des données obtenues	103
2.3.4. Limitations et efficacité des PSI	104
II.3 INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES ET SIG.....	106
3.1 <i>Les données géographiques</i>	106
3.1.1. Cartes et données géologiques.....	106

3.1.2. Carte d'occupation du sol	109
3.1.3. L'imagerie aérienne	110
3.1.4. Données topographiques.....	112
3.1.5. Les données terrain.....	114
3.1.6. Les données climatologiques.....	115
3.2 <i>Traitements et SIG</i>	115
3.3 <i>Photo interprétation et cartographie</i>	120
3.3.1. Méthodologie.....	121
3.3.2. Une pré-analyse des images aériennes, préparation du terrain.....	122
3.3.3. La mission terrain	123
3.3.4. La photo-interprétation complémentaire.....	124
3.3.5. L'analyse spatiale : création de la carte d'influence des arbres sur le bâti.....	125
3.3.6. Résultats cartographiques	126
II.4 CONCLUSIONS	132
CHIII APPLICATION A L'EST PARISIEN	133
III.1 LA REGION D'ETUDE.....	134
1.1 <i>Localisation géographique</i>	134
1.2 <i>Contexte géomorphologique et géologique</i>	135
1.3 <i>Contexte hydrogéologique</i>	137
1.4 <i>L'occupation du sol</i>	138
1.5 <i>La sinistralité</i>	140
III.2 RESULTATS PAR LA METHODE DINSAR	143
2.1 <i>Les données radar concernant la zone d'étude</i>	143
2.2 <i>Les résultats DINSAR</i>	145
2.3 <i>Discussions</i>	152
III.3 RESULTAT PAR LA METHODE PSI	154
3.1 <i>Les résultats PSI</i>	154
3.2 <i>Comparaison avec résultats DINSAR</i>	159
III.4 CONCLUSIONS	162
CHIV MITIGATION DU RISQUE A L'ECHELLE LOCALE	167
IV.1 SOMMET DE PLATEAU : CAS DE NOISY-LE-GRAND.....	168
1.1 <i>Localisation et contexte de la zone d'étude</i>	168
1.2 <i>État des bâtiments</i>	176
1.3 <i>Influence de la végétation</i>	179
IV.2 PLAINE ALLUVIALE : CAS DE GOURNAY-SUR-MARNE.....	181
2.1 <i>Localisation et contexte de la zone</i>	181
2.2 <i>État des bâtiments</i>	183
2.3 <i>Influence de la végétation</i>	187
2.4 <i>Analyse des mesures PSI</i>	190
2.4.1. Regroupement par famille de points homologues.....	190
2.4.2. L'analyse différentielle.....	195
2.4.3. Synthèse des résultats Gournay-sur-Marne.....	237
IV.3 DISCUSSIONS.....	239
CONCLUSIONS	240
BIBLIOGRAPHIE.....	248

FIGURE 1 : MINERAUX ARGILEUX RESULTANT SELON LES PRINCIPAUX FACTEURS DE L'ALTERATION : CLIMAT, ROCHE-MERE ET TOPOGRAPHIE (BEAUCHAMP, 2002).	22
FIGURE 2 : STRUCTURE MINERALOGIQUES DES QUATRE FAMILLES D'ARGILES (YIGZAW, 2009).	24
FIGURE 3 : STRUCTURE MULTI ECHELLE DE LA MONTMORILLONITE (D'APRES LE PLUART ET AL., 2004).	28
FIGURE 4 : SCHEMAS RISQUE/ALEA APPLIQUE A LA SECHERESSE GEOTECHNIQUE.	37
FIGURE 5 : FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF CATNAT DE LA DECLARATION DE L'ASSURE A SON INDEMNISATION. SOURCE : MINISTERE DE L'INTERIEUR- DIRECTION DE LA DEFENSE ET DE LA SECURITE CIVILES.	38
FIGURE 6 : ÉTAT CARTOGRAPHIE NATIONAL DES PPR PRESCRIT OU APPROUVE AU 04/05/2007 POUR L'ALEA : TASSEMENTS DIFFERENTIELS. SOURCE PRIM.NET.	40
FIGURE 7 : PLUVIOMETRIE EFFICACE CORRIGEE (PÉC) MENSUELLE CALCULEE A PARTIR DES VALEURS JOURNALIERES DE PRECIPITATION (P) ET D'EVAPOTRANSPIRATION (ETP) ENTRE 1984 ET 2002 SUR L'EST PARISIEN. REPRESENTATION SOUS FORME D'HISTOGRAMME ET D'UNE COURBE DE MOYENNE MOBILE (PERIODE DE ONZE MOIS). DONNEES SOURCES © METEO FRANCE	48
FIGURE 8 : COURBES DE TEMPERATURES ET PLUVIOMETRIE EFFICACE CORRIGEE (PÉC) MENSUELLE CALCULEE A PARTIR DES VALEURS MENSUELLES DE PRECIPITATION ET D'EVAPOTRANSPIRATION ENTRE 1984 ET 2002. DONNEES SOURCES © METEO FRANCE.	49
FIGURE 9 : NOMBRE D'ARRETES DE RECONNAISSANCE DE CATASTROPHE NATURELLE LIE A LA SECHERESSE PRIS PAR COMMUNE ENTRE 1989 ET 2003 (CARTE DE GAUCHE) ET 2006 (CARTE DE DROITE). SOURCES MEDD, CARTOGRAPHIE BRGM.	52
FIGURE 10: A- CLASSEMENT DES DEPARTEMENTS EN FONCTION DU NOMBRE D'OCCURRENCES DE RECONNAISSANCE DE L'ETAT DE CATASTROPHE NATURELLE SECHERESSE RAPPORTE A 100 COMMUNES, A LA DATE DU 15 AOUT 2006. B- CARTE GEOLOGIQUE AU 1/1.000.000 COMPARE A LA SINISTRALITE DECLAREE JUSQU'EN 2006.	52
FIGURE 11: CARTE GEOMORPHOLOGIQUE DU BASSIN DE PARIS (DIFFRE ET POMEROL, 1979)	53
FIGURE 12 : A- RELIEF ISSU D'UN ESTOMPAGE 315°N DU MNT BdALTI® DE L'IGN AVEC LA SINISTRALITE EN POINTS NOIRS ENTRE 1989 ET 2003, B- EXTRAIT DE CARTES GEOLOGIQUES SUR L'EST PARISIEN AVEC EN POINTS NOIRS LA MEME SINISTRALITE.	54
FIGURE 13: CARTE DES FORMATIONS ARGILE MARNEUSES DES DEPARTEMENTS DE (A) SEINE-SAINT-DENIS ET (B) DU VAL-DE-MARNE (SOURCE : BRGM, D'APRES PLAT ET AL., 2007A, PLAT ET AL., 2007B).	56
FIGURE 14 : CARTOGRAPHIE DE L'ALEA RETRAIT GONFLEMENT DU BRGM POUR L'ÎLE-DE-FRANCE	61
FIGURE 15: CARTE GEOLOGIQUE BRGM COMPARE A LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA RETRAIT GONFLEMENT D'ARGILE DU BRGM.	61
FIGURE 16 : CARTOGRAPHIE DE L'ALEA RGA POUR LE DEPARTEMENT DE SEINE-SAINT-DENIS (PLAT ET AL., 2007)	62
FIGURE 17: CARTOGRAPHIE DE L'ALEA RGA POUR LE DEPARTEMENT DE VAL-DE-MARNE (PLAT ET AL., 2007)	63
FIGURE 18 : ACTION DE LA VEGETATION SUR LE SOL ET DOMMAGES INHERENTS.	66
FIGURE 19 : LE SYSTEME RACINAIRE DE L'ARBRE ISOLE.	67
FIGURE 20 : ECHEANCIER DES MISSIONS SAR EMBARQUE A BORD DE SATELLITE (D'APRES DURO, 2009).	76
FIGURE 21 : CONFIGURATION DE PILOTAGE GYROSCOPIQUE DU SATELLITE ERS2 (D'APRES MIRANDA ET AL., 2004).	77
FIGURE 22 : COMPARAISON DES MODES D'ACQUISITION OPTIQUE (GAUCHE) ET RADAR (DROITE), CAS D'UN TERRAIN PLAT (D'APRES PATHIER, 2003, MODIFIE).	79
FIGURE 23 : COMPARAISON DES MODES D'ACQUISITION OPTIQUE (GAUCHE) ET RADAR (DROITE), CAS D'UN TERRAIN AVEC UNE TOPOGRAPHIE ACCUSEE (PATHIER, 2003, MODIFIE).	80
FIGURE 24 : CONFIGURATION DE L'ACQUISITION RADAR (D'APRES PATHIER, 2003).	81
FIGURE 25 : GEOMETRIE D'ACQUISITION EN INTERFEROMETRIE	87
FIGURE 26 : (A) INTERFEROGRAMMES AFFECTES PAR DES ARTEFACTS A- ATMOSPHERIQUES (B) FRANGES ORBITALES.	91
FIGURE 27: ILLUSTRATION DE LA PERTE DE COHERENCE TEMPORELLE	91
FIGURE 28 : (A) IMAGE D'AMPLITUDE SAR (14348), (B) IMAGE DE COHERENCE D'UN COUPLE INTERFEROMETRIQUE.	95
FIGURE 29: (A) INTERFEROGRAMME QUI PRESENTE LES DIFFERENCES DE PHASE EN COULEUR (COUPLES INTERFEROMETRIQUES 14348/45542) ET (B) UN ZOOM UN SIGNAL PROVOQUE REMONTEE DE LA SURFACE DU SOL ET DES BATIMENTS AU NIVEAU DE LA GARE ST LAZARE SUITE A LA FIN DES POMPAGES.	95
FIGURE 30 : INTERFEROGRAMME EN COLORISATION HSV (FIGURE DE GAUCHE).	95
FIGURE 31: FIGURE 31: LECTURE D'UNE FRANGE COLORIMETRIQUE LIEE A UN DEPHASAGE (A DROITE).	95
FIGURE 32 : EXEMPLE DE TRAITEMENT CARTOGRAPHIQUE A PARTIR DES DONNEES TELECHARGE SUR ARGILES.FR.	108
FIGURE 33 : CLASSIFICATION 2003 MOS IAURIF A 11 POSTES.	110
FIGURE 34 : DALLES D'ORTHOIMAGE AERIENNE DISPONIBLES POUR L'ETUDE DU BASSIN PARISIEN.	111

FIGURE 35 : EXTRAIT D'UNE ORTHO PHOTOGRAPHIE SUR UN QUARTIER D'AFFAIRE DE LA DEFENSE, VILLE DE PUTEAUX, FRANCE. SOURCE : BD ORTHO® IGN.	112
FIGURE 36 : PLANCHE DE DOCUMENTS THEMATIQUES CARTOGRAPHIES SOUS LE SIG	117
FIGURE 37 : SCHEMA SIMPLIFIE DE LA RELATION VEGETATION/BATI POUR DES ESPECES ISOLEES.....	120
FIGURE 38 : METHODOLOGIE DE L'ANALYSE DE L'INFLUENCE DE LA VEGETATION	121
FIGURE 39 : ESTIMATION DE LA HAUTEUR D'UN ARBRE EN FONCTION DE LA TAILLE AU SOL DE L'OMBRE PORTEE ET DE L'HEURE DE PRISE DE VUE DE L'IMAGE AERIENNE.	122
FIGURE 40: SCHEMA REPRESENTANT LA MORPHOLOGIE DE DEUX ESSENCE TYPE D'ARBRE.....	124
FIGURE 41 : EXTRACTION DU RAYON THEORIQUE D'UN POLYGONE NON REGULIER, ASSIMILE A UN DISQUE.....	125
FIGURE 42 : NUMERISATION SUR LA BD ORTHO IGN DE LA CANOPEE ET ESTIMATION THEORIQUE DU CENTRE DE CHAQUE ARBRE.	128
FIGURE 43 : CARTOGRAPHIE DE LA CANOPEE DE LA VEGETATION AVEC L'INDICE D'AGRESSIVITE DES ESSENCES OBSERVEES.....	129
FIGURE 44 : CARTOGRAPHIE DE LA DISTANCE D'ACTION DE LA VEGETATION EN FONCTION DE LA HAUTEUR DES ARBRES.....	129
FIGURE 45 : CARTOGRAPHIE DE L'INFLUENCE DE LA VEGETATION EN FONCTION DE LA HAUTEUR ET DE L'ESSENCE DES ARBRES A NOISY-LE-GRAND.	129
FIGURE 46 : SYNTHESE DE L'INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR LES BATIMENTS.	129
FIGURE 47 : CARTOGRAPHIE DE L'INFLUENCE THEORIQUE DE LA VEGETATION ARBOREE	131
FIGURE 48 : LOCALISATION DES ZONES D'INTERET ; LIMITE DEPARTEMENTALE EN GRAS, LIMITE DES COMMUNES EN TRAIT FIN.....	135
FIGURE 49 : (A) EXTRAIT LEGENDE DE LA CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DU BRGM ET (B) DESCRIPTIF GEOMORPHOLOGIQUE SIMPLIFIE SUR LE ZONE D'INTERET.	136
FIGURE 50 : DATES DES DECLARATIONS DE SINISTRE DE BATIMENTS POUR LE DEPARTEMENT DE SEINE ET MARNE (77) ENTRE 1989 ET 2004. (SOURCE : RAPPORT PUBLIC DEPARTEMENTAL DU BRGM)	141
FIGURE 51 : REPARTITION DE LA SINISTRALITE SELON LE CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE.	142
FIGURE 52 : VITESSE MOYENNE DE PS EN MODE ASCENDANT, SATELLITE ERS1/2 ENVISAT.	156
FIGURE 53 : VITESSE MOYENNE DE PS EN MODE DESCENDANT, SATELLITE ERS1/2 ENVISAT.	156
FIGURE 54 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE DU BRGM PERMETTANT DE RECONNAITRE LES FORMATIONS ARGILEUSES GONFLANTES (G1A EN VERT). LES DEUX ZONES SELECTIONNEES CORRESPONDENT A CELLES DECRITES PLUS PRECISEMENT CI-DESSUS PAR LES CARTES DE VITESSE LINEAIRE PSI.....	156
FIGURE 55 : VITESSE MOYENNE LINEAIRE DES PS ASCENDANT EN MM/AN, (BLEU : NEGATIVES DE -6MM/AN, VERS ROUGE POSITIVE DE +6MM/AN), SATELLITE ERS1/2 ENVISAT AVEC FOND DE CARTE ORTHOPHOTOGRAPHIE IGN.....	157
FIGURE 56 : ORTHOPHOTOGRAPHIE IGN ET SINISTRALITE. EMPRISE SUR ZONE DE NOGENT/MARNE ET BRY/SUR MARNE.....	157
FIGURE 57 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE DU BRGM AU 1:50000 ET SINISTRALITE.....	157
FIGURE 58 : VITESSE MOYENNE LINEAIRE DES PS ASCENDANT EN MM/AN (BLEU : NEGATIVES DE -6MM/AN, VERS ROUGE POSITIVE DE +6MM/AN) AVEC FOND DE CARTE ORTHOPHOTOGRAPHIE IGN. EMPRISE SUR LA ZONE 2 DE VILLIERS-SUR-MARNE	158
FIGURE 59 : ORTHOPHOTOGRAPHIE IGN ET SINISTRALITE (ETOILES NOIRES), SUR LA ZONE DE VILLIERS-SUR-MARNE.....	158
FIGURE 60 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE DU BRGM AU 1:50 000 ET SINISTRALITE.....	158
FIGURE 61 : LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE DANS L'EST PARISIEN : CADRE NOIR, VILLIERS-SUR-MARNE (VM), NOGENT-SUR-MARNE (NG).	168
FIGURE 62 : EVOLUTION DE LA POPULATION DE VILLIERS-SUR-MARNE ENTRE 1850 ET 2007 (SOURCE INSEE).	169
FIGURE 63 : DOCUMENTS THEMATIQUES ISSUS DE LA BASE DE DONNEES THEMATIQUES RGA SUR LE SITE SELECTIONNE SUR LES COMMUNES DE VILLIERS-SUR-MARNE ET DE NOISY-LE-GRAND.	172
FIGURE 64 : CARTE DE LOCALISATION DE PS ET CARTE DE VITESSE LINEAIRES DES PS EN MODE ASCENDANT ENTRE 1995 ET 2006.....	174
FIGURE 65 : DEPLACEMENTS DES PS NUMEROTES DE 1 A 8, LOCALISES EN FIGURE 6.1 AVEC LE DIAGRAMME DE DONNEES METEOROLOGIQUES (HISTOGRAMME DE PLUVIOMETRIE EN MM/MOIS ET TEMPERATURE DE C°/MOIS).	174
FIGURE 66 : (A) BATIMENTS ENDOMMAGES A VILLIERS-SUR-MARNE (B) CARTE DE LOCALISATION DES PS, COMMUNES DE VILLIERS-SUR-MARNE ET DE NOISY-LE-GRAND.....	176
FIGURE 67 : (A) HABITATS SOUMIS A L'INFLUENCE DES ARBRES APRES ENQUETE DE TERRAIN, (B) HABITATS AVEC DEPENDANCE OU SANS VOISINAGE.	176
FIGURE 68 : CARTE DE LOCALISATION DES PS VILLE DE VILLIERS-SUR-MARNE ET NOISY-LE-GRAND.	177
FIGURE 69 : PROFILS DE PS DESCENDANT APPARTENANT A DES BATIMENTS LOCALISES DEFORMES APRES ENQUETE DE TERRAIN, A NOISY-LE-GRAND. REMARQUER QUE LE BATIMENT CORRESPONDANT A LA DERNIERE COURBE NE PRESENTE PAS DE DEFORMATIONS VISIBLE SUR LA FAÇADE COTE RUE.	178

FIGURE 70 : COMPARAISON DES PROFILS PS 1995/2001 ET L'INFLUENCE DE LA VEGETATION.	179
FIGURE 71 : LOCALISATION DES PS (POINTS NOIRS) AILLANT UN COMPORTEMENT CYCLIQUE SAISONNIER VIS A VIS DE L'INFLUENCE DE LA VEGETATION.	180
FIGURE 72 : PLANCHE DESCRIPTIVE DU SITE DE GOURNAY-SUR-MARNE, A- LOCALISATION DE LA ZONE D'INTERET DANS LA COMMUNE DE GOURNAY-SUR-MARNE ET SA SINISTRALITE, B- EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE AU 1/50000EME DU BRGM DE LAGNY, C- CARTE D'OCCUPATION DU SOL PAR L'IAURIF DE 2003 SOUS FORME D'UNE CLASSIFICATION A 11 POSTES, D- ORTHOPHOTOGRAPHIE AERIENNE DE L'IGN DE L'ANNEE 2003.	182
FIGURE 73 : CARTOGRAPHIE DES DEFORMATIONS OBSERVEES A GOURNAY-SUR-MARNE (93460).	185
FIGURE 74 : STATISTIQUES DES OBSERVATIONS RELATIVES A L'ETAT DES BATIMENTS.	186
FIGURE 75 : CARTE D'INFLUENCE DE LA VEGETATION D'UN QUARTIER DE GOURNAY-SUR-MARNE (93460).	189
FIGURE 76 : SYNTHESE GRAPHIQUE DE PROFILS PS DE SOL SOUMIS AU RGA	192
FIGURE 77 : REGROUPEMENT DES POINTS HOMOLOGUE DE TYPE FID 296, FAMILLE DE POINTS PS REFERENCE SOL « PRSOL » SOUMIS AU RGA SANS L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ».....	193
FIGURE 78 : REPARTITION DES FAMILLES DE POINTS PS HOMOLOGUES, COMPAREE A L'INFLUENCE THEORIQUE DE LA VEGETATION ARBOREE ET COMPARE AUX DEFORMATIONS OBSERVEES SUR LES BATIS.	194
FIGURE 79 : CARTE DE LOCALISATION DES REFLECTEURS PS.	196
FIGURE 80 : DEUX PROFILS PS1 ET PS2 D'UN BATIMENT OBSERVE DEFORME ET SOUS L'INFLUENCE DE LA VEGETATION.....	197
FIGURE 81 : PROFIL PS1 (COURBE EN NOIR) COMPARE AUX REFERENCES PS DU SOL INFLUENCE PAR LA VEGETATION (COURBE ROUGE) ET NON INFLUENCE PAR LA VEGETATION (COURBE BLEUE).	197
FIGURE 82 : PROFIL PS2 (COURBE EN NOIR) COMPARE AUX REFERENCES PS DU SOL INFLUENCE PAR LA VEGETATION (COURBE ROUGE) ET NON INFLUENCE PAR LA VEGETATION (COURBE BLEUE).	197
FIGURE 83 : DEUX PROFILS PSI D'UN BATIMENT DEFORME (COURBE NOIRE ET BLEUE) SOUMIS AU RGA.	198
FIGURE 84 : PROFIL PSI D'UN BATIMENT LEGEREMENT DEFORME (COURBE EN NOIR) SOUMIS AU RGA COMPARE AUX PROFILS DE SOL A PROXIMITE (COURBE BLEUE ET ROUGE).	199
FIGURE 85 : PROFIL PS (COURBE EN NOIR) COMPARE A LA REFERENCE PS LOCALE (COURBE EN BLEU) ET COMPARE A LA REFERENCES PS DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).	200
FIGURE 86 : PROFILS PS1 (COURBE EN NOIR), PS2 (COURBE EN BLEU) ET PS3 (COURBE ROUGE) D'UN MEME BATIMENT OBSERVE LEGEREMENT DEFORME.	200
FIGURE 87 : PROFIL PS3 D'UNE MAISON DEFORMEE (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DU SOL A PROXIMITE DU PAVILLON (COURBE BLEUE) ET COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE D'UN SOL SOUMIS AU RGA AVEC INFLUENCE DE LA VEGETATION (COURBE ROUGE).	201
FIGURE 88 : PROFIL PS D'UNE MAISON DEFORMEE (COURBE EN NOIR) COMPAREE AUX PROFILS PS DU SOL A PROXIMITE DU PAVILLON (COURBE BLEUE ET ROUGE).	201
FIGURE 89 : PROFIL PS D'UNE MAISON FORTEMENT DEFORMEE (COURBE EN NOIR) COMPAREE AUX PROFILS PS DE REFERENCE DU SOL LOCAL (COURBE BLEUE) ET DE LA ZONE (ROUGE).	202
FIGURE 90 : DEUX PROFILS PS D'UNE MAISON OBSERVEE DEFORMEE (COURBE NOIRE ET BLEUE) COMPAREE A UNE REFERENCE LOCALE DU SOL (COURBE ROUGE).	202
FIGURE 91 : DEUX PROFILS PS D'UNE MAISON SINISTREE (COURBE NOIRE ET BLEUE) COMPARE AU PROFIL DE REFERENCE DU SOL DE LA ZONE D'ETUDE (COURBE ROUGE).	203
FIGURE 92 : PROFIL PS D'UN PAVILLON OBSERVE DEFORME (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PS SOL DE REFERENCE LOCAL (COURBE EN BLEU) ET AU PS SOL DE REFERENCE DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).	204
FIGURE 93 : DEUX PROFILS PS D'UNE MAISON SINISTREE (COURBE NOIRE ET BLEUE) COMPARE AU PROFIL DE REFERENCE LOCALE DU SOL (COURBE ROUGE).	204
FIGURE 94: PROFIL PS D'UN BATIMENT NON DEFORME (COURBE EN NOIR) COMPARE A UN PROFIL PS SOL D'UNE REFERENCE LOCALE (COURBE BLEUE).	205
FIGURE 95 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT MODEREMENT DEFORME (COURBE NOIRE ET BLEU) COMPARES AVEC LE PROFIL PS DE REFERENCE DE LA ZONE (COURBE ROUGE).	206
FIGURE 96 : PROFIL PS D'UN BATIMENT RENOVE ET NON SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION (COURBE EN NOIR), COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCALE (COURBE BLEUE) ET DE LA ZONE (COURBE NOIRE).	206
FIGURE 97 : DEUX PROFILS PS (COURBE NOIRE ET BLEUE) D'UN BATIMENT OBSERVE DEFORME, SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION. LA COURBE ROUGE REPRESENT LE PROFIL PS DE REFERENCE.	207
FIGURE 98 : PROFIL PS D'UN BATIMENT DISSIMULE (COURBE NOIRE) SOUS L'INFLUENCE THEORIQUE DE LA VEGETATION, COMPARE A UN PROFIL PS DE REFERENCE SOL A PROXIMITE (COURBE BLEUE) ET AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE DE LA ZONE (COURBE ROUGE).	208
FIGURE 99 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) VU NON DEFORME ET A MOITIE SOUS INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE, COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE DU SOL A PROXIMITE DU BATIMENT (COURBE BLEU) AU PROFIL PS DE REFERENCE D'UN SOL SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION (COURBE ROUGE).	209

FIGURE 100 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE, COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE DU SOL LOCAL (COURBE BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'UN SOL SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE (COURBE ROUGE)	209
FIGURE 101 : PROFIL PS (COURBE NOIRE ET BLEUE) D'UN BATIMENT OBSERVE DEFORME, COURBE JUXTAPOSEE A UN PROFIL PS D'UN POINT BAS A PROXIMITE (COURBE ROUGE).....	210
FIGURE 102 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT MODEREMENT DEFORME SOUS L'INFLUENCE DE LA VEGETATION.	210
FIGURE 103: DEUX PROFILS PS (COURBE NOIRE ET BLEUE) D'UN BATIMENT NON DEFORME ET SUFFISAMMENT ELOIGNE DE L'INFLUENCE DE LA VEGETATION, COMPARE A UN PROFIL PS DE SOL (COURBE ROUGE).	211
FIGURE 104 : PROFIL PS (COURBE NOIRE) D'UN BATIMENT OBSERVE DEFORME, COMPARE AVEC LE PROFIL PS DE REFERENCE DE LA ZONE (COURBE ROUGE).	211
FIGURE 105 : PROFIL PS (COURBE NOIRE) D'UN BATIMENT OBSERVE DEFORME, COMPARE AVEC LE PROFIL PS DE REFERENCE DE LA ZONE (COURBE ROUGE).	212
FIGURE 106 : DEUX PROFILS PS DE DEUX BATIMENTS OBSERVES SANS DEFORMATION.....	212
FIGURE 107 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL DU SOL (COURBE EN BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	213
FIGURE 108 : UN PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE A DEUX PROFILS PS DE REFERENCE SITUE A PROXIMITE (COURBE BLEUE ET EN ROUGE).	213
FIGURE 109 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE, COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE DU SOL LOCAL (COURBE BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'UN SOL SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE (COURBE ROUGE)	214
FIGURE 110 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) COMPARE A UN PROFIL PS DU SOL A PROXIMITE (COURBE BLEU) ET A UN PROFIL PS DE REFERENCE DE LA ZONE (COURBE ROUGE).....	214
FIGURE 111 : DEUX PROFILS PS (COURBE NOIRE ET BLEUE) D'UN BATIMENT OBSERVE MODEREMENT DEFORME, COMPARE AVEC LE PROFIL PS SOL DE REFERENCE LOCAL (COURBE ROUGE).....	215
FIGURE 112 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT OBSERVES NON DEFORMES (COURBE BLEUE ET NOIRE) COMPARE AU PROFIL PS SOL DE LA REFERENCE LOCALE (COURBE ROUGE).	215
FIGURE 113 : TROIS PROFILS PS D'UN BATI MODEREMENT DEFORME.	216
FIGURE 114 : TROIS PROFILS PS DU SOL A PROXIMITE DU BATIMENT ETUDIE.....	216
FIGURE 115 : JUXTAPOSITION D'UN PROFIL PS DU BATIMENT DEFORME (COURBE EN NOIR), UN PROFIL PS DU SOL SOUS INFLUENCE DE LA VEGETATION (COURBE EN BLEU) ET D'UN PROFIL PS DE REFERENCE DES SOLS DE LA ZONE (COURBE ROUGE).	217
FIGURE 116 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT OBSERVE NON DEFORME, PARTIELLEMENT SOUS INFLUENCE DE LA VEGETATION.....	218
FIGURE 117 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT OBSERVE MODEREMENT DEFORME, PARTIELLEMENT SOUS INFLUENCE DE LA VEGETATION.	218
FIGURE 118 : PROFIL PS D'UN BATIMENT DEFORME SOUMIS A L'INFLUENCE LA VEGETATION (COURBE NOIRE), COMPARE AUX PROFILS PS DE LA REFERENCE LOCALE DU SOL (COURBE BLEUE) ET DE LA ZONE (COURBE ROUGE).....	219
FIGURE 119 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT DEFORME ET SOUS L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE (COURBE NOIRE ET BLEUE), COMPAREES AVEC LE PROFIL PS DE REFERENCE DU SOL DE LA ZONE (COURBE ROUGE).....	220
FIGURE 120 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT MODEREMENT DEFORME ET A MOITIE SOUS INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE (COURBE NOIRE ET BLEUE), COMPARE A LA COURBE DE REFERENCE PS DE LA ZONE (COURBE ROUGE).....	220
FIGURE 121: PROFIL PS D'UN BATIMENT FORTEMENT DEFORME (COURBE NOIRE) COMPARE AU PROFIL PS D'UN SOL A PROXIMITE HORS INFLUENCE DE LA VEGETATION (COURBE BLEUE) ET AU PROFIL PS D'UN SOL A PROXIMITE DANS LE RAYON D'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE (COURBE ROUGE).	221
FIGURE 122 : TROIS PROFILS PS D'UN BATIMENT DEFORME SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE.	222
FIGURE 123 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT DEFORME DANS LE RAYON D'INFLUENCE THEORIQUE D'UN ARBRE.	222
FIGURE 124 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT MODEREMENT DEFORME PARTIELLEMENT SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE.	223
FIGURE 125: DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT DEFORMES ET SOUMIS A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE (COURBE BLEUE ET NOIRE), COMPARES A LA REFERENCE PS SOL DE LA ZONE (COURBE ROUGE).	223
FIGURE 126 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) ET PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL DU SOL (COURBE BLEUE) ET LE PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE ROUGE).....	224

FIGURE 127 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL DU SOL (COURBE EN BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	224
FIGURE 128 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL DU SOL (COURBE EN BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	225
FIGURE 129 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL DU SOL (COURBE EN BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	226
FIGURE 130 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL DU SOL (COURBE EN BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	226
FIGURE 131 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL DU SOL (COURBE EN BLEU) ET AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	227
FIGURE 132 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DU SOL SITUE A PROXIMITE (COURBE EN BLEU) ET COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	228
FIGURE 133 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE EN NOIR) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL (COURBE EN BLEU) ET COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).....	229
FIGURE 134 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE ET BLEUE) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE D'INFLUENCE DE VEGETATION DE LA ZONE (COURBE EN ROUGE).	229
FIGURE 135 : UN PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN ROUGE).....	230
FIGURE 136 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE ET BLEUE) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN ROUGE).	231
FIGURE 137 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE ET BLEUE) COMPARE AU PROFIL PS DE REFERENCE DE LA ZONE (COURBE ROUGE).	231
FIGURE 138 : UN PROFIL PS D'UN BATIMENT OBSERVE RENOVE (COURBE NOIRE) COMPARE AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN BLEU) ET AVEC UN PROFIL PS SOL DE REFERENCE LOCAL.....	232
FIGURE 139 : UN PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) COMPARE AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN BLEU) ET AVEC UN PROFIL PS SOL DE REFERENCE DE LA ZONE.....	233
FIGURE 140 : UN PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) COMPARE AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN BLEU) ET AVEC UN PROFIL PS SOL DE REFERENCE DE LA ZONE.....	233
FIGURE 141 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) COMPARE AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN BLEU) ET AVEC UN PROFIL PS SOL DE REFERENCE DE LA ZONE.....	234
FIGURE 142 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) COMPARE AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN BLEU) ET AVEC UN PROFIL PS SOL DE REFERENCE DE LA ZONE.....	235
FIGURE 143 : PROFIL PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE) COMPARE AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE A PROXIMITE (COURBE EN BLEU) ET AVEC UN PROFIL PS SOL DE REFERENCE DE LA ZONE.....	235
FIGURE 144 : DEUX PROFILS PS D'UN BATIMENT (COURBE NOIRE ET BLEUE) COMPARE AVEC UN PROFIL PS DE REFERENCE LOCAL (COURBE ROUGE)	236
FIGURE 145 : TROIS PROFILS PS D'UN BATIMENT MODEREMENT FISSURE	236
FIGURE 146: CANICULE AU 11/06/2003, UN ANTICYCLONE S'INSTALLE POUR SUR L'EUROPE POUR UNE DUREE DE 10 JOURS.	265
FIGURE 147 : A- MESURES DE RESTRICTION DE L'USAGE DE L'EAU PAR LES PARTICULIERS DANS 76 DEPARTEMENTS. B-PRECIPITATIONS ENTRE LE 01/02/2003 AU 30/06/2003 COMPARE EN % AVEC LA PERIODE DE REFERENCE 1946/2002.	265

Liste des tableaux & Planches

TABEAU 1 : CARACTERISTIQUE PHYSICO-CHIMIQUE DE TROIS FAMILLES DE MINERAUX ARGILEUX (VELDE, 1995).	26
TABEAU 2 : CLASSIFICATION DES ARGILES SELON LEURS PROPRIETES DE GONFLEMENT : L'ESPECE ARGILEUSE, LE CATION DOMINANT, L'ESPACE BASAL (EN ANGSTREM) EN CONDITIONS GLYCOLEES ET SECHES (D'APRES VELDE, 1995).	27
TABEAU 3 : PIECES DU RAPPORT ETABLI PAR LE PREFET EN VUE DE LA RECONNAISSANCE DE L'ETAT DE « CATNAT ».	38
TABEAU 4 : SELECTION DES INDICES DE SECHERESSE POUR LE BMDI SUR 6 MOIS INFERIEUR A -2 A LA STATION DE MELUN SUR LA PERIODE 1947-2006 (COJEAN ET AL. 2009).	46
TABEAU 5 : SYNTHESE DES DONNEES DE SINISTRALITE, D'AFFLEUREMENT ET D'URBANISATION RELATIVE AUX FORMATIONS MARNO-ARGILEUSES RECONNUES SENSIBLES AU RGA POUR LES DEPARTEMENT DE SEINE-SAINT-DENIS ET DU VAL-DE-MARNE (DONNEES D'APRES PLAT ET AL., 2007A, PLAT ET AL., 2007B).	57
TABEAU 6 : LISTE DES FORMATIONS ARGILLO-MARNEUSES RELATIVES A LA ZONE D'ETUDE EXTRAITE DE TABLEAU 5, CLASSEE PAR ORDRE DE DENSITE DE SINISTRALITE DECROISSANTE. NS : NON SIGNIFICATIF.	58
TABEAU 7 : STATISTIQUES RELATIVES AUX DESORDRES OBSERVEES SUR LES BATIMENTS DUS A LA VEGETATION. ETUDE DE LA VEGETATION DANS LE BASSIN LONDONIEN, REALISEE EN MILIEU URBAIN ANGLAIS (CUTLER ET RICHARDSON, 1989).	68
TABEAU 8 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES CAPTEURS SAR UTILISES (SOURCE : ESA).	78
TABEAU 9 : REFERENCE TECHNIQUES GENERALES DES MNT UTILISES.	113
TABEAU 10 : STATISTIQUE D'OCCUPATION DU SOL SUR LES ZONES D'ETUDES A 21 POSTES CLASSES PAR ORDRE D'IMPORTANCE DE LA SUPERFICIE (SOURCE : POS IAURIF).	139
TABEAU 11 : FORMATIONS GEOLOGIQUES PRESENTES A L'AFFLEUREMENT A VILLIER-SUR-MARNE DANS LA ZONE D'ETUDE. (SOURCE DONSIMONI ET AL., 2003).	171
TABEAU 12 : VEGETATION RECENSEE A GOURNAY-SUR-MARNE (AVRIL 2008).	187
TABEAU 13 : CARACTERISATIONS DES STATIONS INTERPRETEES PAR LES PS COMPAREES AUX OBSERVATIONS FAITES SUR LE TERRAIN RELATIVES AU DEFORMATION ET A L'INFLUENCE DE LA VEGETATION ARBOREE.	238
PLANCHE 1: ZONE DE NOGENT SUR MARNE – A, A1, A2 ORTHO PHOTOGRAPHIE, B - ALEA BRGM AVEC LE BATI (MOS IAURIF) C- CARTE GEOLOGIQUE, D - CARTE DE PENTE, E, F - INTERFEROGRAMME 7334_20360 AVEC ET SANS MASQUE DE COHERENCE DE 0.6.	144
PLANCHE 2 : EXTRAITS D'INTERFEROGRAMMES SUR LA ZONE D'ETUDE DE NOGENT-SUR-MARNE ET (A) ESTOMPAGE DE MNT REVELANT LA TOPOGRAPHIE ET (B) EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE ET DE LA SINISTRALITE RECENSEE PAR LE BRGM.	146
PLANCHE 3: ZONE DE BRY-SUR-MARNE - A, A1, A2 ORTHOPHOTOGRAPHIE, B – ALEA BRGM AVEC LE BATI (MOS IAURIF), C - CARTE GEOLOGIQUE, D - CARTE DE PENTE, E ET F - INTERFEROGRAMME 9338_21863 AVEC ET SANS MASQUE DE COHERENCE DE 0.6.	148
PLANCHE 4 : VUE D'ENSEMBLE DE LA ZONE D'INTERET PAR INTERFEROMETRIE ET AVEC UN ESTOMPAGE DE LA TOPOGRAPHIE EN TRANSPARENCE. LES FLECHES SOULIGNENT L'EMPLACEMENT DE DEFORMATION DANS LA PLAINE ALLUVIALE DE LA MARNE.	150

Terminologie

La mitigation du risque de la sécheresse géotechnique implique de nombreux termes qui varient selon la spécialité scientifique de différents acteurs qui les emploient. Cette problématique fait également intervenir des termes relatifs aux sols qui varient selon les spécialités des chercheurs. Pour cette raison, nous rappelons succinctement ici les définitions des termes d'aléa et de risque de la sécheresse géotechnique, ainsi que les définitions des termes utilisées dans cette thèse.

Aléa

L'aléa est la probabilité qu'un événement naturel violent survienne à un endroit donné. L'aléa se caractérise par des propriétés physiques mesurables (ex : vitesse du vent pour une tempête) qui sont associées à une probabilité permettant de définir une période de retour (ex : crue de la Seine à Paris de 1910 dite centennale).

Argiles

Le mot "argile" englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Le géologue ou le pédologue considèrent comme " argile " tout minéral de faible granulométrie. Le géotechnicien s'attache plutôt aux propriétés de plasticité des matériaux argileux.

Argiles (au sens granulométrique)

Sol dont la fraction des diverses particules est inférieure à 2 micromètres.

Argiles (au sens minéralogique)

Minéraux appartenant à la famille des phyllosilicates.

Sécheresse

La sécheresse est un déficit hydrique par rapport à des normales saisonnières, sur une période significativement longue pour qu'elle ait des impacts sur l'environnement et les activités humaines. Dans l'usage le plus fréquent le mot *sécheresse* se réfère généralement à la sécheresse météorologique.

Géotechnique

Science qui se préoccupe des interactions d'un sol et d'un construit, route, bâtiment ou ouvrage d'art. (Magnan, 2002).

Marnes

Roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcaire (35% à 65%) et d'argile, roche caractérisée par leur cohésion et leur plasticité en présence d'eau.

Mitigation (d'un risque naturel)

La mitigation (eth. lat. *mitigare*, atténuation) d'un risque naturel est la compréhension des différents facteurs intervenant dans la problématique du risque naturel (probabilité de l'aléa, exposition et les vulnérabilités des enjeux), afin de proposer des solutions de prévention et d'aménagement du territoire en vue d'atténuer les dommages sur les enjeux pour les rendre plus supportables par la société.

Sécheresse géotechnique

Perturbations des propriétés physiques et mécaniques des couches superficielles du sol par un aléa climatique, entraînant des mouvements de terrain à l'origine des dommages sur les bâtiments. La sécheresse géotechnique conduit à des mouvements de retrait-gonflement exacerbés par la présence d'argile.

Retrait d'un sol

Tassement ou subsidence du sol consécutif à une diminution de la teneur en eau dans le sol. Un sol peut être affecté par un retrait avec le départ de l'eau, qu'il soit argileux ou non.

Retrait gonflement

Cycle de tassement et d'expansion selon les variations de teneur en eau du sol.

Retrait-Gonflement Argile (RGA)

Phénomène physique de tassement et d'expansion d'un sol composé d'un matériau argileux au sens minéralogique du terme.

Risque

Le risque résulte de l'intersection d'un enjeu et d'un aléa. L'intensité du risque dépend de la vulnérabilité ou de l'exposition des enjeux à l'aléa considéré.

Introduction

Enjeu et problématique

Un sol, dont la composition minéralogique en argile gonflante est importante, est susceptible de retrait pendant une période de sécheresse, puis de gonflement avec le retour de l'humidité. Cela tient à la nature de l'argile qui est dure et cassante lorsqu'elle est desséchée, plastique et malléable à partir d'un certain niveau d'humidité (PLAT *et al.*, 2007). Ce phénomène de retrait-gonflement est étroitement lié aux variations de la teneur en eau des matériaux argileux situé dans les premiers mètres du sol. Les déplacements induits par ce phénomène de Retrait Gonflement-Argile (RGA ci-après) sont d'une faible amplitude en valeur absolue, de l'ordre du millimètre jusqu'à des valeurs cumulées de plusieurs décimètres, mais le tassement différentiel résultant est à l'origine d'importants dommages sur les bâtiments sus-jacent.

Parce qu'elles sont très courantes et qu'elles affleurent dans une large partie du monde, les argiles gonflantes sont responsables de dommages annuels évalués en centaines de milliards de dollars, en particulier dans les pays fortement urbanisés où l'immobilier constitue une forte valeur ajoutée de l'économie : on peut citer en la sécheresse subie en 1991 en Angleterre qui est considéré comme centennale, la sécheresse de 1976-77 aux Etats-Unis et la canicule de 2003 en France. Pourtant, bien qu'elles soient à l'origine de nombreux sinistres avec des couts cumulés du même ordre de grandeur que les autres catastrophes naturelles (séisme, inondations, tempêtes...), ce phénomène est souvent méconnu de la population car il est progressif et se réalise insidieusement sans que les sinistrés puissent le relier à un événement précis. Pourtant les dommages pourraient être grandement réduits par l'amélioration des pratiques de construction sur ce type de sol et en aménageant de manière préventive les pourtours de l'habitat.

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

Contexte scientifique

Le présent mémoire a été en grande partie réalisé dans le cadre du projet de recherche sur la sécheresse géotechnique pour la Fondation MAIF, au sein duquel le groupe de recherche OTIG de l'UPE-MLV a participé au côté d'ARMINES – Centre de Géosciences de l'Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris (coordonnateur), le CERMES (ENPC), OTIG (UPE-MLV) et le CSTB. Ce projet, d'une durée de trois ans, s'est terminé en décembre 2008 et ce

travail de thèse présente les résultats issus de cette recherche. Ce projet MAIF a notamment permis de préciser les mécanismes du phénomène du RGA à l'aide de différentes disciplines de recherche.

L'étude de l'impact de la sécheresse géotechnique en milieu urbain offre de nombreuses perspectives de recherche pour plusieurs disciplines scientifiques tant fondamentale qu'appliquée : en géotechnique et en mécanique des sols, par exemple pour caractériser et quantifier la sensibilité du sol au retrait-gonflement ; en climatologie pour définir le caractère exceptionnelle d'une sécheresse ; en hydrologie de surface et hydrogéologie pour mieux comprendre les circulations complexes de l'eau ; et en pédologie, biologie et agronomie afin de comprendre les interactions entre le sol et les plantes qui jouent un rôle aggravant dans le phénomène. Enfin la télédétection et l'ensemble des outils géomatiques associés au moyen d'observation satellitaire de la surface de la Terre permet de localiser, caractériser, quantifier et cartographier le phénomène de retrait-gonflement. Il s'agit pour ces disciplines scientifiques de comprendre les interactions entre l'eau et le sol et d'isoler des paramètres physiques pertinents et majeurs à l'origine du phénomène RGA.

Les applications concrètes de ces données scientifiques sont principalement attendues en génie civil pour adapter des normes plus contraignantes sur les constructions pavillonnaires légères, dans la gestion des risques avec la mise en oeuvre de plan de prévention et enfin dans le domaine assurantiel qui implique l'état et les compagnies d'assurance. Ces applications sont en fait liées : d'après Vincent (2006), la délimitation des zones sensibles est la première étape d'une politique de prévention des risques. Elle permet d'appliquer des normes de construction plus sévères localement ou d'imposer des aménagements adaptés dans les zones reconnues à fort risque dans les Plans de Prévention des Risques (PPR).

Localement, les analyses géotechniques du sol permettent de caractériser précisément le potentiel expansif du sol (BIGOT *et al.*, 2000). Cependant, les analyses géotechniques et les essais en laboratoire ont un coût et sont longs à effectuer. Il est donc difficile de multiplier les échantillonnages pour un terrain donné et de couvrir ainsi une large zone géographique. Au contraire la télédétection permet d'obtenir une vue synoptique des mouvements de la surface du sol au cours du temps, ce qui n'a pourtant pas encore été pleinement appliqué pour cartographier les effets de la sécheresse géotechnique.

La télédétection et les technologies spatiales sont des outils d'observation de la Terre en plein essor puisqu'elles permettent d'avoir au cours du temps une mesure directe et à distance avec une vue synoptique du phénomène. Les données obtenues permettent d'appuyer des travaux de recherche fondamentale dans le domaine des Sciences de la Terre. Les synthèses de Van der Meer (1999) et de Kariuki *et al.* (2004) exposent succinctement les méthodes et les techniques en télédétection optique utiles à la problématique du RGA. En particulier, en télédétection optique, l'imagerie hyper spectrale a déjà permis de caractériser la minéralogie des sols affleurants (CHABILLAT *et al.*, 2002, BEN-DOR *et al.*, 2002). Cependant, si de bons résultats sont obtenus pour des milieux arides, faiblement végétalisés et peu urbanisés, la

télédétection optique reste inadaptée sur des surfaces où le sol affleure peu, tel qu'en Île-de-France de par la forte urbanisation et l'abondance de la végétation.

Dans le domaine de la télédétection radar, l'interférométrie différentielle radar permet dans certaines conditions de mesurer des déformations discrètes de faible amplitude avec, au mieux, une précision plurimillimétrique, (MASSONNET ET FEIGL, 1998). Cependant, cette technique n'a pas encore été appliquée aux mouvements induits par la sécheresse. Les résultats et les limites de cette technique appliquée au suivi du phénomène RGA sont ici précisés. Les traitements ont été réalisés avec des données d'archives du satellite ERS acquises entre les années 1991 et 2002, en particulier pour la sécheresse de 1996/1997, sur l'Est parisien. Après avoir exposé le phénomène RGA et les facteurs participants, la méthode interférométrique utilisée sera détaillée. On présentera les résultats d'une analyse effectuée à partir de l'imagerie aérienne, des cartes géologiques et de la cartographie de l'aléa réalisée par le BRGM, des cartes de pente et enfin des interférogrammes choisis sur les périodes de sécheresse étudiées appliquées sur l'Est du Bassin de Paris.

Si la cartographie actuelle de l'aléa RGA réalisée par le BRGM au 1/50.000ème permet d'établir un premier aperçu de l'étendue spatiale des zones susceptibles de retrait-gonflement du sol, il est délicat localement, à l'échelle de la parcelle de l'utiliser, tant la complexité du sol est grande et reconnue. En effet, les argiles présentent une grande variabilité spatiale : elles peuvent être présentes sous forme de poches en profondeur ou de lentilles en surface, ce qui montre bien l'importance de réaliser des mesures locales pour réaliser des constructions adaptées. Inversement, les mesures géotechniques et les essais en laboratoire de mécanique des sols sur des prélèvements locaux donnent localement des mesures précises du pouvoir gonflant du sol. Toutefois ces mesures ne couvrent qu'une trop faible portion du territoire pour être généralisé spatialement, sans compter la pluralité des différentes méthodes et techniques selon le temps disponible et les moyens investis. Il y a donc un fort besoin de préciser géographiquement les connaissances de la susceptibilité du sol au RGA établi par le BRGM et de généraliser les informations obtenues par les mesures géotechniques pertinentes.

La télédétection associée aux outils géomatiques permettent d'aborder aussi bien à l'échelle de la commune que celle de l'échantillon faire le lien entre l'échelle de la commune et de l'échantillon, en apportant des informations à l'échelle de la parcelle : la gestion des données sous un SIG permet d'acquérir et d'interpréter les facteurs intervenant dans la problématique RGA et de mettre aussi en évidence les mécanismes du phénomène de retrait gonflement.

Objectif de la thèse

Le but de ce travail est de mieux comprendre et de suivre dans le temps les mécanismes de la déformation de la surface topographique urbanisée induite par la sécheresse géotechnique ainsi que les facteurs intervenant et aggravant en utilisant des nouvelles techniques de mesure des faibles déplacements à distance par télédétection radar. Deux techniques sont mises en œuvre ici : l'interférométrie différentielle dite « classique » (Differential Interferometry SAR – DINSAR, noté DinSAR ci-après), et la technique plus récente dite des réflecteurs ou

diffuseurs permanents, la technique Persistent Scatterer Interferometry (PSI). L'objet de cette thèse est donc d'évaluer la capacité et les limites des techniques DINSAR et PSI pour l'étude des effets de la sécheresse géotechnique en vue de localiser, caractériser et quantifier les déformations de la surface des sols argileux gonflants.

Les résultats de ces mesures de déplacements de la surface du sol sont intégrés au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) et comparée à d'autres données thématiques afin de produire des spatiocartes pertinentes aux besoins de la prévention et gestion de ce risque naturel : l'occupation du sol de l'Institut d'Aménagements Urbains de la Région Île-de-France (IAURIF), la carte géologique (BRGM), les images aériennes (BdOrthos IGN) et la cartographie de l'aléa réalisée par le BRGM (Cf argiles.fr). Les données mensuelles de Météo France telles que la température, les précipitations efficaces et l'évapotranspiration issue de la station de Melun permettent de souligner les périodes de sécheresse géotechnique. Sous forme graphique, ces données permettent d'apprécier, de manière qualitative uniquement, les périodes sèches et humides, afin d'effectuer des comparaisons avec les valeurs de déplacements mesurés par interférométrie radar : les critères de reconnaissance officielle de la sécheresse géotechnique basée sur des indices climatiques persistent.

En guise d'application, la région Île-de-France a été choisie car particulièrement affectée par le phénomène avec un cumul de 559 communes sinistrées sur 1300 (arrêté ministériel du 18.09.98) pour les périodes de sécheresse de 1989/92 et de 1996/1997, représentant une sinistralité de 43% par rapport au territoire national. En particulier, les deux départements de l'Est parisien : le Val-de-Marne (94) et la Seine-Saint-Denis (93) ont les taux de sinistralité parmi les plus élevés de France avec le second et le troisième rang respectivement, selon la Caisse Centrale de Réassurance (rapport 2007). En effet, le fort taux d'urbanisation et le caractère pavillonnaire individuel de leurs zones résidentielles situées sur des argiles gonflantes Eocène/Oligocène font de ces départements des territoires particulièrement vulnérables au RGA. Plus récemment, la canicule de 2003 et la sécheresse de l'année 2005 soulignent la récurrence du phénomène régionalement, dans un contexte de réchauffement climatique mondial (cf. GIEC, 2007).

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Si le premier chapitre fait la synthèse du phénomène de retrait gonflement à l'aide d'une approche bibliographique détaillée, cet état de l'art s'appuie sur les connaissances actuelles en minéralogie, géotechnique, et climatologie. Il se conclue par des notions de risques et d'aléa, nécessaire à la compréhension des facteurs intervenant dans la problématique du phénomène RGA et en mettant l'accent sur les éléments pouvant servir à une analyse par télédétection. Le second chapitre intitulé : « méthodologie et données », détaille les techniques radar d'interférométrie et les données radar utilisé pour l'étude. Le troisième chapitre est l'application proprement dite à l'est Parisien à l'échelle régionale. On y détaille les premiers résultats obtenus par les deux techniques interférométriques et une analyse des signaux enregistrés est réalisée. Enfin le quatrième et dernier chapitre détaille la mitigation du risque de la sécheresse géotechnique à l'échelle locale en détaillant les facteurs intervenant. Ce dernier chapitre inclut une validation terrain et une discussion élaborée autour des mécanismes du RGA à l'échelle de la parcelle.

CHAPITRE

1

CHI LA SECHERESSE GEOTECHNIQUE

Sommaire

LA SECHERESSE GEOTECHNIQUE.....	19
I.1 LE RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES	21
1.1 LE PHENOMENE RGA	21
1.2 CARACTERISATION DU RETRAIT GONFLEMENT	33
1.3 LA GESTION DU RISQUE SECHERESSE GEOTECHNIQUE.....	35
I.2 L'ALEA SECHERESSE.....	42
2.1 GENERALITES SUR LA SECHERESSE.....	42
2.2 LES INDICES DE SECHERESSE	44
2.3 LES PERIODES DE SECHERESSE RETENUES.....	47
I.3 LE RISQUE SECHERESSE GEOTECHNIQUE	49
3.1 LA SUSCEPTIBILITE DU SOL AU RGA	50
3.2 LES FACTEURS INTERVENANTS	64
I.4 CONCLUSIONS.....	72

La sécheresse géotechnique, plus souvent connu par l'appellation « retrait gonflement des argiles » RGA, est la terminologie utilisée dans la littérature scientifique, le terme étant employé et défini pour la première fois par (Cojean, 2007) dans une introduction de la revue française géotechnique en 2007. Il s'agit d'un risque naturel en milieu urbain qui est souvent confondu et associé avec les événements de sécheresse. Il n'est pas explicitement cité en tant que tel dans le 4^{ème} rapport du GIEC (GIEC, 2007) et qui apparaît sous le nom de « sécheresse 2003 » dans le rapport d'information du sénat (Frécon et Keller, 2009) ou « Retrait gonflement des argiles » dans les arrêtés de catastrophe naturelle publiés au journal officiel de la République Française entre 1989 à nos jours. Une définition simple et grand public de la sécheresse géotechnique serait « un phénomène de mouvement de terrain consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols argileux, entraînant des dommages au bâti ».

Si la géotechnique se définit comme la science qui se préoccupe des interactions d'un sol et d'un construit, route, bâtiment ou ouvrage d'art (Magnan, 2002), et la sécheresse comme un état de déficit hydrique par rapport à des normales saisonnières, le terme

sécheresse géotechnique désigne un risque naturel déclenché par l'aléa sécheresse, et qui a pour conséquence une modification des propriétés physiques du sol entraînant des mouvements de terrain de subsidence et de retrait-gonflement. Ce risque est déclenché par un événement de sécheresse qui selon la durée et l'intensité de cet aléa va déplacer les sols hors de leur état d'équilibre d'humidité : le mouvement de retrait gonflement est lié au cycle saisonnier printemps/été et automne/hiver en se manifestant généralement par un retrait en saison estivale et une expansion/gonflement avec le retour de l'humidité, mais une sécheresse géotechnique peut être observée lors d'un événement sec hors saison. La sécheresse géotechnique dépend donc d'intensité de l'aléa climatique, de la sensibilité des premiers mètres du sol au retrait-gonflement et de la vulnérabilité du bâti au mouvement de retrait gonflement.

La tranche la plus superficielle du sol, sur un à deux mètres de profondeur, est alors soumise à l'évaporation. Il en résulte un tassement vertical et l'ouverture de fissures horizontales. L'ordre de grandeur de l'amplitude des mouvements à la verticale est d'ordre centimétrique, selon la charge exercée par les bâtiments sur le sol. L'ouverture de fente de dessiccation fait apparaître des fissures profondes également centimétriques. Une couche argileuse saturée de un mètre d'épaisseur et dont la teneur en eau baisserait globalement de 10%, subirait un tassement de 5 centimètres (Barbier, 2004).

Les mouvements de retrait peuvent intervenir sur différents types de sol tandis que les mouvements de retrait gonflement caractérisent des sols composés de matériaux argileux à propriétés gonflantes : les argiles gonflantes voient en effet leurs volumes varier avec leur teneur en eau, jusqu'à 100% pour les argiles les plus sensibles (Montmorillonites), occasionnant des dommages sur les constructions insuffisamment fondées ou mal conçues selon les règles de l'art. Les règles de construction préconisées dans les Documents Techniques Unifiés (D.T.U.) permettent de concevoir des ouvrages suffisamment rigides afin de résister aux mouvements verticaux. Cependant un ouvrage soumis à un effet de tassement différentiel, même avec le respect de ces règles, risque d'être endommagé à cause des effets cycliques de retrait et de gonflement des sols argileux.

L'objet de ce chapitre est de préciser les connaissances actuelles sur les processus et les facteurs de prédisposition de la sécheresse géotechnique et de cerner les informations utiles à l'analyse de ce risque naturel par télédétection radar. Cet état de l'art rappelle les définitions usuelles des différents aspects de la problématique RGA d'un point de vue risque, aléa et vulnérabilité.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : une première section (I.1) est consacrée à la définition du phénomène physique du retrait gonflement, en détaillant la nature minéralogique des argiles ainsi que les méthodes géotechniques permettant de caractériser les sols argileux sensibles au phénomène retrait gonflement. La seconde section (I.2) est consacrée à l'aléa climatique et au risque sécheresse géotechnique. Quelles sont les différentes définitions de la sécheresse ? Quels sont les indices climatiques et principaux modèles utilisés pour la caractériser ? La troisième et dernière section (I.3) précise les autres

facteurs intervenant dans la problématique de la sécheresse géotechnique à savoir la susceptibilité du sol sub-affleurant en France, la vulnérabilité des bâtiments, l'influence de la végétation et les moyens de prévention.

I.1 Le Retrait Gonflement des Argiles

Cette partie est consacrée à l'état de l'art sur le phénomène de retrait de gonflement des argiles. Après avoir rappelé (I.1.1) la définition du phénomène RGA, on précisera (I.1.2) les méthodes géotechniques et les essais en laboratoire de mécanique des sols pour le caractériser. Enfin en (I.1.3), une synthèse descriptive en terme d'aléa/risque/vulnérabilité montre les facteurs exacerbant le phénomène de RGA à prendre en compte dans l'étude des mouvements urbains par télédétection.

1.1 Le phénomène RGA

La majorité des sols argileux est sensible au phénomène de retrait gonflement car les argiles réagissent chimiquement et physiquement en fonction du milieu, mais cette sensibilité au gonflement varie selon les proportions et les variétés minéralogiques des argiles en présence. Les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols argileux sont contrôlées à la fois par leur minéralogie, l'arrangement microstructural des particules argileuses et non argileuses au sein du sol, et par les interactions eau-solide. Pour bien comprendre les interactions physico-chimiques existant entre l'eau et les minéraux argileux, il faut auparavant considérer les différentes échelles structurales des argiles du feuillet, à la particule (assemblage de feuillet) et jusqu'à l'agrégat (assemblage de particules argileuses) (Millot, 1964, Tessier *et al.*, 2006, Makki, 2009).

Après avoir rappelée (I.1.1) la définition du phénomène RGA, nous détaillerons l'origine des argiles (I.1.2), la nature minéralogique des argiles et leur structure (I.1.3), la microstructure d'un sol argileux (I.1.4) et l'interaction entre l'eau et l'argile (I.1.5).

1.1.1. Définitions et origines des argiles

Définitions

Une première définition simple de la consistance d'un matériau argileux donnée par Caillere *et al.*, 1989 : « Le phénomène de retrait gonflement des sols est lié à la consistance du matériau argileux qui varie selon sa teneur en eau : il est dur et cassant lorsqu'il est desséché, plastique et malléable à partir d'un certain degré d'humidité ».

Une définition plus complète du phénomène RGA est donnée par Cojean, 2007 qui tient compte de la complexité d'un sol détritique et de son passé : « Les processus de retrait gonflement des sols argileux, générateurs de tassements différentiels et de dommages au bâti, trouvent leur origine dans des facteurs de prédisposition relatifs à la composition minéralogique et la texture des sols concernés. Ces facteurs résultent de l'histoire géologique des sols argileux – sédimentation, diagenèse, altération – et des sollicitations hydriques, thermiques et mécaniques correspondantes, passées et actuelles [...], (Cojean, 2007) »

Origines et formations des argiles

L'origine des argiles résulte principalement de l'altération des roches, qui peuvent soit rester sur place (argiles résiduelles à silex, argiles de décalcification) soit être transportées sur de longues distances (argiles des fonds océaniques). En fonction des roches mères, du climat et du relief qui détermine le degré de confinement ou de drainage, les minéraux argileux résultant sont différents (Figure 1).

En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les smectites en milieu confiné. En climat tempéré, humide, l'altération est modérée, il apparaît des interstratifiés, des illites et chlorites dégradées, de la vermiculite.

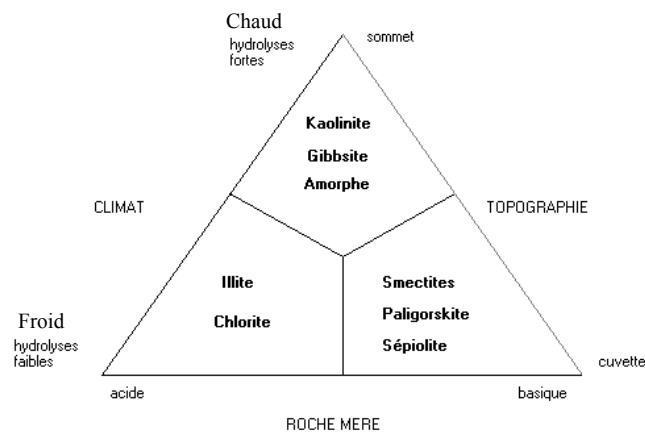


Figure 1 : Minéraux argileux résultant selon les principaux facteurs de l'altération : climat, roche-mère et topographie (Beauchamp, 2002).

Les argiles peuvent également être néoformées en milieux confinés. Les argiles fibreuses se forment dans des croûtes calcaires, dans des zones à climat à saison sèche marquée, dans des milieux évaporitiques sur salés (néoformation de sépiolite par concentration des ions par évaporation). Certains minéraux argileux se forment en dehors des sols à partir des ions en solution (glauconie, ou illite ferrique, dans les vases littorales, les argiles rouges des grands fonds, smectites ferriques provenant des vases calcaires et siliceuses et des cendres volcaniques). (Tessier *et al.*, 2006)

Les minéraux argileux subissent des transformations physico-chimiques selon les conditions des sols dans lesquels ils sont incorporés. Les minéraux néoformés ou hérités peuvent évoluer pour prendre un nouveau statut en équilibre avec le nouveau milieu. On distingue les transformations par dégradation (soustraction d'ions) et par aggradation (par fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que de la diagénèse (Kaolinite en Chlorite, Smectites en Illite). (Tessier *et al.*, 2006).

En Europe, sous un climat tempéré et humide, avec des températures moyennes de 15° et des précipitations comprises entre 500 et 1000mm par an, l'altération chimique est significative. Un sol qui se développe sur 10 à 150 cm, présente des argiles secondaires qui sont de type 2/1, résultant d'une pseudo-bisiallisation en climat tempéré (vermiculites) ou d'une bisiallisation (smectites) si la température est plus élevée et le contraste saisonnier plus important (Allen, 1997) : donc il s'établit un équilibre entre la chimie des argiles et le sol, toutes modifications brusques et importantes des conditions de ce dernier induit des modifications minéralogique de l'argile et donc de sa stabilité.

1.1.2. La minéralogie des argiles (structure des minéraux)

Nous rappelons ici des notions élémentaires sur la structure des minéraux argileux, synthèse réalisée à partir des travaux de Cojean *et al.*, (2009), Tessier *et al.* (2006), Yigzaw (2009) qu'il est recommandé de consulter pour plus d'informations.

Les argiles appartiennent à la famille des alumino-silicates plus ou moins hydratés, les phyllosilicates (du grec phylos, feuillet) qui possèdent une texture lamellaire ou fibreuse. Ces minéraux sont constitués feuillets bidimensionnels. Un feuillet élémentaire est constitué de l'assemblage de couches de type octaédrique ou tétraédrique selon la nature de l'unité de base qui forme la couche (Figure 2). La couche tétraédrique (T) est constituée d'une combinaison régulière de particules tétraédrique SiO_4 . La couche octaédrique (O) est quand à elle constituée d'une combinaison régulière d'octaèdre disposé en assemblage hexagonal compact.

La majorité des minéraux argileux appartient à la famille des phyllosilicates de type TO ou 2:1 (deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique). Certains d'entre eux, telle que la montmorillonite, présentent des liaisons faibles entre feuillets, ce qui permet l'acquisition ou le départ de molécules d'eau.

A l'échelle microscopique, les phyllosilicates sont constitués de particules dont l'unité de base est un tétraèdre de silicates (SiO_4) et d'aluminates (Al_2O_3), éléments qui s'agencent en feuillets résultant d'un assemblage entre lesquels viennent s'interposer des molécules d'eau. Cette organisation explique l'affinité avec l'eau de par leur importante surface spécifique et de par leur capacité d'échange de cations (CEC). Le processus d'hydratation et de dessiccation sont réversibles : l'hydratation des cations situés à la surface des feuillets provoque leur éloignement, ce qui se traduit par une augmentation du volume du minéral,

c'est le phénomène de gonflement interfoliaire. Le gonflement est lié au phénomène d'adsorption d'eau sur les sites hydrophiles de l'argile. A l'inverse, un départ d'eau entraîne une diminution du volume du minéral.

Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment préférentiellement dans les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (la montmorillonite, la beidellite, la nontronite, la saponite, l'hectorite, la sauconite...) et dans une moindre mesure au groupe des interstratifiés caractérisé par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes, par exemple illite – montmorillonite (d'après Plat et *al.*, 2007).

Il existe différentes classifications des argiles selon le type et l'épaisseur des feuillets, la charge et la nature des espaces interfoliaires : la plus classique est basée sur la structure du feuillet (Jozja, 2003) avec quatre groupes de minéraux. (1) Pour les minéraux à 7 Å, le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1. (2) Les minéraux à 10 Å ; le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1, (3) Les minéraux à 14 Å ; le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires, enfin (4) Les minéraux interstratifiés ; l'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

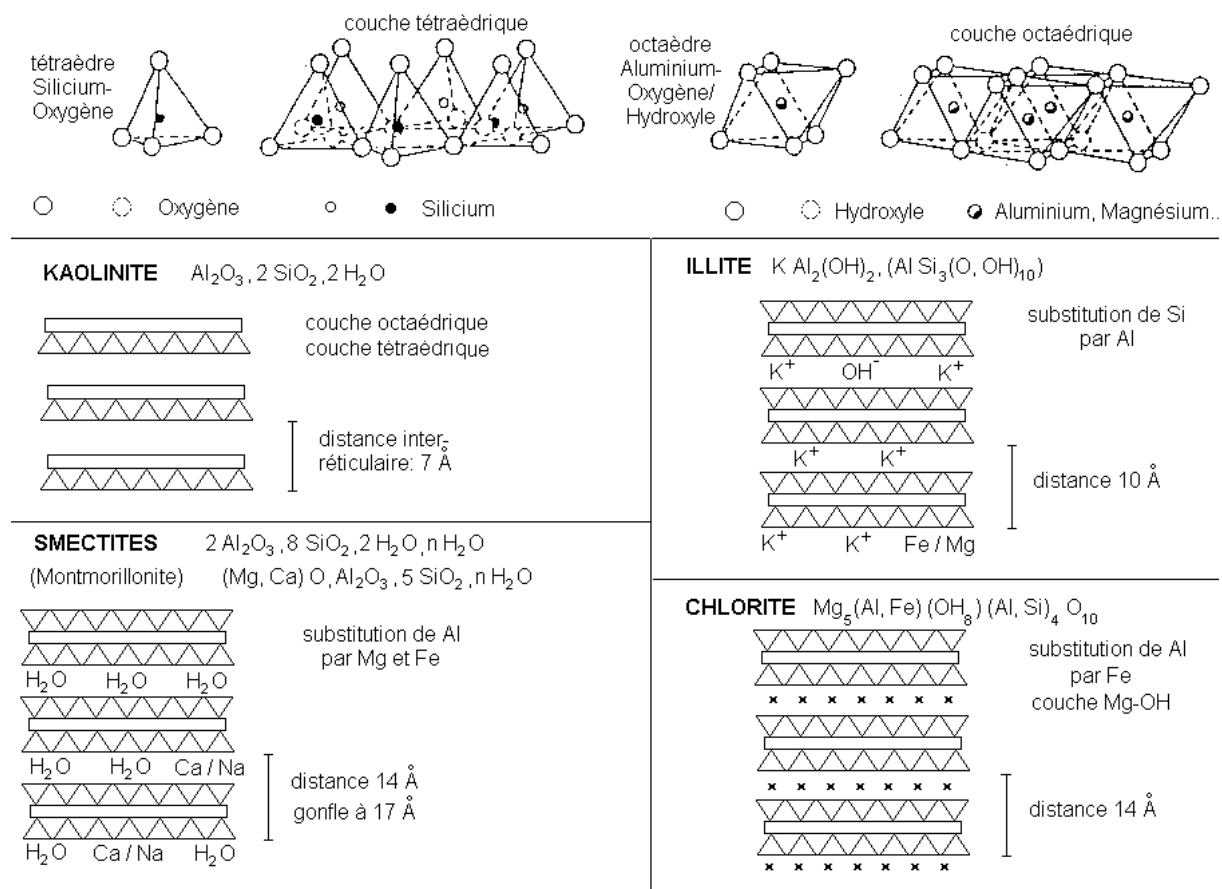


Figure 2 : Structure minéralogiques des quatre familles d'argiles (Yigzaw, 2009)

Cette classification permet de définir cinq familles d'argiles avec leurs noms usuels (d'après Yigzaw, 2009) :

La famille des kaolinites : la kaolinite fait partie de la famille des T:O ou 1:1. Chaque feuillet est constitué d'une couche octaèdre et tétraèdre qui s'empilent successivement par des liaisons hydrogènes et des forces de Van der Waals défavorable à la pénétration de molécule d'eau. Ces empilements forment des plaquettes rigides appelé les cristallites (Tessier, 1984) de quelques centaines de nm de long et de quelque dizaine de nm d'épaisseur.

La famille des smectites : les smectites sont composés de trois couches, une octaédrique entouré par deux couches tétraédriques, de la famille T-O-T ou 2:1. Des substitutions isomorphiques (même morphologie) conduisent à des déficits de charge compensés par des cations hydratables compensateurs dans l'espace interfoliaire par des liaisons de Van der Waals. Ce type de liaison à faible énergie permet aux molécules d'eau de se fixer dans l'espace interfoliaire.

La famille des illites : les illites sont composés de trois couches, une octaédrique entouré par deux couches tétraédriques, de la famille T-O-T ou 2:1 comme celle des smectites. Les cations hydratables compensateurs dans l'espace interfoliaire sont des ions K^+ qui rendent les liaisons très fortes entre feuillet. Les feuillets d'illite s'empilent donc solidement les uns aux autres pour former des plaquettes non expansibles dans l'eau.

La famille des chlorites : la famille des chlorites possède une structure de type TOT-O. Les feuillets élémentaires TOT ont des espaces interfoliaires à liaison hydroxyle permettant un assemblage avec une couche octaédrique supplémentaire très stable.

La famille des interstratifiés : cette famille d'argile résulte de l'empilement de feuillets ou de paquets de feuillets appartenant à des familles différentes comme par exemple l'illite-smectite.

Le comportement des différentes argiles est conditionné d'une part par leurs propriétés intrinsèques telles que la localisation et la densité de charge, la taille et la surface spécifique des particules, le type et la charge de cations compensateurs ; et d'autres part par les conditions environnantes telles que le type et la concentration de l'électrolyte, la température etc... (Tessier, 1984 ; Qi, 1996 ; Durand et *al.*, 1995 ; Van Damme, 2002). Le Tableau 1 donne les propriétés intrinsèques des Kaolinite, Illite et Smectite. Un rappel simple des définitions des propriétés utilisées en géotechnique y est donné ci-dessous. A gauche, on placé la kaolinite et l'illite qui sont considéré comme des minéraux peu gonflants, et à droite la famille smectique, minéral argileux gonflant (selon Velde, 1995). Ce tableau montre que pour des diamètres et épaisseurs équivalentes de particules argileuses, la famille des smectites a une surface spécifique 10 fois à 70 fois plus importante que la famille des kaolinites et des illites et donc une capacité d'échange cationique bien plus élevée. Le fort potentiel de gonflement des smectites se traduit par une limite de plasticité, une limite de liquidité et d'activité élevée (Giroud et Bottero, 1972).

	Kaolinite	Illite	Smectite	Source
Charge (meq/100g)	5 - 15	20 - 40	80 - 100	Yong et Warkentin, 1975
Surface spécifique ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)	10 - 20	65 - 100	700 - 840	Mitchell, 1993
CEC (meq/100g)	3 - 15	10 - 40	80 - 150	Mitchell, 1993
Diamètre d'une particule (μm)	0,1 - 10	0,1 - 1	0,1	Bultel, 2001
Epaisseur particule (μm)	1 - 10	0,003-0,01	0,001	Bultel, 2001
Masse Volumique	2,60 - 2,68	2,60 - 3,00	2,35 - 2,70	Mitchell, 1993
Limite de Liquidité (%)	30 - 75	60 - 90	100 - 1000	Giroud et Bottero, 1972
Limite de plasticité (%)	20 - 40	25 - 60	50 - 100	Giroud et Bottero, 1972
Activité	0,01 - 0,4	0,25 - 0,9	0,57 - 7	Giroud et Bottero, 1972

Tableau 1 : Caractéristique physico-chimique de trois familles de minéraux argileux (Velde, 1995).

Légende :

Charge électrique (mesuré en meq/100g) : Les feuillets ne sont pas électriquement neutres. Une nette charge négative à la surface du feuillet (Sharma, 1998) résulte de la distribution des cations à l'intérieur du feuillet et celle des anions (oxygène et hydroxyle) à l'extérieur. Les substitutions isomorphiques entraînent des déficits de charges qui augment d'autant la charge négative du feuillet. Un feuillet peut être schématisé comme un objet chargé négativement sur la surface et positivement sur les bords.

La surface spécifique ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$) : La surface spécifique des argiles est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. La forme des particules argileuses leur confère une grande capacité spécifique, beaucoup plus importante que tous les autres minéraux, donc une capacité d'adsorption des molécules d'eau et d'ions très élevée (Komornik et David, 1969). Plus la surface spécifique est élevée moins la densité de charges est forte, et par conséquent plus le potentiel de gonflement est élevé. C'est le cas des argiles qui ont une surface spécifique très élevée et donc sont très gonflantes. La présence d'autres minéraux non argileux réduit proportionnellement la surface spécifique totale développée, qui sera donc inférieure à celle d'une argile pure.

La capacité d'échange cationique ou CEC (meq/100g) : La capacité d'échange cationique (CEC) mesure la capacité à échanger des cations qui est liée à la charge négative du feuillet. Elle est définie comme étant le nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs d'un silicate pour compenser la charge électrique de 100g de ce minéral calciné.

Limite de Liquidité : La limite de liquidité est la teneur en eau en % qui correspond à une fermeture en 25 chocs, chocs que l'on fait subir à une coupelle contenant le sol mélangé à une quantité d'eau sous forme de pâte. La pâte obtenue est placée dans une coupelle de 100 mm de diamètre environ. On trace sur la pâte lissée une rainure normalisée avec un outil spécial. A l'aide d'une came, on réalise les chocs et on observe en fin d'expérience le contact des deux lèvres de la rainure.

Limite de plasticité : Indice qui mesure la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. On l'obtient en mélangeant un échantillon avec des quantités variables d'eau qu'on façonne avec une pâte sous forme de rouleau de 3 mm de diamètre pour une centaine de mm de longueur. La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm. (Collectif, 1974 ; Merrien-Soukatchoff, 2007)

Activité : L'indice de plasticité en fonction de la teneur en argile forme une droite dont la pente est appelée activité. L'activité est caractéristique pour un minéral donné et il est mesurable lorsque l'échantillon contient une fraction fine du même minérale (Costet et Sanglerat, 1981).

Espèce argileuse	Cation dominant	e.b.glycolées	e.b. sèches
<i>Minéraux gonflants</i>			
Smectite			
Beidellite	Al	17	10
Montmorillonite	Al (Mg, Fe ²⁺ mineur)	17	10
Nontronite	Fe ³⁺	17	10
Saponite	Mg, Al	17	10
Vermiculite	Mg, Al	15,5	10-12
Mixed layer minerals	Mg, Fe ²⁺ , Al (Fe ³⁺ minor)	10-17	<10
<i>Minéraux non gonflants</i>			
Illite	K, Al (Fe, Mg minor)	10	
Glauconite	K, Fe ²⁺ , Fe ³⁺	10	
Celadonite	K, Fe ²⁺ , Mg, Fe ³⁺ , Al ³⁺	10	
Chlorite	Mg, Fe, Al	14	
Berthièrite	Fe ²⁺ , Al ³⁺ (minor Mg)	7	
Kaolinite	Al	7	
Halloysite	Al	10,2	
Sepiolite	Mg, Al	12,4	
Palygorskite	Mg, Al	10,5	
Talc	Mg, Fe ²⁺	9,6	

Tableau 2 : Classification des argiles selon leurs propriétés de gonflement : l'espèce argileuse, le cation dominant, l'espace basal (en Angstrom) en conditions glycolées et sèches (d'après Velde, 1995).

Le Tableau 2 donne les cations dominants pour chaque type de minérale. Ces différentes variétés de cations interchangeables sont liées aux substitutions isomorphiques au sein des tétraèdres et octaèdres de l'atome Si⁴⁺ par Al³⁺, Fe²⁺, et Al³⁺ par Mg²⁺ à la surface des feuillets qui entraînent un déficit de charge au sein des feuillets et déterminent les liaisons interfeuillets. Les forces de liaison sont principalement dues aux forces d'attractions de Van der Waals des liaisons faibles, aux liaisons hydrogènes qui se forment en présence d'atome fortement électronégatifs, aux substitutions isomorphes qui résultent du remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallins par d'autres de valence différente.

L'électroneutralité est alors préservée par la fixation de certain cation (Ca²⁺ ou Na⁺) appelé cation interchangeable qui influence le gonflement et la texture des argiles. A titre d'exemple la valence de l'ion sodium Na⁺ étant plus faible que l'ion calcium Ca²⁺, les montmorillonites sodiques auront une plus grande surface spécifique pour la fixation de molécule d'eau et de cations que les montmorillonites calciques. Ce tableau montre que les minéraux argileux les plus sensibles au retrait gonflement sont ceux qui ont un cation dominant trivalent de type Al ou Fe³⁺.

1.1.3. De la microstructure à la macrostructure des sols argileux

Nous avons détaillé au paragraphe précédent la structure minéralogique des feuillets argileux responsables du phénomène RGA, il est cependant rare de trouver dans la nature ces matériaux argileux à l'état pur. De plus, le gonflement d'une roche argileuse dépendra non seulement de la minéralogie des constituants argileux, mais aussi de la texture (Bauer-Plaîndoux et al., 1998) et de l'agencement de ces minéraux parmi les autres constituants de la roche. Ainsi, une roche argileuse dont l'argile gonflante est le principal constituant peut ne pas présenter de gonflement macroscopique (Gaombalet, 2004). En effet, les particules argileuses forment avec les autres particules du sol une microstructure qu'il est important de prendre en compte pour caractériser le potentiel de retrait gonflement : un sol argileux qui présente une organisation des particules d'argiles serrée et orientée n'a pas la même aptitude au gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation est rapide et récente (absence de compaction et d'orientation). Il est donc nécessaire de rappeler l'importance de la microstructure et de la macrotexture des sols argileux.

La microstructure des sols argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. L'organisation des particules d'argiles en association avec des éléments non argileux définit la texture d'un sol. Cette organisation des minéraux argileux est la source d'une des principales causes du gonflement anisotrope. Nous présentons succinctement la microstructure des sols argileux extraits des travaux bibliographiques (Benchabane, 2004 et Yigzaw, 2009).

Différents auteurs ont mis en évidence trois niveaux d'organisation dans les systèmes argileux, nous avons repris sur la Figure 3 la présentation des différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation proposée par Le Pluart et al. (2004). Nous présentons donc dans cette partie les trois différents "objets" caractéristiques de cette structure multi-échelle des montmorillonites (Benchabane, 2006).

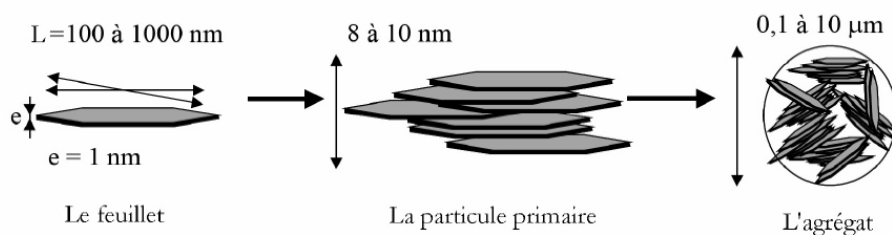


Figure 3 : Structure multi échelle de la montmorillonite (d'après Le Pluart et al., 2004)

D'après Tessier D. (1984), la constitution des argiles comprend plusieurs niveaux superposés : (1) Les feuillets constitués des minéraux décrit précédemment, (2) la particule primaire qui est l'empilement des feuillets, (3) l'agrégat ou l'unité morphologique et les associations de ces unités morphologiques :

(1) Les feuillets sont les unités structurales de base définissant la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique. Le feuillet représente la répétition horizontale de la demi-maille dans les directions x et y. Il est assimilable à un disque ou à une plaquette, possédant

des dimensions latérales de l'ordre du micron, et faisant à peu près un nanomètre d'épaisseur. Ces plaquettes sont considérées comme souples et relativement déformables.

L'anisotropie des feuillets est donc très importante, environ d'un facteur 10^3 entre la longueur et épaisseur. Dans la famille des smectites, la charge d'un feuillet varie de 0,2 à 0,6 électron par maille, selon la localisation des substitutions et le taux d'occupation des couches octaédriques. La montmorillonite possède environ 0,3 à 0,4 électron par maille (Le Pluart, 2002). Comme nous l'avons dit plus haut, les cations compensateurs à la surface des feuillets de montmorillonite sont généralement des ions calcium ou sodium. On emploie généralement les termes de montmorillonite "calcique" et de montmorillonite "sodique" pour faire référence à la nature de ces cations (REF).

(2) La particule primaire. Les particules constituent le premier niveau d'organisation des argiles. Elles sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques parallèlement à leur plan de base. Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que celles existant au sein du feuillet. Si on considère les principales espèces minéralogiques, la structure de la particule observée dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets peut se présenter suivant trois grands types d'empilements : (i) Empilement ordonné où les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait. C'est le cas des phyllosilicates dont l'espace interfoliaire est vide ou anhydre (plutôt pour les kaolinites ou illites). (ii) Empilement semi-ordonné (ou désordre translationnel). Dans ce cas, les feuillets successifs présentent des translations "semi-définies". Ils sont séparés par quelques molécules d'eau, l'épaisseur de la particule est variable et dépend du degré d'hydratation. Ils peuvent glisser latéralement les uns sur les autres. (iii) Empilement désordonné (ou désordre turbostratique). Dans ce cas, des feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations quelconques dans tout l'édifice. Les feuillets sont séparés par un film d'eau permettant une libre rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule (Pons, 1980 ; Pédro, 1994).

(3) L'agrégat. C'est un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions. Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns comme il est montré sur la Figure 3, (d'après Le Pluart, 2002). Il s'agit d'un assemblage de particules dont l'arrangement est gouverné par le type de forces résultant des interactions entre particules et du degré de compaction. En effet, lorsque les forces répulsives sont dominantes, les particules s'orientent parallèlement et la structure est dite dispersée. Ces particules s'assemblent au sein d'agrégats, plus au moins denses selon la texture et le nombre des particules, ainsi que les distances entre celles-ci. Tessier (1975), en prenant pour référence les données de Mering et Oberlin (1971) et de Van Olphen (1963), portant sur les minéraux expansibles, a proposé une nomenclature pour nommer les différents modes d'association des particules (détaillés plus loin) : l'agrégat constitué de plusieurs particules primaires a été nommé unité morphologique ; le dernier niveau d'organisation est constitué par les super-agrégats, où se regroupent les agrégats. Selon la quantité d'eau présente au sein du système et la nature de l'argile considérée, l'organisation sera plus ou moins variée. Il en résulte différents types de structuration comme, par exemple, dans le cas de la montmorillonite, qui possède des unités morphologiques très déformables. Ces déformations sont probablement plus aisées que dans les autres phyllosilicates, même si

elles sont relativement limitées du fait que les particules possèdent une certaine rigidité (Luckham et Rossi, 1999 ; Jozja, 2003).

La définition des différents niveaux d'organisation permet de préciser le comportement mécanique des argiles mais il est nécessaire de préciser les différents types de texture/structures pour les décrire. Nous donnons ici la classification de Le Roux (1975), à réalisée à partir de l'observation d'une marne au Microscope Electronique à Balayage trois classes principales de textures : (1) Une texture homogène : tout les minéraux sont intimement mélangés et ou aucune direction n'est privilégiée, avec des sous classes. Homogène à dominante argileuse ou à dominante carbonatée, et homogène compacte ou lâche suivant la compacité et la continuité. (2) Une texture orientée : une direction est privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains, en particulier des phyllites. (3) Texture floconneuse ou microagrégat : ou la phase argileuse se présente sous forme de flocons grossièrement sphériques, soit seul, soit associé aux carbonates. Lorsque la dimension des flocons devient plus importante de l'ordre de 100µm on passe à une structure de type micro agrégat.

A l'échelle macroscopique, la texture des sols argileux et leurs caractéristiques géométriques du milieu poreux, contrôlant la plus grande facilité des molécules d'eau aux sites d'absorption représentés principalement par les minéraux argileux et les colloïdes. Les facteurs intervenant dans l'accès de l'eau à ces particules argileuses : la présence d'autres minéraux et leur disposition pouvant contrarier les accès des molécules d'eau au site d'absorption. La densité initiale des matériaux, qui détermine la capacité du matériau à exercer des pressions de gonflement. La teneur en eau initiale détermine l'état du matériau argileux et donc sa capacité à perdre ou gagner en volume (Cojean, 2007).

Les micro-agrégats de feuillets s'organisent en assemblages plus ou moins anisotropes et cohérents, en fonction de la forme des particules élémentaires qui les composent, et en fonction de la force des liaisons entre particules. Ces dernières sont assurées par des molécules d'eau intercalées. Ce mode d'assemblage, qui définit la texture du « sol argileux » dépend de la nature minéralogique des argiles, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation du matériau. En particulier, une argile de type vaseuse ne présentera pas la même texture – et donc pas la même cohésion – qu'une argile surconsolidée, par exemple à la suite d'un enfouissement à grande profondeur. À cette échelle, la variation de teneur en eau dans le sol se traduit également par des variations de volume du matériau. On parle alors de gonflement interparticulaire. Ce phénomène affecte toutes les argiles, mais son amplitude est nettement plus faible que le gonflement interfoliaire (qui n'affecte que certaines argiles). Les sols argileux se caractérisent donc par une grande influence de la teneur en eau sur leur comportement mécanique (Plat et al., 2007).

Enfin, à l'échelle de la formation géologique, la structure géologique contrôle l'accès de l'eau aux zones d'absorption : des microfissures, des hétérogénéités silteuses, la bioturbation ou l'infiltration des racines permettant de créer un complexe organique colloïdale, l'humus. Il faut donc distinguer ce qui est facteur environnant et ce qui résulte des propriétés minéralogiques intrinsèques des argiles. Avoir les deux points de vu permet de

mieux appréhender le véritable potentiel de retrait gonflement réel d'un sol en équilibre naturel avec son environnement. En effet, les mesures réalisées en laboratoire n'évaluent que les seules propriétés minéralogiques par des essais mécaniques sur échantillons hors environnement, résultats qui peuvent différer avec le réel potentiel du sol avec son environnement géologique et pédologique.

1.1.4. Interaction eau-argiles

La partie précédente a établi l'organisation de l'argile de la particule aux échelles microscopique et macroscopique sans cependant toutefois préciser les relations existantes entre l'argile et l'eau. Or c'est la quantité d'eau qui rentre et sort des matériaux argileux qui définit le potentiel de retrait gonflement. L'interaction eau-argiles est toujours un sujet de recherche en voie d'approfondissement tant les paramètres à prendre en compte sont complexes : selon Tessier (1978), la rétention d'eau par les argiles dépend, entre autres facteurs, de l'énergie d'hydratation des cations compensateurs, de la taille des particules et de celles des agrégats, mais aussi des différents types de porosité du matériau. Ce qui signifie que les mécanismes d'hydratation et de déshydratation d'un matériau argileux dépendent des interactions eau/argiles selon les différentes échelles énumérées ci-avant, de la minéralogie de la particule jusqu'à l'agrégat argileux à l'échelle macroscopique.

On distingue trois types d'interaction eau/argile ou processus d'hydratation (1) l'hydratation par adsorption, (2) capillarité et (3) osmose :

(1) L'hydratation par adsorption : les minéraux argileux adsorbent l'eau sur leur surface libre. Ce phénomène est dû à l'existence de déficit de charge et à la présence de sites actifs sur les particules argileuses. Les dimensions des feuillets et celles des particules formées jouent un rôle important dans l'adsorption : l'hydratation peut avoir lieu sur la totalité de la surface des particules argileuses que si les molécules sont en mesure de pénétrer dans les vides ménagés dans la structure (feuillet, plaquette, agrégat, voir partie précédente). Dans certains cas l'eau ne peut accéder au espace interfoliaire (illite, kaolinite), donc seulement aux espaces inter-agrégats ou interparticulaire. Les smectites ont une surface accessible à l'eau beaucoup plus élevée et retiennent davantage d'eau par adsorption. Mitchell (1993) a proposé les mécanismes susceptibles d'expliquer le phénomène d'adsorption : (a) les liaisons hydrogènes qui se développent entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène ou les hydroxydes situés sur la surface du feuillet argileux, (b) l'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés électriquement par les feuillets argileux chargés négativement, (c) les molécules d'eau liées à la surface argileuse par des forces de type Van der Waals.

(2) L'hydratation par capillarité : l'eau capillaire est une eau adsorbée retenue sur les sites hydrophiles, à partir de transferts en phase vapeur, par condensation aux points de contact entre particules et agrégats (Prost, 1990). L'hydratation par capillarité s'effectue tout d'abord au point de contact entre particules et ensuite par le remplissage des pores.

(3) L'hydratation par osmose : l'attraction osmotique est créée par un différentiel de concentration de cations entre la solution et au voisinage des feuillets selon le modèle de la double couche diffuse de Gouy-Chapman-Stern (Gouy, 1910, Gouy et Chapman, 1913, Stern, 1924). Si la concentration de la solution est inférieure à celle de l'espace interfoliaire, une migration des molécules d'eau s'effectue de la solution vers les particules argileuses pour établir un équilibre de concentration de cations de part et d'autre.

Le mécanisme par adsorption qui est fonction de la surface libre des particules argiles et reflète la nature minéralogique de l'argile est le processus dominant. Ainsi dans les conditions les plus favorables, chaque particule d'argile serait entourée d'une double couche diffuse d'eau dont l'épaisseur est du même ordre ou même plus grande que les dimensions de 0.01 à 0.3 μ m de la plaquette d'argile. L'hydratation par capillarité concerne la matrice du sol, selon les relations existantes entre les agrégats argileux et les autres particules du sol. Enfin le dernier mécanisme est plus anecdotique dans la problématique du RGA, l'eau libre étant chargé électriquement avec le sol.

A l'échelle minéralogique, c'est la nature des forces des liens unissant les feuillets d'argiles qui autorisent ou non l'arrivée d'eau dans l'espace interfoliaire. Chez certaines argiles telle que la kaolinite ou l'illite, l'eau ne peut s'engager entre les feuillets, ces argiles minéralogiques sont donc faiblement gonflantes. En revanche, dans les smectites, qui font partie des argiles dites « gonflantes », la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace interfeuille peut s'hydrater. Les feuillets s'écartent, et la liaison entre deux feuillets parallèles doit alors être assurée différemment. Il en résulte une réorganisation complète de la matrice solide (Tessier, 1978). Si l'amplitude du gonflement dépend de l'état initial, la prise d'eau peut être telle que **le matériau voit son volume multiplié par vingt**.

Enfin toujours à l'échelle minéralogique, l'interaction eau-argile dépend des ions présents dans l'eau. Les cations présents en solution sont attirés vers les surfaces des feuillets d'argiles chargées négativement ; ils sont par ailleurs repoussés de ces surfaces par la force osmotique qui tend à uniformiser la concentration en cations dans la solution. Il résulte de ces deux effets opposés une certaine distribution des cations au voisinage des feuillets. De même, les anions, qui sont repoussés électrostatiquement par les feuillets, mais repoussés vers ceux-ci par osmose, ont une distribution spatiale particulière au voisinage des feuillets. Il en résulte que la distribution des ions dans l'espace interfoliaire est en général différente de celle dans les gros pores, ce qui se traduit par une différence entre les pressions osmotiques « internes » et « externes » aux particules, et donc par des forces exercées sur les feuillets et qui tendent à les écarter.

Nous avons vu dans la partie précédente que les mécanismes microscopiques expliquant le phénomène de gonflement-retrait, observé pour certaines argiles, sont d'origine physico-chimique. Du point de vue macroscopique, ce phénomène est lié à la prise ou au départ d'eau (c'est-à-dire la variation de la teneur en eau). Les argiles sont ainsi souvent qualifiées de roches hydrophiles, mais on ne sait pas forcément affirmer si c'est l'arrivée d'eau qui provoque le gonflement, ou bien si c'est le gonflement qui permet l'arrivée d'eau

(Barbour et al. 1989). Deux phénomènes coexistent : soit l'eau est susceptible de s'introduire dans un échantillon d'argile sous l'effet de gradients osmotiques ; l'arrivée d'eau induit une augmentation de volume, soit l'arrivée d'eau provoque une évolution de la solution interstitielle (en terme de concentration des différents solutés), et influe sur l'interaction eau-argile expliquée plus haut dans un sens qui provoque l'écartement des feuillets et donc le gonflement, l'eau s'engouffrant dans l'espace ainsi créé.

1.2 Caractérisation du retrait gonflement

Il existe deux familles de méthodes de caractérisation du phénomène de retrait gonflement des sols : les méthodes indirectes inspirées des essais d'indentification géotechnique et les méthodes qui caractérisent le retrait gonflement par des essais mécaniques en laboratoire. Ces méthodes fournissent des paramètres macroscopiques applicables au dimensionnement des ouvrages de génie civil et permettent d'établir une classification des sols par sensibilité au RGA. Ces méthodes sont trop nombreuses et complexe pour être présenter en détails dans ce présent ouvrage. Nous les citons pour mémoire avec les références majeures qu'il est recommandé de consulter pour plus de détails.

1.2.1. Essais géotechniques

L'identification des sols gonflants peut s'effectuer à l'échelle microscopique mais cette reconnaissance est très coûteuse et n'informe pas quantitativement sur les paramètres du retrait-gonflement.

Une identification à partir des résultats d'essais simples, peut présenter un intérêt considérable puisqu'elle permet de gagner en temps et en coût. En effet, le fait de soupçonner qu'un sol puisse être expansif permet de recommander la réalisation de test de reconnaissance appropriée et pour concevoir une infrastructure adaptée (Bekkouche *et al.*, 2001). Ces méthodes indirectes, qui relient le gonflement des sols à leurs paramètres géotechniques sont décrites ci-après.

Limites d'Atterberg

Sur un plan macroscopique, le phénomène de gonflement est à rapprocher de la notion de limites consistance. Ainsi, l'indice de plasticité $I_p = W_L - W_P$ peut s'interpréter comme la quantité d'eau nécessaire pour faire passer un sol de l'état "solide" ($W < W_P$) à l'état "liquide" ($W > W_L$). Plus le sol possède de minéraux actifs dans leur interaction avec l'eau, plus il sera nécessaire d'ajouter de l'eau au sol pour qu'il devienne liquide ; sachant qu'une grande partie de cette eau sera adsorbée par les particules, il ne restera donc pas à l'état liquide et ne conférera pas au matériau un état liquide mais pâteux, correspondant à la phase plastique. Quand toute la capacité d'adsorption du sol sera saturée, alors l'eau en excès restera à l'état libre c'est-à-dire liquide. Cette définition montre également que I_p est un paramètre important

dans les propriétés de rétention d'eau du terrain et donc de gonflement. C'est la raison pour laquelle un certain nombre de corrélations ont rapidement été recherchées entre les limites d'Atterberg et les propriétés de gonflement des sols.

Limite de retrait

Les sols argileux présentent un retrait volumique lors de l'évaporation de l'eau interstitielle. Le retrait volumique évolue de manière linéaire en fonction de la teneur en eau W jusqu'à une teneur en eau W_R définie comme la limite de retrait. A partir de cette limite W_R , le sol perd de l'eau sans grande variation de volume, il se dessature. La limite de retrait et l'indice de retrait $IR = W_L - W_R$ apparaissent aussi comme des éléments fondamentaux pour l'étude des variations de volume des sols.

L'essai au bleu de méthylène

Cet essai est fait systématiquement pour tout sol dont la fraction argileuse dépasse 15 à 20%. Il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour adsorber les particules argileuses. Suivant la surface spécifique des grains, la quantité sera plus ou moins grande. En effet, une argile de la famille des montmorillonites (qui a un potentiel de gonflement élevé) a une surface spécifique de 150 à 800 m²/g, tandis qu'une kaolinite (dont le potentiel de gonflement est quasi-nul) a une surface spécifique de 10 à 20 m²/g (Mouroux et al, 1988). De ce fait, une valeur de bleu dépassant 6 indique un sol à potentiel de gonflement fort (Zerhouni et al., 2002).

Il existe des essais d'identification quantitative. Dans la phase de reconnaissance primaire et une fois le sol gonflant soupçonné, il est possible d'obtenir une estimation des paramètres de gonflement (amplitude et pression) à partir des nombreuses corrélations proposées dans la littérature. Ces relations empiriques mettent en relation les paramètres de gonflement avec les paramètres géotechniques déterminés à partir des essais classiques d'identification. Bien sûr, il faut se garder d'une utilisation abusive de ces relations, les valeurs obtenues ne doivent servir que lors des études d'avant projet sommaire notamment pour orienter les concepteurs.

Amplitude de gonflement

Komornik et David (1969) ont travaillé plus particulièrement sur des sols non remaniés, car la méthode de compactage est un facteur très influent sur les paramètres de gonflement. Les nombreux essais qu'ils ont réalisés ont montré qu'une simple corrélation linéaire est possible entre le gonflement libre e_g et l'indice de plasticité IP

Pression de gonflement

Chen (1975) ou Brackley (1983), considèrent la pression de gonflement comme une propriété intrinsèque du matériau, c'est-à-dire dépendant uniquement de la minéralogie et de

la densité de l'empilement des particules sans tenir compte de l'eau. Alors que d'autres auteurs, comme Komornik (1969) ou Vijayvergiya (1973), affirment que plusieurs paramètres liés à l'état hydrique, comme la teneur en eau initiale W ou la limite de liquidité WL , peuvent influencer sur la pression de gonflement (Bultel, 2001).

1.2.2. Essais mécaniques en laboratoire

Les essais mécaniques sont des méthodes directes d'identification. On relève dans la littérature une multitude de procédures permettant de mesurer les paramètres de gonflement des sols, ce qui traduit en partie la complexité du phénomène. La façon de procéder à la mesure de ces paramètres dépend du problème posé, du but recherché et des moyens mis en oeuvre. Les procédures d'essais de gonflement tirent leur diversité de la complexité du phénomène analysé, des nombreuses variétés de matériaux gonflants et d'une longue pratique empirique. Il semble illusoire, en effet, de chercher à qualifier mécaniquement un sol susceptible de gonfler par une procédure universelle de laboratoire.

Les quatre catégories d'essais de gonflement

- Essai de gonflement libre
- Essais de gonflement en parallèle
- Essai à volume constant
- Essai d'Huder - Amberg

Procédures d'essais normalisées

- Norme ISSMFE (1991)
- Norme française NF P 94-091 (AFNOR, 1995)
- Norme française NF P 94-091 (AFNOR, 1995)
- Norme ASTM D-4546-90 (1985)
- Procédures empêchant le gonflement
- Méthode du D.T.U.11.1 (France)
- Norme ASTM D-4546-90 (méthode C)
- Procédures du LCPC (France)

1.3 La gestion du risque sécheresse géotechnique

Le phénomène de retrait gonflement des argiles a été défini ainsi que les méthodes géotechniques permettant de le caractériser. Cependant il est important de préciser la notion de risque et d'aléa dans ce travail, tant les facteurs environnementaux qui interviennent dans la problématique de la sécheresse géotechnique sont nombreux.

L'objet de cette partie précise la problématique en terme d'aléa et de risque afin d'adopter une démarche méthodologique compatible avec l'étude d'un risque naturel. Nous rappelons succinctement le dispositif d'indemnisation en France et la déclaration de l'état de catastrophe Naturel. Il s'agit d'expliquer concrètement la gestion actuelle du risque de la sécheresse géotechnique, non pas pour en faire l'apologie mais pour préciser dans quelle

mesure la détection des mouvements de retrait gonflement à l'échelle de la parcelle peut aider à la gestion et prévention du risque de la sécheresse géotechnique.

1.3.1. Notion d'aléa et de risque, risque géotechnique.

Rappelons qu'un aléa est un phénomène naturel susceptible de se produire et dont on s'efforce d'évaluer la probabilité (Bourrelief *et al.*, 2000). L'aléa est décrit par des paramètres physiques mesurable qui le caractérise (ex : force du vent pour la tempête), et selon sa gravité on lui associe une probabilité : la crue de 1910 est dite centennale. La notion d'un aléa « extrême » est donc liée à un événement naturel rare et intense associé à des faibles probabilités, en se basant sur l'historique des événements passés. Un aléa extrême peut être la résultante de la combinaison de plusieurs aléas climatiques, auquel cas les probabilités se croisent : par exemple, l'inondation du domaine littoral le 28 février 2010 dans les communes d'Aiguillon-Sur-mer et de la Faute-Sur-Mer est la combinaison d'une tempête (tempête Xynthia) à probabilité annuelle et d'un fort coefficient de marnage à probabilité mensuelle.

Le risque est l'effet d'un aléa sur les enjeux, tels que des biens ou personnes (Figure 4A). Le risque se mesure par une intensité. L'aléa est un danger, le risque sa mesure (Bourrelief *et al.*, 2000). L'intensité ou le degré d'un risque dépend de la probabilité de l'aléa et de la vulnérabilité ou de l'exposition des enjeux à cet aléa. On peut citer l'exemple du risque sismique : l'échelle de Mercalli est fondée sur l'étendue des dégâts observés, ce qui est subjectif, tandis que l'aléa sismique est caractérisé par les magnitudes du moment sismique M_w (mesure de l'énergie délivrée) associée à une probabilité selon les événements passés. Un séisme avec une forte magnitude a un risque quasi nul, si la surface est inhabitée (absence d'enjeu). A contrario, un séisme de faible magnitude localisé en plein centre urbain a un risque élevé pour les enjeux considérés (biens et personnes). Quels sont donc les enjeux et facteurs intervenant spécifique au risque géotechnique ?

Le risque sécheresse géotechnique

Dans la problématique du risque naturel sécheresse géotechnique, la sécheresse est l'aléa qui est défini par sa période de temps et son intensité. Le croisement de cet aléa climatique avec la susceptibilité du sol au retrait gonflement donne un risque de mouvement de terrain (Figure 4B). La nature argileuse accentue cette susceptibilité. Le risque de mouvement de terrain est donc noté ici « risque de retrait gonflement » que le terrain soit argileux ou non.

La problématique fait intervenir un enjeu urbain, défini par la présence et la concentration de pavillons individuels caractéristiques de la zone périurbaine de Paris, reconnus comme vulnérables au mouvement de retrait gonflement. Le croisement de cet enjeu urbain et des mouvements de terrain consécutifs à l'aléa sécheresse constitue le risque de la sécheresse géotechnique (Figure 4C).

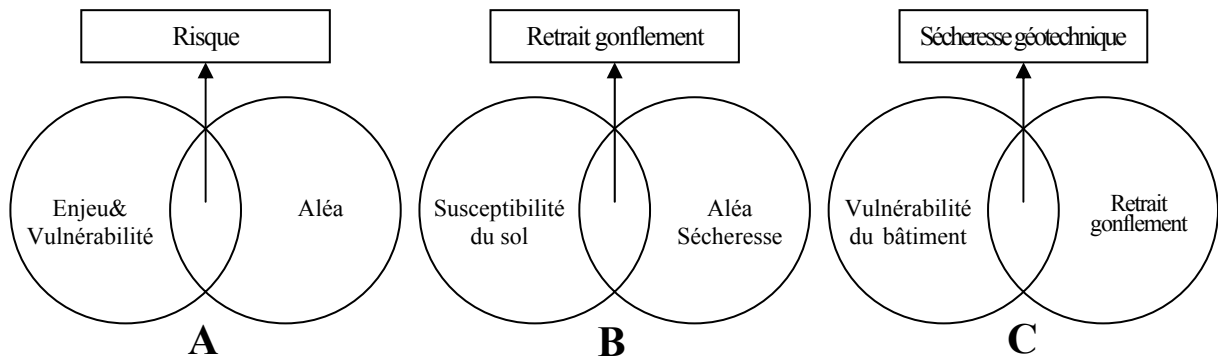


Figure 4: Schémas risque/aléa appliqué à la sécheresse géotechnique.

A- Définition de l'aléa par l'intersection de l'aléa et d'un enjeu et sa vulnérabilité. B- Le risque d'un mouvement de terrain lié à la sécheresse résulte de l'aléa sécheresse et de la susceptibilité du sol au retrait gonflement. C- Le risque de sécheresse géotechnique résulte de la vulnérabilité des bâtiments et des mouvements de terrain liés à la sécheresse.

1.3.2. Gestion du risque naturel en France

Les éléments théoriques développés ci-dessus n'expliquent pas comment les différents acteurs assurantiels et décideurs prennent en compte la sécheresse géotechnique, il s'agit de comprendre la gestion de ce risque naturel.

En France, le dispositif actuel d'indemnisation contre les événements naturels exceptionnels est basé sur le principe de la solidarité nationale afin d'assurer la protection des biens assurés contre les dégâts liés à des catastrophes naturelles exceptionnelles non assurables et d'une intensité anormale. Ce régime spécifique d'assurance fait intervenir l'Etat et ses collectivités, les sociétés d'assurances, la Caisse centrale de Réassurance (CCR). Un point important de ce dispositif est la reconnaissance de l'état de Catastrophe Naturelle (CATNAT) pour chaque commune par arrêté interministériel, publié au journal officiel.

Pour être reconnu en état de catastrophe naturelle, la commune doit constituer un dossier spécifique de reconnaissance « CATNAT » qui comprend notamment une étude géotechnique dans le cas de mouvements de terrain. Chaque dossier est ensuite adressé à la préfecture du département qui rassemble l'ensemble des demandes des communes affectées par un même phénomène. La préfecture présente une demande à la commission interministérielle en joignant aux dossiers les rapports des services spécialisés selon le type de phénomène constaté. Dans le cas de la sécheresse géotechnique le dossier est conséquent du fait du caractère discret et peu visible des effets de l'aléa sécheresse (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

a - Cas général, Pièces obligatoires :

- un rapport circonstancié sur la nature et l'intensité de la catastrophe, et les mesures de prévention prises ou envisagées ;
- le rapport météorologique établi par Météo-France ;
- le(s) rapport(s) spécifique(s) selon l'événement (géotechnique, hydrologique, hydrogéologique, sismologique) ;
- la demande de reconnaissance de classement à remplir par le maire suivant modèle ;

- une carte administrative du département délimitant la zone géographique touchée par l'événement ;
 - la liste des communes atteintes, classées par ordre alphabétique dans chaque arrondissement et canton ;
 - la liste des communes ayant déjà bénéficié d'un arrêté interministériel au titre de la sécheresse et des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols ;
- Pièces facultatives
- les rapports et messages de police, de gendarmerie ou de sapeurs-pompiers ;
 - un dossier photographique.

b - Sécheresse

Afin de permettre la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, deux situations doivent être envisagées :

- si la commune n'a jamais été reconnue sinistrée au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols :

- la demande doit être accompagnée d'une étude géotechnique fournie par la commune, réalisée postérieurement à la période de reconnaissance sollicitée et d'un rapport météorologique, sollicité par la préfecture auprès des services de Météo-France, couvrant la période de reconnaissance demandée ;
- la reconnaissance est accordée à compter de la date demandée par la commune, jusqu'à la date de réalisation de l'étude géotechnique.

- Si la commune a déjà fait l'objet d'une reconnaissance antérieure au titre de ces mouvements de terrain (prorogation) :

- il n'est pas nécessaire de joindre un nouveau rapport géotechnique ;
- la reconnaissance est prorogée jusqu'à la date sollicitée par la commune et confirmée par le rapport météorologique.

Tableau 3 : Pièces du rapport établi par le Préfet en vue de la reconnaissance de l'état de « CATNAT ».

Source : Circulaire du 19 mai 1998 relative à la constitution des dossiers concernant des demandes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (d'après Frécon et Keller, 2009).

La commission interministérielle est ensuite chargée d'émettre un avis sur les demandes en examinant l'importance des dégâts et le caractère d'intensité anormal de l'agent naturel, la décision relevant ensuite aux ministres compétents. Si l'avis favorable est suivi, l'arrêté interministériel de déclaration de CATNAT paraît au journal officiel de la République Française qui mentionne les communes concernées. Les sinistrés disposent alors d'un délai de dix jours maximum pour transmettre à leur compagnie d'assurance un état estimatif des pertes matérielles -s'ils ne l'ont pas déjà fait dès la survenance du sinistre-.

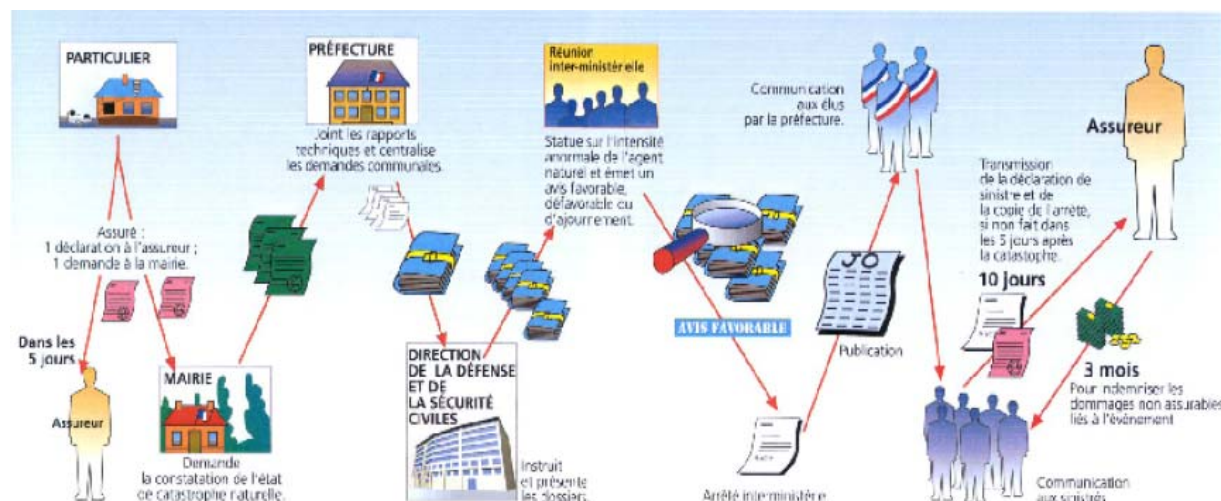


Figure 5 : Fonctionnement du dispositif CATNAT de la déclaration de l'assuré à son indemnisation.
Source : Ministère de l'intérieur- Direction de la défense et de la sécurité civiles.

Le financement de ce régime est à la charge des assurés qui se voient assujettis à une surprime ou une cotisation additionnelle lors de la réalisation du contrat d'assurance dommage de leurs biens ; Elle est obligatoire et fixée par l'Etat afin d'être indemnisé par l'assureur des dommages causés à ces biens par une catastrophe naturelle.

Face à l'ampleur des désordres, l'Etat a engagé une politique de prévention visant à limiter les conséquences économiques de ce phénomène, notamment par la mise en place de Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN). Il s'agit d'éviter que l'indemnisation qui repose sur la solidarité et la mutualisation des couts liés aux catastrophes naturelles, ne décourage la prévention et incite à une surexposition des assurés aux risques naturels.

L'objectif est de faire connaître les zones à risques aux populations et aux aménageurs, de maîtriser l'urbanisation dans les zones à risques et de réduire la vulnérabilité des populations et des biens existants. Le PPRN régit l'utilisation des sols en tenant compte des risques naturels (aléa, enjeux, vulnérabilité) identifiés sur cette zone et de la non-aggravation des risques. L'absence d'adoption d'un PPRN ou le non respect des règles du PPRN peuvent conduire à une diminution des indemnisations par un système de modulation de franchise, voire même la perte du droit à l'indemnisation de sinistres déclarés -et ceci malgré la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle-. D'après un recensement au 27 novembre 2007, 1601 communes ont un PPRN tassements différentiels prescrit et 553 communes disposent d'un PPRN de ce type approuvé. L'essentiel des PPRN tassements différentiels approuvés se situe dans les départements du Gers, du Lot-et- Garonne et du Tarn-et-Garonne. En Île-de-France, compte tenu du coût des dédommagements et du nombre de dossiers, les communes ont majoritairement prescrit un PPR tassements différentiels (Figure 6), en particulier les départements de Seine-Saint-Denis (93) et du Val-de-Marne (94). Un exemple de PPRN pour la Seine-Saint-Denis est fourni à l'ANNEXE 6.

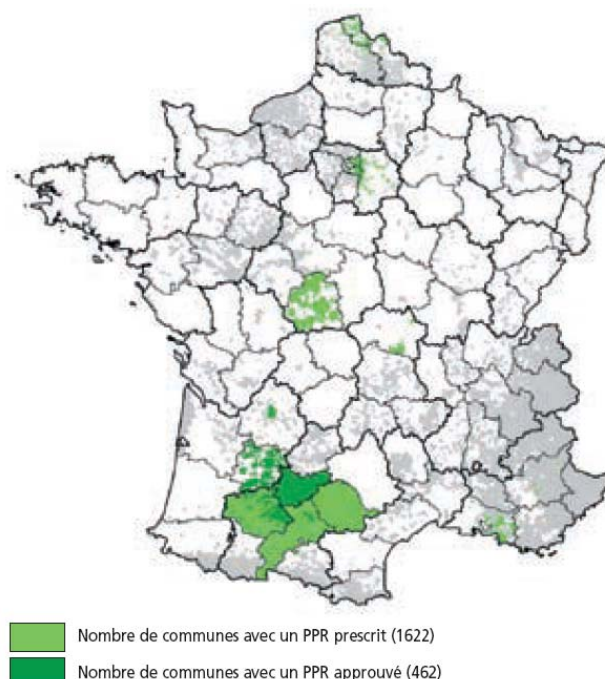


Figure 6 : État cartographié national des PPR prescrit ou approuvé au 04/05/2007 pour l'Aléa : tassements différentiels. Source Prim.net.

1.3.3. Critères de reconnaissance de la sécheresse en France

Le risque de sécheresse géotechnique désigne les dommages affectant les bâtiments suite aux mouvements de retrait gonflement d'un sol consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Le phénomène de retrait gonflement affecte régulièrement un grand nombre de pays urbanisés et occasionne de lourde perte financière. Le fait que la présence d'argile au sein du sol ne constitue pas un aléa en soi, cela explique pourquoi ce risque est généralement exclu de toute couverture assurantielle dans la majorité des pays étrangers, la construction devant être correctement ouvragée en fonction du sol. La France est le seul pays, avec la Grande-Bretagne, pour lequel la sécheresse géotechnique est incluse dans le régime des catastrophes naturelles, au même titre que les phénomènes d'inondations et de coulée de boue, d'inondations par remontée de nappe phréatique, d'inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues, de séismes, des vents cycloniques et des avalanches. Comment les pouvoirs publics français prennent-ils en compte ce risque naturel ?

Jusqu'en 1999, le traitement des dossiers à la commission interministérielle s'est appuyé sur l'estimation du caractère exceptionnel des déficits pluviométriques observés. Puis en 2000, une approche plus réaliste du point de vue des interactions entre le sol, l'atmosphère et la végétation a été adoptée. Elle s'appuie sur le calcul du bilan hydrique du sol grâce à la combinaison d'observations et de données modélisées. Cette approche prend en compte non seulement les précipitations observées, mais également l'évapotranspiration des végétaux et la saturation éventuelle des sols, afin d'estimer le contenu en eau des sols qui est le paramètre à priori le plus directement lié au phénomène de retrait gonflement des argiles (BOUTIN, 2007).

La sécheresse de l'année 2003 fut exceptionnelle de par son ampleur avec plus de 8000 communes sollicitant une procédure de reconnaissance de CATNAT et atypique de par son intensité de jour et de nuit en période estivale 2003 (voir ANNEXE 7). Les critères de reconnaissance jusqu'alors utilisés datant de 2000 se révélèrent inadaptés (voir). Les critères jusqu'en 2002 devaient faire ressortir les éléments suivants :

- Une période de 4 trimestres consécutifs durant laquelle la réserve en eau des sols est inférieure à la normale,
- Une décade pendant la période de recharge des nappes (de janvier à mars) inférieure à 50% de la normale.

Pour s'adapter à cet événement de nouveaux critères ont été élaborés en 2004 (), avec notamment la prise en compte de la présence d'argile au sein du sol. Puis pour faire face à l'ampleur de la sinistralité, il fut suivi d'un assouplissement en janvier 2005. Un second assouplissement est intervenu en juin 2005, en s'appuyant sur l'occurrence statistique du phénomène de la sécheresse dite "durée de retour" égale ou supérieure à 25 ans. Ces adaptations successives ont permis de reconnaître plus de 4 300 communes. Enfin, il a été précisé que les communes qui ne seraient pas éligibles au regard du critère météorologique "durée de retour" pourraient bénéficier d'une procédure exceptionnelle d'indemnisation au titre de la solidarité nationale.

L'événement de sécheresse de l'année 2003 a révélé au pouvoir public que les indicateurs de sécheresse climatique utilisés avant 2002 n'étaient plus adaptés. En premier lieu, il n'existe pas une relation simple et directe entre les phénomènes de retrait et les paramètres du bilan hydrique du sol modélisés, c'est-à-dire que le seul critère météorologique ne suffit plus en tant qu'outil décisionnaire. Deuxièmement, il n'existe pas de relevés géotechniques permettant de relier précisément les phénomènes de subsidences du sol observées localement avec la nature argileuse du sous-sol. On ne peut que déplorer les conséquences de l'absence de mesure géotechnique locale précise lors de la conception de l'ouvrage de résidence pavillonnaire. Si la carte de retrait-gonflement établie par le BRGM est un document confirmé et valable à l'échelle départementale (développé en 3.1), elle ne peut être utilisée directement pour fonder un avis à l'échelle de la parcelle. Enfin l'état des connaissances actuelles en géotechnique ne permet pas d'établir une relation directe entre les dégâts aux habitations au retrait du sol argileux. Cette relation est d'autant plus difficile à établir sur des bases statistiques que les dégâts aux habitations peuvent intervenir longtemps après les épisodes de sécheresse géotechnique (plusieurs années parfois) et qu'il n'existe pas de base de données organisée centralisée en la matière.

Progresser dans la compréhension du risque naturel « sécheresse géotechnique » signifie d'établir les périodes de sécheresse (développé en I.2.3), la susceptibilité des sols au retrait gonflement (développé en I.3.1), la vulnérabilité du bâti (développé en I.3.2) et les facteurs environnementaux aggravants (développé en I.3.3). Les parties suivantes font le point sur l'état des connaissances actuelles de ces différents aspects de la problématique du RGA en prenant pour exemple l'Est Parisien.

1.2 L'aléa sécheresse

Lors de périodes exceptionnellement sèches -que nous détaillerons ci-après en terme de durée, température et pluviométrie-, les formations argileuses voient leur état d'équilibre se modifier : il se crée au sein des sols une matière sèche, dense et compacte d'un niveau argileux. Avec le retour de la saison humide, le sol se réhydrate mais de manière hétérogène selon l'influence de facteurs environnants détaillés ci-après (I.3), ce qui explique que la sinistralité se poursuive bien après un événement de sécheresse.

Les recherches actuelles posent la question de la définition du caractère exceptionnel d'une sécheresse et de comment utiliser les données climatiques pour établir une période de sécheresse géotechnique. L'objet de cette partie est de préciser la notion de sécheresse et ses indices climatiques, puis de faire le point sur les travaux de modélisation climatique en cours de développement. Enfin, nous expliquons les périodes de sécheresse retenue dans ce travail.

2.1 Généralités sur la sécheresse

2.1.1. Définitions

En plus de la sécheresse géotechnique décrite en introduction, il existe plusieurs autres définitions de la sécheresse selon les enjeux considérés : sécheresse météorologique, sécheresse agricole, sécheresse hydrologique de surface et hydrogéologique, et sécheresse sanitaire. Ces nombreuses définitions s'expliquent par le fait que la sécheresse est ressentie différemment selon son emplacement ou selon l'usage qui en est habituellement fait par l'homme. Ainsi toute définition de la sécheresse est relative au contexte géopolitique et sociologique ; l'état « *normal* » de disponibilité de l'eau change selon les zones biogéographiques et les besoins réels ou ressentis des individus et des sociétés. Dans l'usage le plus fréquent du terme sécheresse se réfère à un déficit de précipitation météorologique par rapport à une période de référence. Cela implique des études statistiques et des normes qui peuvent varier d'un pays à un autre. On donne les définitions de chacune :

- **La sécheresse agricole** est un déficit de précipitation permettant de maintenir une humidité suffisante à la croissance des cultures. Lorsqu'elle a lieu, la réserve utile des sols des végétaux s'épuise et donc entraîne des effets dramatiques sur la santé des plantes, jusqu'à empêcher la montée de la sève dans la plante. On prend donc en compte le taux d'humidité du sol agricole à un mètre de profondeur. Cependant cette condition peut avoir lieu même si les précipitations sont normales à cause des conditions du sol et des techniques agricoles, ou de choix de plantes inadaptées à l'humidité du sol disponible.

- **La sécheresse hydrologique de surface** se réalise quand les rivières, les lacs et les réservoirs sont à secs. On parle de **sécheresse hydrologique profonde** quand les réserves d'eau disponibles dans les nappes aquifères descendent en dessous de la moyenne. Ceci peut arriver alors que même les précipitations soient normales ou au-dessus de la moyenne si l'eau est détournée pour une autre zone géographique ou qu'elle a été surexploitée, ou si la consommation d'eau dépasse les capacités de la nappe ou des réservoirs à se renouveler, ou si les conditions d'alimentation des nappes (perméabilité du sol selon Loi de Darcy) ne sont plus réunies.

- **La sécheresse sanitaire** se définit par des normes de santé, en prenant en compte la résistance de l'homme à la chaleur. Les valeurs de températures et la durée -de jour comme de nuit- de la période de chaleur intense permettent de définir le phénomène de canicule. La canicule de 2003 a affecté l'ensemble du territoire Français et provoqué le décès de plus de 40000 personnes les plus fragiles exposés à l'élévation de température. Ce phénomène assez récent de par son ampleur et impact a fait prendre conscience aux autorités publiques de la vulnérabilité des personnes âgées et de l'absence de climatisation dans les infrastructures privées et publiques.

- **La sécheresse géotechnique** est un phénomène de retrait gonflement d'un sol argileux soumis à un aléa climatique extrême, mouvement du sol pour lequel les bâtiments sont peu ou mal conçus. La sécheresse géotechnique concerne donc les sols de subsurface, jusqu'à 5 mètres de profondeur.

2.1.2. Historique de la sécheresse en France

Historiquement en France, la sécheresse a longtemps eu un caractère agricole, du fait de l'importance de l'enjeu de l'agriculture, notamment en France. Une étude historique des sécheresses en France depuis 1135, montre des événements secs récurrents qui ont eu des répercussions sur la production agricole, source d'importants conflits socio économiques (Garnier, 1967). On peut citer l'année 1788, soit un an avant la Révolution Française, où la France a connu un printemps et un été terriblement secs qui ont compromis les récoltes et eu des implications fortes (Leroy Ladurie, dans « le climat depuis l'an mille »). L'instrumentation de la collecte des données climatiques ne commençant qu'autour de 1850 (Cojean *et al.*, 2009), ces informations historiques ne sont donc pas quantifiées par des valeurs de températures ou de précipitations et ne sont donc comparable avec les sécheresses du XXème siècle et actuelles. Toutefois ces données historiques se révèlent utiles pour souligner la récurrence de la sécheresse et de son impact sur la société française.

Depuis le début du 20^{ème} siècle, et surtout depuis 1872 à Paris-Montsouris, les mesures des précipitations et températures ont permis de mettre en évidence des sécheresses importantes en Région d'Île-de-France aux dates de 1921, 1947-1955, 1976, 1989-1991, 1996-1997, 2003, puis récemment en 2005 et 2010.

La sécheresse de 1976 est considérée comme centennale car d'après Brochet, XXXX selon une étude statistique basée sur la moyenne de la pluviométrie portant uniquement sur les périodes de printemps et d'été. Cette étude montre que pour 1949 et 1976, il est tombé seulement 54 % des précipitations moyennes interannuelle et en 1953 seulement 58 % (Cojean *et al.*, 2009).

La sécheresse 1989/90 est une sécheresse hivernale, associé à une stabilité anticyclonique de durée inhabituelle (Leroux, 1991), qui a entraîné des désordres et les premières procédures de déclaration en CatNat pour ce type de risque naturel.

La sécheresse 2003, décrite précédemment, a eu une ampleur nationale avec des conséquences en perte de vie humaine. C'est donc le caractère « sanitaire » qui a marqué cet événement climatique, avec des températures supérieure à 30° de jour et nuit et une durée supérieure à 3 jours : c'est la définition de la canicule. Cette information est importante dans la mesure où avant la sécheresse 2003, les expertises des sinistres ne prenaient en comptes que des valeurs moyennes de températures de jour pour déterminer si la période où les déformations du bâti observées sont apparues correspond à une période de sécheresse. Cette sécheresse « caniculaire » a provoqué des pertes de 4,3 milliards en France (source : CCR) de 2003 jusqu'en 2006 avec une procédure exceptionnelle d'indemnisation.

La phénoménologie liée à la sécheresse géotechnique est donc un phénomène plus récent, lié à la valeur ajoutée immobilière qui prend une place croissante dans l'économie Française. On peut remonter jusqu'à l'année 1970 avec le développement des produits et contrats d'assurance et le premier impact sur les contrats d'assurance avec la sécheresse en 1976, puis l'événement 1989/90 qui donna lieu aux premières déclarations de CatNat de ce type de risque, la sécheresse de 1996/97 et de 2003. Devant la répétition des sécheresses et de leur impact sur les bâtiments, il est apparu nécessaire d'organiser les interventions de l'Etat, des collectivités et des assurances et pour faire face à la sinistralité liée à la sécheresse géotechnique.

2.2 Les indices de sécheresse

Plusieurs indices permettent de définir la sécheresse à partir des données climatiques mesurées par les stations météorologiques. Afin de réaliser l'analyse statistique des périodes de sécheresse, il faut caractériser ces sécheresses par un paramètre d'intensité. Ce paramètre ou indice peut porter exclusivement sur les précipitations comme le pourcentage à la normale, ou être un résultat plus complexe prenant en compte différentes mesures météorologiques telles que la température, le vent ou l'insolation. Leurs calculs se révèlent complexes quand il s'agit d'indices prenant en compte des bilans et valeurs antérieures. Nous rappelons ici les principaux indices (voir aussi **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) utilisées et les résultats appliquées aux données météorologiques de la station de Melun, résultats issus du

programme de recherche MAIF (Cojean *et al.*, 2009). Ces indices de sécheresse permettent ils de définir les périodes de sécheresse en région d'Île-de-France ?

Les indices de sécheresse utilisent des paramètres climatiques mesurés par les stations météorologiques telles que la température, les précipitations et l'ensoleillement. Ces données journalières permettent de calculer l'évapotranspiration théorique (ETP) correspond à la quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. Ces données climatiques sont utilisées pour calculer trois types d'indice de sécheresse détaillée ci-après (Cojean *et al.*, 2009) :

- Les indices d'anomalie de précipitation,
- Les indices « alimentation - demande »,
- Les indices récurrents.

Les indices d'anomalie de précipitations sont basés sur le principe que les sécheresses sont liées aux précipitations tombées durant la période précédente (entre un mois et un an). L'indice « Ecart à la normale » ou « AI » est calculé par différence entre les précipitations mensuelles et la moyenne de ces valeurs sur 60 ans compris entre 1947 et 2006. On notera pour chacun de ces indices la simplicité des calculs. De plus, les paramètres qui interviennent dans ces indices sont tous disponibles à partir de séries de données de précipitations, températures et insolation disponibles dès 1953. Le vent n'est utilisé qu'à partir de 1979 dans le calcul de l'ETP selon Penman (1948).

Les indices « alimentation / demande » basés sur l'équilibre hydrique permettent de considérer d'une part l'alimentation caractérisée par les précipitations et d'autre part la demande des plantes et du sol que l'on exprime habituellement soit par l'évapotranspiration potentielle soit par sa plus simple approximation, la température moyenne de la période considérée. Toutes ces formules sont utilisables avec les données mensuelles dont nous disposons pour la station de Melun, les résultats des calculs sont présentés dans l'ANNEXE 9

Les indices récurrents estiment la sécheresse d'une période à partir de l'indice de sécheresse de la période précédente. Ces périodes de sécheresse à estimer sont généralement mensuelles.

En région Île-de-France, dans l'Est du bassin de Paris, la station de Melun a été sélectionnée sur des critères de représentativité du climat régional et plus particulièrement de la Seine et Marne et du Val-de-Marne. Cette station est située sur une piste de l'aérodrome de Melun-Villaroche dans la commune de Moissy-Cramayel (77550). Les mesures sont donc moins sensibles aux biais induits par l'urbanisation importante de ces départements et tout particulièrement dans le Val-de-Marne. L'instrumentation de cette station commence en 1947 avec la mesure des données de précipitations, les relevés de l'insolation depuis 1953, du vent depuis 1961 et de l'ensemble des paramètres nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman depuis 1979. C'est donc une station bien documentée avec des données suffisantes pour avoir des périodes de référence d'au moins trente ans.

Le résultat du calcul des différents indices de sécheresse (Cojean *et al.*, 2009) se présente sous la forme d'une table colorée (Tableau 4), les colonnes bleues correspondent aux indices calculés à partir des valeurs de précipitation, les colonnes jaunes correspondent aux indices qui nécessitent d'autres paramètres telles que la température, le vent. Les valeurs notées en orange clair correspondent aux valeurs de l'indice dans la classe de sécheresse fréquente, les valeurs notées en orange vif correspondent aux valeurs de l'indice de la classe des sécheresses sévères ou extrêmes, ici seule les mois avec un indice de sécheresse et d'inondation de Bhalme Mooley inférieure à -2 noté BMDI sont visibles.

Date	Date	AI	rP	rAI	SAI	LI	dMI	SCH	Thorthwl	PDI1	ETP-P	ETP/P	MAI	BMDI sur 12 mois	BMDI sur 6 mois
11	1964	-27.630	52.222%	-0.478	-1.103	4.377	21.444	1.459	2.745	1.237	-8.926	0.704	1.420	-1.840	-2.69
12	1964	-18.620	67.172%	-0.328	-0.670	15.240	36.576	5.080	4.754	-0.324	-26.852	0.295	3.387	-1.929	-2.75
12	1971	-52.720	7.052%	-0.929	-1.898	0.976	3.404	0.325	0.346	1.834	9.399	3.350	0.299	-1.368	-2.10
01	1972	22.790	141.429%	0.414	0.825	29.923	74.095	9.974	10.430	-1.110	-65.737	0.155	6.450	-1.324	-2.29
02	1972	-6.830	85.446%	-0.146	-0.251	7.291	31.045	2.430	4.094	0.764	-17.041	0.575	1.739	-1.244	-2.47
03	1972	-17.860	64.323%	-0.357	-0.585	3.744	20.774	1.248	2.681	1.448	22.385	1.695	0.590	-1.200	-2.25
04	1976	-34.030	27.795%	-0.722	-1.133	1.424	8.188	0.475	0.956	0.629	65.821	6.025	0.166	-0.619	-2.39
05	1976	-41.640	27.126%	-0.729	-1.338	1.076	7.623	0.359	0.905	1.341	99.296	7.406	0.135	-1.011	-3.50
06	1976	-51.570	2.643%	-0.974	-1.914	0.071	0.566	0.024	0.051	4.250	151.280	109.057	0.009	-1.569	-4.20
07	1976	17.340	131.957%	0.320	0.586	3.393	27.627	1.131	3.863	0.949	63.877	1.892	0.529	-1.747	-3.83
08	1976	-41.580	20.314%	-0.797	-1.534	0.552	4.356	0.184	0.494	2.017	119.234	12.248	0.082	-2.154	-3.97
09	1976	-11.920	79.204%	-0.208	-0.359	3.068	21.968	1.023	2.939	-2.151	22.475	1.495	0.669	-2.776	-3.94
10	1976	-7.110	87.485%	-0.125	-0.209	3.976	26.507	1.325	3.588	0.732	-3.876	0.922	1.085	-2.956	-3.61
11	1976	-1.530	97.354%	-0.026	-0.061	8.797	41.195	2.932	5.648	-0.139	-35.583	0.368	2.718	-3.250	-3.00
12	1976	-0.720	98.731%	-0.013	-0.026	28.000	56.000	9.333	7.579	-1.259	-46.097	0.177	5.655	-3.124	-2.66
12	1985	-22.220	60.825%	-0.392	-0.800	6.509	27.059	2.170	3.508	1.434	-13.900	0.597	1.675	-1.113	-2.11
01	1986	23.490	142.701%	0.427	0.850	19.625	67.286	6.542	9.528	-0.502	-56.100	0.285	3.504	-0.953	-2.13
02	1986	-26.230	44.108%	-0.559	-0.994	-7.667	34.027	-2.556	3.920	-1.594	0.300	1.014	0.986	-0.808	-2.21
11	1989	-20.030	65.364%	-0.346	-0.800	6.197	28.174	2.066	3.694	0.400	-12.100	0.680	1.471	-1.399	-2.02
01	1990	-29.410	46.537%	-0.535	-1.064	5.224	20.617	1.741	2.583	1.820	-8.100	0.684	1.463	-1.323	-2.36
09	1990	-10.720	81.298%	-0.187	-0.323	3.170	22.640	1.057	3.038	-2.255	43.900	1.942	0.515	-1.819	-2.92
04	1992	-13.730	70.868%	-0.291	-0.457	3.479	20.449	1.160	2.651	0.313	39.200	2.174	0.460	-0.960	-2.18
05	1992	-16.540	71.054%	-0.289	-0.531	2.654	19.257	0.885	2.544	1.821	74.100	2.825	0.354	-0.908	-2.51
06	1992	-3.970	92.505%	-0.075	-0.147	2.952	22.105	0.954	2.978	0.117	44.700	1.912	0.523	-1.211	-2.45
07	1992	-26.260	51.603%	-0.484	-0.898	1.414	11.275	0.471	1.422	1.585	95.600	4.414	0.227	-1.492	-2.11
03	1996	-37.460	25.170%	-0.748	-1.227	2.136	9.509	0.712	1.103	0.483	32.600	3.587	0.279	-0.695	-2.21
04	1996	-36.930	21.642%	-0.784	-1.230	1.030	6.151	0.343	0.699	1.356	75.100	8.363	0.120	-1.401	-2.55
05	1996	2.060	103.605%	0.036	0.066	4.975	32.438	1.658	4.479	-1.372	18.600	1.314	0.761	-1.770	-2.40
06	1996	-38.370	27.563%	-0.724	-1.424	0.844	6.418	0.281	0.755	1.928	113.100	8.747	0.114	-2.032	-2.47
07	1996	-2.660	95.098%	-0.049	-0.090	2.835	21.957	0.945	2.970	-0.246	90.000	2.744	0.364	-2.166	-2.55
08	1996	38.820	174.396%	0.744	1.432	4.973	38.587	1.658	5.559	-1.561	26.900	1.296	0.772	-1.920	-2.13
12	2005	-20.120	64.528%	-0.355	-0.724	11.806	33.527	3.935	4.349	0.079	-20.900	0.429	2.331	-1.567	-2.37
01	2006	-15.810	71.260%	-0.287	-0.572	15.680	37.632	5.227	4.907	0.242	-21.600	0.449	2.227	-1.710	-2.70
02	2006	25.070	153.420%	0.534	0.921	24.000	66.462	8.000	9.290	-1.344	-53.400	0.258	3.871	-1.549	-2.30

Tableau 4 : Sélection des indices de sécheresse pour le BMDI sur 6 mois inférieur à -2 à la station de Melun sur la période 1947-2006 (Cojean et al. 2009).

Signification des sigles : AI Anomaly Index, rP Précipitation relative, rAI Indice d'anomalie relative, SAI Indice d'anomalie standard, LI Indice de Précipitation de Lang, Indice dMI aridité de Martonne, SCH coefficient hydrothermique, Thorthwl indice de Thorthwaite, PDI1 1er indice de Ped, ETP-P déficit en eau potentiel, ETP/P Ration de l'écapotranspiration potentielle, MAI Indice d'humidité disponible, BMDI Indice de sécheresse et d'inondation de Bhalme Mooley.

Signification du code couleur : les colonnes bleues correspondent aux indices calculés à partir des valeurs de précipitation, les colonnes jaunes correspondent aux indices qui nécessitent d'autres paramètres telles que la température, le vent. Les valeurs notées en orange clair correspondent aux valeurs de l'indice dans la classe de sécheresse fréquente, les valeurs notées en orange vif correspondent aux valeurs de l'indice de la classe des sécheresses sévères ou extrêmes, ici seule les mois avec un indice de sécheresse et d'inondation de Bhalme Mooley inférieure à -2 noté BMDI sont visibles.

Comparaison et analyse de la pertinence des indices

Nous avons calculé les valeurs mensuelles de ces différents indices pour la période 1947-2006 pour la station de Melun à l'exception du PDSI. Le BMDI a été calculé sur des périodes glissantes de 12 mois et de 6 mois et nous avons sélectionné le BMDI sur 6 mois car

la valeur calculée sur 12 mois décale de quelques mois l'indication de sécheresse après sa période historique. Afin de comparer leur pertinence, nous utiliserons les classes établies par Farago pour des sécheresses fréquentes et extrêmes en saisons printanières et estivales. Afin de visualiser les valeurs de ces indices, nous avons sélectionné les mois pour lesquels le BMDI était inférieurs à -2 (mois secs, le BMDI est inférieur à -3 pour des mois très secs). Cette sélection de valeur ($BMDI < -2$) caractérise assez bien les sécheresses passées 1947-1955, 1976, 1989-1991, 1996-1997. Elle exprime également l'importance de ces sécheresses avec les plus faibles indices pour 1949, 1959, 1976. La correspondance entre le BMDI et les autres indices est correcte mais décalée puisque le BMDI additionne les écarts standardisés à la normale des précipitations sur 6 mois et que les autres indices donnent un résultat mensuel. Toutefois l'effet du changement climatique n'est pas pertinent sur la fréquence des sécheresses actuelles car « la mise en évidence de tendances d'événements extrêmes se heurte à des limites tenant à la rareté de ces derniers. L'accumulation apparente d'événements extrêmes au cours des dernières années pourrait tout aussi bien représenter une tendance réelle qu'être due au hasard (Frei, 2003). On remarque en effet concernant les sécheresses que de 1949 à 1959 il y a eu 4 étés particulièrement secs, donc la succession de 1990, 1992, 1996 n'est peut-être pas significative d'une aridification du climat en Seine et Marne.

Les indices "alimentation / demande" révèlent mieux les déficits hydriques qui résultent à la fois de précipitations faibles et de températures élevées. Le PDI1 cumule l'anomalie standard de précipitation et l'anomalie standard de température alors que le rapport ETP/P les conjugue. Les valeurs du PDI1 supérieures à 1 traduisent des mois secs comme les valeurs d'ETP/P supérieures à 2. Le PDI1 traduit une anomalie inhabituelle pour la station alors que le rapport ETP/P révèle un déficit hydrique absolu. On peut également regretter que ces indices ne tiennent pas compte du bilan hydrique des mois précédents.

2.3 Les périodes de sécheresse retenues

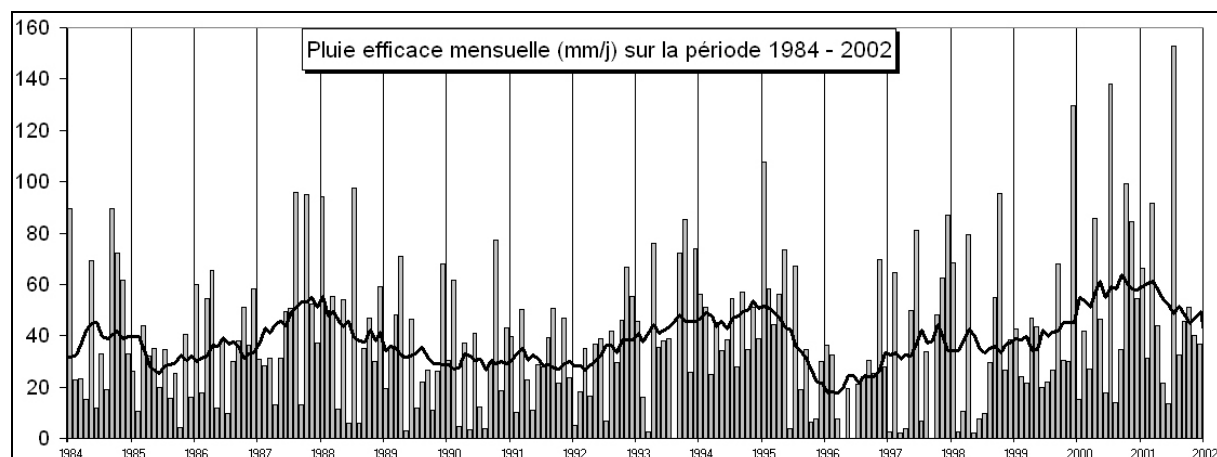
Ces nombreux indices montrent la complexité de la sécheresse. Il faut néanmoins déterminer les périodes de sécheresse pour étudier le risque de sécheresse géotechnique. Afin de déterminer une ou des périodes d'étude de sécheresse géotechnique, une étude simple de données climatiques de METEO FRANCE a été réalisée à partir des données journalières de précipitations et d'évapotranspiration (station Melun) sur la région Est parisienne : ces données sont représentées sous forme d'histogramme de Pluie efficace corrigée mensuelle (Figure 7) calculé entre 1984 et 2002. Le calcul de la Pluviométrie Efficace corrigée (PEc) s'écrit :

$$PEc = |PP - ETP| \text{ (en mm/mois)}$$

Avec P : Précipitation en mm/jour

ETP : Evapotranspiration (formule de Penman) en mm/jour

On peut noter les périodes relativement humides qui sont justes situées avant les sécheresses de 1989 et de 1996. De même que la période 2001-2002 est relativement abondante en précipitations. Une explication possible à la sécheresse géotechnique serait un fort contraste météorologique (tant au niveau des températures que de la pluviométrie) qui fait sortir l'état des sols hors de leurs états d'équilibre hydrique. Cette étude simple fixe deux périodes de sécheresse à étudier par interférométrie : la sécheresse de mars à juin 1996 et celle de 2003. Celle de 1989 ne peut être étudiée par l'absence de données radar sur cette période (lancement ERS1 en juin 91)



La Pluie Efficace brute est calculée à partir de la formule simplifiée : $PE = P - ETP$, le bilan dans ce cas peut être négatif. On définit également la Pluie Efficace Corrigée PEc pour laquelle les valeurs négatives sont remplacées par zéro. Avec :

Précipitation – P : le terme précipitation recouvre toutes les eaux météoriques, il concerne la pluie, la rosée, le brouillard, la neige, la grêle, le givre. L'unité employée est le millimètre d'eau par surface unitaire de $1m^2$, ce qui correspond à une quantité d'eau en litre / m^2 .

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

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

Figure 7 : Pluviométrie Efficace corrigée (PEc) mensuelle calculée à partir des valeurs journalières de Précipitation (P) et d'évapotranspiration (ETP) entre 1984 et 2002 sur l'est parisien. Représentation sous forme d'histogramme et d'une courbe de moyenne mobile (période de onze mois). Données sources © METEO FRANCE

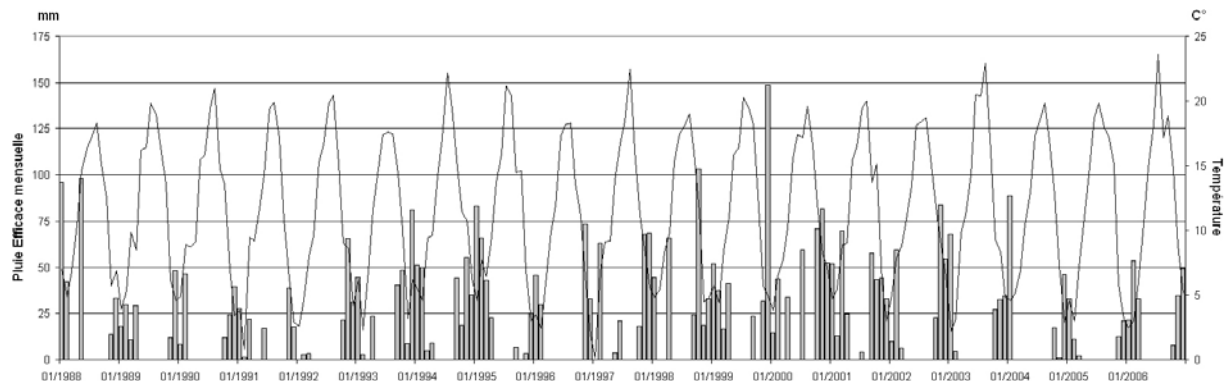


Figure 8 : Courbes de températures et Pluviométrie Efficace corrigée (PEc) mensuelle calculée à partir des valeurs mensuelles de Précipitation et d'évapotranspiration entre 1984 et 2002. Données sources © METEO FRANCE

Le même travail a été réalisé mais avec des **données mensuelles** de précipitations, températures et d'ETP (Figure 8). La comparaison avec la Figure 7 sur la période de temps commune montre que les valeurs de pluie efficace corrigée *PEc* sont plus importantes si on prend en compte les données journalières, et qu'il en résulte une sous-estimation des valeurs réelles de pluie disponibles pour le sol avec des données mensuelles. Néanmoins ce graphique (Figure 8) détaille les périodes de recharges des sols en eau et permet d'apprécier la durée réelle des périodes de sécheresse estivale à l'échelle de l'année. On montre que les saisons hivernales de 1998 et 1999 sont plus pluvieuses et contraste avec le déficit de pluviométrie en 1996. Les années de 2003, 2004, 2005 et 2006 sont marquées par des contrastes saisonniers avec des températures moyennes similaires. On peut remarquer que les valeurs de températures moyennes journalières acquises de jour ne révèlent pas la canicule d'août 2003 marquée par des températures extrême de jour et de nuit.

Dans ces conditions, il est difficile de caractériser des périodes de sécheresse extrêmes, seul le contraste pluviométrique étant ici délimité de manière qualitative. Pour cette raison, seul le graphique sera représenté et comparé aux profils de déplacements et les périodes de sécheresse reconnue de 1996 et 2003 sont retenus selon l'étude bibliographique réalisée en 1.2.2.

1.3 Le risque sécheresse géotechnique

Les désordres touchant les bâtiments qui sont attribués aux mouvements des sols gonflants sont discrets voire parfois non visibles, et ils ne mettent pas en danger les vies humaines. Mais ils ne représentent pas moins l'un des plus coûteux sinistres que connaissent de nombreux pays, souvent classé 2nd après les inondations. Aux Etats-Unis d'Amérique, les dégâts ont été estimés pour l'année 1976 à 2,25 Milliards de dollars (GILBERT ET BUCHANAN, 1977, VERDEL, 1993). En France, les indemnisations cumulées dans le cadre des catastrophes naturelles entre 1989 et 2003 ont représenté plus de trois Milliards d'Euros (Vincent, 2003), devenant ainsi le second poste de remboursement après les inondations.

Les causes ayant conduit à ces sinistres sont dues principalement à une identification inadéquate de la nature gonflante du sol et à une mauvaise prise en charge du phénomène lors de la construction. Les moyens de préventions existent pourtant et ne représentent qu'un faible coup au moment de la construction, **faible cout vis-à-vis de pertes potentielles**.

L'objet de ce chapitre est de détailler les éléments intervenant dans la problématique, à savoir : (1) préciser la nature du sol sub-affleurant et sa susceptibilité au RGA, (2) le bâtiment et sa vulnérabilité ainsi que (3) les facteurs environnants internes et externes.

3.1 La susceptibilité du sol au RGA

La nature argileuse du sol est le principal facteur de susceptibilité du sol au RGA. Même si les argiles n'ont pas toutes les mêmes propriétés et que les sols ont des textures et des compositions chimiques variables, la présence d'argile reste un critère déterminant pour les déclarations de reconnaissance d'état de CatNat, comme nous l'avons détaillé en 1.3.3. Quelles sont les connaissances géologiques et géotechniques actuelles qui permettent de définir l'emplacement des ces argiles gonflantes en France et tout particulièrement dans l'est parisien ?

L'objet de cette partie n'est pas de faire une synthèse de l'histoire géologique du bassin de Paris ou de refaire la cartographie géologique en Île-de-France, mais de détailler les connaissances actuelles sur les formations géologiques affleurantes en particulier celles qui sont susceptibles d'engendrer des phénomènes de retrait gonflement.

Cette partie aborde premièrement la sinistralité officielle à l'échelle nationale et départementale afin de souligner la relation entre les phénomènes de subsidence observée avec la géologie du territoire français, avant de détailler la bibliographie existante sur la caractérisation de la nature du sol affleurant dans l'est Parisien. Les données s'appuient d'une part sur la carte géologique du bassin parisien, sur rapports départementaux du BRGM en région d'Île-de-France pour les communes de sein de Saint Denis (93) et du Val-de-Marne (94), (Donsimoni, 2003) et sur des données topographique de l'IGN afin de détailler la géomorphologie conjointement avec la géologie.

Enfin ce travail bibliographique rappelle les informations géotechniques et d'essai mécanique en laboratoire sur les formations argileuses sensibles au retrait-gonflement et reconnues comme étant en cause dans la sinistralité (Yigzaw, 2009).

3.1.1. La sinistralité lié au RGA

A l'échelle nationale

Le phénomène de mouvement de terrain lié à la sécheresse géotechnique est largement distribué sur le territoire à l'échelle nationale. Depuis 1989, ce sont plus de 5 000 communes françaises, réparties dans 75 départements, qui ont été reconnues en état de catastrophe naturelle vis à vis du retrait-gonflement. Avec la sécheresse de 2003, le nombre de commune a augmenté de +62% avec 8000 communes en 2006 (Figure 9) grâce à une procédure exceptionnelle de reconnaissance de CatNat pour l'évènement de 2003 (source CCR).

Pourtant, certaines régions sont plus particulièrement touchées en se concentrant sur une partie du territoire et ceci en étroite corrélation avec la nature géologique du sol (Figure 10). C'est en particulier la couverture sédimentaire détritique d'âge éocène oligocène au sein des bassins et des plaines qui explique principalement la localisation et la concentration du nombre d'arrêté de catastrophe naturel lié au mouvement de terrain lié à la sécheresse. C'est le cas en particulier des plaines de Flandres, de la partie sud du Bassin de Paris et son centre à l'est de Paris, du fossé de la Limagne, de la région d'Apt et surtout de l'ensemble des coteaux molassiques du Sud-Ouest, entre Agen et Toulouse et le delta du Rhône. A contrario, les massifs armoricains de Bretagne, les massifs du jura, ceux du massif Central, les Pyrénées et les Alpes sont constitués des roches lithologiquement faibles en argile et plus induré, présentent une sinistralité quasi nulle.

Un examen plus attentif montre que la sur-sinistralité dépend également de la concentration urbaine et de son étalement spatial sur des formations argileuses susceptibles de retrait gonflement sur de vastes territoires à l'échelle des bassins sédimentaires : Est Parisien, périphérie de bordeaux et delta du Rhône autour de Marseille sont de bons exemples. L'évolution du nombre d'arrêtés de reconnaissance de catastrophe naturelle lié à la sécheresse entre les dates de 2003 et 2006 le prouve (Figure 9A et Figure 9B).

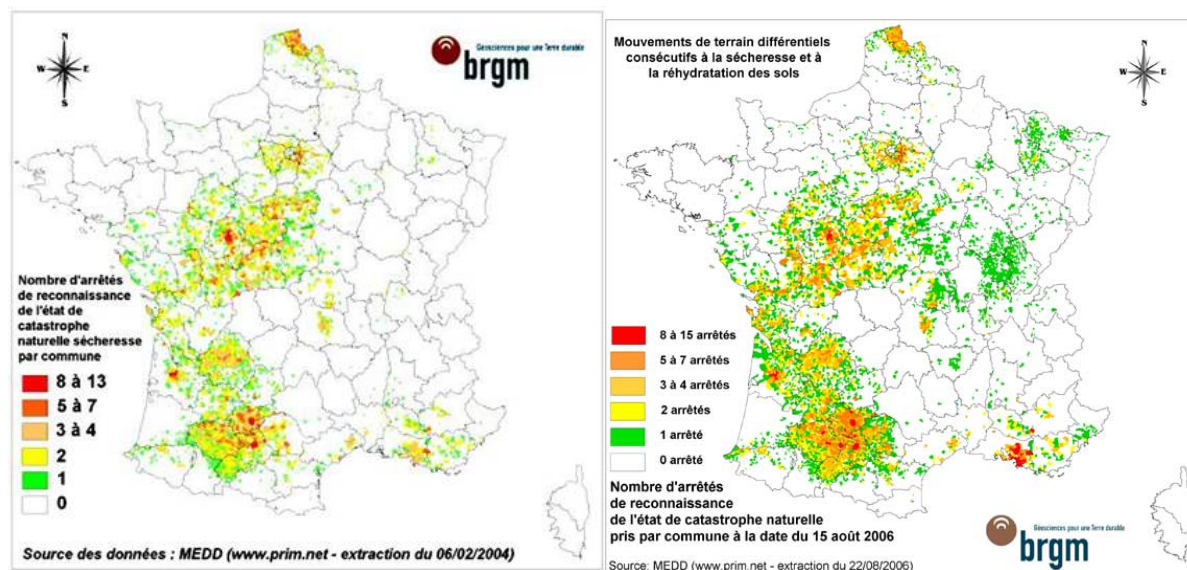


Figure 9 : Nombre d'arrêtés de reconnaissance de catastrophe naturelle lié à la sécheresse pris par commune entre 1989 et 2003 (carte de gauche) et 2006 (carte de droite). Sources MEDD, cartographie BRGM.

Pour la période comprise entre 1989 et 2003 (carte de droite, données mises à jour en mars 2005, issues du site prim.net géré par le MEDD), ces données ne tiennent compte que d'une partie des éventuelles reconnaissances consécutives à la sécheresse de l'été 2003.

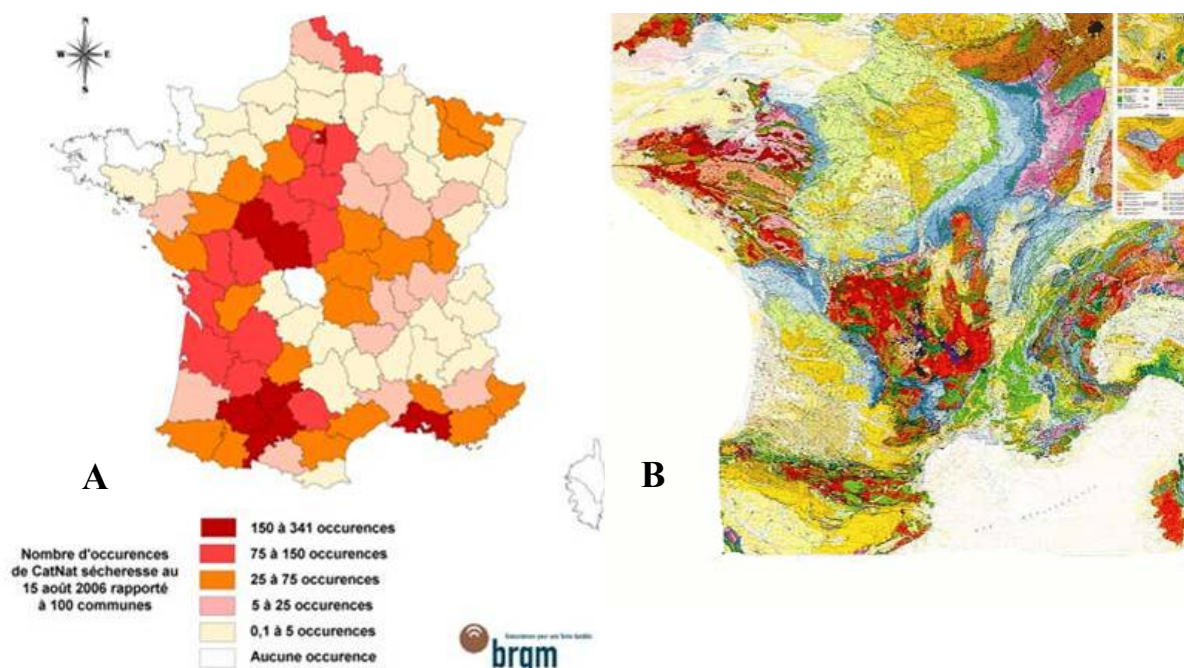


Figure 10: A- Classement des départements en fonction du nombre d'occurrences de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse rapporté à 100 communes, à la date du 15 août 2006. B- Carte géologique au 1/1.000.000 comparé à la sinistralité déclarée jusqu'en 2006.

A l'échelle de l'est parisien

Le document ci-dessous (Figure 12) présente la géomorphologie de la zone d'étude sous forme d'un estompage d'un MNT ainsi qu'un extrait de la carte géologique, documents détaillés ci-après lors de l'inventaire des formations argileuses.

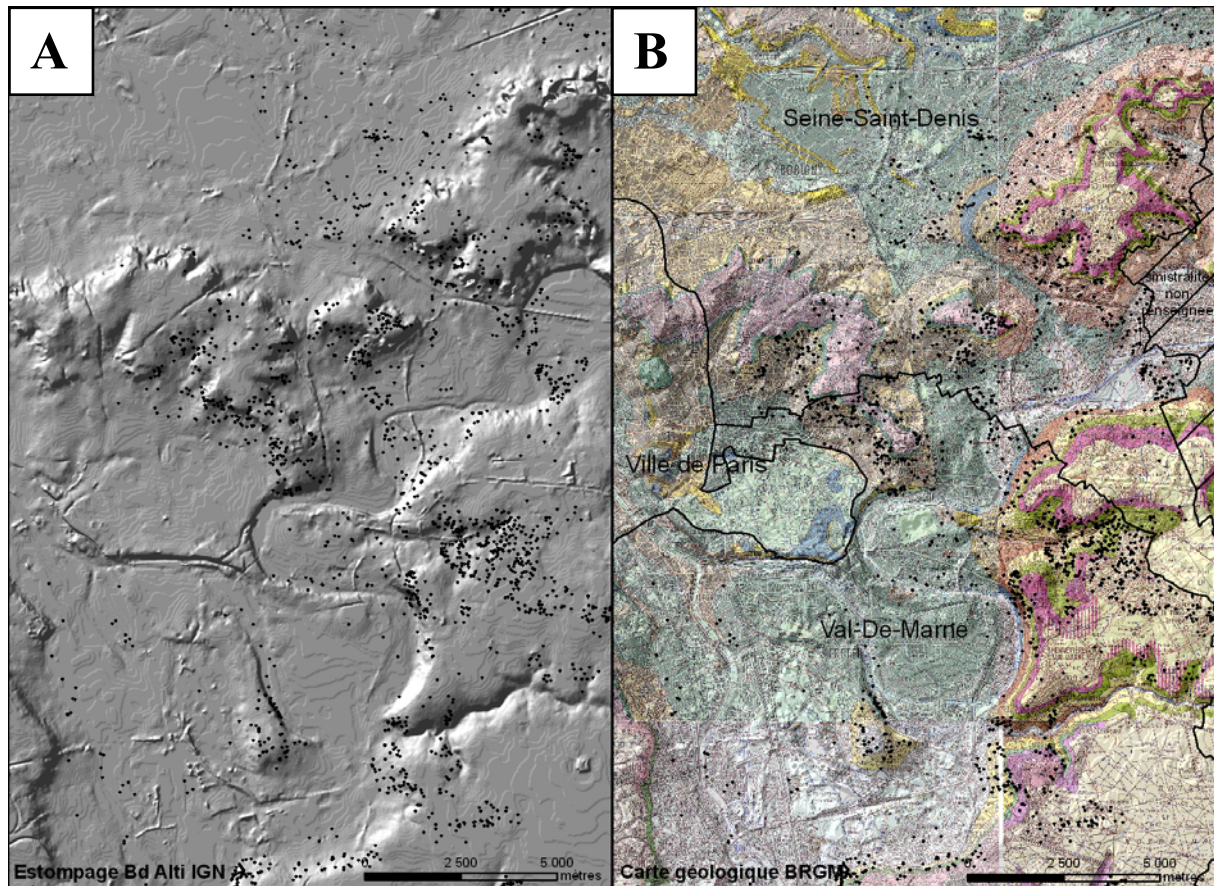


Figure 12 : A- Relief issu d'un estompage 315°N du MNT BdAlti® de l'IGN avec la sinistralité en points noirs entre 1989 et 2003, B- Extrait de cartes géologiques sur l'Est Parisien avec en points noirs la même sinistralité.

Quatre cartes géologiques du BRGM au 1:50 000 décrivent l'est parisien pour le travail proposé : la carte de Brie-Comte-Robert (Soyer et Goguel, 1963), la carte de Paris (1966), la carte de Corbeil-Essonnes (1987) et la carte de Lagny (1922). Cependant principalement celles de Lagny et de Paris recouvrent les sites d'étude, les informations lithologiques et stratigraphiques ont été saisies sur celle-ci.

D'un point de vue géographique, on observe que les communes les plus sinistrées dans l'Est parisien sont majoritairement présentes dans l'Est du département de Seine-Saint-Denis (93) et du Val-de-Marne (94) et dans l'Ouest du département de Seine-et-Marne (77). La répartition spatiale de la sinistralité est en étroite relation avec la nature géologique des sols affleurant, la géomorphologie et en partie avec les zones inondables en plaine alluviale à proximité des berges des rivières.

Six départements de la région d'Île-de-France comptent parmi les vingt départements ayant le plus fort taux de sinistralité à l'échelle nationale et sept des quinze départements ayant occasionnés le plus fort coût cumulé (Donsimoni, 2001).

La partie précédente a montré qu'à l'échelle nationale, le risque de retrait gonflement d'argiles est particulièrement prononcé sur les bassins sédimentaires de par la présence de

formations géologiques argilo-marneuses. Il s'agit maintenant de faire le point sur l'état actuel des connaissances géologiques et géotechniques relatives aux formations argileuses de l'Est Parisien, précisément sur la zone d'étude.

3.1.2. Les formations argileuses affleurantes

Nous présentons ici l'inventaire des formations argilo-marneuses sensibles au phénomène de RGA qui affleurent dans l'est Parisien en se basant sur quatre rapports départementaux du BRGM pour les départements de Seine-Saint-Denis (93) et de Val-de-Marne (94) (Donsimoni *et al.*, 2001, Donsimoni *et al.*, 2003, Plat *et al.*, 2007a, Plat *et al.*, 2007b), départements qui ont déjà fait l'objet d'une actualisation en 2007.

Il s'agit de mettre en évidence les formations argilo-marneuses les plus susceptibles au phénomène de retrait-gonflement d'argile dans les départements de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne, en s'appuyant sur les données de sinistralité officiellement déclarés entre 1989 et 2005. Même si la zone d'étude choisie de l'Est Parisien se limite à portion limitée des ces deux départements, il est important de prendre en compte l'environnement géologique régional, ce qui permet aussi de s'appuyer sur des chiffres de sinistralité pour une surface de territoire statistiquement significative de 472km².

Dans la mesure où les départements de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne sont d'une surface équivalente, il est intéressant de se rendre compte de la sinistralité de part et d'autre des ces départements, formations géologiques par formations géologiques. Ces deux départements couvrent la zone d'étude, il est important de faire la synthèse géologique des formations argilo-marneuses sensibles au RGA. La partie Ouest du département Seine-et-Marne (77) n'a pas été pris en compte dans cette analyse, du fait des importantes variations de faciès au sein des formations géologiques. De plus, le département de Seine-et-Marne est plus vaste que les deux autres réunis, ce qui aurait affecté les valeurs calculées de densité de sinistralité que nous souhaitons utiliser pour mettre en évidence les formations géologiques les plus sensibles au RGA.

Pour chaque formation géologique, le BRGM a réalisé une synthèse de données utiles à la problématique (Annexe 10, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) : le nombre de sinistre, la surface des affleurements et leur taux d'urbanisation. Il est intéressant d'étudier la sinistralité des formations géologiques de ces deux départements, toutefois cette comparaison des données a été rendu difficile en l'absence d'une synthèse de ces deux tables.

Afin de rendre compte de la sensibilité des sols dans l'Est Parisien, nous avons regroupés ces informations en une seule et unique table (Tableau 5), tout en respectant la nomenclature des formations géologiques. A partir du nombre de sinistre recensé et de la valeur de la surface urbanisée, la densité de sinistralité par km² a ainsi été calculée pour chaque formation géologique, d'une part pour chaque département et enfin pour l'ensemble des deux départements. L'inventaire des formations géologiques argilo-marneuses est placé

en Annexe 12 dans l'ordre des formations les plus récentes au plus anciennes, accompagnée de leur description lithostratigraphique extraite des rapports départementaux actualisés du BRGM ainsi que d'une analyse de sinistralité propre à chaque formation géologique. L'extension des formations géologiques est présentée ci-dessous (Figure 13) :

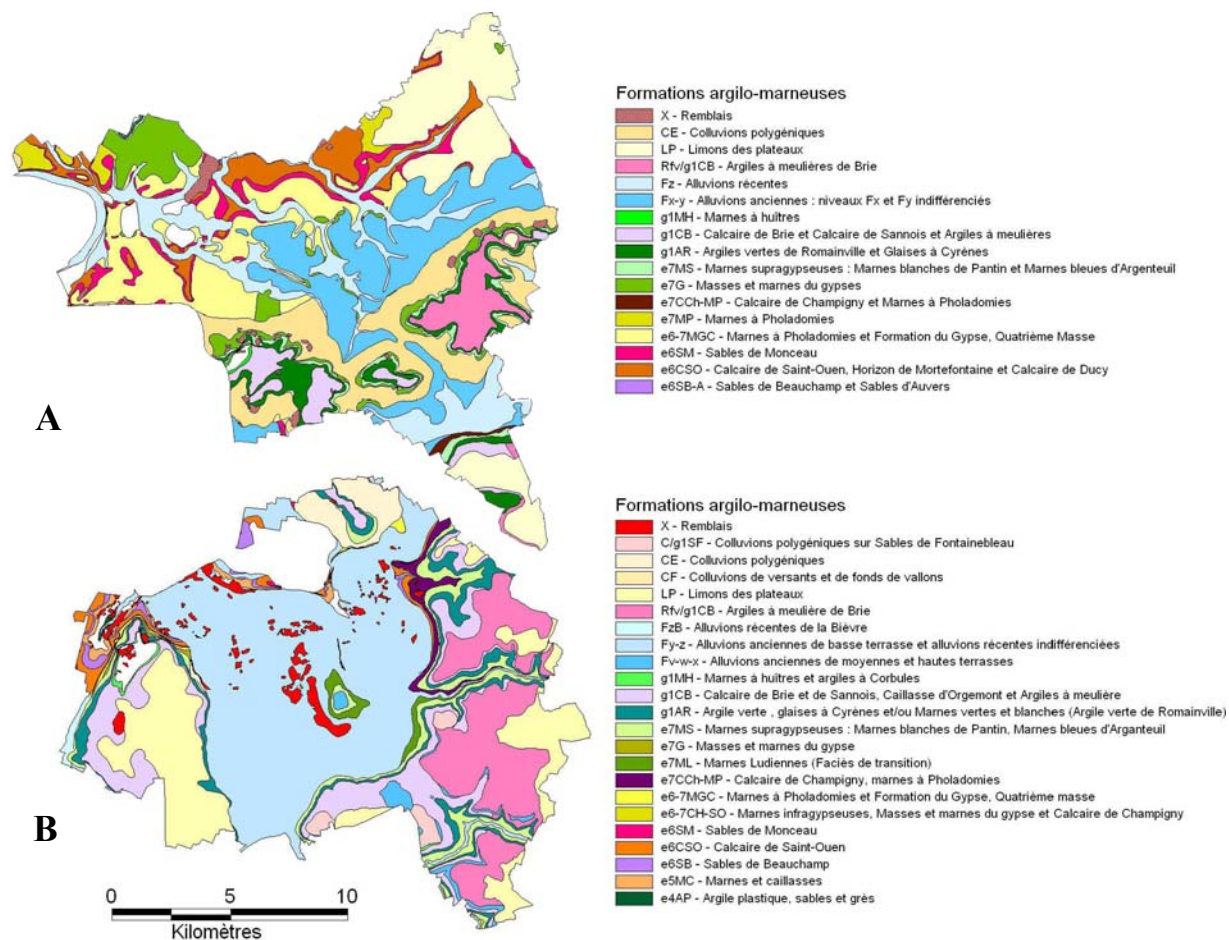


Figure 13: Carte des formations argilo-marneuses des départements de (A) Seine-Saint-Denis et (B) du Val-de-Marne (Source : BRGM, d'après Plat et al., 2007a, Plat et al., 2007b).

	Nombre de sinistres			Sinistres en %			Surfaces d'affleurement km²			Affleurement en %			Surface bâtie en m²			surface bâtie en %			Sinistralité Sinistres par km²		
Notation	93	94	Total	93	94	Total	93	94	Total	93	94	Total	93	94	Total	93	94	Total	93	94	Total
X	5	6	11	0.1%	0.1%	0.2%	2.64	6.42	9.06	0.6%	1.4%	1.9%	0.09	0.83	0.92	0.2%	1.5%	1.6%	55.6	7.2	N.S.
CE	649	189	838	12.6%	3.7%	16.3%	29.72	6.72	36.44	6.3%	1.4%	7.7%	4.71	1.34	6.05	8.4%	2.4%	10.8%	137.8	141.0	138.51
LP	134	8	142	2.6%	0.2%	2.8%	31.75	34.57	66.32	6.7%	7.3%	14.0%	1.71	1.68	3.39	3.1%	3.0%	6.1%	78.4	4.8	41.89
Rfv/g1CB	141	452	593	2.7%	8.8%	11.6%	8.99	31.49	40.48	1.9%	6.7%	8.6%	1.06	2.18	3.24	1.9%	3.9%	5.8%	133.0	207.3	183.02
CF	-	0	0	-	0.0%	0.0%	-	0.08	0.08	-	0.0%	0.0%	-	0	0	-	0.0%	0.0%	-	-	N.S.
C/g1SF	-	22	22	-	0.4%	0.4%	-	2.67	2.67	-	0.6%	0.6%	-	0.21	0.21	-	0.4%	0.4%	-	104.8	N.S.
Fz-FzB	225	11	236	4.4%	0.2%	4.6%	31.71	0.96	32.67	6.7%	0.2%	6.9%	3.76	0.13	3.89	6.7%	0.2%	6.9%	59.8	84.6	60.67
Fy-z	-	359	359	-	7.0%	7.0%	-	91.91	91.91	-	19.4%	19.4%	-	12.47	12.47	-	22.3%	22.3%	-	28.8	28.79
Fx-y	412	-	412	8.0%	-	8.0%	37.94	-	37.94	8.0%	-	8.0%	6.67	-	6.67	11.9%	-	11.9%	61.8	-	61.77
Fv	-	31	31	-	0.6%	0.6%	-	3.09	3.09	-	0.7%	0.7%	-	0.22	0.22	-	0.4%	0.4%	-	140.9	N.S.
g1MH	1	6	7	0.0%	0.1%	0.1%	0.31	0.58	0.89	0.1%	0.1%	0.2%	0.07	0.1	0.17	0.1%	0.2%	0.3%	14.3	60.0	N.S.
g1CB	102	214	316	2.0%	4.2%	6.2%	7.46	24.34	31.8	1.6%	5.1%	6.7%	1.26	2.44	3.7	2.2%	4.4%	6.6%	81.0	87.7	85.41
g1AR	318	447	765	6.2%	8.7%	14.9%	9.4	12.03	21.43	2.0%	2.5%	4.5%	1.27	1.54	2.81	2.3%	2.7%	5.0%	250.4	290.3	272.24
e7MS	190	650	840	3.7%	12.7%	16.4%	4.83	11.12	15.95	1.0%	2.4%	3.4%	0.45	1.27	1.72	0.8%	2.3%	3.1%	422.2	511.8	488.37
e7G	147	12	159	2.9%	0.2%	3.1%	13.21	0.38	13.59	2.8%	0.1%	2.9%	1.64	0.07	1.71	2.9%	0.1%	3.1%	89.6	171.4	92.98
e7ML	-	70	70	-	1.4%	1.4%	-	2.19	2.19	-	0.5%	0.5%	-	0.29	0.29	-	0.5%	0.5%	-	241.4	N.S.
e7CCh-MP	21	88	109	0.4%	1.7%	2.1%	0.69	3	3.69	0.1%	0.6%	0.8%	0.12	0.36	0.48	0.2%	0.6%	0.9%	175.0	244.4	N.S.
e7MP	19		19	0.4%		0.4%	3.76		3.76	0.8%	-	0.8%	0.37	-	0.37	0.7%	-	0.7%	51.4	-	51.35
e6-7MGC	35	54	89	0.7%	1.1%	1.7%	27.41	0.83	28.24	5.8%	0.2%	6.0%	3.58	0.19	3.77	6.4%	0.3%	6.7%	9.8	284.2	23.61
e6-7CHSO	-	2	2	-	0.0%	0.0%	-	0.11	0.11	-	0.0%	0.0%	-	0.01	0.01	-	0.0%	0.0%	-	200.0	N.S.
e6SM	40	8	48	0.8%	0.2%	0.9%	9.14	0.42	9.56	1.9%	0.1%	2.0%	1.05	0.06	1.11	1.9%	0.1%	2.0%	38.1	133.3	43.24
e6CSO	11	41	52	0.2%	0.8%	1.0%	13.03	3.48	16.51	2.8%	0.7%	3.5%	1.05	0.71	1.76	1.9%	1.3%	3.1%	10.5	57.7	29.55
e6SB-A	0	1	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.02	2.16	2.18	0.0%	0.5%	0.5%	0	0.56	0.56	0.0%	1.0%	1.0%	-	1.8	N.S.
e5MC	-	4	4	-	0.1%	0.1%	-	1.92	1.92	-	0.4%	0.4%	-	0.45	0.45	-	0.8%	0.8%	-	8.9	N.S.
e4AP	-	7	7	-	0.1%	0.1%	-	0.21	0.21	-	0.0%	0.0%	-	0.04	0.04	-	0.1%	0.1%	-	175.0	N.S.
	2450	2682	5132	47.74%	52.26%	100.00%	232.01	240.68	472.69	49.08%	50.92%	100.00%	28.86	27.15	56.01	51.53%	48.47%	100.00%	84.8926	98.7845	91.6265

Tableau 5 : Synthèse des données de sinistralité, d'affleurement et d'urbanisation relative aux formations marno-argileuses reconnues sensibles au RGA pour les département de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne (données d'après Plat et al., 2007a, Plat et al., 2007b).

La densité de sinistralité est calculé sur la base des surfaces réellement batie. Si cette surface est inférieure à 1 km2, la valeur de sinistralité est considérée comme non significative, noté N.S. le cas échéant. Les descriptions lithologiques correspondant au notation des formations géologiques est disponible à l'Annexe 12.

Nom de la formation argilo-marneuse	Notation	Sinistralité Désordres, %		Affleurements Surface, %		Urbanisation Surface, %		Sinistralité sinistres/km ²
Marnes supragypseuses Marnes blanches de Pantin et Marnes bleues d'Argenteuil	e7MS	840	16.4%	15.95	3.4%	1.72	3.1%	488.37
Argiles vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes	g1AR	765	14.9%	21.43	4.5%	2.81	5.0%	272.24
Argiles à meulière de Brie	Rfv/g1CB	593	11.6%	40.48	8.6%	3.24	5.8%	183.02
Colluvions polygéniques	CE	838	16.3%	36.44	7.7%	6.05	10.8%	138.51
Masses&marnes du Gypse	e7G	159	3.1%	13.59	2.9%	1.71	3.1%	92.98
Calcaire de Brie. Calcaire de Sannois et Argiles à meulière	g1CB	316	6.2%	31.8	6.7%	3.7	6.6%	85.41
Alluvions anciennes Fx Fy indifférenciés	Fx-y	412	8.0%	37.94	8.0%	6.67	11.9%	61.77
Limons des plateaux	LP	142	2.8%	66.32	14.0%	3.39	6.1%	41.89
Calcaire de Saint-Ouen Horizon de Mortefontaine et Calcaire de Ducy	e6CSO	52	1.0%	16.51	3.5%	1.76	3.1%	29.55
Remblais	X	11	0.2%	9.06	1.9%	0.92	1.6%	N.S.
Calcaire de Champigny & Marnes à Pholadomies	e7CCh-MP	109	2.1%	3.69	0.8%	0.48	0.9%	N.S.
Sables de Beauchamp et Sables d'Auvers	e6SB-A	1	0.0%	2.18	0.5%	0.56	1.0%	N.S.
totaux		5132	100.00%	472.69	100.00%	56.01	100.00%	μ= 91.6

Tableau 6 : Liste des formations argilo-marneuses relatives à la zone d'étude extraite de Tableau 5, classée par ordre de densité de sinistralité décroissante. NS : Non significatif.

L'inventaire des formations argilo-marneuses (voir Annexe 12) montre que la majorité des sols sont potentiellement candidate au phénomène de retrait-gonflement d'argiles, cependant parmi celles qui affleurent dans la zone d'étude, il a été nécessaire d'effectuer un tri selon leur densité de sinistralité Tableau 6, par valeur décroissante.

Parmi les formations argilo-marneuses affleurant dans la zone, deux d'entre elles se distinguent pour leur taux de sinistralité extrêmement élevée : La formation des Marnes Supragypseuses Marnes blanches de Pantin et Marnes bleues d'Argenteuil, noté e7MS et les Argiles Vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes noté g1AR, avec respectivement 488,4 sinistres par km² et 272,2 sinistres par km², ce qui représente des taux supérieurs jusqu'à trois à cinq fois plus la densité moyenne de 91,6 sinistres par km² pour les département de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne. Deux autres formations se distinguent également pour leur fort un taux de sinistralité « modérément élevé », car au dessus de la valeur moyenne : Argiles à meulière de Brie noté Rfv/g1CB et les Colluvions polygéniques noté CE avec respectivement 183 sinistres par km² et 138,5 par km².

Nous avons retenu pour cette étude bibliographique la formation des Marnes Supragypseuses, Marnes blanches de Pantin et Marnes bleues d'Argenteuil, noté respectivement ci-après « MBP » et « MBA », et la formation Les Argiles Vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes, noté ci-après « AVR ». Ces deux formations géologiques font l'objet d'une description géotechnique ci après.

3.1.3. Cartographie de l'aléa retrait gonflement par le BRGM

Le BRGM a réalisé une cartographie de l'aléa retrait gonflement à l'échelle départementale en Île-de-France, en s'appuyant sur les connaissances géologiques des cartes au 1/50 000 et en prenant en compte les informations géotechniques disponibles pour caractériser la susceptibilité du sol au retrait gonflement.

L'objet de cette partie est présenter une synthèse de la méthode et de ses limites, ainsi que le résultat cartographique pour les départements de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne.

Ces deux départements ont fait l'objet d'une première cartographie associée à une publication de rapport en 2001 (disponibles sur le site www.argiles.fr du BRGM) pour la Seine-Saint-Denis (Donsimoni *et al.*, 2001) et en 2003 pour le Val-de-Marne (Donsimoni *et al.* 2003). Ces travaux ont été actualisés en 2007 (Plat *et al.*, 2007a, Plat *et al.*, 2007b) avec des adaptations méthodologiques afin d'affiner et d'harmoniser la cartographie départementale.

La méthodologie de cartographie de l'aléa et ses limites

La méthode de cartographie (Vincent *et al.*, 2008) mise au point par le BRGM consiste à attribuer un degré d'aléa aux formations argilo-marneuses issues de la carte géologique à l'échelle du 1/50 000. Le degré d'aléa est obtenu en effectuant la somme des deux notes, la note de susceptibilité et la note de densité de sinistres, obtenues pour chaque formation, en affectant un poids double à la note de susceptibilité. L'indice d'aléa obtenu est compris entre 3 et 9, hiérarchisé en trois catégories : aléa faible, moyen et fort.

La note de susceptibilité est établie sur la base de trois critères : 1) la nature lithologique au sens granulométrique, 2) la composition minéralogique de par la présence de minéraux argileux gonflants, et 3) le comportement géotechnique selon des essais « classiques » d'indice de plasticité, de valeur de bleu et de retrait linéaire.

La note de sinistralité est établie pour chaque formation argileuse, densité de sinistres ramenée à 100 km² de surface réellement urbanisée avec l'établissement de trois catégories : note 1) sinistralité faible, note 2) sinistralité moyenne, note 3) sinistralité forte.

Une des limites de cette méthode est liée à la nature de la carte géologique. La cartographie géologique est réalisée à partir de l'interprétation des observations des minutes de terrain (observations) et des sondages effectués, ce travail réalisé n'ayant pas pour finalité de représenter rigoureusement les cinq premiers mètres d'affleurement du sol. La problématique du RGA devrait inclure une interprétation pédogénétique des sols à une échelle au 10000, ce qui n'est pas l'objet de la cartographie géologique.

Une seconde limite tiens à l'échelle cartographique au 1/50000 et donc au degré de précision de la cartographie géologique. En particulier les changements de faciès au sein d'un même horizon géologique sont mal représentés, hétérogénéités qui traduisent des conditions paléo environnementales spécifiques lors du dépôt des sédiments. En effet, la cartographie géologique privilégie la datation des horizons où à chaque formation géologique est attribuée un étage stratigraphique bien délimitée dans le temps, mais cela au détriment de sa variation lithologique dans l'espace. Si des affleurements de référence désignent la composition type d'une formation géologique, leurs variations de faciès sont interprétées par interpolation entre différents sondages géologique, mais parfois en nombre insuffisants pour contraindre les réels changements lithologiques au sein d'une même formation géologique. Ainsi des formations hétérogènes telles que Les Limons de Plateaux (LP) ou encore les Argiles à meulière de Brie (Rfv/g1CB) sont mal précisées tant au niveau de leur épaisseur que de leur composition lithologique.

La cartographie de l'aléa retrait-gonflement proposée par le BRGM est rendue d'autant plus complexe qu'il est nécessaire d'harmoniser les informations géologiques entre les différentes cartes géologiques, au détriment de leur réelle lithologie, les formations les plus superficielles ayant souvent été diversement interprétées d'une feuille à l'autre. Ceci est illustré par les alluvions Fx, Fy et Fz, qui sont de nature hétérogène et dont la nature lithologique dépend des apports sédimentaires spécifiques à la localité. Leur cartographie repose sur leur faciès de dépôt, mais cela est insuffisant pour déterminer localement les dépôts argileux en leur seins, présents sous forme de lentille, plaquages ou encore de poches, dépôts pourtant extrêmement sensibles au RGA. Cela est d'autant plus problématique que les alluvions couvrent une vaste partie du territoire en basse altitude dans les plaines alluviales sur près de 165,6km² dans les départements de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne, soit 34,4% de la surface considérée.

Le BRGM reconnaît les limites de la cartographie d'aléa : « Ces considérations sont importantes car elles expliquent pourquoi les cartes d'aléa ainsi élaborées ne peuvent en aucun cas prétendre refléter en tout point l'exacte nature des terrains présents en surface ou sub-surface. En particulier il n'est pas exclu que, sur les secteurs considérés d'aléa a priori nul (qui sont présentés sans figuré spécifique sur les cartes d'aléa), se trouvent localement des zones argileuses d'extension limitée [...] à l'échelle de la parcelle constructible, elles sont en tout cas de nature à provoquer des sinistres isolés. Inversement, il est possible que, localement, certaines parcelles situées pourtant dans un secteur dont l'aléa retrait-gonflement des argiles a été évalué globalement comme non nul soient en réalité constituées de terrains non sensibles au phénomène, voire non argileux. » (Extrait du site argiles.fr)

Cartographie de l'aléa RGA dans l'est parisien : départements de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne

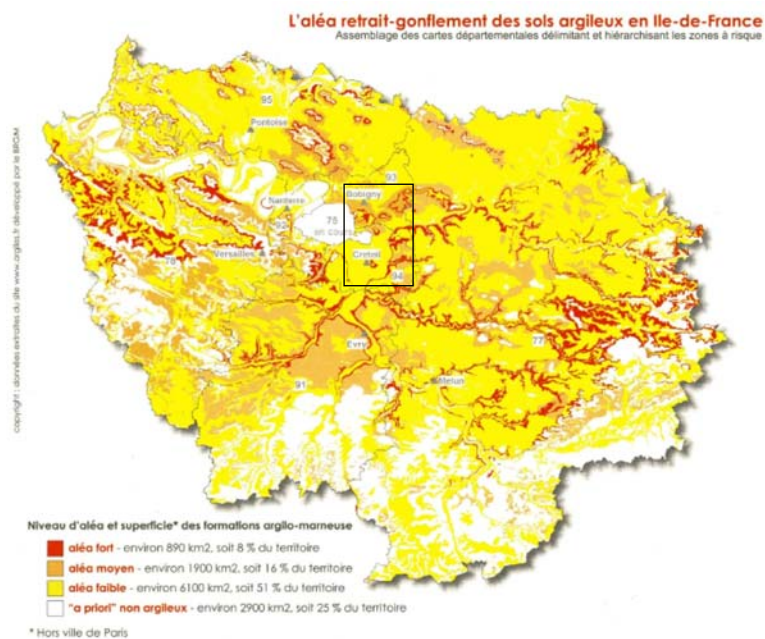


Figure 14 : Cartographie de l'aléa retrait gonflement du BRGM pour l'Île-de-France

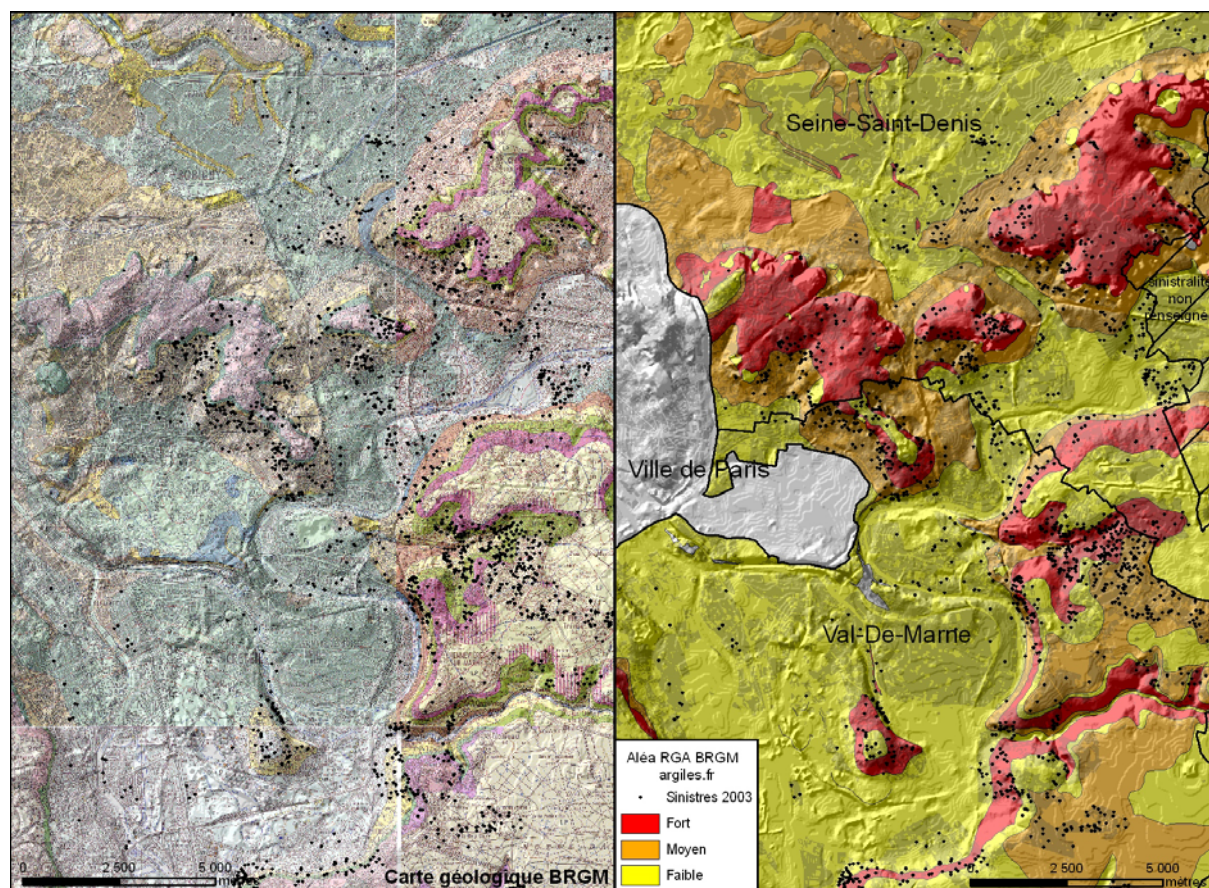


Figure 15: Carte géologique BRGM comparé à la cartographie de l'aléa retrait gonflement d'argile du BRGM.

Cartographie de l'aléa pour le département de Seine-Saint-Denis (93)

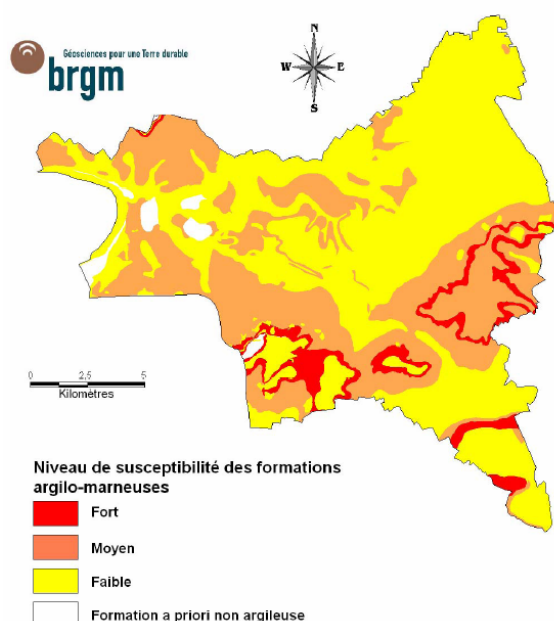


Figure 16 : Cartographie de l'aléa RGA pour le département de Seine-Saint-Denis (Plat et al., 2007)

Dans le département de Seine-Saint-Denis (Plat E. et al., 2007), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître vingt formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles dix-sept formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement. La mise en oeuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées 3 classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses.

Sur une superficie d'affleurement de 237 km², on constate que :

- 6,2% (14,7 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 35,5% (84,1 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 56,7% (134,4 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- moins de 2% (environ 4 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses. Les zones d'aléa fort correspondent à trois formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :
 - Argiles vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes (g1, AR), sur 9,40 km² ;
 - Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 4,83 km² ;
 - Marnes à Huîtres (g1, MH), sur 0,31 km².

Ces trois formations classées en aléa fort représentent 6,2% de la surface urbanisée du département (cette surface étant estimée à 30 km², soit 12,5% de la superficie totale du département), avec 20,8% des sinistres répertoriés (509 sur un total de 2451). Les zones d'aléa moyen correspondent à 6 formations géologiques, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Colluvions polygéniques (CE) ;

- Marnes à Pholadomies et Formation du Gypse, 4ème masse du Gypse (e6-7, MGC) ;
Masses et marnes du Gypse (e7, G) ;
- Argiles à meulières de Brie (Rfv/g1, CB) ;
- Marnes à Pholadomies (e7, MP) ;
- Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies (e7, CCh-MP)

Cartographie de l'aléa pour le Val-de-Marne (94)

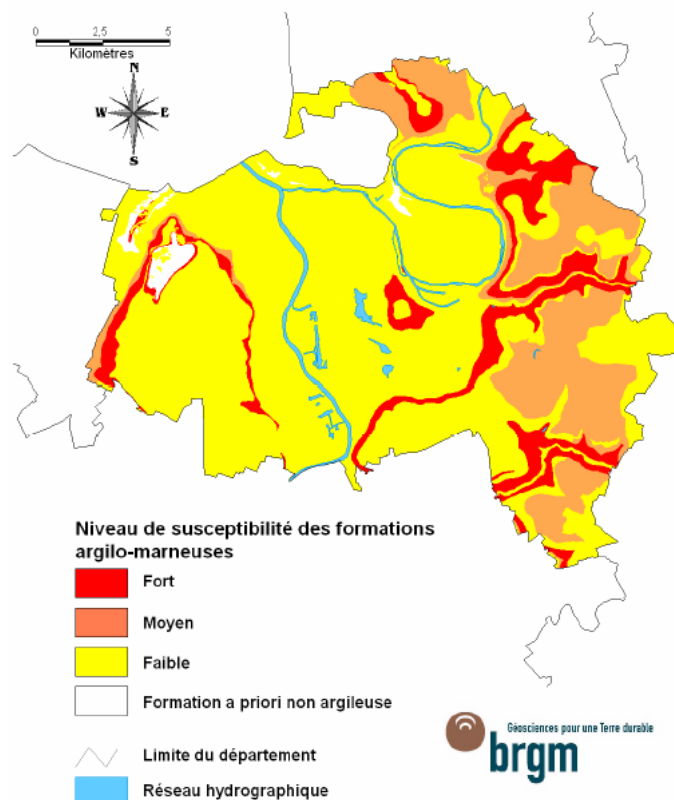


Figure 17: Cartographie de l'aléa RGA pour le département de Val-de-Marne (Plat et al., 2007)

Dans le département de Val-de-Marne (Plat E. *et al.*, 2007), la carte géologique au 1/50 000 fait apparaître 20 formations géologiques à l'affleurement, parmi lesquelles 23 formations principalement ou partiellement argileuses ou marneuses ont été identifiées comme sensibles aux processus de retrait-gonflement.

La mise en oeuvre de la méthodologie rappelée conduit à établir une carte d'aléa où sont distinguées trois classes d'aléa (fort, moyen, faible) parmi les zones argileuses ou marneuses. Sur une superficie d'affleurements de 244 km², on constate que :

- 10,7% (26,1 km²) sont classés en zone d'aléa fort ;
- 17,8% (43,4 km²) sont classés en zone d'aléa moyen ;
- 70,1% (171,0 km²) sont classés en zone d'aléa faible ;
- moins de 1,5% (environ 4 km²) sont classés en zone d'aléa nul à négligeable, car correspondant à des formations géologiques a priori non argileuses.

Les zones d'aléa fort correspondent à cinq formations géologiques particulièrement sensibles aux processus de retrait-gonflement, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles vertes de Romainville, Glaises à Cyrènes (g1, AR), sur 12,03 km² ;
- Marnes supragypseuses : Marnes bleues d'Argenteuil et Marnes blanches de Pantin (e7, MS), sur 11,12 km² ;
- Marnes ludiennes (faciès de transition, e7, ML), sur 2,19 km² ;
- Marnes à Huîtres et Argiles à Corbules (g1, MH), sur 0,58 km² ;
- Argile plastique, sables et grès (e4, AP), sur 0,21 km².

Ces cinq formations classées en aléa fort représentent 11,6% de la surface urbanisée du département (cette surface étant estimée à 28 km², soit 11,4% de la superficie totale du département), avec 44% des sinistres répertoriés (1180 sur un total de 2682). Les zones d'aléa moyen correspondent à sept formations géologiques, classées par ordre de surfaces d'affleurement décroissantes :

- Argiles à meulière de Brie (Ffv/g1, CB) ;
- Colluvions polygéniques (CE) ;
- Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies (e7, CCh-MP) ;
- Alluvions récentes de la Bièvre (Fz, B) ;
- Marnes à Pholadomies et Formation du Gypse, 4ème masse du Gypse (e6-7, MGC) ;
- Masses et marnes du Gypse (e7, G) ;
- Marnes infragypseuses, Masses et marnes du gypse et Calcaire de Champigny (e6-7, CH-SO).

Le retour d'expérience attaché à cette démarche méthodologique permet de dire (Vincent et al., 2008) que : 1) les secteurs classés en aléa fort correspondent à des zones où affleurent des formations argileuses riches en smectites, avec une forte sinistralité pour les zones actuellement urbanisées, 2) les secteurs classés en aléa moyen correspondent à des zones où les formations géologiques à l'affleurement sont argileuses mais plus hétérogènes, avec une sinistralité moins régulière, 3) les secteurs classés en aléa faible correspondent à des zones où les formations géologiques à l'affleurement sont très hétérogènes, seulement localement argileuses, avec une sinistralité très irrégulièrement répartie.

3.2 Les facteurs intervenants

Il faut distinguer les facteurs déclenchant et les facteurs de prédispositions : **Les facteurs de prédisposition** sont ceux dont la présence induit le phénomène de retrait-gonflement, mais ne suffit pas à elle seule à le déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement avec le temps. On distingue les facteurs internes qui sont liés à la nature du sol et des facteurs d'environnement qui caractérisent plutôt le site. Les facteurs de prédisposition permanents conditionnent en fait la répartition spatiale du phénomène. Ils permettent de caractériser la susceptibilité du milieu vis à vis du phénomène de retrait-gonflement. **Les facteurs déclenchant** sont ceux dont la présence provoque le phénomène de retrait-

gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. La connaissance des facteurs déclenchant permet de déterminer l'occurrence du phénomène (autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité).

Le processus de retrait gonflement des sols est déclenché par un facteur externe climatique et amplifié par des facteurs locaux aggravants dont certains sont d'origine anthropiques.

L'occurrence du phénomène de sécheresse géotechnique est influencée par les facteurs extérieurs suivant : a) la végétation puisque les arbres sont le plus souvent de grands consommateurs d'eau par l'intermédiaire des racines contribuant ainsi à son assèchement les variations climatiques avec l'alternance de périodes de temps pluvieux et sec notamment ; b) La pente et le relief du terrain ; c) Les variations du niveau des nappes à savoir l'hydrogéologie ; d) les actions de l'homme par modifications des écoulements, imperméabilisation des sols, fuites sur les réseaux d'eau, pompes.

3.2.1. La végétation

La végétation est un facteur aggravant du Retrait Gonflement d'Argiles (REF). En période de sécheresse, lorsque les prélèvements en eau sont supérieurs aux apports météoriques, la succion exercée par les racines diminue la teneur en eau du sol et donc accentue alors son assèchement. Un retrait de l'eau provoque alors un tassement du sol en particulier si celui-ci est argileux. S'il y a de la végétation arborée à une faible distance du bâtiment, les racines se développent à proximité -voire sous les bâtiments- et induisent des tassements différentiels préjudiciables à la stabilité de leurs structures engendrant des désordres. Le tassement du sol se traduit par la formation d'une cuvette concentrique où l'arbre occupe le centre de la dépression avec des mouvements de la surface du sol radiaux. En plus de ces mouvements verticaux, il se développe des ouvertures de fissures verticales représentant des fentes de dessiccation -ou Mud cracks en anglais- superficiellement. En sous sol, la profondeur d'action des racines selon Bidle (1984) n'affecterait pas les sols au-delà de trois mètres de profondeur. Cependant des bâtiments fondés même à trois mètres ont montré sous leurs fondations des racines importantes et les tassements liés à ces racines qui ont entraînés des dommages (guide prévention, sécheresse et construction, MEDD, 1993). L'influence des arbres en profondeur peut se faire sentir jusqu'à une profondeur de quatre à cinq mètres (ref).

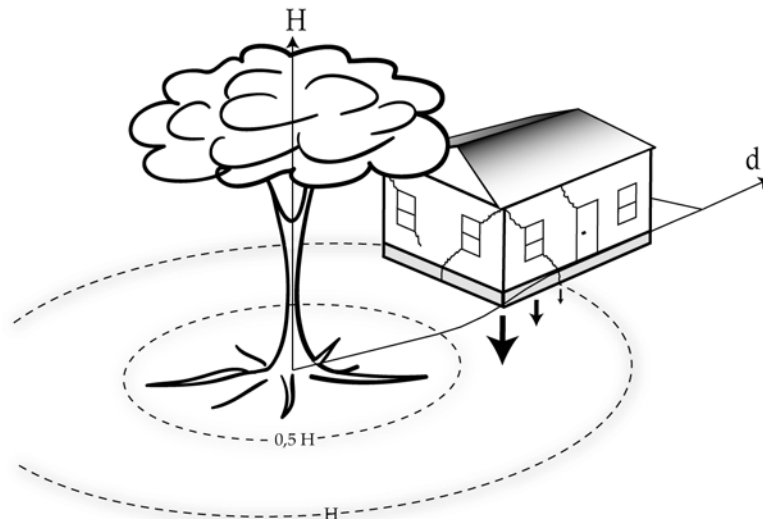


Figure 18 : Action de la végétation sur le sol et dommages inhérents.

La surface d'action exercée par l'arbre et ses racines est à priori concentrique. Les tassements différentiels occasionnés sont sources de dommage sur le bâti selon sa proximité, exprimé proportionnellement par rapport à sa hauteur.

Un bâtiment soumis au domaine d'influence de l'arbre va donc subir une double distorsion, verticale et horizontale. Les mouvements différentiels ont un effet particulièrement important sur les angles des habitations et sur les maçonneries à faible rigidité. Les fissures apparaissent ainsi principalement dans les zones de moindres résistances sur le bâti telle que les fenêtres, lucarne et portes.

Les sols soumis à la dessiccation, aggravée par la présence de la végétation peuvent à nouveau s'expanser avec le retour de l'humidité en période hivernale, ce qui induit également des effets à retardement bien après la sécheresse géotechnique. Le sol perd sa teneur en eau et la récupère d'autant plus facilement que le sol est perméable et humide. Cependant dans le cas des sols argileux, le rééquilibrage de la teneur en eau peut être lent et avoir un caractère saisonnier [guide prévention, sécheresse et construction, MEDD, 1993]. Ainsi des mouvements plus ou moins réversibles de la surface topographiques sont attendus et sont particulièrement étudiés ci après.

Bien que chaque plante soit caractérisée par son interaction avec le climat et le sol, la zone d'influence des racines des arbres dépend des facteurs suivants, classés par ordre d'importance :

(1) L'essence de l'arbre. Chaque espèce végétale possède sa propre séquence génétique de développement. Cette programmation détermine dans le temps les différents stades de croissance et de vieillissement au cours duquel temps l'arbre va développer des affinités avec le sol et l'environnement. L'arbre développe un système racinaire spécifique selon l'essence qui devient plus ou moins concentré autour de lui selon son âge. Avec son vieillissement, les besoins en eau de l'arbre diminuent. On estime que l'extension spatiale aérienne est similaire au développement souterrain. Cependant, malgré la spécificité de

chaque essence, son adéquation avec l'environnement direct impose à la plante de développer ses racines en fonctions des conditions du milieu. C'est ainsi que des plantes qui se développent dans un milieu avec peu d'affinité, ne vont pas avoir une extension spatiale (aérienne et souterraine) maximale pour lesquelles elles sont programmées. Le système racinaire théorique connu peu être obtenu et plus ou moins atteinte selon les conditions du milieu (nature du sol et ressource du sous-sol).

Type	Schéma	Exemples
Pivotant		A enracinement profond Châtaignier, chêne sessile, chêne pédonculé, tilleul Sapin pectiné, sapin de Vancouver A enracinement moyennement profond Pin laricio de Corse
Tracant		Bouleau pubescent, bouleau verruqueux, Epicea commun, peupliers (divers), tremble
Oblique		A enracinement profond Hêtre, pin noir d'Austriche A enracinement moyennement profond Charme, érable, hêtre Douglas

(ONF, 1999)

Figure 19 : Le système racinaire de l'arbre isolé.
Ce système dépend de l'essence de l'arbre, de la texture du sol

(2) La maturité de l'arbre. Lors de son développement, un arbre accroît sa surface d'échange foliaire augmentant ainsi son potentiel d'évapotranspiration et donc ses besoins en eau. La maturité de l'arbre se traduit donc par sa taille mais il faut souligner que la hauteur maximum atteinte est variable selon les essences.

(3) Le nombre d'arbres. Une importante densité d'arbre accroît localement les prélèvements en eau ce qui provoque des tassements cumulés dans le temps. L'influence d'une population d'arbre sur le sol est donc additive.

(4) La nature du sol. La nature du substrat facilite ou non le développement du système racinaire. Dans le cas d'un sol argileux, les racines se développent principalement en surface dans les premiers 100 centimètres du sol altéré par la bioturbation et donc riche en humus, et oxygéné grâce à l'interface sol/air. La plante met en place une stratégie de développement racinaire pour couvrir ses besoins en eau et nutriments. **On estime qu'il faut XXm2 de sol non couvert pour assurer le bon développement d'un arbre** (ref). Enfin il faut noter que le développement des racines peut être asymétrique du fait de l'hétérogénéité du sol (roche dure, sol sec) alors que dans un milieu favorable au développement de l'essence de l'arbre, les racines se développent en circonférence.

(5) Les ressources disponibles. L'influence racinaire est liée à son extension dans le sol. Or les racines se développent préférentiellement selon les ressources disponibles et en fonction du gradient d'humidité dans le sous-sol. L'espace du sol confiné sous une maison favorise la présence d'humidité ce qui favorise le développement racinaire vers cette zone plus humide. L'apport d'eau artificielle par l'homme comme la présence de fuite de canalisation ou les rejets d'eau de pluie attire également le système racinaire.

Quelle est la distance d'action de la végétation ? Dans le cas de la végétation arborée, on estime que le développement en surface (ramure, feuillage) est du même ordre que dans le sous-sol pour les racines. En effet, la consommation en eau dépend de l'évapotranspiration du feuillage de l'arbre. Ainsi, le vieillissement de l'arbre diminue sa capacité de prélèvement en eau et donc le potentiel de tassement. De même, un arbre qui a été élagué ou étêté voit ses besoins en eau largement diminuer ce qui permet amoindrir le phénomène de tassement du sol. Mais le principal facteur à prendre en compte est l'essence de l'arbre. Une étude détaillée de Cutler et Richardson (1989) précise pour chaque essence la hauteur des arbres et la distance d'action maximale à laquelle des désordres ont été observées (Tableau 7).

	chêne	peuplier	frêne	faux acacia	marronnier	tilleul	saule	aubépine	hêtre	platane	pommier/poirier	érable	cerisier prunier	bouleau	Opulus	sorrier/cornier	allier	orme	trène	rosier	buisson ardent
Hauteur maximale en zone urbaine (mètres)	16-23	25-28	14-23	18-20	12-15	16-24	15-25	10	20	25-30	8-12	10-24	6-12	12-14	15-25	8-12	17-25				
Distance maximale du désordre (mètres)	30	30	21	12,4	23	20	40	11,5	15	15	10	20	11	10	20	11	25				
Distance en dessous de laquelle 50 % des désordres ont été constatés (mètres)	9,5	11	6	7	7,5	6	7	5	6	5,5	4	6	3	4	2,5	5	8				
% de désordres liés à l'essence considérée	11,5	8,7	7,5	3	3	8,2	5,7	4,6	1	11	5,7	8,3	6	2	3	2	2	0,8	0,7	0,35	
% de l'essence dans la population	2,1	3	3	1,8	2,2	6,4	4,5	3,5	1	13,7	7,1	13,9	14,7	4,9	10	9,4	-				
Coefficient d'agressivité *	5,5	2,9	2,5	1,7	1,4	1,3	1,3	1,3	1	0,8	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,2	-				

* Le coefficient d'agressivité est le rapport du % de désordres liés à l'essence sur le % de l'essence dans la population globale.

Tableau 7 : Statistiques relatives aux désordres observées sur les bâtiments dus à la végétation. Etude de la végétation dans le bassin londonien, réalisée en milieu urbain anglais (Cutler et Richardson, 1989).

Il ressort de cette étude que l'influence des arbres est très variable selon les différentes essences d'arbre prises en compte. Certaines variétés sont plus agressives avec des premiers désordres recensés distance/hauteur > 1,5 telles que le chêne, le saule et le marronnier. De plus nombre des ces espèces végétales arrivés à maturité (chêne, peuplier, saule, frêne, tilleul, orme et érable) ont une distance d'action d'au moins de 20 mètres et sont responsables de 50% des sinistres lorsque le bâti est à une distance inférieure à une demi fois la hauteur de l'arbre.

Ces données montrent aussi que le type d'essence est déterminant dans l'identification des espèces les plus agressives. Il est connu que l'aspect du système racinaire est spécifique d'une espèce de plante à une autre ; par exemple, un chêne dispose de racines pivotantes qui se développent en profondeur, alors qu'un peuplier a un système racinaire de surface dite traçante (Figure 19). Mais c'est surtout la maturité de ces plantes et donc leur besoin en eau qui détermine leur influence. A maturité, les distances d'action maximum observées pour l'essence du chêne et du saule sont les mêmes avec au moins 30 mètres. C'est donc bien le fort besoin en eau des arbres qui détermine leur « agressivité » vis-à-vis des bâtiments, ce qui s'exprime naturellement par leur hauteur et leur développement de ramure et de feuillage. On peut considérer que les racines ont une action jusqu'à 1 à 1,5 fois la hauteur de l'arbre selon les essences (1h en moyenne, 1,5 pour les essences les plus agressives) et jusqu'à deux fois si ces plantes se concentrent en grand nombre dans une même zone.

La végétation arbustive isolée a peu de conséquences sur le bâti car son influence est évaluée à 0,5 fois leur hauteur. En revanche, en grand nombre et à trop grande proximité d'un mur (moins de 50cm), comme par exemple une haie de thuyas poussant contre un mur, l'effet cumulatif de tassement est suffisant pour entraîner des désordres sur le bâti.

3.2.2. La topographie et la géométrie du terrain

Un examen attentif de la morphologie du bassin parisien révèle la relation entre les terrains en forte pente avec la présence de sinistres déclarés (Figure 15). La géomorphologie conditionne la stabilité des sols : un terrain en pente est le plus souvent sujet à des fluages ou des glissements de terrain lents. La sécheresse accentue la déstabilisation des sols argileux en pente ; une dessiccation intense des sols en pente suivi d'un retour brutal de l'humidité entraîne un phénomène de solifluxion des sols, voir même des glissements de terrain. Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment.

D'autres par il est certainement plus délicat de construire sur un terrain avec les différences de pente prononcées, la conception de l'ouvrage doit tenir compte de l'équilibre des charges exercées sur les fondations. Si, en raison d'une dissymétrie des fondations, un bâtiment qui se trouve plus profondément fondé du côté amont, alors les fondations situées à l'aval subissent un mouvement plus importants de la part du sol qui, étant en position plus superficielle, est souvent plus altéré et donc davantage sensible aux variations de teneur en eau. Les tassements différentiels sont donc plus fréquents sur ce type de terrain si l'assise du bâtiment est mal conçue.

Une des difficultés de l'expertise d'une maison sinistrée est de savoir si les dégâts sont en relation avec un tassement différentiel exacerbé par la pente ou si il s'agit d'un mouvement de terrain plus à plus large échelle.

3.2.3. Les erreurs d'aménagement et défauts de construction

La mauvaise prise en compte de la nature du sol et l'absence d'une architecture du construit adaptée au mouvement de retrait gonflement explique l'importance de la sinistralité en milieu urbains pavillonnaire. Les maisons individuelles fondées sur semelles continues peu ou non armées et peu profondes (40 à 80 cm) et dépourvue de chaînage horizontale se traduit par une aggravation des désordres, dont l'existence peut être révélée à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle. Toutefois Il n'est pas exclu que des phénomènes de retrait-gonflement aient pu se produire dans le sol d'assise et contribuer à l'apparition des désordres constatés. Toutefois, il est probable que des fondations réalisées dans les règles de l'art auraient pu, dans de tels cas, suffire à limiter fortement, voire à éviter la manifestation de ces désordres.

Parmi les autres malfaçons du construit on peut citer les bâtiments accolés sans joint inséré pour amortir les éventuels mouvements, l'exposition de façade pleins sud sans trottoir périphérique qui accentue la dessiccation au sol, la modification des écoulements ou le mauvais entretien des évacuations de eaux pluviales –si il y en a un-, la mauvaise protection de la tuyauterie au gel provoquant des fuites d'eau, l'imperméabilisation de manière inégales des sols, ou encore la fuite et le mauvais entretien des piscines.

3.2.4. Les variations du niveau des nappes, hydrogéologie

Les conditions hydrogéologiques constituent un facteur aggravant car agissant directement sur la teneur en eau des sols affleurant ou subaffleurant. D'une part, la présence d'une nappe peut contribuer à maintenir un sol dans un état d'humidité élevé et le préserver d'une dessiccation que ce soit en surface ou en profondeur. D'autre part, sont retrait entraine un tassement des sols quelque soit leur nature et composition mais change leur état d'équilibre des sols vis-à-vis de l'environnement et aggrave ainsi la dessiccation d'un sol soumise à l'évaporation.

La présence de ces nappes superficielles est mise en évidence lors de la construction de structure ouvragée profonde, comme les fondations, la mise en place d'un sous-sol ou garage. Des propriétés privées nécessitent un pompage régulier pour la mise à sec de leur niveau inférieur, ce qui traduit la réelle influence de l'hydrogéologie dans la problématique du RGA.

3.2.5. Les actions de l'homme

Les grands ouvrages routiers ou, réseaux ferrés découpent la morphologie du terrain, contrariant ainsi l'équilibre des sols qui tendent à réagir lors de période de sécheresse intense.

La modification des écoulements des eaux profondes liée à ces ouvrages conjugués à un relief fortement aménagé conduit à des déstabilisations du sol à large échelle.

Enfin les pompages d'eau au sein de ressources aquifère déjà affaibli en période sèche peut conduire à des désordres urbains en surface, mettant hors de cause le phénomène de retrait gonflement argiles.

Conclusions

Ce chapitre a successivement précisé l'état de l'art sur les matériaux argileux, l'aléa sécheresse et la vulnérabilité des constructions aux risque naturel de la sécheresse géotechnique. Plus précisément ce travail bibliographique a mis en évidence les périodes de sécheresse, l'emplacement des sols susceptibles de retrait gonflement et les symptômes de dommages au sein de bâtis révélant une influence de la sécheresse géotechnique. Ce chapitre a précisé également les différents facteurs internes et externes intervenant dans la problématique de la sécheresse géotechnique. Nous reprenons ici point par point les conclusions du travail bibliographique.

La synthèse des données bibliographiques sur les argiles révèle que le comportement de retrait gonflement des sols argileux soumis aux contrastes climatiques est cyclique, saisonnier et se réalise en fonction de l'intensité de la sécheresse, et aussi selon l'état initiale des sols avant l'événement. La nature du sol argileux et notamment les relations entre les particules argileuses avec les autre particules du sol détermine la capacité de retrait gonflement d'un sol.

Les différents aspects de la sécheresse ont été exposés et les principaux paramètres climatiques à prendre en compte dans une étude de cas ont été démontré. Cependant cet état de l'art révèle qu'il n'y a pas encore un indice climatique fiable et précis pour définir le caractère extrême d'une sécheresse. Il a donc été décidé de représenter la pluie efficace et la température sous forme graphique, ces deux informations climatiques étant nécessaires pour l'étude des mouvements de retrait gonflement du sol et des bâtiments par interférométrie radar. La pluie efficace est calculée à partir de la pluviométrie mensuelle et des valeurs d'Evapotranspiration de la station de Melun.

Si la définition théorique de la sécheresse et du risque sécheresse géotechnique sont simple à énoncer, les acteurs de l'immobilier, les assureurs et l'Etat sont toujours à la recherche d'une définition stricte pérenne à appliquer avec des critères de qualification de la sécheresse géotechnique. Le nombre élevé d'approches géotechnique disponibles dans la littérature pour l'identification des sols gonflants ne rend pas la tâche facile aux praticiens. L'application de ces approches sur un même site fournirait des indications contradictoires. C'est pourquoi la formulation dans un cadre approprié comme les directives techniques d'une démarche unifiée pour identifier ce genre de sols serait d'une grande utilité pour les praticiens. Si une telle démarche est adoptée, elle n'éliminera pas totalement les désordres mais unifiera le langage des praticiens et réduira les litiges.

Les recherches en cours en climatologie et modélisation des bilans hydriques sont encourageantes afin de préciser à une maille kilométrique l'état d'humidité du sol. Néanmoins

des progrès ne peuvent définitivement acquis en l'absence d'une connaissance précise de la nature du sol affleurant. Quels que soient les critères utilisés, une amélioration du dispositif doit être recherchée grâce à une caractérisation plus fine dans le temps et l'espace de l'aléa climatique, dont l'exploitation doit aller de pair avec une connaissance plus fine en espace de la composition du sol. Ceci peut être réalisé à travers :

- Une meilleure représentativité spatiale du bilan hydrique du sol observé et de sa climatologie ;
- Une meilleure caractérisation temporelle des épisodes par rapport à une climatologie du phénomène ;
- La poursuite de l'actualisation des cartes d'aléa retrait-gonflement des argiles et une recherche de précision et fiabilité des caractéristiques géologiques (Boutin, 2007).

Deux nouvelles notions interviennent dans la compréhension du phénomène du RGA : d'une part c'est le contraste entre les périodes sèche/humide qui caractérise l'intensité de RGA, et non le caractère exceptionnel d'une sécheresse et d'autre part, la répétition de contraste climatique réactive au sein des sol les fractions argileuses qui voit leur potentiel de retrait gonflement exacerbé.

Les méthodes géotechniques et les essais en laboratoire permettent de caractériser localement le potentiel de retrait gonflement. Cependant deux limites ont été relevées : d'une part la multitude d'indices et de paramètres géotechniques prise en compte empêche une homogénéité et une vue d'ensemble des caractéristiques, un travail de classification de ces méthodes est toujours en cours de réalisation. D'autre part, ces méthodes sont coûteuses en temps et onéreuses, valable localement mais difficilement applicable à l'ensemble d'un territoire.

Les études du BRGM sont à une échelle départementale liée à l'exactitude des cartes géologiques utilisées (1/50 000), il n'y a pas de connaissance précise de la composition argileuse gonflante au sein des sols à l'échelle du bâti. De plus le bilan des formations géologiques argilo marneuse montre que cette formation (Alluvions, Limons des Plateaux) pose des difficultés de cartographie et de description lithologique tant ses sols ont eu une histoire de dépôt complexe et spécifique à la localité.

Les données géologiques concernant les départements de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne ont été successivement détaillées selon les données disponibles dans les rapports. Une mesure de la densité de sinistralité relative à chaque formation géologique, en s'appuyant sur les sinistres déclarés et le taux d'urbanisation a permis de classer les formations les plus sensibles au RGA, résultats en accord avec le classement de l'aléa effectué par le BRGM. Il a été mis en évidence que les formations suivantes : Les argiles Vertes de Romainville et les Marnes Supragypseuses sont les plus concernées par la sinistralité.

CHII METHODES ET DONNEES

Sommaire

II.1 LES DONNEES SAR.....	74
1.1 Introduction.....	74
1.2 Les satellites SAR.....	76
1.3 L'imagerie SAR.....	78
II.2 LES TECHNIQUES DINSAR ET PSI.....	84
2.1 Principe de l'interférométrie.....	84
2.2 L'interférométrie différentielle (DINSAR)	87
2.3 L'interférométrie des points stables.....	96
II.3 INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES ET SIG.....	106
3.1 Les données géographiques.....	106
3.2 Traitements et SIG.....	115
3.3 Photo interprétation et cartographie.....	120
II.4 CONCLUSIONS	132

L'objet de ce chapitre est de préciser les données, les méthodes ainsi que les outils informatiques utilisés ici. Tout d'abord nous présenterons en II.1 les capteurs et les données radar utilisées en interférométrie, puis en II.2 les différentes méthodes interférométriques DINSAR et PSI et enfin en II.3 les informations géographiques analysées par le Système d'Information Géographique.

II.1 Les données SAR

1.1 Introduction

Depuis la fin des années 1970, les premières missions de capteur radar SAR ont démontrés leurs hautes performances en tant qu'outils pour l'étude de la surface de la terre et des océans. L'observation radar a permis de mesurer les mouvements de la surface de la terre afin de mieux comprendre des phénomènes naturels catastrophiques tels que le tremblement de terre, le volcanisme (Hansen, 2001), de soutenir les efforts de gestion des mesures

d'urgence, d'étudier l'évolution des glaciers pour comprendre la variabilité du climat à long terme, d'élaborer des cartes topographiques, de suivre les zones à risque d'inondation, d'évaluer les ressources naturelles, de détecter les pollutions en mer, voire de planifier le développement urbain et de détailler l'occupation du sol et l'évolution de son utilisation.

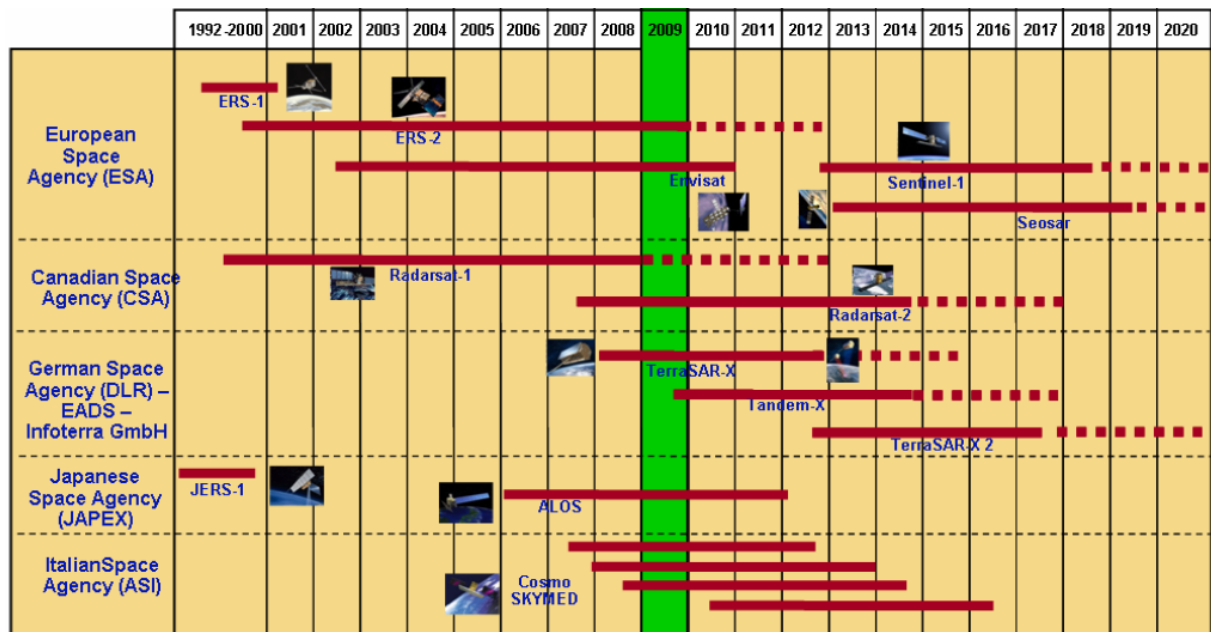
Treize ans après la mise en orbite de SeaSat, l'agence spatiale Européenne lance en 1991 son premier satellite civile d'observation de la terre : la mission ERS-1 de l'ESA (décrit-ci après en II.1.2) a acquis un grand nombre d'images avec une répétitivité de 35 jours. La disponibilité de cette archive d'images radar ERS a permis d'appliquer pleinement les premières applications d'interférométrie radar permettant d'étudier avec une précision centimétrique des déplacements de la surface du sol liés à des phénomènes naturels largement distribués. Des nombreuses applications thématiques furent rendues possible telles que le suivi de phénomène tectonique, volcanisme, tremblement de terre, subsidence liée à des phénomènes naturelle ou anthropique, suivi de glissement de terrain (détaillée en II.2.1).

Le satellite ERS-1 fut suivi du satellite JERS1 lancé par le Japon en 1992 (1.275GHz, HH) (www.esa.int). Puis, en 1995, le Canada lance son premier satellite d'observation, RADARSAT, équipé d'un SAR fonctionnant à 5.3GHz en polarisation HH. La même année, l'ESA lance le successeur d'ERS-1 en 1995, le satellite ERS-2 assurant ainsi la continuité de l'acquisition des données radars (SAR et diffusiomètre) qui connu néanmoins des dysfonctionnements de son gyroscope en 2000 (Rosich, 2000). En janvier 2002, le lancement du satellite Envisat doté de multiples capteurs, a permis de poursuivre les continuités des calculs interférométriques. Ce dernier offre la possibilité d'acquérir des images dans différents modes polarimétriques et géométriques lesquels augmente en interférométrie la complexité des traitements et donc des résultats.

Depuis lors une grande variété de satellite radar (Radarsat-1, TerraSAR-X, ALOS) offre différents modes d'acquisition : longueur d'onde, incidence, polarisation, date de répétitivité et emprise des scènes. De nouvelles applications sont rendus possibles grâce à l'amélioration constante des techniques des radars comme la polarimétrie (Lardeux *et al.*, 2010) offrant plus de possibilités pour la caractérisation des scènes. Selon l'application envisagée, l'une ou l'autre de ces paramètres peut être considérés. Une nouvelle génération de satellite radar a vu le jour en 2006-2007 avec le lancement du capteur radar-PALSAR ALOS, et les capteurs haute résolution TerraSar-X, cosmo SkyMed.

Précisons que pour TerraSAR-X, le nouveau satellite radar allemand qui a été lancé en 2007 et qui est pleinement opérationnel viendra y remédier fortement avec sa période de 11 jours (au lieu de 35 jours) et une très grande amélioration de sa résolution (3 m au sol au lieu de 20 m pour ERS et ENVISAT). Mais ce gain se fait avec des coûts images bien supérieurs (3000 euro/image) à la place de quelques centaines pour les satellites de l'ESA.

Nous rappelons ci-dessous (Figure 20) les missions spatiales utilisant un capteur radar SAR utile à l'application d'interférométrie radar.



N'est pas mentionné les satellites civils ALMAZ-T (Russie) lancé en juin 1987 et mars 1991, embarquant à son bord un SAR en bande S, polarisé en HH. Le premier n'aura eu que deux ans de durée de vie et le second ne durera qu'un an et demi à cause d'un problème mécanique de déploiement d'une antenne. N'est pas mentionné le satellite Magellan car destinée à la planète Vénus. N'est pas mentionné également les missions par navette spatiales SIR-A (1981), SIR-B (1984) et SIR-C (1994), équipée d'un SAR multifréquence (L, C, X) pouvant faire des acquisitions entre 17° et 63° par rapport au nadir. De même la navette SRTM (USA, NASA) lancée en 2000.

Figure 20 : Echancier des missions SAR embarqué à bord de satellite (d'après Duro, 2009).

1.2 Les satellites SAR

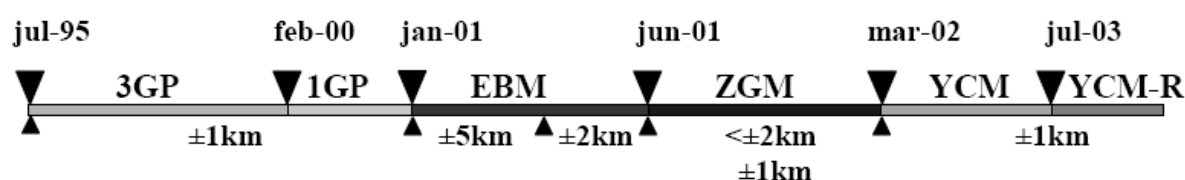
Nous donnons ici les caractéristiques techniques et les spécificités des satellites SAR utilisée dans cette étude. Il s'agit de trois satellites radar de l'ESA, à savoir ERS-1, ERS-2 et Envisat.

Le satellite ERS-1 embarque à son bord un ensemble d'instruments comprenant des capteurs actifs et des instruments complémentaires tels que (a) un Détecteur actif à hyperfréquence (AMI) combinant les fonctions d'un Radar à synthèse d'ouverture (SAR) et d'un diffusiomètre vent (le diffusiomètre vent utilise trois antennes pour mesurer la vitesse et la direction du vent à la surface de la mer) (b) Un Radar Altimètre (RA) fournissant des mesures précises du niveau de la mer, (c) un Radiomètre à balayage dans le sens de la trace associé à un sondeur hyperfréquence (ATSR) combinant un détecteur infra-rouge (IR) et un sondeur micro-onde (MW) pour mesurer la température de surface, (d) un équipement de mesure précise de vitesse et de distance (PRARE) et un rétro réflecteur laser (LRR), ces deux dispositifs permettant la détermination précise de la position du satellite et de son orbite et pour la localisation géodésique des stations sur Terre.

Le satellite ERS-2 a pris le relais d'ERS-1 le 21 avril 1995 et fonctionne toujours actuellement. Ce deuxième satellite est équipé de manière similaire que son prédécesseur

ERS-1 avec toutefois un instrument supplémentaire, le GOME, avec lequel il peut mesurer selon les procédés de mesure précis et modernes des ballons stratosphériques la teneur en ozone de l'atmosphère et mieux surveiller la croissance de la végétation. Sa mission est donc plus étendue que celle d'ERS-1. De plus, pendant 5 mois en 1995-1996, ERS-1 et ERS-2 ont été exploités en tandem (même orbite avec 1 jour de décalage).

Il faut toute fois noter qu'une série de fonctionnement des gyroscopes du satellite ERS-2 à partir de février 2000. Le gyroscope est un instrument embarqué qui permet au satellite de calculer son altitude et donc de corriger son orbite. Avec la perte de ses gyroscopes, le satellite aurait été mis hors service. Il a fallu reprogrammer le comportement du satellite avec le seul gyroscope encore opérationnel, calculs qui ont permis d'assurer la continuité de la mission ERS2, avec une première correction en juin 2001, puis une seconde en mars 2002. Cependant, sur une période de temps de février 2000 à mars 2002, notée 1GP, EBM et ZGM, l'ESA ne peut fournir de données fiables pour l'application interférométrique qui nécessite des valeurs de doppler constante.



3GP : Three-gyro piloting mode, mode de navigation à 3 Gyroscopes, 1GP : Three-gyro piloting mode, mode de navigation à un seul Gyroscope, EBM : Extra-Backup Mode, ZGM : Zero Gyro Mode, modélisation plus précise du mode EBM à un gyroscope, YCM : Yaw Control Monitoring mode mode, YCM-R : Yaw Regional Control Monitoring mode.

Figure 21 : Configuration de pilotage gyroscopique du satellite ERS2 (d'après Miranda et al., 2004).

Notez la précision du positionnement du satellite suite au dysfonctionnement début février 2000. Le positionnement du satellite est un paramètre important pour l'acquisition des image radar SAR.

Enfin le satellite Envisat, lancé en mars 2002, est le plus gros satellite d'observation de la terre jamais construit, d'un poids de trois à quatre fois plus important que ces prédécesseurs ERS (Tableau 8). Il transporte des instruments radars et optiques sophistiqués parmi lesquels le radar ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) et le spectromètre MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer). Envisat fournit de manière continue des données issues de l'observation du sol, de l'atmosphère, des océans et de la calotte glacière. Les états membres de l'ESA ont voté à l'unanimité la reconduction de la mission Envisat jusqu'en 2013.

Les satellites ERS1&2 et Envisat présente un fort intérêt en interférométrie pour mesurer les déplacements de la surface du sol, il est en effet possible de les utiliser de manière compatible pour les calculs interférométriques. Leur géométrie d'acquisition est similaire avec des caractéristiques techniques (longueur d'onde, cellule de résolution) identiques. Les données SAR issues de ces trois satellites intéressent donc l'étude interférométrique de ce présent mémoire.

Satellite	ERS-1	ERS-2	Envisat
-----------	-------	-------	---------

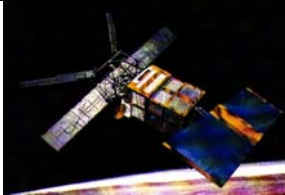
Vue d'artiste			
Agence	ESA	ESA	ESA
Date de lancement	17 juillet 1991	21 avril 1995	1 ^{er} mars 2002
Fin de programme	Inactif depuis ?	Actif	Actif
Site de lancement	Kourou (Guyane Française)	Kourou (Guyane Française)	Kourou (Guyane Française)
Budget	-	-	2,3 milliards
Masse (Kg)	2384	2516	8500
Altitude (km)	800	800	800
Inclinaison	98.5°	98.5°	98,6°
Durée (minutes)	100	100	100,6
Répétition (jours)	35	35	35
Bande	C	C	C
Polarisation	HH	HH	(HH, VV, VH et HV)

Tableau 8 : Caractéristiques techniques des capteurs SAR utilisés (source : ESA).

1.3 L'imagerie SAR

Cette section est surtout destinée au lecteur souhaitant connaître les principes fondamentaux de l'imagerie SAR. Il détaille l'imageur radar, de l'acquisition au traitement SAR, en grande partie bien développée dans la thèse d'Erwan Pathier, 2003 et Baup, 2007.

1.3.1. De l'optique au radar

Les images d'amplitude de la surface de la terre que le radar reflète, n'ont pas les mêmes propriétés géométriques et radiométriques révélés par les imageurs optiques. Le support de l'information en imagerie radar est l'onde électromagnétique rétrodiffusée et déformée suite à sa réflexion sur la surface du sol. Les informations du sol que révèlent les capteurs radar SAR permettent de caractériser la rugosité de la surface du sol et sa constante diélectrique (Allain, 2003). Parce qu'elles sont complètement différentes des images optiques qui fournissent des informations similaires à la perception visuelle humaine, il est nécessaire d'avoir des connaissances particulières pour pouvoir analyser et déchiffrer les images radar.

L'imagerie optique nous est beaucoup plus intuitive parce qu'elle rend compte de la radiométrie, tel que notre œil la perçoit ou tel qu'un appareil photo pourrait la révéler. En imagerie optique, comme en photographie, l'image est acquise en une seule fois à un instant donné, en se plaçant préférentiellement en face des cibles pour minimiser les distorsions géométriques (

, gauche). Ainsi, à chaque cellule d'une image optique correspond une information de réflectance radiométrique pour une longueur d'onde donnée. C'est la différence d'angle d'incidence de l'onde renvoyée sur l'instrument par les objets qui permet de distinguer les objets les uns des autres. L'amplitude enregistrée caractérise la nature de surfaces illuminées qui réfléchissent ou absorbent le spectre des ondes électromagnétiques en provenance du soleil (lui-même filtré par l'atmosphère).

En revanche en imagerie radar, c'est le satellite qui émet un train d'onde et l'enregistre en retour ce qui lui donne une grande souplesse par rapport à l'imagerie optique (le radar est utilisable même la nuit). La maîtrise de la source du signal émis est un trait fondamental du radar. Cela permet de comprendre l'importance de cette technique dans le domaine de la télédétection. Ainsi, contrairement à la source de rayonnement solaire, le radar peut émettre des ondes cohérentes, dans un domaine de fréquence tel qu'elles ne sont pas arrêtées par les nuages mais toutefois ralenties. En retour, non seulement l'amplitude mais aussi la phase de ces ondes cohérentes peuvent être mesurées (cf. ci-après).

Or, pour restituer une image radar, le système capteur émetteur doit viser latéralement afin de distinguer les positions des cibles en utilisant le temps aller retour de l'écho réfléchi par chacune des cibles. Si le radar réalisait son acquisition verticalement, il lui serait impossible de discerner la position des différentes cibles, car deux cibles situées à la même altitude mais géographiquement séparées renverraient simultanément le même écho. Une visée latérale permet donc d'introduire un ordre de réception des différents échos. Afin de distinguer des objets, il faut que la différence de distance radar objet soit supérieure au seuil de détection, ce qui caractérise la résolution « en distance » de l'instrument radar embarqué dans le satellite.

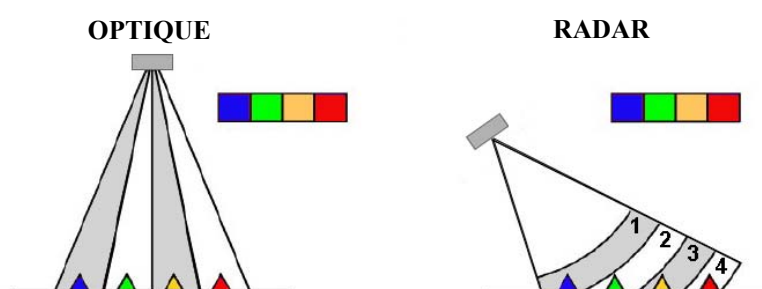


Figure 22 : Comparaison des modes d'acquisition optique (gauche) et radar (droite), cas d'un terrain plat (d'après Pathier, 2003, modifié).

En optique (à gauche), l'acquisition verticale et simultanée permet d'enregistrer les informations. En radar (à droite), l'acquisition se fait latéralement, le temps d'aller retour permettant de déterminer la position de chacune des cibles.

Ces propriétés distinctes d'acquisition est lourde de conséquence si le terrain est à fort relief, puisque cela induit en optique et radar des distorsions géométriques qui ne seront pas identiques. En optique, le relief induit des distorsions géométriques qui sont plus ou moins accentué selon l'angle d'incidence entre chaque pixel de l'image et le satellite. On note aussi

que le relief provoque également des ombres portées naturelles liée à l'ensoleillement, ce qui diminue l'amplitude des valeurs radiométriques. En radar, du fait d'un angle d'incidence rasant, un même pixel peut correspondre à la réponse de zones non contiguës de la surface par un effet de renversement (ou "lay-over"), ou encore une zone d'ombre radar peut apparaître dans l'image (Figure 23, droite). Nous ne développerons pas ces aspects de lecture d'image radar car dans la zone d'étude, la région Île-de-France, les pentes sont relativement modérées voire faibles du fait de la géomorphologie du bassin Parisien.

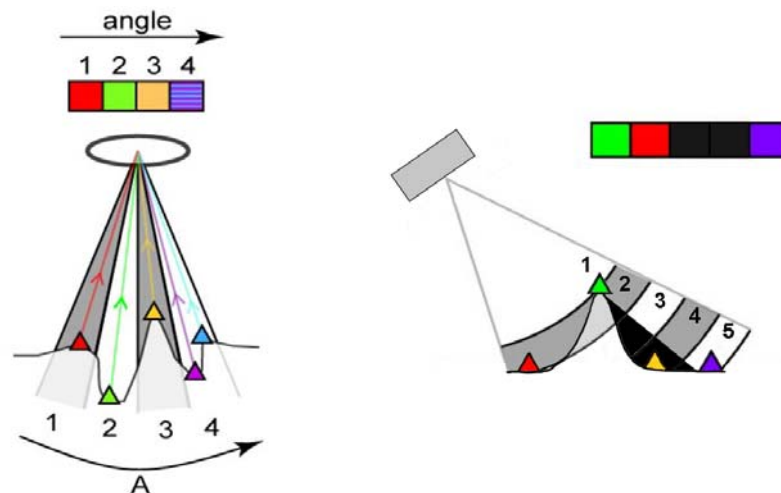


Figure 23 : Comparaison des modes d'acquisition optique (gauche) et radar (droite), cas d'un terrain avec une topographie accusée (Pathier, 2003, modifié).

En optique (à gauche), la résolution dépend de la différence d'angle d'incidence de l'onde renvoyée par les objets vers le capteur. Si à cause du relief, la distance entre objets est insuffisante, les objets peuvent être confondus comme c'est le cas ici pour les triangles violets et bleus. Le radar (à droite) montre les effets de la topographie avec une situation de renversement entre la cible verte et rouge et une zone d'ombre faisant disparaître la cible jaune de l'enregistrement.

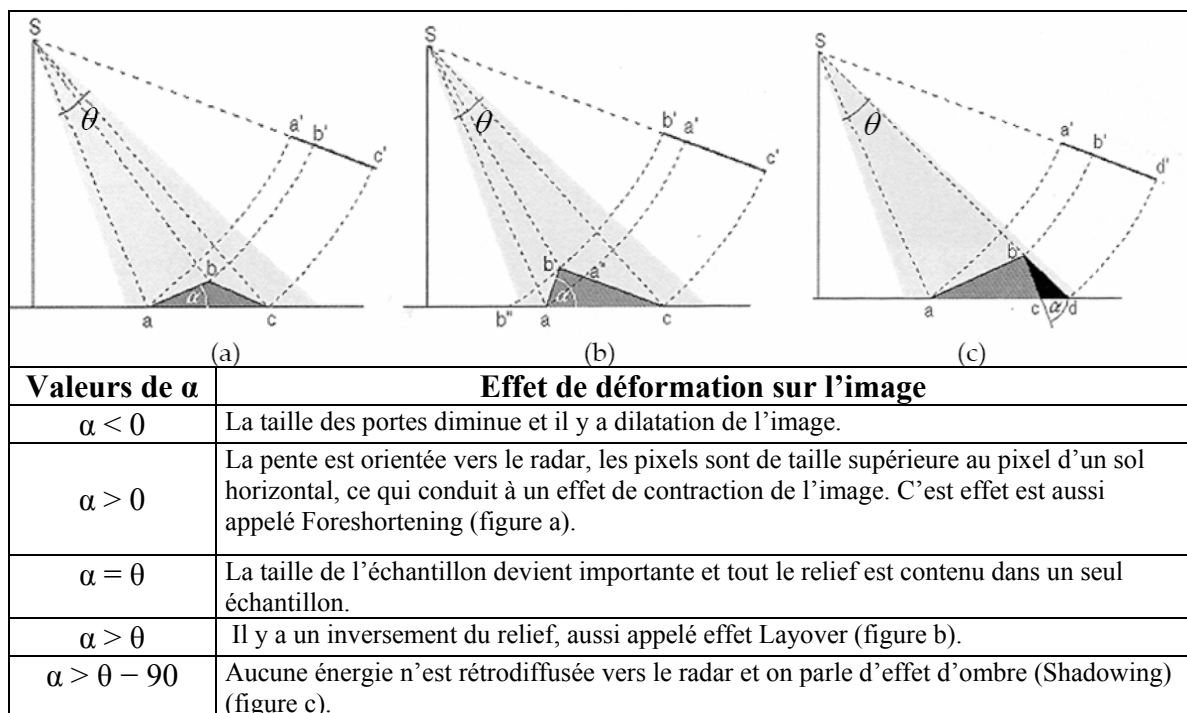


Tableau 2 : type de déformation de l'image pour différentes valeurs de pente du relief, noté α (d'après Envisat handbook, <http://envisat.esa.int/handbooks/>).

1.3.2. L'acquisition des données brutes

Un radar est un instrument actif mesurant principalement des distances et son principe de fonctionnement est rappelé sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Au cours de son déplacement de long de l'orbite, le satellite acquiert une bande continue de sol parallèle à l'orbite, sa largeur étant appelée "la fauchée". Le radar illumine cette bande de sol en continu au moyen d'une antenne qui émet régulièrement de brèves impulsions avec un même signal de polarisation constante. La fréquence de répétition et la durée de ces impulsions conditionnent la résolution spatiale du SAR (détaillé ci-après). La surface ainsi éclairée, appelée l'empreinte au sol de l'antenne, renvoie vers le satellite une partie du rayonnement émis (Annexe 3).

La phase et l'amplitude du rayonnement rétrodiffusé vers l'antenne est mesuré par le radar. La fréquence à laquelle sont émises les impulsions du radar, couramment appelée Pulse Repetition Frequency (PRF) est suffisamment grande pour que deux empreintes successives se chevauchent largement. Ce recouvrement crée une certaine redondance de l'information qui sera utilisée par le traitement SAR.

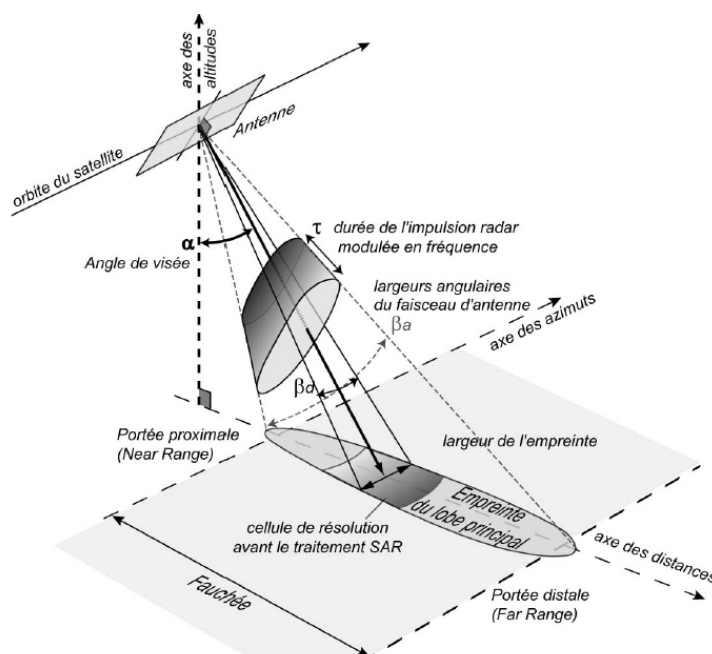


Figure 24 : Configuration de l'acquisition radar (d'après Pathier, 2003).

L'émetteur (A) génère de courtes impulsions de fréquence, de durée, à intervalles réguliers contenues dans le faisceau de l'antenne (B). Le faisceau radar est orienté perpendiculairement à l'axe de déplacement de la plateforme et l'antenne reçoit une partie de l'énergie réfléchie (rétrodiffusée) par la scène (C). En mesurant le délai entre la transmission et la réception de l'impulsion rétrodiffusée, on peut déterminer la distance radar-cible. À mesure que le capteur se déplace, l'enregistrement et le traitement du signal rétrodiffusé permettent d'obtenir une image en deux dimensions de la surface.

Les dimensions de l'antenne déterminent la taille et la forme de l'empreinte au sol. Plus l'antenne est longue et plus le faisceau est fin (angles β_a et β_d petits voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La relation entre la largeur de l'empreinte au sol L_e et sa largeur L_a à une distance D est la suivante (Hanssen, 2001) :

$$L_e = \lambda / L_a \times D \quad (\text{eq.1})$$

avec λ la longueur d'onde utilisée

La largeur L_e définit la résolution en azimuth R_a du radar avant le traitement SAR, c'est donc aussi la largeur d'une cellule de résolution avant le traitement SAR. En effet, le radar ne peut faire la distinction entre les différents points de l'empreinte situés à une même distance du radar (Figure 23). En distance, la résolution suivant la direction de visée R_d est donnée par :

$$R_d = c \tau / 2 \quad (\text{eq.2})$$

avec τ la durée d'impulsion et c la vitesse de la lumière.

La taille de la cellule de résolution au sol, dépendant de l'angle d'incidence θ , **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** est déterminée par :

$$R_d = c \tau / 2 \sin \theta \quad (\text{eq.3})$$

En prenant l'exemple du satellite ERS, avec une longueur d'onde de 5,66 cm, d'une durée d'impulsion de 37,1 μs , on trouve pour une cellule de résolution, avant le traitement SAR, une résolution en azimuth de 4,8 km et une résolution en distance de 14 km pour une fauchée d'environ 100 km (Pathier, 2003). Ainsi le capteur radar ERS mesure l'amplitude et la phase du signal avec une résolution kilométrique. Avec une fréquence d'échantillonnage en distance de 18,963 MHz chaque ligne représente 5600 enregistrements faits pour une impulsion sur l'ensemble de la fauchée. Cette fréquence suffisamment élevée permet un fort recouvrement des cellules de résolution mesurées, créant là aussi une forte redondance de l'information. L'ensemble des données mesurées peut être représenté sous la forme d'une matrice bidimensionnelle qui n'est pas a priori, limité en nombre de colonnes, car le radar image une bande continue de sol.

Cependant pour des raisons pratiques d'utilisation pour les utilisateurs, la bande est découpée régulièrement en pièce, numéroté et désigné par le terme anglais "frame". La "track" quand a lui, désigne l'emplacement de l'orbite par lequel passe le satellite avec une répétitivité de 35 jours pour le satellite ERS et Envisat. Ainsi une image est définie par ses valeurs "track" "frame" mais aussi par le nombre d'orbite que le satellite a effectué pour obtenir la dite image depuis le lancement de la mission.

1.3.3. Le traitement SAR

Nous évoquons ici brièvement les principes du traitement SAR en s'appuyant sur les travaux de Curlander et McDonough (1991), Balmer (1992), Arnaud (1997) et Pathier (2003).

Si un pixel de l'image issu de la donnée brute correspond à une cellule de résolution kilométrique, le traitement SAR va permettre d'améliorer « la résolution naturelle » du radar afin d'obtenir une résolution métrique de type SAR. Chaque pixel de l'imagerie brute contient les réponses de tous les autres objets de la cellule de résolution correspondante. L'extraction de la réponse d'une cellule de résolution SAR est appelée la focalisation ou la compression qui se fait en deux étapes :

(1) La compression en distance permet d'obtenir une résolution en distance noté Rd_{sar} suivant la direction de visée en utilisant le fait que le signal radar émis est modulé linéairement en fréquence B.

$$Rd_{sar} = c / 2B \quad (\text{eq.4})$$

(2) La compression en azimuth permet d'amélioration de la résolution grâce à la modulation de fréquence de l'onde radar créée par l'effet doppler lors du déplacement du satellite par rapport au sol. La compression en azimuth utilise les différents échos renvoyés sur l'antenne par une même cible, en réponse aux différentes impulsions successives de telle sorte que la dimension de l'empreinte en azimuth Ra_{sa} correspond à la moitié de la longueur caractéristique de l'antenne "synthétisée" (d'où le terme SAR) noté La :

$$Ra_{sar} = La / 2 \quad (\text{eq.5})$$

Grâce au traitement SAR, plus l'antenne réelle est petite, plus le faisceau est large et donc plus l'antenne simulée est grande alors que sans le traitement SAR, la taille d'une cellule de résolution en azimuth diminue avec la largeur d'antenne (eq.5). Cependant, une taille minimum d'antenne est requise pour éviter les bruits.

L'image SAR est donc une matrice de données brutes d'un radar "simulé" ayant les mêmes fréquences d'acquisition en azimuth et en distance que le radar réel, avec une antenne équivalente à l'antenne synthétisée émettant une impulsion sur une durée beaucoup plus brève : la résolution en distance est plus fine à mesure que cette durée diminue (voir eq.2). La résolution d'une image SAR ne dépend pas de la distance radar-sol, c'est une caractéristique intéressante de l'imagerie SAR.

Pour ERS, cela équivaut à une longueur d'antenne de 9400m et une durée d'impulsion de 64ns (contre 10m et 37,1µs en réalité). La résolution naturelle d'un tel radar simulé est bien de 5m en azimuth et de 9,6m en distance, ce qui correspond, en terrain plat, à une cellule de résolution au sol de 5m par 25m. Sachant qu'une telle taille d'antenne est irréaliste sur un satellite et qu'il faudrait fournir une puissance instantanée beaucoup plus importante pour obtenir une durée d'impulsion si brève, les avantages du radar à ouverture synthétique sont évidents.

II.2 Les techniques DINSAR et PSI

Cette partie est dédiée aux deux méthodes interférométriques utilisées dans ce présent travail. Après avoir rappelé le principe de l'interférométrie radar et ses applications dans les sciences de la Terre, les méthodes DINSAR et PSI sont successivement détaillées tant dans leur principe que leurs limites.

2.1 Principe de l'interférométrie

L'interférométrie radar consiste à exploiter l'information de phase contenue dans les images SAR complexes enregistrées par un ou des capteurs, en faisant varier un paramètre d'acquisition (la date, la position et l'orientation du radar, la fréquence, la polarité de l'onde émise/reçue) en fonction de l'application souhaitée (Bamler et Hartl, 1998). Cette définition assez large permet d'inclure l'ensemble des méthodes et domaines d'application de l'interférométrie : (1) l'étude des déplacements de la surface du sol, (2) l'étude de la topographie ou géodésie et (3) la caractérisation des milieux sols et atmosphère.

Une bibliographie complète est fournie par Massonnet et Feigl (1998), et Hanssen (2001) qui détaillent de manière exhaustive les applications de l'interférométrie radar différentielle. Nous récapitulons brièvement ici les trois champs d'application de l'interférométrie en indiquant les références majeures, en précisant toutefois que seule l'application sur les déformations topographiques concerne l'étude du RGA.

L'étude des déplacements de la surface du sol et des objets de sursol.

Dans cette application, on compare les phases des images radar à différentes dates, avec des images prises dans une géométrie identique ou presque similaire afin de déduire et calculer les déplacements des objets de sursol et les modifications de la surface du sol. La répétitivité du satellite permet un suivi du déplacement dans le sens de visée du capteur avec une précision meilleure que le centimètre. Cette technique a déjà permis de couvrir un grand nombre de types de déformations : les mouvements liés aux séismes, avec une mesure pré-sismique, co-sismique et post-sismique, (Massonnet *et al.*, 1993), (Zebker *et al.* 1994), (Pathier *et al.*, 2005), (Peltzer et Rosen, 1995), (Massonnet et Feigl, 1995). D'autres phénomènes naturels sont analysables tels que le déplacement des glaciers et leur dynamique, (Goldstein *et al.*, 1993) ou l'évolution d'une structure volcanique active, (Massonnet *et al.*, 1995), (Amelung *et al.*, 1999). Les glissements de terrain sont détectables et voire suivis dans

le cas de mouvements lents, réguliers et affectant une grande surface (Fruneau et al. 1995, Manunta *et al.*, 2006). Cette technique permet également de détecter la subsidence liée à des activités humaines, comme les affaissements miniers, (Sandwell *et al.*, 2000), le tassement de formations poreuses par l'exploitation de fluides, comme l'eau, le gaz et les huiles, (Fielding *et al.*, 1998), (Rabus *et al.*, 2004). De même, l'effet d'une surexploitation d'aquifère par pompage est quantifiable en surface, surtout quand celle-ci se superpose à des périodes de sécheresse, (Tomas *et al.*, 2005). Une modification de la surface topographique peut intervenir lors de pompage d'eau dans le cadre d'un chantier important (Fruneau *et al.*, 2005). Le phénomène naturel de recharge et décharge d'une nappe de manière élastique est également mesurable par interférométrie, (Amelung *et al.*, 1999), mais dans des conditions idéales liées au terrain. A une échelle plus locale, des déformations du sol par glissement de terrain, (Fruneau, 1995), Colesanti *et al.*, 2001 et Colesanti *et al.*, 2003). De même, les désordres urbains liés à l'instabilité du sous-sol sont potentiellement analysables, (Mora 2004).

L'étude de la topographie, et géodésie.

Dans cette application de l'interférométrie on souhaite déterminer et mesurer les formes du relief. En faisant varier les paramètres d'orientation et de position du satellite et en faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de déformations de surface entre deux acquisitions, on déduit des images radar l'information topographique sous forme d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), (Zebker et Goldstein, 1986). On acquiert donc simultanément ou à des dates très proches les images radar dans des géométries différentes. Ce n'est plus le paramètre « temps » qui est la variable mais la géométrie qui permet ainsi de resituer le relief.

D'un point de vu théorique, du fait de la couverture mondiale et de la répétitivité du satellite, un MNT peut être obtenu à l'échelle du monde à partir de l'ensemble des archives radar. Cependant cela n'est pas réalisable techniquement du fait de la perte de corrélation et les effets parasites atmosphériques (troposphère) entre les deux acquisitions dégradent l'extraction du MNT.

Un exemple d'application réussie dans ce domaine est la mission Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) lancée en février 2000, qui met en œuvre une interférométrie simultanée « single pass » (un passage) avec deux antennes, l'une sous le capteur, l'autre déployé à distance le long d'un mat. Ce dispositif permet ainsi d'obtenir un MNT continu sur 80% des surfaces émergées (Bamler *et al.*, 1996) et de s'affranchir de nombreuses contraintes. Enfin, les futurs capteurs SAR à plus haute définition (RadarSat), permettent d'envisager de la modélisation urbaine 3D (Gamba *et al.*, 2000).

La caractérisation du sol et de l'atmosphère.

Dans ce type d'application on peut faire varier le paramètre de longueur d'onde qui modifie le comportement de l'onde lorsqu'il traverse le milieu atmosphérique ou le sol.

Un changement de l'état de la surface du sol se traduit par un changement des propriétés de rétrodiffusion du sol. L'étude de la cohérence permet d'étudier et de cartographier des objets naturels tels que des coulées de laves, les zones inondées, l'évolution du permafrost, les coulées de boues, les zones brûlées ou incendiées ou les changements de surface dus à la présence de végétation (Hanssen, 2001).

Cependant, l'utilisation de la phase pour la cartographie thématique est peu utilisée. C'est en effet la réflectivité (image en amplitude), qui est privilégiée dans la cartographie thématique, en jouant sur les nombreuses propriétés du radar (ENVISAT) comme la polarisation, l'angle d'incidence ou la longueur d'onde.

Enfin l'étude de l'atmosphère est une application qui reste anecdotique. Bien que les effets atmosphériques soient plutôt considérés comme une nuisance en interférométrie radar (Janssen, 2004), il est possible d'étudier de manière expérimentale les propriétés atmosphériques, principalement celles de la troposphère, par l'interférométrie IRM (interferometry Radar Meteorology), (Hanssen, 2001).

Nos travaux se concentrent sur l'étude des déplacements. Les traitements réalisés utilisent des images radar qui ont une répétitivité d'acquisition afin de se placer dans une géométrie d'acquisition la plus proche possible. L'information recherchée est la différence de phase qui va exprimer les modifications de la surface du sol après diverses corrections des différentes contributions de la phase (développé ci après).

Il existe deux techniques en interférométrie qui permettent d'avoir accès aux déplacements de surface: l'interférométrie différentielle, fréquemment abrégée par DINSAR ou INSAR et l'interférométrie radar sur Points Stables (PSI ou Permanent Scatterers Interferometry en anglais). Ces techniques permettent entre autre une mesure de la variation topographique avec une précision théorique de l'ordre du demi-centimètre. Ces techniques ont permis de nombreuses applications scientifiques et techniques utiles dans les sciences de la Terre et l'environnement.

L'interférométrie d'images radar obtenue à partir de données des satellites européens ERS1 et ERS2, du satellite japonais JERS ainsi que du satellite canadien R A D A R S A T a permis, depuis 1992, d'améliorer sensiblement la mesure des déformations à la surface de la Terre. Cette technique a été appliquée, en particulier, à l'étude des déformations associées aux tremblements de Terre (Massonnet et al., 1993), aux mouvements de terrain (Carnec, 1996 ; Carnec et al., 1996 ; Fruneau et al., 1996), au fluage des glaciers (Goldstein et al., 1993) et également à l'étude des déformations volcaniques. Dans un article de synthèse, Massonnet et Feigl (1998) font une revue détaillée de la méthode interférométrique et de ses applications. La majorité des résultats interférométriques ont été fournis par les satellites ERS1 et ERS2.

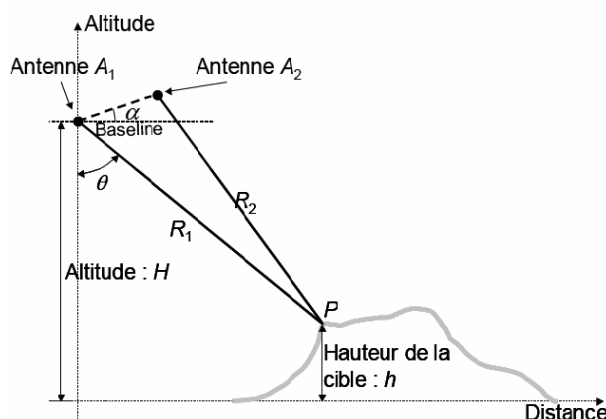
La longueur d'onde du radar utilisé par ces satellites est de 56 mm, et une frange interférométrique correspond donc à 28 mm de déplacement apparent dans la direction de visée du satellite. Les thématiques de recherche actuelles portent sur :

- l'amélioration des logiciels de calculs, de filtrage et de déroulement automatique de franges.
- l'amélioration de la connaissance des orbites des satellites (Scharoo et al., 1998).
- l'amélioration des modèles numériques de terrain utilisés pour le calculs interférométrique (Ferretti et al., 1997, Froger et al., 1999).
- l'amélioration de la correction troposphérique à appliquer aux interférogrammes bruts (Delacourt et al., 1998, Hansen, 1998 ; Beauducel et al., 1999).
- la validation sur le terrain des mesures de déformation détectées par interférométrie, en particulier à l'aide de mesures GPS ou de nivellement.
- la prise en compte de la grande densité des données d'interférométrie pour améliorer la modélisation des déformations observées ou mettre en évidence des déformations non observées préalablement.

2.2 L'interférométrie différentielle (DINSAR)

Principe de la méthode

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



Les deux capteurs A1 et A2 sont séparés par une distance, la baseline. Idéalement, cette distance doit être la plus courte possible. Une cible P est localisée dans la scène, à une hauteur h. R1 et R2 sont les distances respectives entre les capteurs et la cible.

Figure 25 : Géométrie d'acquisition en interférométrie

Pour l'étude des déplacements (sismique, glissement de terrain, subsidence, RGA), le seul paramètre d'acquisition qui doit changer entre les deux images est la date d'acquisition entre les deux passages successifs. Dans ce type d'application, il est donc préférable que la géométrie d'acquisition entre les passages successifs du capteur soit la plus proche que possible.

Dans un cas idéal où le satellite repasse exactement au même endroit, on peut alors étudier la différence de phase entre les deux images (la répartition spatiale de ce déphasage) et étudier ainsi l'origine de ce déphasage. Cependant, la relative maîtrise du positionnement des satellites ne permet pas d'avoir des géométries d'acquisition strictement identiques. La distance entre les deux satellites est appelée la base de couple (baseline en anglais) qui est l'un des paramètres de sélection des images radar pour produire des interférogrammes exploitables.

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

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

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

$\Delta\phi$: différence de phase.

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

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

$\Delta\phi_t$: différence de phase issue de la géométrie de la topographie.

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

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

L'analyse d'un interférogramme consiste principalement à distinguer les différentes contributions des phases au sein de l'image pour isoler la seule composante $\Delta\phi_d$ (mesure du déplacement). Une frange interférométrique ainsi obtenue représente un déplacement dont la valeur vaut la demi-longueur d'onde du capteur SAR. Par déroulement des franges, on peut ainsi estimer une composante du vecteur de déplacement de la surface du sol selon la ligne de visée du capteur.

Les limitations de l'interférométrie DINSAR.

L'interférométrie DINSAR fonctionne si le décalage dans le temps n'est pas trop long (inférieur à dix ans), si la ligne de base, c'est-à-dire la distance entre les positions de satellite au moment de l'acquisition des images est inférieure à un kilomètre, si l'atmosphère est comparable au moment des deux acquisitions de données. Sous ces conditions, on choisit deux images radar pour former un couple interférométrique performant et obtenir des franges interprétables en terme de déplacement.

En pratique, l'interprétation des franges interférométrique est rendue difficile par la perte de cohérence temporelle et spatiale (ou géométrique) entre les deux acquisitions. Par exemple, la présence de végétation diminue ou annule la cohérence. A l'inverse, un milieu densément urbanisé favorise la concentration de réflecteurs RADAR et améliore la lisibilité de l'interférogramme. La précision de mesure pour cette méthode interférométrique est de l'ordre du demi centimètre, pourvu que la mesure spatiotemporelle de la technique (répétitivité de mesure 35 jours, mesure dans l'axe de visée) soit adaptée au phénomène étudié.

Il existe donc de nombreuses limitations à l'interférométrie différentielle. La cohérence est une mesure du degré de corrélation entre deux images radar prises sur une même zone avec un certain intervalle de temps. Plus la cohérence est élevée, plus l'interférogramme est lisible. Cette cohérence peut être diminuée par des décorrélations. Nous allons détailler les deux types de décorrélations : la décorrélation spatiale et la décorrélation temporelle. De plus, les artefacts atmosphériques viennent perturber l'interprétation des interférogrammes et doivent donc être décrits. Il en résulte que l'interférométrie est limitée à certains domaines ou champs d'applications que nous détaillons ci-dessous.

Les décorrélations temporelles : la décorrélation temporelle est liée aux changements physiques de la surface entre les deux observations. Cela peut servir d'indicateur de l'état de la surface du sol et ses modifications entre les deux acquisitions. Certains événements tels que les séismes, les éruptions volcaniques ou encore les inondations, peuvent provoquer des variations de cohérence, étant donné que sur les zones touchées on voit apparaître une chute locale de cohérence. Ces zones seront d'autant plus repérables que les zones autour seront cohérentes. Les images de cohérence peuvent donc permettre dans certains cas une évaluation des dégâts après une catastrophe naturelle. Par exemple, la quantification des arbres qui ont été abattus lors de la tempête de décembre 1999.

Un autre exemple de décorrélation temporelle est l'évolution de la cohérence des forêts denses qui est différente de celle des cultures. Une illustration de cette décorrélation est proposée à la Figure 27 : on peut observer que sur un interférogramme avec une faible période (ici 1 mois) entre les deux acquisitions sera plus cohérent, notamment au niveau des champs d'agriculture, qu'un interférogramme avec une période entre images radar de plusieurs années (3 ans pour le second couple).

La décorrélation spatiale : La décorrélation géométrique est due à une ligne de base trop élevée, ce qui rend les interférogramme bruités, même sur les zones normalement cohérentes. Dans la pratique, on sélectionne des images radar dont la ligne de base est inférieure à 200 mètres. De même, les autres bruits s'amplifient à mesure que la ligne de base augmente.

Les artefacts atmosphériques : les types d'artefacts atmosphériques sont les variations globales de l'atmosphère standard (la température, l'humidité et la pression sont fonction de l'altitude). Ces perturbations apparaissent lorsqu'on est en présence d'un relief favorisant ses conditions atmosphériques particulières, telles que de la brume (humidité basse altitude) ou des températures locales. (2) Ou encore, des pressions différentes selon l'altitude où l'on se trouve, ce qui entraîne l'apparition de franges atmosphériques corrélées au relief. (3) Les hétérogénéités atmosphériques locales (présence de nuage, pluie...) introduisent aussi des franges atmosphériques et des anomalies de formes variables (globulaire, effilée ...) sur les interférogrammes et ne peuvent pas être séparées facilement des franges de déplacement. Une illustration à la Figure 26A montre les effets sur l'interférogramme de ce type d'artefact. Enfin d'autres effets peuvent être obtenus comme l'apparition d'une frange liée aux modifications de la géométrie orbitale lors de l'acquisition des images (voir Figure 26B). Il apparaît ainsi des franges au sein des interférogrammes qu'il est nécessaire de corriger.

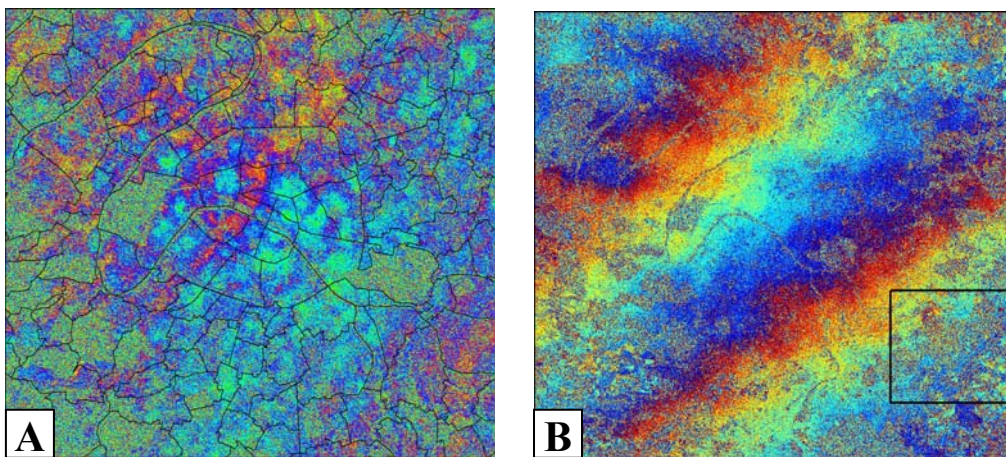


Figure 26 : (A) Interférogrammes affectés par des artefacts A- atmosphériques (B) franges orbitales.

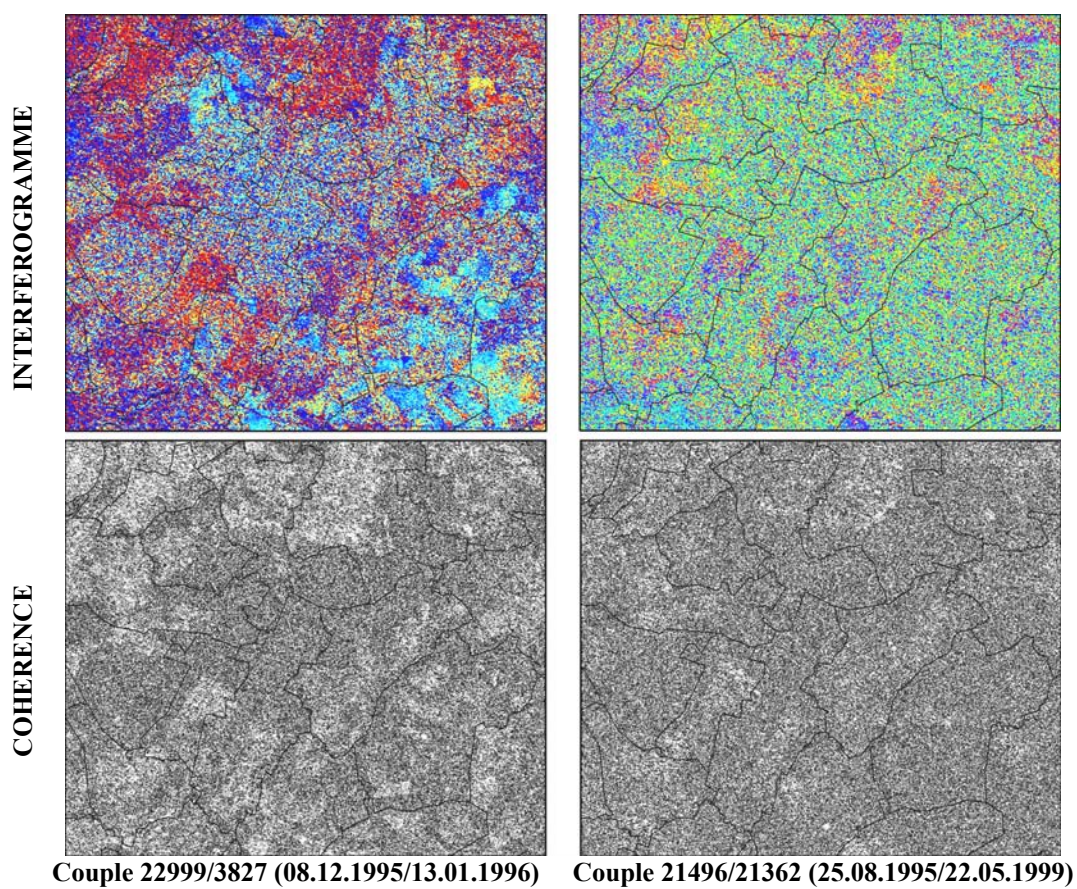


Figure 27: Illustration de la perte de cohérence temporelle.

Critères de sélection des couples interférométriques.

Trois critères de sélection interviennent dans le choix des images radar pour calculer un interférogramme. Ils indiquent également l'intérêt de l'interférogramme avant le calcul en garantissant sa qualité, selon que ces critères sont plus ou moins respectés : les périodes de sécheresse, la baseline (ou ligne de base) et les valeurs de doppler.

- Les périodes de sécheresse

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

Deux périodes de sécheresse ont été étudiées : la période de 1996/1997, avec en mars 1996 le début d'une anomalie de précipitation et la période d'août 2003, plus précisément les deux premières semaines d'août 2003.

- La ligne de base entre satellite.

La ligne de base ou « baseline » est un paramètre essentiel dans la sélection des données radar pour constituer des couples interférométriques. C'est une variable qui indique la qualité des interférogrammes produits : en effet, plus la distance entre les positions des satellites est courte, plus la géométrie d'acquisition est identique. De plus, de nombreuses sources de bruit voient leurs effets augmenter avec une forte valeur de la baseline (Rodriguez et al, 1992). Une sélection avec une ligne de base de 200 mètres a été réalisée, mais dans la pratique, les interférogrammes facilement interprétables ont une valeur de ligne de base inférieure à 100 mètres.

- La « qualité » du doppler

Les échos qui portent l'information de phase et d'amplitude sont enregistrés par le capteur radar en utilisant un effet doppler qui est utilisé en traitement du signal pour reconstruire les images. La valeur d'un doppler d'une image satellite est même une norme de qualité pour commercialiser les données satellites. En interférométrie, la différence des valeurs doppler doit en tout rigueur ne pas être supérieur à 400 en valeur absolue. Donc même après une sélection par la ligne de base et les dates, tous les interférogrammes ne sont pas exploitables. Cela est particulièrement vrai pour le satellite ERS2 qui a eu des difficultés technique à partir

de 2000. Un travail de programmation d'un outil informatique a permis de faciliter le calcul de la différence des valeurs de doppler afin de réaliser une sélection correcte des données.

Le logiciel interférométrie radar : Diapason®

Ce logiciel DIAPASON est développé par le CNES et est distribué commercialement par ALTAMIRA Information. Il permet de calculer des interférogrammes par la méthode interférométrie différentielle, la méthode DINSAR. Les traitements sont effectués par étapes (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) avec l'aide d'un opérateur. Les données qui peuvent être utilisées en entrée sont les images du capteur ERS et ENVISAT. Afin d'optimiser le temps de travail, une chaîne de traitement automatisant ces étapes a été conçue au laboratoire G2i de Marne-la-Vallée (Mabed Z., 2002).

Les différents produits interférométriques calculés.

Nous présentons ci-dessous les différents produits calculés lors de la constitution d'un interférogramme. Il est important d'en faire mention car ces produits dérivés peuvent intervenir dans l'analyse. Afin d'illustrer notre propos, des extractions sont faites sur Paris et ses environs immédiats avec le couple ERS de numéro d'orbite 14348 et 44542, entre les dates du 17 janvier 1998 et du 21 janvier 2000.

L'image d'amplitude est présentée en Figure 28A. Il s'agit ici d'une image SAR du capteur ERS. Plus le pixel est blanc (valeur forte) plus l'énergie renvoyée vers le capteur radar est élevée. L'amplitude d'une image radar mesure donc la capacité de la cible (ou d'un ensemble de cibles) à renvoyer le signal reçu sous forme d'écho vers le radar, ce qui dépend naturellement aussi de l'amplitude du signal émis et de l'atténuation de l'onde lors de sa propagation dans l'atmosphère. Chaque écho reçu par le capteur représente la réponse d'un ensemble de cibles élémentaires pour une unité de surface de 20 mètres sur 20 mètres après traitement.

L'image de cohérence est issue du calcul d'un interférogramme (Figure 28B). Elle mesure le degré de similitude des bons réflecteurs entre les images radar. Plus les cibles de part et d'autres des scènes radar sont réfléchissantes, plus celle-ci la cohérence est élevée. Un interférogramme est beaucoup plus lisible là où la cohérence est forte.

L'image des différences des phases (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.A**), l'interférogramme, est présenté en teinte colorée en utilisant une succession colorimétrique pour une frange de phase.

Enfin en combinaison HSV (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), on peut associer la différence de phase en teinte (Hue), avec la cohérence en saturation (Saturation) et l'amplitude en valeur (Value). Ce type de traitement permet de visualiser simultanément ces trois informations et d'apprécier les variations de phases là où la cohérence et l'amplitude le

permettent. Les interférogrammes seront analysées en extrait comme à la (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

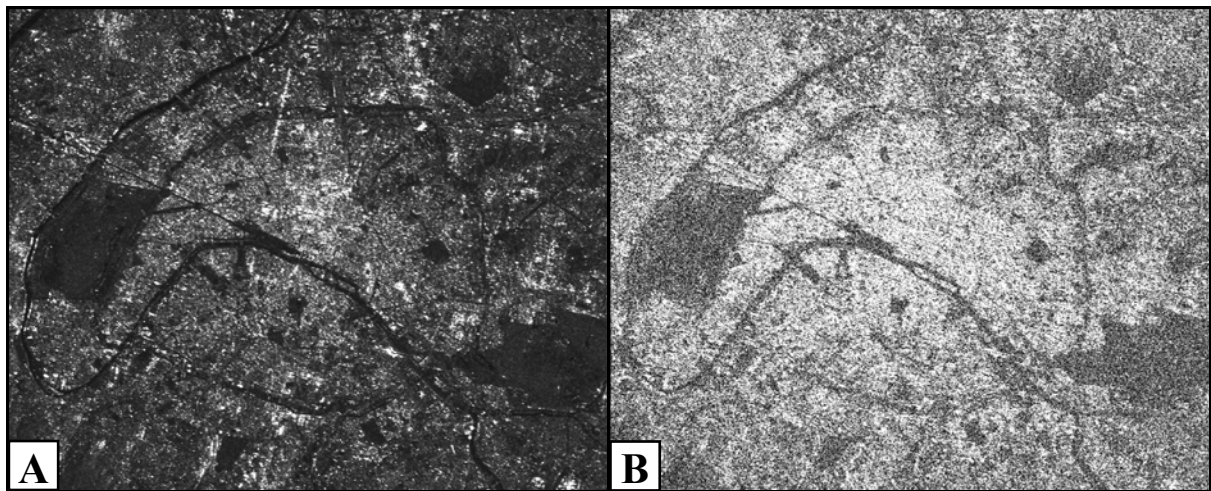


Figure 28 : (A) Image d'amplitude SAR (14348), (B) image de cohérence d'un couple interférométrique.

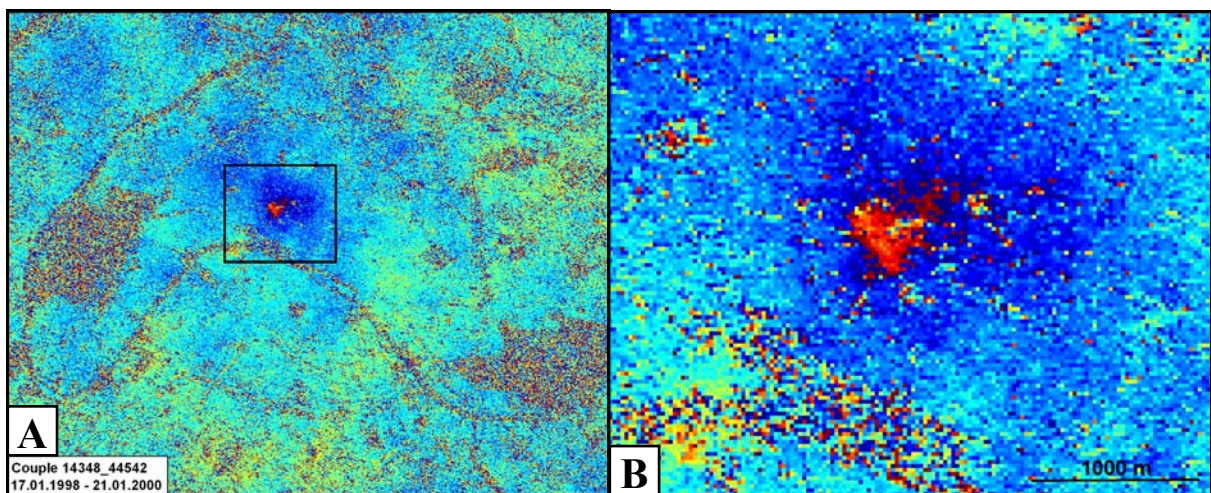


Figure 29: (A) Interférogramme qui présente les différences de phase en couleur (couples interférométriques 14348/45542) et (B) un zoom un signal provoqué remontée de la surface du sol et des bâtiments au niveau de la gare St Lazare suite à la fin des pompages.

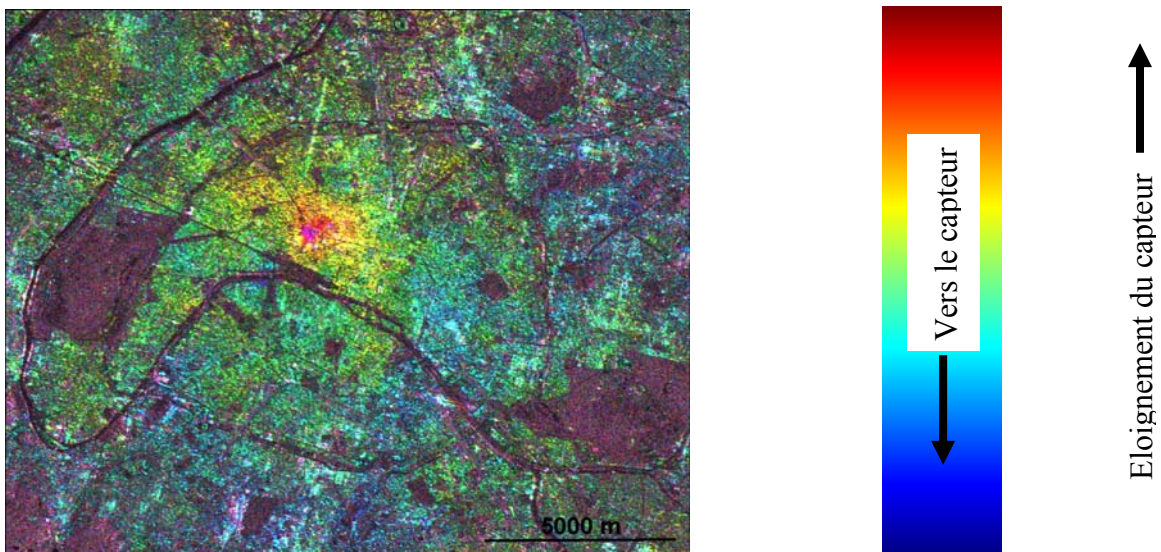


Figure 30 : Interférogramme en colorisation HSV (figure de gauche).

Figure 31: Figure 31: Lecture d'une frange colorimétrique liée à un déphasage (à droite).

La méthode d'interprétation des interférogrammes

La lecture d'un interférogramme nécessite une bonne expertise pour séparer les différents signaux entre eux et isoler la seule contribution liée à une déformation de la surface du sol. La principale limitation étant les artefacts atmosphériques, la méthode d'interprétation consiste à comparer des couples interférométriques indépendants (qui n'utilisent pas les mêmes images radar) à différentes dates pour observer si les signaux persistent. En effet, comme l'atmosphère a un caractère aléatoire, on ne peut pas avoir une réponse identique à différentes dates causée par l'atmosphère.

Une fois un signal identifié comme la réponse d'une déformation de la surface topographique, il faut interpréter le déphasage. Le déphasage est soit négatif, -éloignement du sol dans la ligne de visée du satellite-, ou soit positif -rapprochement vers le capteur-, (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ce raisonnement pose le postulat que l'environnement autour de la déformation à partir duquel on va compter les variations colorimétriques est stable. En fonction de l'importance du déphasage, on peut estimer le déplacement dans sens de visée du satellite. Une frange colorimétrique complète représente une demi longueur d'onde du capteur (2,8 cm dans le cas du capteur ERS1 et ERS2). En connaissant le type de mouvement, on peut estimer l'amplitude du mouvement réel à une précision de quelques millimètres. Cependant la sensibilité de la technique pour détecter le mouvement est de l'ordre du demi-centimètre compte tenu du bruit. C'est à dire que l'on peut décrire une déformation au millimètre avec la technique DINSAR pourvu que cette déformation soit d'une amplitude au moins supérieure à un centimètre de déplacement dans sens de la visée du satellite.

2.3 L'interférométrie des points stables

2.3.1. Origine et développement de la technique.

La technique interférométrique des points stables (PS), ou « persistent scatterers interferometry » en anglais, que nous noterons « méthode PSI » ci-après, a été développée scientifiquement à l'école polytechnique de Milan (POLIMI) en 1999 (Ferretti, 2001). De nombreuses approches ont commencé à être développées à partir de la fin des années 90 pour essayer de résoudre les problèmes de la méthode différentielle et d'exploiter au mieux les bases de données fournies par les satellites SAR (Usai *et al.* 1999, Ferretti *et al.* 2000, 2001, Berardino *et al.* 2002, Schmidt et Bürgmann 2003). Ces approches, utilisant plusieurs acquisitions sur une même scène, permettent d'améliorer la précision des mesures et de suivre en temps l'évolution des déplacements de coins rétrodiffusant.

D'autres méthodes de calcul utilisant le principe des réflecteurs persistants existent dorénavant. Tel est le cas des approches développées par Hooper *et al.* (2004) à l'Université

de Stanford STAMPS, Kampes (2006) au DLR en collaboration avec l'Université de Delft (STUN), Werner et al. (2003) et son équipe Gamma en Suisse (IPTA), et par Arnaud (2003) dans son entreprise Altamira Information, avec la chaîne INSAR Stable Points Network (INSAR SPN), que nous utilisons dans notre travail. La technique PSI fait également l'objet d'une exploitation industrielle et commerciale par la société TRE Tele Rilevamento Europa (start-up issu de POLIMI) avec le brevet PSinSARTM (brevet POLIMI 1999).

L'analyse PSI repose généralement sur des modèles de déplacements linéaires, c'est-à-dire des déplacements avec des taux de déformations relativement constant au cours de la période d'observation. Si il est possible jusqu'à un certain degré de décrire des déplacements non linéaires avec ces méthodes, des profils vont être rejeté ou jugé de mauvaise qualité car le modèle linéaire ne suffit pas pour permettre de suivre dans le temps un phénomène non linéaire comme ceux lié au RGA. L'enjeu est désormais de concevoir un traitement spécifique en se basant sur un modèle non linéaire, adapté à des déplacements non continu dans le temps.

TRE a développé un algorithme PSInSAR Analysis (APSA), de même ALTAMIRA a mise au point un algorithme avec un modèle de déplacement non linéaire que nous utilisons dans ce travail de thèse.

Ces réflecteurs sont dit « stables » non pas qui soient immobiles au cours du temps, mais stable au sens où ils sont suffisamment rétrodiffusant pour qu'on puisse étudier la phase du signal dominant : grâce à la redondance de l'information, apportée par le fait d'utiliser plusieurs interférogrammes, il est possible de diminuer le bruit sur les mesures et de séparer le terme de phase lié à la déformation du reste du signal interférométrique. Dans la littérature scientifique, on parle aussi de points permanents, terme jugé moins ambiguë.

2.3.2. Principe

Comme nous l'avons vu dans la partie II.2 précédente, la précision des mesures obtenue par interférométrie différentielle s'avère limitée lorsqu'il s'agit d'étudier des déplacements de faibles amplitude : d'une part à cause de la perte de cohérence, et d'autre part à cause des contributions atmosphériques qui masquent le signal de phase lié au déplacement, limitant ainsi son application à l'étude des déformations avec une magnitude suffisamment importante. De plus, le suivi de l'évolution temporelle d'une déformation non régulière dans le temps reste problématique : par interférométrie différentielle, on calcule un diagramme de différence de phase entre deux images radar, qui une fois déroulé, donne des informations sur les déplacements cumulés entre les deux dates d'acquisition. Or, les acquisitions intermédiaires disponibles ne sont pas forcément utilisables, à cause de lignes de base perpendiculaire et/ou temporelle trop importantes.

Le but des PSI est donc d'exploiter une série de données radar SAR tout en s'affranchissant des limitations de l'interférométrie différentielle telles que les décorrélation temporelles, géométriques et les déphasages liés aux effets de l'atmosphère. Le principe de la

méthode consiste à sélectionner des points particuliers, les PS dont la réponse radar est suffisamment forte et continue dans le temps. Ces points radar réflecteurs sont dits « stables » non pas parce que leur comportement de la surface du sol qu'il représente soit immobile ou monotone dans le temps, mais stables dans le sens où ce sont des points suffisamment réflecteurs (figure X montrant qu'un réflecteur domine les autres ; thèse Javier, ou Pathier) permettant le calcul du déphasage lié aux mouvements des réflecteurs au cours du temps.

Pour cela on sélectionne une seule image maîtresse et à combiner le maximum d'images avec celle-ci, malgré des différences orbitales conséquentes (grandes lignes de base perpendiculaires). Plus la ligne de base (spatiale et temporelle) est grande, plus la décorrélation entre les deux images est importante. Un point clé de la méthode est donc de sélectionner correctement les réflecteurs dont la phase reste stable dans le temps et quelles que soient les configurations orbitales : l'utilisation de toutes les images disponibles sur la zone étudiée est possible du fait de l'absence de contraintes pour choisir la ligne de base perpendiculaire et temporelle des interférogrammes. Les réflecteurs sélectionnés sont appelés Permanent Scatterers (désormais Persistent Scatterers - réflecteurs persistants - pour contourner le problème de marque déposée).

Historiquement, la méthode PS a été développée en milieu urbain (Ferretti et al., 2000, 2001). Dans un tel environnement, les études récentes (e.g., Perissin and Rocca, 2006; Ferretti et al., 2007) montrent que la stabilité du pixel est liée à des objets bien plus petits que le pixel lui-même. Ces objets sont classés suivant leurs propriétés géométriques et physiques. Il s'agit souvent d'un coin d'immeuble, de toit...qui, grâce à leur orientation par rapport à l'antenne du satellite, vont dominer le signal retour du pixel et apparaître plus stable. Ces réflecteurs particuliers (dont la phase est stable) ont la particularité d'avoir une valeur d'amplitude forte qui varie peu dans le temps. Une méthode basée sur l'amplitude a donc été élaborée pour sélectionner les PS.

A partir d'une série de $N+1$ images SAR disponibles sur la scène d'intérêt (en général supérieur à 20), l'indice de dispersion de l'amplitude est calculé sur chaque pixel :

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A}$$

Où σ_A et m_A correspondent respectivement à l'écart-type et la moyenne de l'amplitude d'un pixel en temps. La sélection des pixels qui seront utilisés par la suite s'effectue par seuillage sur cet indice (en général pris inférieur à 0.25).

L'étape suivante est la formation des interférogrammes différentiels : à partir des $N+1$ images SAR, N interférogrammes sont construits, en faisant interférer chacune des images avec une même image maîtresse. Le choix de l'image maîtresse est fait de façon à limiter la dispersion des lignes de base perpendiculaires (Colesanti et al., 2003). En chaque pixel d'un interférogramme donné, la phase interférométrique s'écrit :

$$\phi = \phi_{topo} + \phi_{dep} + \phi_{atm} + \phi_{bruit}$$

où ϕ_{topo} est la phase de topographie, ϕ_{dep} la phase liée au déplacement du point, ϕ_{atm} le délai de phase atmosphérique, et ϕ_{bruit} le bruit de décorrélation.

La phase interférométrique différentielle, obtenue après élimination de la composante de phase topographique (simulée à partir du MNT) s'écrit :

$$\phi = \phi_{erreur_topo} + \phi_{dep} + \phi_{atm} + \phi_{bruit}$$

où ϕ_{erreur_topo} est le délai de phase dû aux erreurs sur le MNT (le MNT n'étant pas parfait). La phase de topographie résiduelle est proportionnelle à la ligne de base B_{perp} et à l'erreur de topographie :

$$\phi_{erreur_topo} = K_1 B_{perp} \varepsilon_{MNT}$$

Avec K_1 une constante, et ε_{MNT} l'élévation du point par rapport à la surface topographique de référence, appelée erreur du MNT.

Un modèle linéaire est utilisé pour modéliser le déplacement :

$$\phi_{dep} = K_2 T_k v$$

Où K_2 est une constante, T_k est l'intervalle de temps du couple (ou ligne de base temporelle par rapport à l'image maîtresse), et v le taux de déplacement moyen du point (vitesse de déplacement).

La phase interférométrique peut donc finalement s'exprimer de la façon suivante :

$$\phi = K_1 B_{perp} \varepsilon_{MNT} + K_2 T_k v + \phi_{residu}$$

où ϕ_{residu} correspond au résidu de phase, comprenant le bruit, les effets atmosphériques et le déplacement non linéaire du point, c'est-à-dire non pris en compte par le terme $T_k v$.

Le problème reste le déroulement de phase. Pour dérouler la phase, nous devons estimer la différence de phase entre pixels voisins :

$$\Delta\phi = K_1 B_{perp} \Delta\varepsilon_{MNT} + K_2 T_k \Delta v + \Delta\phi_{residu}$$

En considérant des pixels proches, c'est-à-dire dont la distance est inférieure à la distance de corrélation de l'atmosphère (environ 1000 m), on peut supposer que leur phase atmosphérique est identique. Si les déplacements résiduels sont similaires entre pixels voisins, alors $\Delta\phi_{residu}$ sera a priori inférieure à π . Si ces conditions sont vérifiées, il est alors possible de déterminer $\Delta\varepsilon_{MNT}$ et Δv directement à partir de l'ensemble des interférogrammes non déroulés ($\Delta\varepsilon_{MNT}$ et Δv sont identiques sur tout le jeu d'interférogrammes).

Une fois cette estimation faite, un processus d'intégration permet de déterminer pour chaque PS sa vitesse v et son erreur de MNT. La phase résiduelle, après élimination des précédents termes de déformation linéaire et erreur de MNT est calculée sur chacun des PS :

$$\phi_{\text{residu}} = \phi_{\text{dep_non_linéaire}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{bruit}}$$

Finalement cette phase résiduelle déroulée est filtrée pour isoler la composante atmosphérique et les déplacements non linéaires. Les résidus de phase atmosphériques sont supposés être décorrélés dans le temps, et avoir spatialement des variations douces. Quant aux déplacements résiduels (non linéaires, on suppose qu'ils sont corrélés dans le temps et dans l'espace. Un filtrage temporel passe-haut (permettant de retirer les termes du déplacement corrélés en temps), suivi d'un filtrage spatial passe-bas donne une estimation des effets atmosphériques à grande longueur d'onde. Les basses fréquences temporelles fournissent une estimation des déplacements non linéaires.

Au final, on obtient, sur chaque PS, une estimation de la déformation linéaire, des erreurs du MNT et de la déformation non linéaire. La méthode PSI permet d'obtenir ainsi un réseau de points sur lequel on peut suivre l'évolution de l'altitude relative des déplacements des réflecteurs le long de la ligne de visée du satellite, l'échantillonnage temporel de ces mesures correspondant aux dates d'acquisitions des images.

En comparaison avec la méthode classique DinSAR qui exploite des couples d'image radar pour estimer de proche en proche des déplacements de la surface du sol, la méthode PSI permet d'obtenir une information de déplacement de chaque cible de manière continue dans le temps, ce qui est plus utile pour suivre et donc comprendre les mouvements discrets des réflecteurs. Un des avantages majeurs de la méthode est d'éliminer la composante atmosphérique (Duro, 2009). On s'affranchie également de la décorrélation temporelle et géométrique, puisque seules les portions de l'image SAR les plus cohérentes et les plus adaptées à l'application interférométrique sont calculées.

Par ailleurs, les post traitements des données PSI sont donc moins importantes que dans le cas de la méthode DinSAR qui perdait une partie de son information lors de filtrage ou d'orthorectification pourtant nécessaires à leur interprétation. La précision de la mesure s'en trouve ainsi nettement améliorée par rapport à l'interférométrie différentielle DinSAR, soit une précision théorique de $\pm 1\text{mm}$ pour la méthode PSI contre $\pm 5\text{mm}$ pour la méthode DinSAR (REF). Une autre spécificité de la méthode PSI, un point PS est utilisé comme référence pour le calcul. Les variations altimétriques des autres PS sont relatives à la référence.

Les travaux antérieurs.

La notion de Réflecteur Permanent (RP) a été présentée pour la première fois par une équipe du Politecnico di Milano (Polimi) en 1999, **Ferretti et al. (1999)**, puis développée en 2001, **Ferretti et al. (2001)**. Depuis, de nombreuses études utilisant cette méthode ont été menées, **Ferretti et al. (2000)**, **Colesanti et al. (2003)**, **Lyons et Sandwell (2003)**, **Perissin et al. (2004)**, démontrant l'énorme potentiel de celle-ci. Tout comme pour l'interférométrie différentielle DINSAR, la recherche bibliographique ci-dessous se focalise sur les

mouvements liés aux RGA et l'aléa sécheresse : il s'agit de relever les éléments clef de cette technique au travers des études de cas préexistantes.

La subsidence de la ville de Murcia (Espagne, Cordillère Betic), dans la plaine alluviale de la Segura (rivière Véga Media) a été étudiée par **Tomas R. et al. (2005)**. Les auteurs montrent la capacité de l'interférométrie radar pour localiser et quantifier la déformation, ici évaluée à 5 à 10 mm/an (± 5 mm), soit une subsidence de l'ordre de 7,5cm, sur une surface de 4km², pour la période de 1993 à 2004.

La technique interférométrique différentielle employée est celle des Points Stables (PSI) ou Coherent Pixels Technique (CPT), **Mora (2004)**. La déformation est suivie dans le temps sur des positions spatiales qui conservent une cohérence. Les termes linéaires et non linéaires de la déformation sont séparés et étudiés séparément. Les artefacts atmosphériques sont soustraits par une sélection sur 1500m des termes non linéaires. Les données utilisées consistent en 28 images SLC SAR ERS1 et ERS2 de 1993 à 2004 et un MNT de la mission SRTM à trois arc seconde. D'autres données sont utilisées pour la validation des résultats : des levés piezométriques, des mesures in situ à l'aide d'extensomètres et enfin les constats de dégâts du bâti au sein de la ville.

La déformation est attribuée à l'affaiblissement des ressources hydrogéologiques en période de sécheresse, aggravé par la surexploitation des nappes aquifères sous jacentes. Le suivi piezométrique indique un retrait des nappes aquifères de 8 à 15 mètres. La réponse en surface mesurée par interférométrie est une subsidence de 8 mm/an qui donne lieu à des dommages importants sur le bâti. L'étude est focalisée sur le milieu urbain de Murcia, où sont installés des extensomètres. Dans ce milieu urbain dense et fortement imperméabilisé, la subsidence est régulière, mais atténuée lors de la recharge des aquifères. Le tassement du sol est irréversible sur la période étudiée. C'est-à-dire que l'on n'observe pas de soulèvements mais un arrêt de la subsidence qui est alors considéré comme un retour à l'équilibre.

En revanche, en dehors de la ville de Murcia, les mesures interférométriques PSI montrent un soulèvement de l'ordre de 4 mm/an, consécutif à la recharge de la nappe. C'est un milieu urbain secondaire voire rural, où malgré le fait qu'il y ai moins de réflecteurs, le sol est moins imperméabilisé par le goudron et donc plus exposé à la sécheresse. De plus, la nature du sol est argileuse et les auteurs évoquent le phénomène RGA. Les résultats produits par l'interférométrie PSI montrent une corrélation entre les mouvements en surface mesurés au cours du temps et les relevés piezométriques.

Dans l'article "Comparing GPS, Optical Leveling and Permanent Scatterers", **Colesanti (2001)** fait le point sur les différentes méthodes de mesure de déformation d'un glissement de terrain situé sur la cote Sud Ouest d'Ancona (Italie) : l'auteur fait une étude comparative entre les PSI, le levé de terrain optique et le GPS.

Avec la technique des PSI, la précision de mesure dans l'axe de visée (Line of Sight LOS) est de l'ordre du millimètre. Dans un milieu urbain dense, l'auteur rappelle qu'on peut compter sur 100 à 300 PS/km². Alors qu'en milieu rural, les cibles présentant de grandes surfaces exposées étant plus rares, on peut compter sur plus de 10 PS/ km². Le déplacement et l'altitude mesurés sont ainsi relatifs à un point de référence supposé immobile.

Le levé GPS est en accord avec les mesures spatiales par interférométrie radar (technique PS). Le GPS permet un suivi journalier et 3D de la déformation avec une précision de l'ordre de 5 à 10 millimètres. Avec ce type de méthode, il n'est cependant pas nécessaire de posséder une station de référence en dehors du champ de déformation.

En conclusion, l'auteur met en avant la complémentarité des techniques, notamment la possibilité d'utiliser les archives des données radar. L'auteur suggère enfin une intégration dans un SIG pour traiter avec efficacité l'ensemble des résultats.

Les travaux de **Colesanti et al. (2002)** ont montré l'efficacité de la technique PSI pour suivre une déformation largement distribuée telle qu'un glissement de terrain. Cet article fait suite aux travaux des mêmes auteurs sur le glissement de terrain d'Ancona (Italie). 55 images SAR sont traitées pour produire des points stables entre 1992 et décembre 2000. Les résultats sont comparés par des mesures GPS et des levés optiques. Ces méthodes sont présentées comme complémentaires : le GPS pour fournir un mouvement 3D et le levé optique pour détailler l'évolution à un pas temporel très fin. Les résultats montrent un mouvement de terrain continu de 6 cm à 10 cm sur 16 ans. Le suivi PSI, qui mesure la déformation dans la visée du capteur, restitue les quantités de déplacement avec une précision de 1mm/an.

Dans un papier de Colesanti et al. (2003), l'interférométrie PSI est utilisée pour mettre en évidence les déformations topographiques (0.5mm/an), plus les déformations du sol en fonction des saisons (± 1 cm par cycle). La zone d'étude concernée est la plaine alluviale de Santa Clara en Californie (USA). Le travail est d'autant plus intéressant qu'un système de failles actives existe à proximité de la vallée intervient dans la déformation. La déformation est largement distribuée (10*10km). La densité des points stables (cohérence = 0.8) est supérieure à 230 par km². Le MNT utilisé est produit par interférométrie. 25 images ERS1 et ERS2 entre 1995 et 2000 ont été utilisées dans l'étude. Un modèle de variation sinusoïdale est appliqué. La précision théorique de la mesure est détaillée (1mm) et la précision lors de l'application est évaluée à 1 à 3mm par an. La méthode est probante pour suivre les déformations de surface engendrées par des variations saisonnières de la nappe et de failles actives.

Conclusion

Dans la mesure où les déformations sur le bâti induites par le phénomène RGA sont estimées de l'ordre du centimètre, la technique PSI est adéquate pour mesurer et suivre localement l'évolution de réflecteurs de manière précise et régulière dans le temps. Elle permet également de s'affranchir des artefacts atmosphériques. C'est une technique

prometteuse, particulièrement adaptée au milieu urbain dense et secondaire (pavillonnaire). Pour un milieu rural, l'idéal est d'installer des cibles artificielles pour augmenter le nombre de réflecteurs, Hartl and Xia (1993), Hartl et al. (1993) et Prati et al. (1993).

Dans la bibliographie, seul l'article de Tomas et al. (2005) aborde la problématique du RGA avec la technique des PS, avec une validation par des mesures piezométriques. Le mouvement détecté est de 8mm et sa description au cours du temps est réalisée : le mouvement de subsidence et de soulèvement (retrait/gonflement) est effectivement observé. De plus, compte tenu des autres types de déformations mesurées grâce à la technique PSI (glissement de terrain, déformation de bâtiments), il est donc théoriquement possible de localiser, caractériser et quantifier les déformations de la surface topographique induites par le RGA au travers de la réponse du bâtiment. Deux éléments sont toutefois à considérer avec les PS :

(1) La connaissance de la nature des réflecteurs sur le terrain reste une question assez ouverte et importante : il est nécessaire d'identifier la nature des réflecteurs et de corroborer l'information relative à la variation d'altitude, ce qui nécessite un modèle 3D du bâti.

(2) De même, tout comme l'interférométrie radar DINSAR, seule une composante du mouvement de déformation est mesurée dans la ligne de visée du satellite. Il est donc important de prendre en compte l'incidence de l'onde par rapport aux objets étudiés pour restituer correctement le mouvement.

2.3.3. Caractéristiques des données obtenues

Les données PS calculées consistent principalement en une série de valeur de déplacement $d(z)$ pour chaque cible, différence d'altitude calculée par rapport à la première image radar de référence, avec une mesure pour chaque date d'acquisition. En plus de l'information de déplacement, la chaîne de traitement PSI livre un certain nombre d'informations -les métadonnées- très utiles pour caractériser chacune des cibles et préciser la qualité des traitements effectués. Suite aux calculs, chaque PS est caractérisé par les informations suivantes:

- Le numéro FID, attribuée par le SIG qui est un entier permettant de comptabiliser les lignes PS calculées,
- Des coordonnées XY ainsi que son altitude précise déduite de l'erreur du MNT,
- Les valeurs XY images en range et azimuth de chacune des cibles,
- Une vitesse linéaire, noté V_L , vitesse représentant le déplacement moyen le long de visée du satellite, obtenu par moindres carrées,
- La cohérence obtenue selon un modèle linéaire de déplacement,
- Les valeurs de déplacements $d(z)$ mesurées dans l'axe du satellite.

Les valeurs de cohérence comprises entre 0 et 1, une valeur de zéro indiquant l'absence de cohérence, permettent de caractériser la qualité relative des PS calculés selon un modèle linéaire :

- Les PS d'une cohérence inférieurs à 0,2 ne sont pas exploitables.
- Les PS d'une cohérence de 0,2 à 0,5 sont généralement exclus de l'analyse interférométrique ; ils possèdent un comportement fortement non linéaire, ou bien il s'agit d'une série dont le bruit est trop important avec des erreurs d'aliasing.
- Les PS d'une cohérence comprise entre 0,5 et 0,8 donnent une estimation fiable des déplacements avec une précision de 1-3mm/an et d'une précision de 5mm sur les valeurs Dz.
- Pour une cohérence supérieure à 0,8, l'estimation des déplacements dans le temps est extrêmement fiable avec une précision millimétrique.

Nous utilisons les données radar ERS et Envisat pour calculer des données interférométriques PSI. La technique PSI comme la technique DINSAR est appropriée au suivi de mouvements progressif et compatible avec une acquisition tout les 35 jours. Ce qui signifie que l'un des points faibles de la méthode interférométrique réside toujours dans la répétitivité du passage du satellite. Des déplacements de la surface du sol non linéaires peuvent échapper à l'acquisition PSI. Or, c'est l'objet de notre travail. Pour suivre correctement les mouvements de type retrait gonflement, il faut disposer d'acquisition suffisamment nombreuses au cours d'une année pour détailler les effets immédiats de la sécheresse et les effets retardés de gonflement.

Un milieu urbain favorise le nombre de points d'accroches et donc on s'attend à obtenir un réseau de points plus denses.

2.3.4. Limitations et efficacité des PSI

La technique PSI a prouvée son efficacité pour suivre des déplacements au cours du temps de réflecteurs suffisamment rétrodiffusant. Elle est désormais utilisée industriellement pour le suivi de chantier urbain, les chantiers d'exploitation de fluides (eaux, gaz pétrole), la compréhension de risques naturelles (glissement de terrain, suivi d'édifice volcanique). Toutefois il convient de rappeler ses limitations qui sont inhérentes à ses caractéristiques :

- La mesure dans l'axe de visée satellite, déjà expliqué en II.2,
- La précision de la mesure en z de l'ordre de 5 mm, meilleure si le réflecteur suivi dans le temps domine largement l'ensemble des signaux de la cellule de résolution,
- La localisation absolue des réflecteurs, qui en {XXZ} est de 2 mètres,
- La perte de réflecteurs, exclus du calcul selon le modèle utilisé (linéaire/non linéaire), avec des erreurs de commission et d'omission par ambiguïté de phase,

- Des sauts de phase et ambiguïté par recouvrement de phase, qui altère la qualité des profils « bruts »,
- Un volume important des archives et la durée des calculs, plus de 5 jours pour une scène entière à 200 images.

Enfin il faut souligner que la qualité des images radar est aussi un facteur limitant de la technique PSI, même si cela n'est pas directement lié à la méthode. Les données SAR doivent être dans une géométrie d'acquisition la plus proche possible, avec des écarts de valeur de doppler conforme au cahier des charges de l'ESA.

II.3 Informations géographiques et SIG

L'analyse des données est réalisée avec un logiciel spécialisée pour le traitement des informations géographiques : archiver et organiser les données, acquérir des données, les afficher, les analyser et les représenter, tels sont les fonctions offertes par le Système d'Information Géographique (SIG). L'objet de cette partie est de détailler les données que nous avons utilisées pour résoudre la problématique du RGA ainsi que les méthodes de travail mise en œuvre pour l'étude de la sécheresse géotechnique. Les possibilités et les limites des SIG sont précisées ainsi que les choix techniques effectués pour réaliser le travail.

3.1 Les données géographiques

L'étude du risque naturelle de la sécheresse géotechnique implique la mise au point d'une base de données géographique intégrant des données utiles à la problématique. Cette partie précise les données utilisées et les traitements effectués sur celles-ci.

3.1.1. Cartes et données géologiques

Les données géologiques sont extraites des quatre coupures de cartes géologiques numériques qui ont été acquises auprès du BRGM et intégrés à la base de données. Ces cartes numériques sont des rasters géoreféréncés issus de la base de données ScanGeol® du BRGM au 1/50 000 sur les feuilles de Paris, Lagny, Corbeil-Essonnes et Brie-Comte-Robert, toutes positionnée en Lambert 2 étendu dans le système géodésique NTF.

La cartographie de l'aléa de retrait gonflement, basée sur cette cartographie géologique est une base intéressante de travail pour représenter les sols affleurant susceptibles de RGA. Les données numériques relatives à la conception des cartes d'aléa par le BRGM (cf. chapitre I.3.1.4) sont extraites à partir du site argiles.fr :

- Les entités vectorielles des couches d'aléa au format Mid/Mif MapInfo,
- La position {X, Y} et date des sinistres ont été saisies à partir des rapports départementaux,
- Les limites administratives françaises (communes, départements) de la région d'Île-de-France sont téléchargées sur le site InfoTerre® du BRGM, extrait de la Bd Carto® de l'IGN,
- Code des communes INSEE croisée avec la table attributaire des communes,
- Les rapports départementaux au format « pdf » qui décrivent la géologie et les informations géotechniques disponibles.

Le BRGM met à disposition sur son portail « argiles.fr » des données numériques permettant ainsi à n'importe quel utilisateur qualifié de reconstituer les cartes d'aléa du BRGM. Il est recommandé de préciser la date d'extraction au vu des nombreuses actualisations réalisées par l'institut et de porter la mention des droits d'auteur du BRGM.

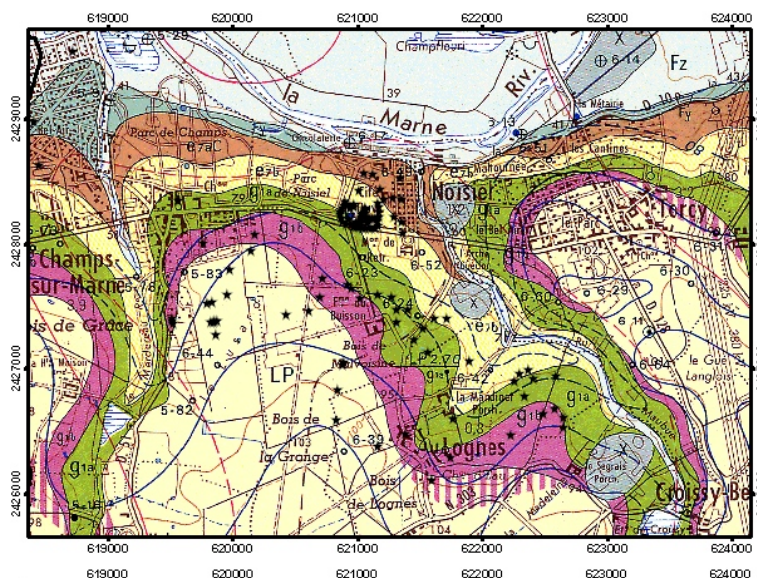
Les rapports départementaux contiennent des tables d'informations qui peuvent être numérisées mais qui ne sont pas intégrées à la base de données géoréférencée mais plutôt compilées et intégrées à la banque de données :

- Le nombre d'arrêtés de CatNat par commune,
- Dates des déclarations des CatNat paru au Journal Officiel de la République,
- Nombre de sinistres par communes et parfois leur date d'observation,
- Description géotechnique (rapport actualisé),
- L'inventaire des formations argilo-marneuses susceptibles de RGA,
- Table de synthèse des sinistres par formations argileuses,
- Les cartes d'aléa avec parfois la sinistralité représentée dessus,
- L'inventaire {X, Y} des sinistres liée à la sécheresse.

Rappelons que l'ensemble de ces données sont disponibles et utilisables dans un but scientifique et disponible pour le public et les différents acteurs concernés par la sécheresse géotechnique.

La planche de figures ci-après (Figure 32) montre les possibilités de traitement graphique à l'aide d'un SIG réalisable à partir des données téléchargées sur « argiles.fr ». Il s'agit de compléter « thématiquement » cette cartographie – et non de la modifier – en superposant d'autre type d'informations utiles à la problématique telles que la sinistralité ou l'emprise des zones urbanisées. Dans cet exemple ci, on reporte l'extrait de la carte géologique (Figure 32A) que l'on compare avec la cartographie de l'aléa actualisée en 2009 par le BRGM (Figure 32B) pour la commune de Noisiel, dans le département de Seine-et-Marne. Afin d'apprécier la densité de la sinistralité vis-à-vis des couches géologiques et comprendre la répartition spatiale des sinistres recensés, on utilise les surfaces urbanisées (enjeu) extraites de la base de données MOS de l'IAURIF (Figure 32C). Les données cartographiques montrant les zones urbaines sont issues du MOS de l'IAURIF, décrit ci-après.

Ce travail révèle les zones urbanisées en milieu classé « aléa fort » et donc de mieux comprendre la répartition de la sinistralité. Enfin, une visite terrain du quartier avec un survol de la sinistralité a montré des défauts de conception des pavillons organisés sous forme d'un lotissement. Tous les pavillons présentent les mêmes erreurs de conception technique ce qui explique la forte concentration de la sinistralité. Ce site n'a donc pas été retenu dans les sites à étudier par interférométrie radar.



Carte géologique du BRGM 1/50.000, feuille de Lagny. Sinistralité de 2003 représentée par des étoiles noires.

X : Remblais

F_z : Alluvion modernes

F_{x,y} : alluvion de basse et moyenne terrasse

LP : Limons des Plateaux

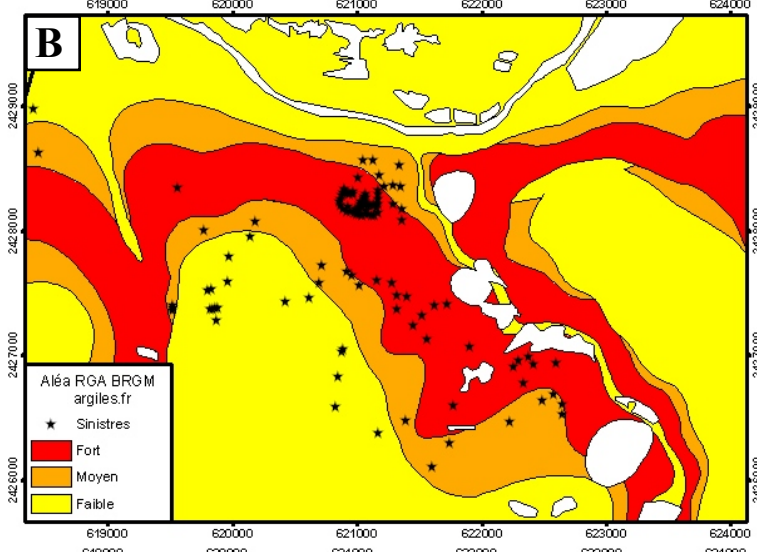
e_{7a} : Calcaire de Champigny et Marnes indifférenciée

e_{7b} : Marnes Supragypseuses

g_{1a} : Argiles Verte de Romainville

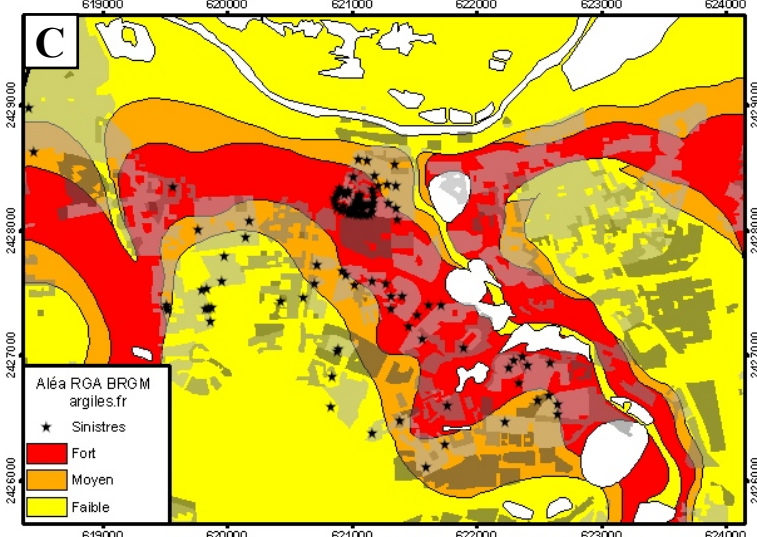
g_{1b} : Calcaire de Brie et argile à meulière.

Remarque : une zone de sur sinistralité indiquée par une flèche.



Carte d'aléa du BRGM (argiles.fr)

Remarque : la répartition spatiale des sinistres au travers des différentes zones d'aléa. La formation géologique des Limons de Plateau en sommet de plateau nécessiterait plus amples investigations.



Carte d'aléa du BRGM avec en sur imposition l'emprise des surfaces urbanisées d'après l'IAURIF, MOS2003.

La présence ou non de la sinistralité prend son sens en visualisant l'enjeu (les zones urbaines ici) simultanément avec la carte d'aléa.

Les sites en gris clair indiquent des bâtiments pavillonnaires individuels et les sites en gris foncé des bâtiments collectifs élevés et suffisamment fondés.

Figure 32 : Exemple de traitement cartographique à partir des données téléchargé sur argiles.fr.

A- Extrait carte géologique du BRGM, B- Carte d'aléa du BRGM et la sinistralité déclaré en 2003, C- Carte aléa du BRGM avec les surfaces urbanisées, d'après l'IAURIF, MOS2003.

3.1.2. Carte d'occupation du sol

La carte d'occupation des sols est extraite de la base de données MOS (Mode d'Occupation du Sol). C'est est un atlas cartographique informatisé, crée et actualisé par l'Institut d'Aménagement Urbain de la Région d'Île-de-France (IAURIF) disponible sous forme d'une carte interactive sur <http://www.iau-idf.fr>.

Actualisé régulièrement depuis sa première édition de 1982, le MOS permet de suivre l'évolution de l'occupation du sol de la région d'Île-de-France. Le MOS a été mis à jour cinq fois en 1987, 1990, 1994, 1999 et en 2003. La réalisation de la classification est établie à partir d'une couverture photographique aérienne complète de l'Île-de-France, donc avec une précision géométrique au 1/5 000 et de diverses sources d'informations complémentaires des services administratifs de l'Etat. La classification se présente sous forme d'une base de données vectorielle, avec pour nomenclature une légende à quatre-vingt trois postes, elle est ici simplifiée à onze postes par regroupement des différentes classes. Les données sont compatibles et sémiologiquement prédéfinis pour le SIG ArcGis afin d'effectuer rapidement le rendu cartographique (Figure 33) en Lambert 2 étendu (NTF).

Suite à notre demande, l'IAURIF a mis à notre disposition les données sources sur l'Est Parisien à des fins de recherche ce qui nous a permis de compléter la base de données relative au RGA. Son utilisation pour la thématique du RGA s'est avéré limité, puisque qu'il n'y pas de description plus précise à l'échelle de la parcelle des aménagements urbains privés (espace vert et arbres privée, type de bâtiment et annexe...). Toutefois à l'échelle de la commune, le MOS permet de préciser des informations utiles à la problématique du RGA : a) les surfaces d'emprise des zones urbaines secondaire de type bâtiments pavillonnaires faiblement fondés et fortement soumis au RGA), b) des bâtiments collectif (bâtiment élevés à plusieurs copropriétés) ou d'infrastructure (usine, école...) ainsi que 3) les espaces vert **publics**, véritables interface atmosphère/lithosphère et donc soumis au RGA. Son utilité pour comprendre la nature et la répartition spatiale du tissu urbain est importante, en particulier dans l'analyse de la sinistralité car les surfaces habitable définissent l'enjeu.

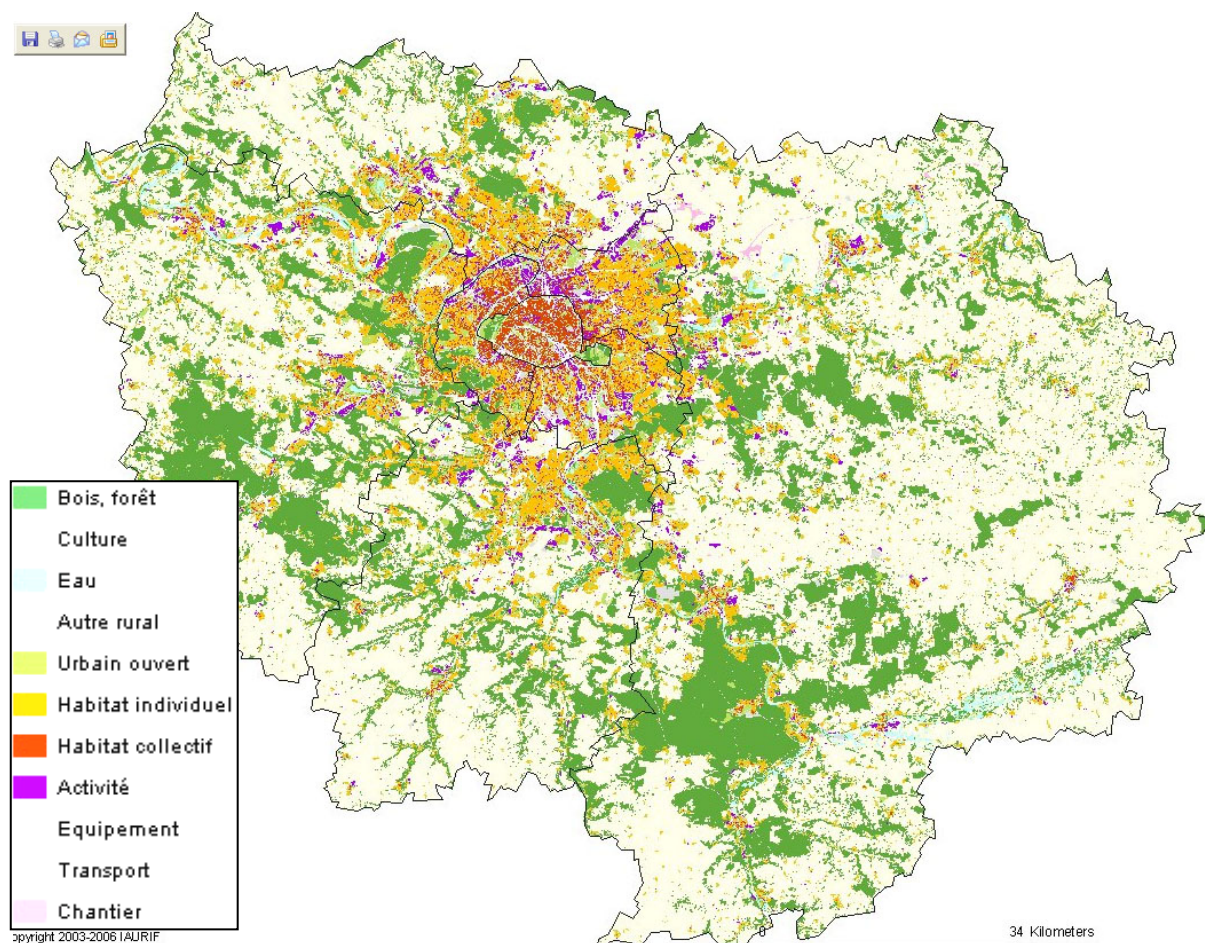


Figure 33 : Classification 2003 MOS IAURIF à 11 postes.

La classification à onze postes montre l'étalement périurbain caractérisé par un habitat pavillonnaire jardiné vulnérable au RGA (en jaune) autour de la Capitale caractérisée par des bâtiments collectifs suffisamment fondés et non vulnérables au RGA (en rouge). Aucune action n'est entreprise pour cartographier l'aléa RGA dans la Ville de Paris (75). Les départements de Seine-Saint-Denis (93) et de Val-de-Marne (94) sont nettement les plus concernés par l'extension à l'est de Paris de la ceinture périurbaine de Paris sur des sols soumis au RGA ou peu adaptés à la construction.

3.1.3. L'imagerie aérienne

L'imagerie aérienne est un support géographique essentiel pour traiter la problématique du RGA en milieu urbain de par sa richesse en informations et de par sa qualité géométrique. C'est une source d'information qui permet de localiser et caractériser des objets utiles à la problématique, mais aussi une donnée utile au traitement des PS, comme le géocodage des réflecteurs PS en géométrie projetée (voir partie CH.II.2.3). De plus, du fait que les images aériennes soient à une haute résolution spatiale, de l'ordre du demi mètre, -les données les plus précises spatialement du jeu de données disponibles-, il est possible de géoréférencer les autres données thématiques par rapport à celles-ci et d'appliquer la projection cartographique des images aériennes à l'ensemble de la base de données.

L'imagerie aérienne utilisée est issue de la base de données raster de l'IGN, la BD ORTHO®. L'orthophotographie de l'IGN est une image aérienne couleur acquise dans la longueur d'onde du visible. La couverture aérienne est renouvelée chaque cinq ans sur le

territoire français en moyenne, avec une répétitivité toutefois plus importante jusqu'à une mission tout les trois ans sur les sites fortement évolutifs, densément peuplés tels que l'Ile-de-France. Les documents sont géométriquement orthorectifiés, c'est-à-dire qu'ils sont corrigés de telle sorte que les objets de sur-sol aient un rendu géométrique tels qu'ils seraient observé à l'aplomb. La région parisienne accuse quelques reliefs faiblement élevés, autour de 300 mètres pour les plateaux du bassin parisien, les déformations géométriques y sont mineures et les corrections y sont aisées.

En revanche l'acquisition d'image aérienne en milieu urbain dense peut poser un souci technique dans l'ortho-rectification des objets de sursol à altitude élevée, de type gratte-ciel commerciaux et bâtiments collectifs à nombreux étages. Cependant, le travail réalisé concerne les milieux péri-urbains de la Ville de Paris, quartier urbain constitué de bâtiments relativement bas, ce qui ne pose pas de difficulté de repositionnement des objets au sein de l'image aérienne lors de l'ortho rectification.

Les dates d'acquisition des images aériennes utilisées dans ce travail sont de l'année 2003, la projection retenue est le Lambert 2 étendu, en système géodésique NTF.

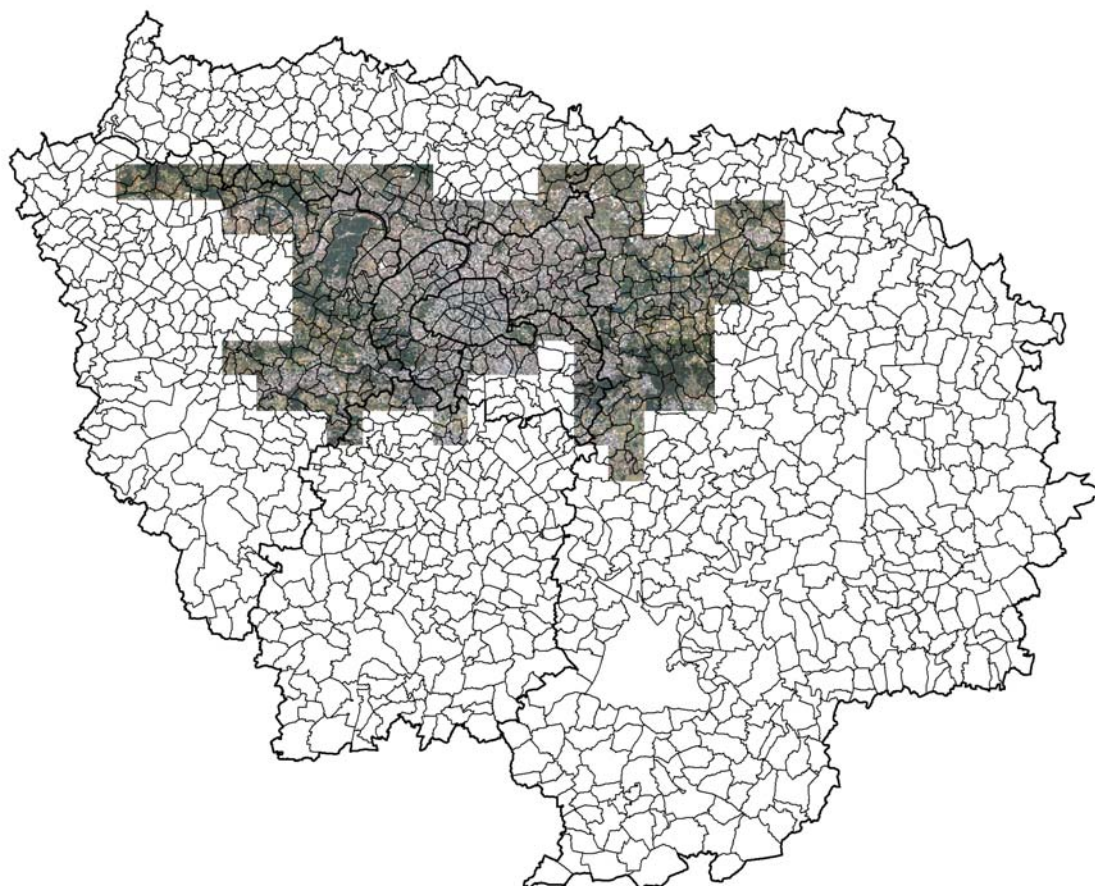


Figure 34 : Dalles d'orthoimage aérienne disponibles pour l'étude du bassin parisien.



Figure 35 : Extrait d'une ortho photographie sur un quartier d'affaire de La Défense, ville de Puteaux, France. Source : Bd Ortho® IGN.

L'ortho image doit redresser géométriquement les objets de sursol pour éviter la distorsion dans l'image inhérente à l'angle de vue. Sur l'exemple ci-dessus, sur une photo du quartier de la Défense proche de Paris, les bâtiments sont tellement élevés que même après ortho rectification les façades des grattes ciel restent observables. Remarquez aussi l'ombre portée des bâtiments.

3.1.4. Données topographiques

Dans la base de données établie pour ce travail, les données topographiques se présentent sous forme de matrice géoréférencée ou chaque cellule contient une valeur altimétrique dans un repère altimétrique orthonormée. On appelle MNT de type raster, un modèle Numérique de terrain dont la qualité dépend de la précision de la valeur contenue dans chaque cellule et de la taille de ces cellules. La matrice est la forme la plus répandue des MNT, on note qu'il existe sous forme vectorielle (tin, courbes de niveau). Un MNT de type raster est d'autant plus précis que son pas est petit et que la valeur altimétrique présente dans chaque cellule soit exacte. Il existe de nombreux produits dérivés des MNT tels que les cartes de pente, les estompages pour simuler les espaces à l'abri ou exposé à la lumière, les cartes d'orientation de facette, les cartes de visibilité calculé à partir d'un point d'observation etc.

Les données topographiques sont indispensables pour résoudre certain aspect de la problématique du risque de sécheresse géotechnique. En effet, **la pente est un facteur aggravant** de la sécheresse géotechnique, on a pu déjà mettre en évidence que le relief « pilotait » en parti la répartition spatiale de la sinistralité. La modélisation du relief intervient pour se rendre compte des effets de la pente sur la sensibilité des sols au RGA et sur la stabilité des sols lors d'une sécheresse.

Mais c'est aussi une donnée qui intervient dans les calculs interférométriques, dans la rectification des images radar et optique pour corriger les effets du relief. C'est donc à la fois une donnée thématique une donnée et une donnée intervenant dans les traitements radar.

Deux données sont disponibles : la Bd Alti de l'IGN et les données SRTM issue de la mission spatial américaine de 2002, dont les caractéristiques respectives sont données ci-dessous (Tableau 9).

	BdAlti	SRTM
"Meilleure" résolution	25m	3' arc (90m) *
précision Altimétrique	+/-5m	15m
Géométrie	Projetée	Géographique
système	NTF clarke 1880 IGN	WGS84
Date	Variable, depuis 1950	fevrier 2000
source	Photogrammétrie	Interférométrie

Tableau 9 : Référence techniques générales des MNT utilisés.

3.1.5. Les données terrain

Les données de terrains interviennent dans deux aspects du travail : en premier lieu, les observations de terrain permettent de compléter la base de données avec des informations observées dont on est sûr. D'autre part, le terrain sert aussi à la validation des modèles établis ainsi que de confirmer les relations mises en évidence entre les différents faits et phénomènes déduits des modèles. Nous présentons ici succinctement les informations relevées sur le terrain et qui ont été intégrées à la base de données. Les observations des terrains consistent :

- Le positionnement des pavillons, dont la localisation est contrôlée avec une saisie de point GPS. L'information de l'adresse postale n'étant pas fiable pour un positionnement spatial de précision,
- Les observations sur ces bâtiments comme le type de bâtiment et les degrés de fissuration ou de déformations,
- Des photos, indexés sur un objet ou au dernier cas sur un point GPS,
- L'Observation de la végétation,
- Observation du système routier et des déformations de terrain,
- Et l'observation en générale associée à un objet toujours repéré dans l'espace par une saisie GPS

Remarquons qu'un grand nombre de ses observations concernent les bâtiments eux-mêmes. L'information principale recherchée est leur état, plus précisément le degré de déformation et de fissuration en lien avec le RGA conformément aux symptômes caractéristiques de ce type de dégâts (méthode développée en CHI 3.2.2.). Enfin on cherche à s'affranchir de l'adresse postale, cette information étant soumise au règlement de la Commission nationale de l'informatique et des Libertés (CNIL, Loi n° 78-17 du 6 Janvier 1978) et qui ne doit pas être mentionnée dans les travaux par respect des informations personnelles. Seule une clef (code numérique) indépendante liée à une saisie GPS lors du terrain est appariée aux objets « maison » numérisée sur les images aériennes.

Des pré-requis sont nécessaires lors du terrain : il est nécessaire de d'organiser une série de planches pour pouvoir noter les informations requises pour la base de données –ce qui suppose d'avoir déjà formalisé les informations à relever sur le terrain-, avoir les connaissances requises selon la thématique envisagée comme par exemple savoir reconnaître les essences d'arbres ou savoir identifier des déformations liées à des mouvements de terrain et non à la dégradation et vieillissement des matériaux.

Une grande difficulté dans la gestion des observations du terrain est leur continuité spatiale et temporelles : a) spatiale, car il n'est pas possible de tout voir depuis la voirie publique, auxquelles cas il est nécessaire de compléter avec des informations de télédétection (sur imagerie aérienne par exemple). b) Temporelle, car les données terrain posent un problème d'actualisation. c) Les objets environnants ont évolué ou vont évoluer lors de

l'analyse. On oublie bien souvent de dater et de reporter la date des observations faites, alors que c'est une métadonnée (information sur l'information) importante.

Enfin, il faut noter l'importance de l'usage du GPS qui permet de localiser tous les types d'information afin de pouvoir les situer lors du dépouillement en laboratoire. Il est parfois délicat d'obtenir un positionnement précis en milieu urbain dense du fait de la présence de haut bâtiment occultant la réception des satellites. Cependant le travail effectué en région péri-urbaine n'est pas sans poser de problèmes à la réception du signal GPS : un positionnement de plus ou moins deux mètres est la norme.

3.1.6. Les données climatologiques

Les données météorologiques ne font pas partie intégrante de la base de données mais plutôt à la banque de données, car aucun modèle spatiale d'interpolation n'a été réalisé au cours de cette étude. Les données les plus proches de Bry-Sur-Marne ont été saisies et extraites de la base de données du PIREN Seine (groupe de recherche UMR 7619 Sisyphe), extrait des données de Météo France :

- Pluviométrie, en mm par mois,
- Température en degrés Celsius, mesuré le jour,
- La valeur de l'ETP mesuré à Melun, station météorologique la plus proche de la zone d'étude.

Ces informations météorologiques sont statiques dans la base de données et ne servent qu'à « habiller » les graphiques montrant les profils de déplacement PS, afin d'établir un lien entre les périodes climatiques et les déplacements mesurés.

3.2 Traitements et SIG

Un SIG permet d'archiver, afficher, actualiser, aider à l'abstraction des données pour les modéliser et analyser ces données. Le travail effectué sous SIG passe généralement par les étapes suivantes :

- Poser clairement la problématique et identifier les informations utiles à cette problématique,
- Formaliser les données et structurer les relations entre elles (schéma relationnel),
- Renseigner la base de données en saisissant les champs dans les tables attributaires,
- Réaliser les requêtes spatiales ou attributaires pour répondre à la problématique,
- Formaliser les résultats sous forme de statistique ou de spatiocarte.

L'analyse spatiale des différentes données thématiques est effectuée dans l'environnement du SIG à partir d'une base de données géoréférencées. Le choix du système Lambert 2 étendu a été effectué en se basant sur le document « pivot » le plus précis et le plus indispensable aux corrections géométriques des diverses données : l'imagerie ortho rectifié de l'IGN.

L'exemple ci-dessous illustre un cas démonstrateur de la thématique RGA sous forme d'une planche de figures, regroupant les différentes thématiques utiles pour la prise de décision (sélectionner le site d'étude ou non). Il s'agit de déterminer les sites concentrant des désordres liés au RGA et qui soient renseignés dans la base de données (emprise des scènes satellite tout particulièrement). Un certain nombre de sites « test » ont été évalué afin de prendre en compte ceux qui présentent le plus d'intérêt pour le travail à effectuer. En Juillet 2003 lors de la canicule, il a été recensé des sites fortement touché par la sécheresse géotechnique. Les sites de Noisiel sont reconnus en 2003 pour leur sur-sinistralité et une mission de terrain a été programmée. Le site n'a pas retenu finalement notre attention, nous présentons ici les différents documents thématiques le justifiant.

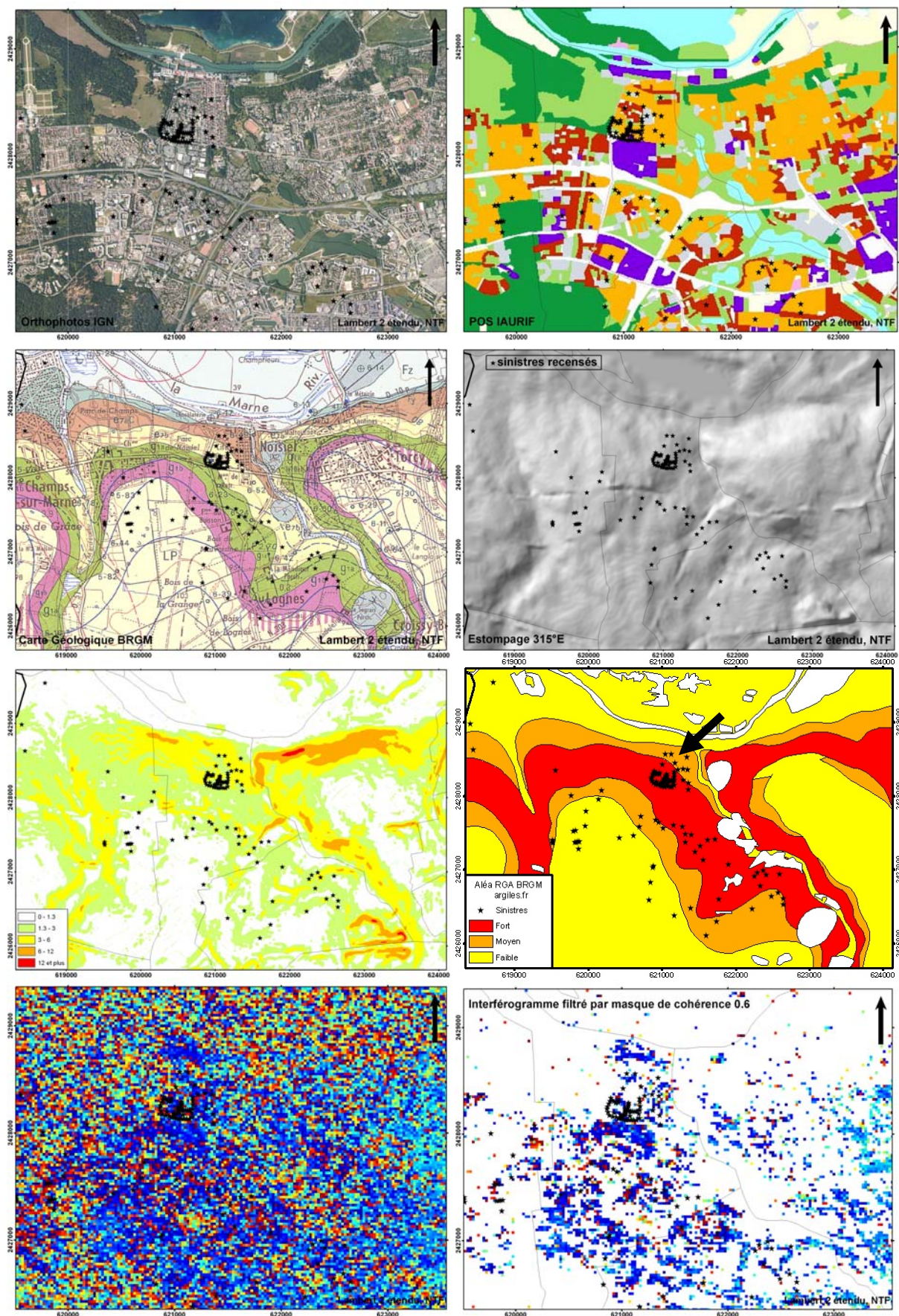


Figure 36 : Planche de documents thématiques cartographiés sous le SIG

1- Orthophotographie IGN

- 2- Occupation du sol IAURIF
- 3- Carte géologique (extrait)
- 4- Estompage de MNT
- 5- Carte des pentes
- 6- aléa BRGM
- 7- Interférogramme DINSAR brut
- 8- Interférogramme DINSAR filtré

Ces vignettes extraites de la base de données illustre un cas simple lors de la recherche de site à détailler. Les points noirs montrent sur l'orthophotographie (A) les sinistres déclarés suite à la sécheresse de 2003. Sur la classification de l'IAURIF (B) il s'agit d'un quartier en jaune classé pavillonnaire, sur un sol argileux peu sensible au RGA (Donsimoni *et al.*, 2006) sur un terrain accusant une pente relativement prononcée (3 à 5°). Cependant cette sur-sinistralité est liée à la présence d'un lotissement de pavillons construite sur le même plan architectural avec des défauts de conception. Cet exemple montre la possibilité offerte par les SIG de visualiser différents type d'information thématique pour discuter d'un cas précis et des facteurs intervenant.

Si à l'échelle globale le but recherché est avant tout une cartographie thématique permettant de visualiser et de comparer les différents facteurs intervenant à la même emprise spatiale, l'analyse spatiale à l'échelle de la parcelle nécessite une continuité et un renseignement précis des tables attributaires des différents objets suivant :

- Objets maisons, numérisé à partir de l'imagerie aérienne sous forme de polygone représentant le toit avec pour champ attributaire [n°référencement, type maison, adresse postale, n° de photos et croquis, type de garage, accolé ou non à une autre propriétés, type de déformation et observations diverses].
- Objets arbre, numérisé sur imagerie aérienne et/ou géolocalisé par saisie GPS sur le terrain avec pour attribut [n°ID, position XY, hauteur relative ou hauteur mesurée, essence de l'arbre, placée en haie ou non]

A partir des informations renseignées dans les champs attributaires pour ces deux objets, il est possible d'effectuer des sélections lors de requêtes spatiales. Par exemple, il est possible de sélectionner automatiquement tous les bâtiments observés déformés et qui soient à proximité d'un arbre. Le résultat pourra être ensuite comparé au nombre de maisons observées « non déformée » qui sont également à proximité de la végétation arborée afin de discuter de l'influence du paramètre « proximité de la végétation » sur l'état du bâti.

Un autre traitement très couramment utilisé est la jointure de table attributaire : lors de l'acquisition des données de terrain, un certain nombre d'observations sont relevées pour chaque bâtiment. Ces informations sont numérisées en laboratoire et doivent être à ajouter à la base de données existante. Mais comment ajouter ce type d'information au bâtiment pré-numérisé sur l'orthoimage sous forme de polygone? Le traitement consiste à associer une clef identique aux deux tables afin de créer un lien et d'ajouter les observations de terrain

correctement à chaque bâtiment extrait de l'orthoimage. Encore faut-il que lors de la mission terrain, un extrait de l'imagerie aérienne montrant ces bâtiments et leur code soit préalablement imprimé et utilisé lors de la saisie des observations.

Si un SIG permet d'effectuer des tâches automatiques d'analyse et de requêtes, le travail de préparation des données en amont exige une formalisation des objets (abstraction) ainsi qu'une démarche de renseignement préalablement définie et structurée. Les difficultés sont réelles, il n'est pas impossible qu'un bâtiment ait été construit ou un arbre abattu lors de l'acquisition de l'orthoimage ou lors de la visite. Il peut en résulter des erreurs de croisement de données : une grande vigilance est requise et des corrections manuelles souvent requises pour valider la base de données.

Le résultat abouti d'une analyse spatiale se présente soit sous la forme de chiffres et de statistiques permettant de répondre à la problématique ou bien une spatiocarte présentant l'influence des tels ou tels facteurs sur un fait observés. Dans les deux cas, il faut qu'une question claire soit posée en rapport avec les objets renseignés dans la base de données. Il faut que ces objets soient correctement représentés et décrits par leur table attributaire et correctement positionnés. La partie 3.3 ci-après montre la démarche utilisée de l'observation de terrain jusqu'à l'analyse proprement dite.

3.3 Photo interprétation et cartographie

L'objet de cette partie est d'illustrer les parties précédentes avec un exemple d'analyse spatiale sous SIG afin de résoudre un problème d'aménagement urbain. Comment évaluer et représenter l'influence théorique de la végétation dans un espace urbain ? Il s'agit de montrer la démarche adoptée, c'est-à-dire comment l'acquisition des données, la photo-interprétation des images aériennes et l'analyse spatiale sous SIG se combinent afin de produire une cartographie thématique.

Nous souhaitons donc cartographier l'influence théorique de la végétation vis-à-vis de l'environnement urbain comme le montre le schéma ci-dessous (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

La connaissance précise de la géométrie de l'emplacement de la végétation arborée et de l'habitat permet de déterminer la distance moyenne les séparant et donc de déterminer l'influence de la végétation sur le bâti. Pour cela l'emplacement des résidences doit être connu ainsi que celle de la végétation qui doit être caractérisée (hauteurs, essences...). Ce travail est réalisable avec (1) une pré-analyse des documents de télédétection, en vu de (2) préparer les missions terrain, puis (3) une photo interprétation qui complète la numérisation des données lors du dépouillement, suivi de (4) l'analyse spatiale et sa représentation cartographique.

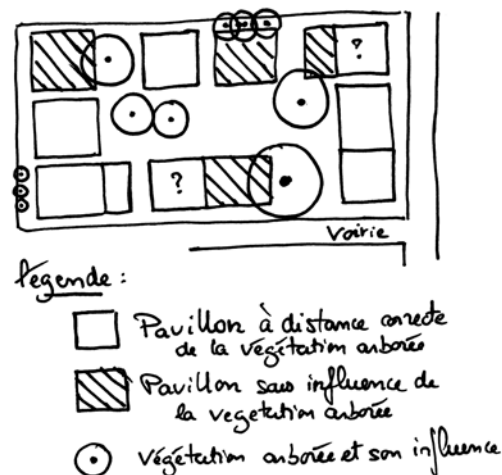


Figure 37 : Schéma simplifié de la relation végétation/bâti pour des espèces isolées.

Remarquez que les effets d'espèces végétales proches s'additionnent.

3.3.1. Méthodologie

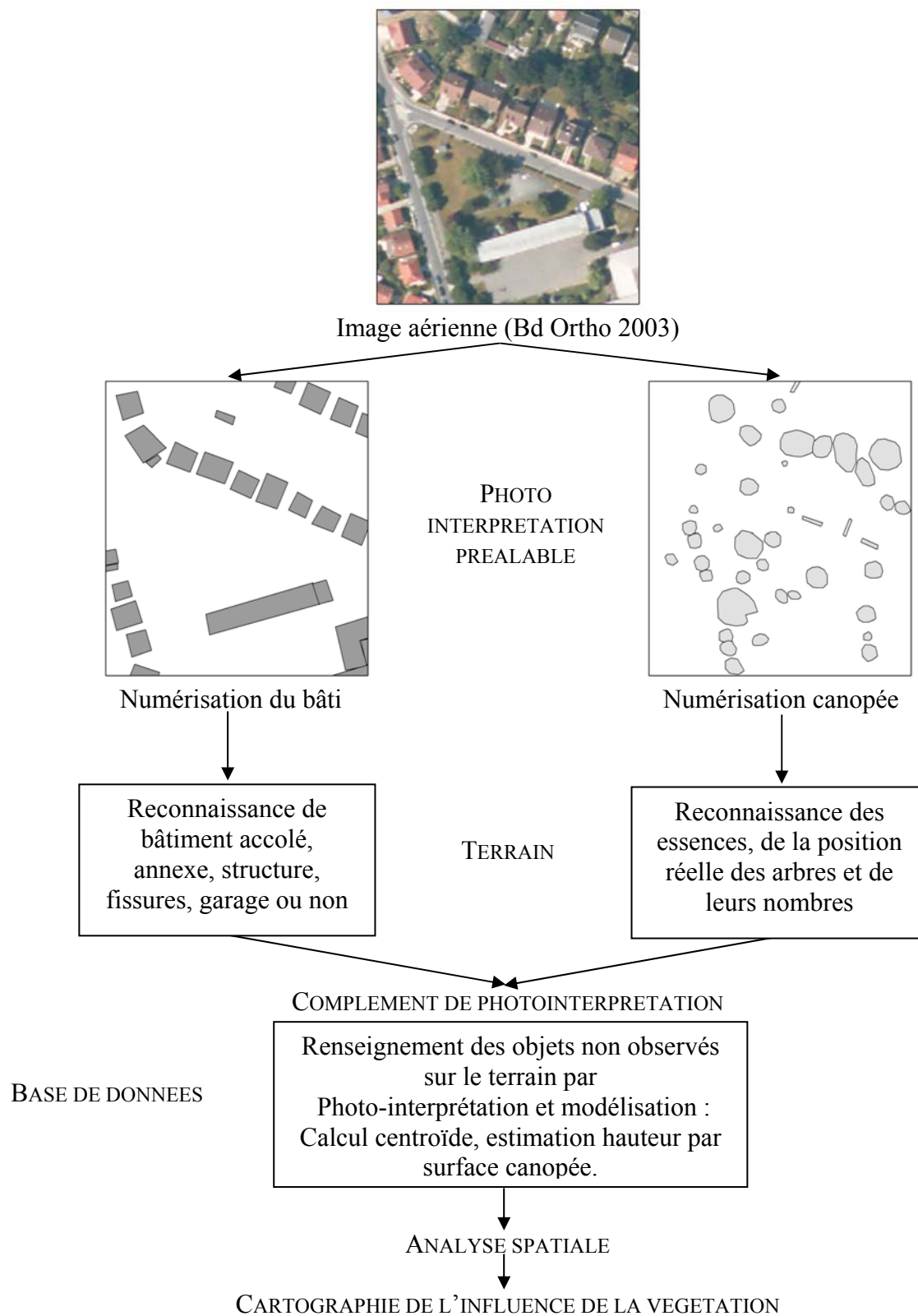


Figure 38 : Méthodologie de l'analyse de l'influence de la végétation

3.3.2. Une pré-analyse des images aériennes, préparation du terrain.

Une photo interprétation préalable garantit une sortie terrain facile à mener car en partie effectuée ou « dégrossie ». Les nombreuses informations apportées par les observations de terrain sont une garantie de la qualité de la base de données. Même en l'absence de l'observation de certain objet, il est possible d'analyser et de modéliser les objets restants par photo interprétation. Cette méthodologie (Figure 38) d'aller retour terrain/laboratoire assure une base de donnée dûment complétée où chaque objet possède les attributs renseignés nécessaire à la cartographie de l'influence de la végétation.

Un document de base utile à cette problématique est orthophotographie IGN datant de 2003 d'une résolution de 50cm. L'analyse préalable des images aériennes permet de bien cartographier l'emprise de la végétation en estimant une position moyenne des troncs des arbres, en particulier si ceux-ci sont isolés. Cependant, il subsiste un doute sur la position des arbres lorsque la canopée est étendue. Autre fait important, dans la majorité des cas il est difficile d'identifier l'essence des arbres par photo interprétation : cela est d'autant plus vrai en milieu péri urbain, les résidents plantent des arbres d'une grande variété possible, contrairement à la parcelle forestière qui sont présente une relative monotonie.



Figure 39 : Estimation de la hauteur d'un arbre en fonction de la taille au sol de l'ombre portée et de l'heure de prise de vue de l'image aérienne.

La numérisation sur l'image aérienne en laboratoire des données de végétation arborée consiste à acquérir le contour de la canopée dans un premier temps sous forme de polygone. La canopée est la surface végétalisée des arbres vue du ciel par le capteur embarqué. Sa numérisation sur l'image aérienne seule permet de localiser une majorité des arbres.

Une première difficulté de ce travail est de distinguer la végétation basse (arbuste, haie, buisson, élément jardiné) de la végétation arborée haute, telle que les arbres et forêt d'arbres. La radiométrie n'est pas un critère déterminant pour cette distinction, mais grâce à la perception visuelle du relief apparent des objets (grâce aux ombres), il est possible de détecter

la végétation haute, et à quelle groupe elle appartient (feuillus/conifère). Dans certains cas, il est même possible de quantifier les hauteurs des arbres grâce à l'importance de l'ombre portée (Figure 39) connaissant notamment la date (position du soleil) et l'heure de prise de vue. Le moyen d'améliorer la perception du relief et notamment la hauteur de la végétation consiste à visualiser les images aérienne en stéréoscopie.

Lorsque les arbres sont mitoyens, il est alors difficile de les distinguer sur l'image aérienne. La canopée ainsi numérisée fournit un nombre insuffisant d'arbres par rapport à la réalité. Pour les arbres isolés et dont le couvert végétal est fortement développé, la méthode de détection par image aérienne est valable avec plus de 90% d'arbres détectés. Les erreurs de saisie sont en revanche plus importantes pour les ensembles de végétation basse et arbustive tel que les haies : La trop forte proximité des haies par rapport aux résidences et leur faible emprise spatiale rend difficile leur localisation avec l'appui de l'imagerie aérienne. Cependant l'extension (verticale et horizontale) du système racinaire est moins importante pour les arbustes et donc ils ont moins d'influence sur les effets de RGA.

3.3.3. La mission terrain

Une première interprétation de l'image aérienne permet donc de créer un support de travail qui est à compléter sur le terrain : sur une impression papier de l'image aérienne interprétée, il est possible de compléter et de corriger d'éventuelles erreurs d'omissions ou de commission avec les observations faites sur le terrain. Par exemple, on peut ne pas avoir numérisé certain arbre de fait de l'absence d'ombre portée ou qu'un groupement d'arbre forme une seule canopée (erreur d'omission) ou encore d'avoir numérisé la canopée d'un arbre qui a été coupé (erreur par commission).

Le travail de terrain permet ainsi de confirmer et de préciser la localisation d'une majorité d'arbres, de réaliser la mesure de leur hauteur, puis dans le même temps d'identifier les différentes essences en présence. On relève également les dégradations sur les bâtiments. Il s'agit donc de préciser l'exactitude de la pré-numérisation et de renseigner la table attributaire des objets « arbre » dans la base de données.

La précision de ce travail dépend grandement de l'accessibilité à l'espace arboré au sein des propriétés privées, ce qui n'est pas toujours possible, auquel cas la photographie aérienne est alors la seule source d'information, méthode détaillée ci-après.

3.3.4. La photo-interprétation complémentaire

Selon l'étude anglaise (Cutler et Richardson, 1989), la hauteur de l'arbre donne une information sur son développement racinaire et donc son influence spatiale sur le sol. Estimer la hauteur de l'arbre est donc primordiale pour évaluer l'influence de la végétation. La meilleure méthode pour acquérir précisément cette information consiste à la mesurer sur le terrain et de relever les dimensions physiques de chaque arbre. Cependant il n'est pas toujours possible d'y parvenir, car nombre de jardins privés sont à l'arrière des propriétés et hors de la portée de la vue depuis la voie publique.

La photo-interprétation reste donc un moyen de compléter ces lacunes. Une tentative de quantification de la hauteur de l'arbre en utilisant l'information « surface canopée », mais cela n'a pas donné de résultat probant. L'utilisation de la surface canopée est délicate pour estimer la hauteur des arbres comme le souligne le croquis ci-dessous (Figure 40) :

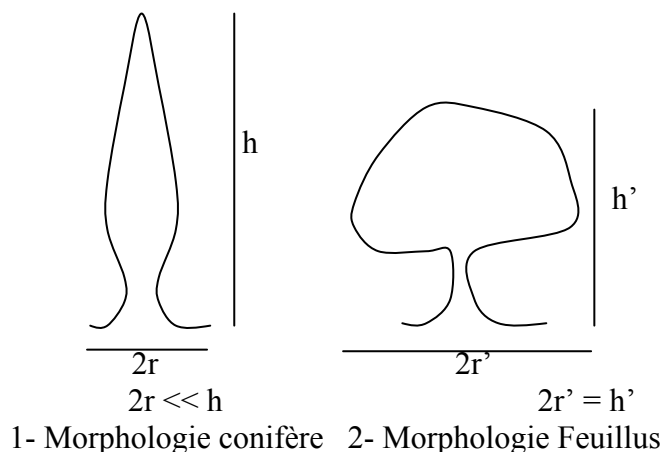
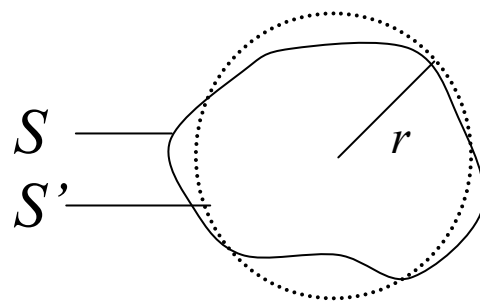


Figure 40: schéma représentant la morphologie de deux types d'arbres.

$2r$ représente la section de l'emprise de la canopée vue du ciel. Si le calcul de la surface de chaque canopée avec le SIG permet de déduire le rayon d'un disque de surface équivalente, il n'est pas évident que cette valeur soit représentative de la hauteur de l'arbre selon les essences.

Une autre tentative avec une reconnaissance indirecte du groupe auquel appartient l'arbre par photo interprétation n'a pas permis de réduire les écarts entre les mesures terrain et celle obtenue par la modélisation de la surface de canopée.



$$S = S' \quad \text{soit} \quad r = (S' / \pi)^{0,5}$$

Figure 41 : extraction du rayon théorique d'un polygone non régulier, assimilé à un disque.

Un polygone de canopée est assimilé à un disque de rayon r afin d'estimer qualitativement l'emprise et la hauteur relative de l'arbre.

Une meilleure méthode consiste à déduire la hauteur de l'arbre par la mesure de l'ombre portée en connaissant l'heure et la géométrie de prise de vue. Dans l'étude ci-après, il a été possible sur une population de 296 arbres de comparer les mesures de la hauteur d'arbre effectuées terrain et celles réalisées sur les ombres portées de l'image aérienne. Sur 141 objets comparés, les mesures diffèrent en moyenne de +0,79m (mesure observation - mesure interprétée) avec un écart type de 2,8mètres ce qui est de l'ordre de grandeur de la précision des mesures des hauteurs d'arbre sur le terrain. Ces résultats sont donc très satisfaisants. Cependant on observe dans 87 cas des écarts très importants du fait d'une lecture de l'ombre faussée par le groupement d'arbres ou par la proximité des bâtiments qui occultent l'ombre. L'utilisation de l'ombre portée pour mesurer la hauteur des arbres est donc efficace pour des arbres isolés et distants vis-à-vis des autres objets de sursols (bâti, arbre). Cette limitation est importante pour l'étude de l'influence de végétation sur le bâti et rend donc par conséquent obligatoire le terrain pour renseigner cette information de hauteur d'arbre.

3.3.5. L'analyse spatiale : création de la carte d'influence des arbres sur le bâti

L'analyse spatiale croise l'information de la hauteur des arbres et de leurs agressivités respectives pour chaque objet arbre. L'influence est alors exprimée sous forme d'un disque permettant de représenter cartographiquement l'influence de la végétation sur les bâtiments. Il est possible d'affiner une telle cartographie en représentant le gradient d'influence de la végétation sous forme d'iso contours 0,5h, 1h, 1,5h et 2h autour de chaque arbre. De même, l'intensité de cette influence peut être représentée là où les influences se recoupent. La cartographie finale souligne l'emplacement des objets les plus agressifs et leur sphère d'influence ce qui permet de représenter ainsi à un instant donnée l'influence de la végétation sur son environnement.

Plusieurs requêtes peuvent être élaborées sous le SIG afin de répondre aux différentes attentes des acteurs intervenant dans la gestion du risque de la sécheresse géotechnique. L'analyse spatiale permet de :

- Mettre en évidence les habitations soumis à influence théorique de la végétation.
- Préciser les espaces où la végétation est la plus dense et donc là où son influence est maximale.
- Préciser les zones les plus sensibles par une accentuation des effets du phénomène de retrait gonflement argiles par la végétation en période de sécheresse extrême.
- Distinguer les espaces privés et publics relevant des différentes responsabilités.
- Anticiper la croissance de la végétation. Si les informations « hauteur arbre » et « essence arbre » sont renseignées, il est possible de représenter les futurs espaces de développement de la végétation en appliquant des hauteurs d'arbre à maturité.

3.3.6. Résultats cartographiques

Application à un quartier de Villiers-sur-Marne.

La zone d'étude se situe dans un quartier d'étude de Villiers-sur-Marne et de Noisy-le-Grand, un travail de photo interprétation sur de l'imagerie aérienne de l'IGN (résolution au sol 50cm) est réalisé pour représenter la proximité de la végétation aux propriétés privées.

La montre le résultat cartographique de la photo-interprétation des surfaces de canopée numérisées sur l'imagerie aérienne. Pour chaque ensemble de canopée, un point représente le centre l'objet, en l'occurrence le tronc de l'arbre. Malgré les compléments d'observation terrain, il n'est pas toujours possible de déterminer le nombre de fût d'arbre au sein d'une large canopée. Aussi, un centroïde est calculé pour représenter un groupement d'arbres. C'est sur ce point qu'on renseigne un ensemble d'information attributaire afin de réaliser la cartographie avec le SIG ArcGis® : essence, hauteur, agressivité de l'essence....

La Figure 43 présente la cartographie de la canopée de la végétation avec l'indice d'agressivité des essences observées. Les essences les plus agressives (chêne et saule) sont reportées en rouge, les essences moyennement agressives sont en orange (peuplier, frêne, aubépine, prunier, érable, orme, tilleul, poirier, cyprès) et en vert les espèces peu agressives (faux acacia, platane, hêtre). On peut ainsi noter la présence d'une chênaie et d'un saule à proximité de l'école Paul Serelle. Dans l'ensemble, les canopées appartiennent à des essences moyennement à fortement agressives.

La Figure 44 présente l'influence relative de la végétation en fonction de sa hauteur. Chaque cercle rouge est associé à un arbre observé sur le terrain avec un rayon égal à la hauteur de l'arbre. On peut observer l'importance de l'influence des arbres du fait de leur hauteur comme pour la forêt de chênes et des peupliers noirs. La comparaison de la cartographie de la canopée (Figure 43) et de l'influence de la végétation par la seule prise en

compte de la hauteur (Figure 44) montre bien l'importance de la mesure de la hauteur de végétation.

La

Figure 45 présente simultanément l'influence de la végétation et de la canopée avec un code couleur selon l'agressivité des plantes rencontrées. Cette influence sous forme « radiale » est déterminée d'une part par la hauteur de l'arbre et varie d'autre part avec son essence. La comparaison avec la carte d'influence des arbres (Figure 44) où seule la hauteur est prise en compte montre l'importance de la connaissance des essences d'arbres. On peut constater que les essences les plus agressives telles que le chêne ou le saule ont une influence très étendue spatialement mais également des essences dite « moyennement agressives » grâce à leur forte hauteur pour des arbres arrivées à maturité. De nombreuses habitations apparaissent alors sous l'aire d'influence de la végétation arborée, facteur aggravant des mouvements de RGA.

L'ensemble de ces cartographies fait apparaître aussi que la surface de canopée – photo-interprétée sur imagerie aérienne- n'est pas un critère d'influence fiable, bien des arbres possèdent en effet une influence bien plus importante que ne laisse croire leur couvert végétale vu à l'aplomb.

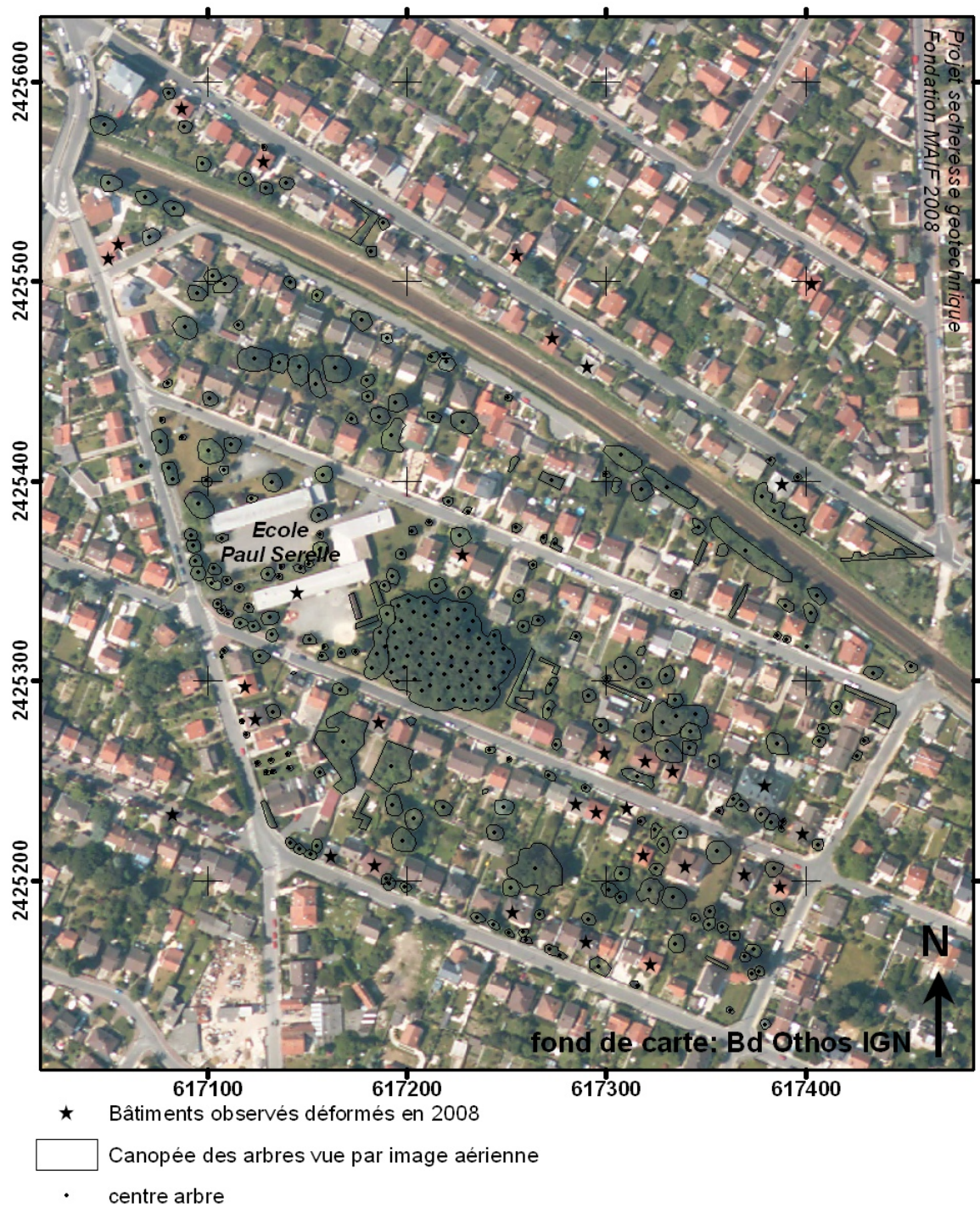


Figure 42 : Numérisation sur la Bd Ortho IGN de la canopée et estimation théorique du centre de chaque arbre.

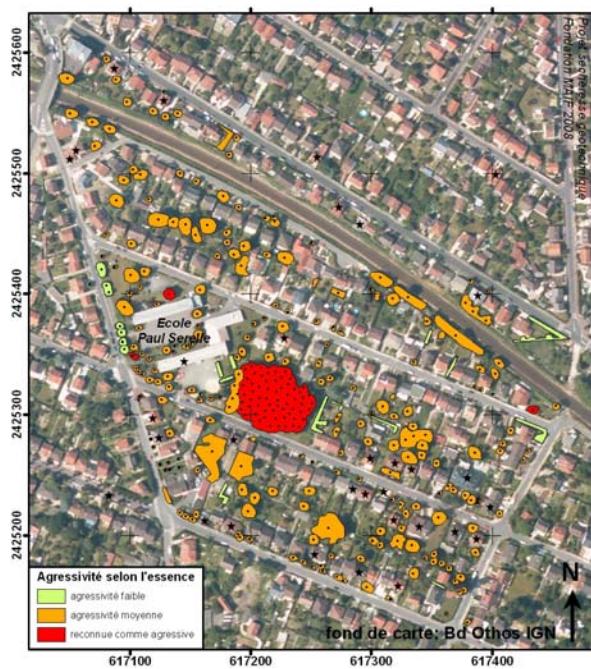


Figure 43 : Cartographie de la canopée de la végétation avec l'indice d'agressivité des essences observées.

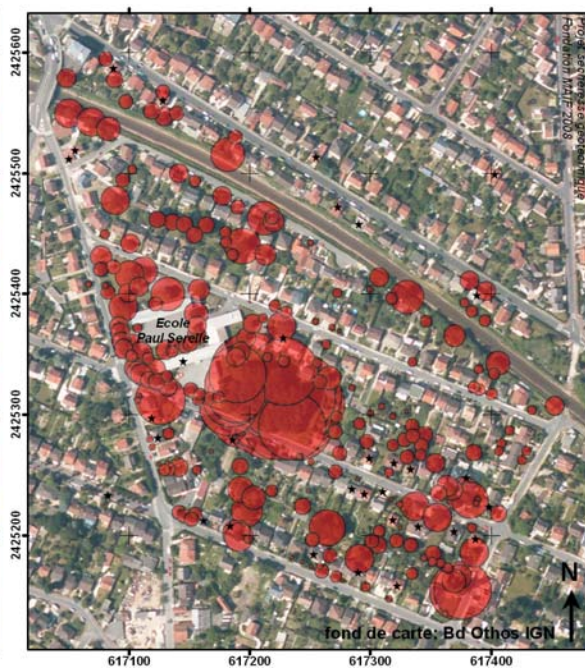


Figure 44 : Cartographie de la distance d'action de la végétation en fonction de la hauteur des arbres.

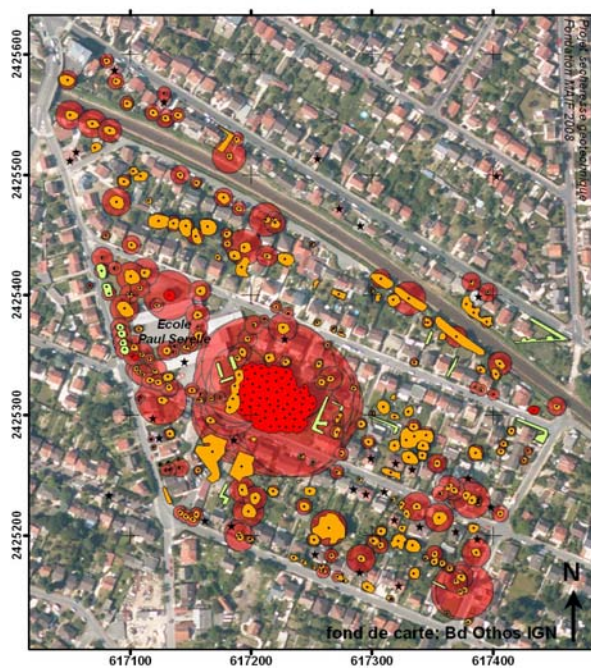
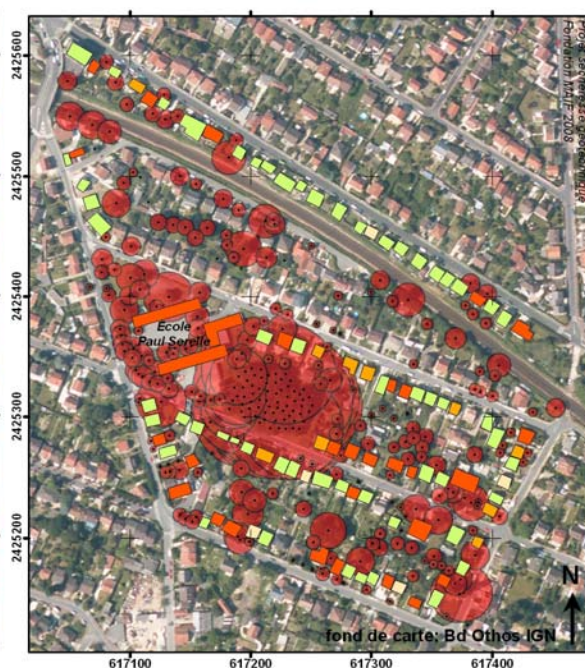


Figure 45 : Cartographie de l'influence de la végétation en fonction de la hauteur et de l'essence des arbres à Noisy-le-Grand.



• centre arbre
Respect de la distance bâtiments/arbres (d/h)

- distance critique (0 à 0,5h)
- distance insuffisante (0,5 à 1h)
- distance suffisante (1 à 1,5h)
- distance correcte (> 1,5h)

influ
● Meters

Figure 46 : Synthèse de l'influence de la végétation sur les bâtiments.

La Figure 46 compare deux travaux issus de mission terrain dont la méthodologie n'est pas identique. D'une part pour chaque maison, une recherche de l'arbre le plus proche a été effectuée afin de renseigner la distance par rapport à la hauteur. Le système colorimétrique appliqué pour chaque bâtiment souligne les distances suffisantes à critique selon le rapport d/H. On constate que ces résultats diffèrent de la mission de terrain où tous les arbres ont été mesurés et localisés. De ce fait, on peut affirmer la seule prise en compte de l'arbre le plus proche du bâtiment considéré pour évaluer l'influence arbre/maison est insuffisante. Il faut donc réaliser un inventaire détaillé de toute la population d'arbre, au risque de faire des erreurs d'omission. Cela est particulièrement observable pour la chênaie dans le domaine public qui a certainement un effet sur le sol et les bâtiments sur un périmètre d'environ une cinquantaine de mètres.

Une majorité des sinistres recensés sont sous influence directe de la végétation. Pour les bâtiments en dehors de leur influence reconnue, on peut observer la présence sur l'imagerie aérienne de la végétation arborée qui n'a pas été prise en compte sur le terrain. En effet tous les arbres n'ont pas pu être approchés, un grand nombre de jardins individuels sont présents à l'arrière des pavillons.

Enfin une dernière cartographie de l'influence de la végétation montre l'intensité des effets cumulés (Figure 47). Sur cette cartographie finale, on a représenté l'intensité de l'influence de la végétation en calculant le recouvrement des différentes sphères d'influence, jusqu'à 4 recouvrements et plus. On révèle ainsi les zones les plus soumises au pompage de la végétation arborée et qui sont donc fortement sensibles au RGA. On a également reporté sur cette figure les observations effectuées sur le terrain relatives aux dégâts des pavillons afin d'évaluer si la végétation est un facteur influençant la répartition spatiale de la sinistralité et des dommages observés. Cette cartographie sera exploitée ultérieurement au chapitre IV pour mettre en évidence les différents facteurs intervenant dans la sinistralité de cette zone.

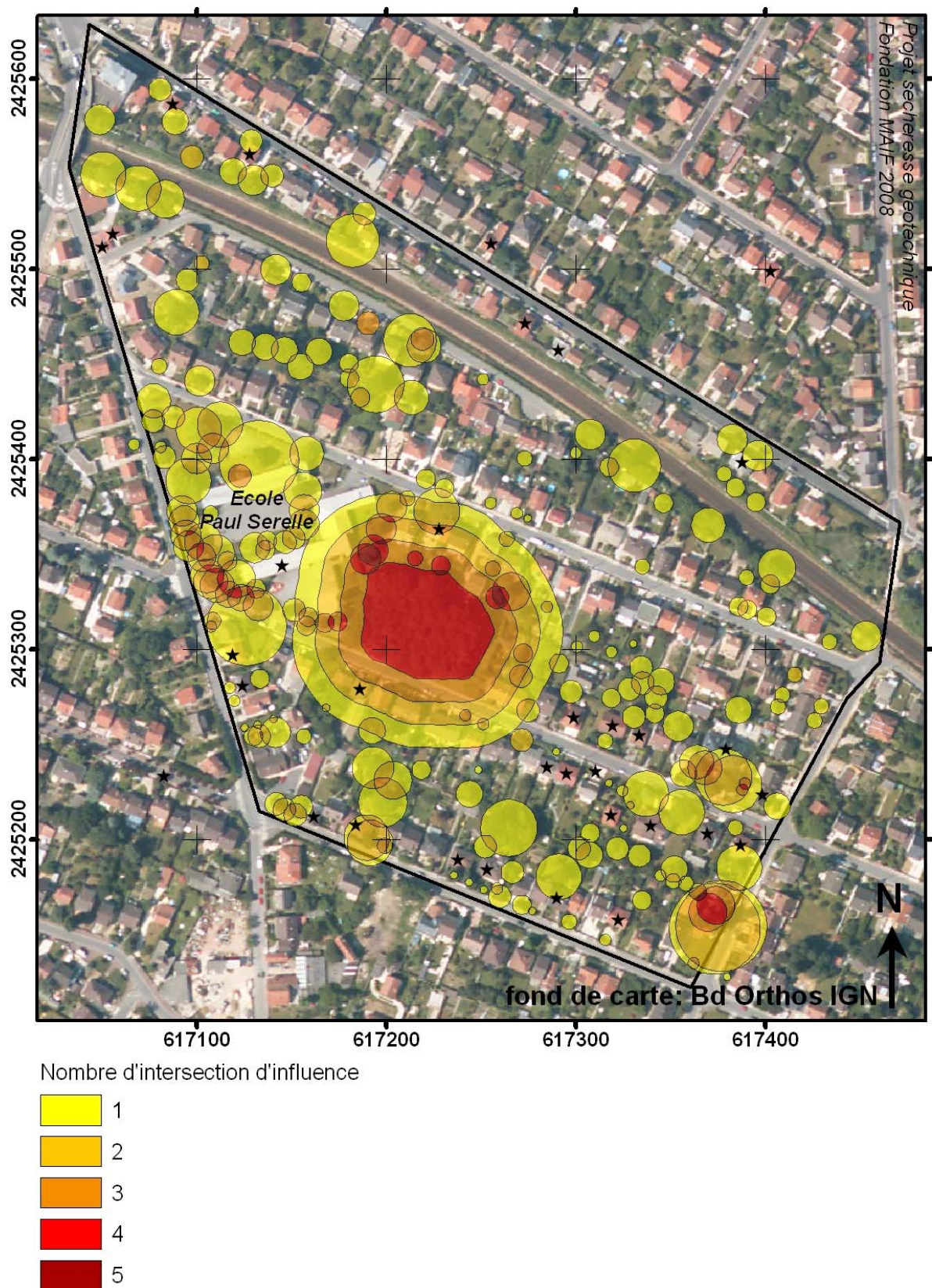


Figure 47 : Cartographie de l'influence théorique de la végétation arborée

II.4 Conclusions

Ce chapitre a précisé les données utiles à la problématique du risque naturel sécheresse géotechnique, les méthodes interférométriques ainsi que les outils informatiques utilisés dans ce travail. Les données disponibles pour l'étude permettent de localiser les différents sites touchés par le phénomène. Le travail de cartographie de l'aléa du BRGM, croisée avec la sinistralité et les zones urbanisées est un excellent document de base de travail pour situer les enjeux. L'imagerie aérienne est indispensable pour les corrections géométriques et le positionnement des différentes données dans un système de projection cartographie identique, mais aussi pour numériser l'emplacement des objets simples tel que les pavillons (toiture) et la végétation arborée (canopée). Les données topographiques servent également à la correction géométrique lors des calculs interférométriques mais également pour représenter le relief, la géomorphologie un facteur aggravant de la sinistralité.

La méthode de travail sur le terrain et comment constituer une base de données adaptée à la problématique du RGA ont été détaillés. On montre que certaines informations telles que les observations du degré de déformation et les photographies sont indispensables pour cette étude qui relève d'une expertise au cas par cas. Les informations relatives à la végétation sont également ciblées pour cette thématique RGA, la démarche sur le terrain a été détaillée pour montrer comment acquérir cette donnée et compléter les lacunes par photo-interprétation. Ces données à l'échelle de la parcelle sont indispensables pour comprendre l'influence des différents facteurs intervenant. Un exemple de cartographie de l'influence de la végétation a été montré.

Cependant tout n'est pas visible depuis la voirie, il est nécessaire de compléter la saisie des données avec la photo-interprétation de l'imagerie aérienne, avec les incertitudes qui y sont liées. Malgré ces efforts, des informations relatives aux caractéristiques des bâtiments pavillonnaires demeurent manquantes : profondeur des fondations, type de maçonnerie, ... Ces informations sont utiles pour mesurer le degré de vulnérabilité des pavillons étudiés. Les techniques interférométriques ont été détaillées au travers d'une synthèse bibliographique quand à leur potentiel et limites déjà connues. La méthode DINSAR paraît peu appropriée pour l'étude des faibles déplacements de la surface du sol lié au RGA du fait de la faible étendue spatiale des déformations et des décorrélation géométrique et temporelle au sein des interférogrammes. Elle est cependant un préalable intéressant pour détecter des phénomènes autres que le RGA à une échelle plus globale, ce qui fait l'objet du chapitre III.

La méthode PS est plus adaptée pour la description et le suivi des déplacements de coins réflecteurs des bâtiments touchés par le RGA ainsi que les réflecteurs du sol. Avec une fréquence d'échantillonnage mensuelle, ces profils de déplacements seront comparés et analysés avec l'ensemble des données thématiques disponibles dans la base de données à l'échelle de la parcelle, travail réalisé au chapitre IV de ce mémoire.

CHIII APPLICATION A L'EST PARISIEN

Sommaire

III.1 LA REGION D'ETUDE.....	134
1.1 Localisation géographique.....	134
1.2 Contexte géomorphologique et géologique.....	135
1.3 Contexte hydrogéologique.....	137
1.4 L'occupation du sol.....	138
1.5 La sinistralité	140
III.2 RESULTATS PAR LA METHODE DINSAR	143
2.1 Les données radar concernant la zone d'étude.....	143
2.2 Les résultats DINSAR.....	145
2.3 Discussions.....	152
III.3 RESULTAT PAR LA METHODE PSI	154
3.1 Les résultats PSI.....	154
3.2 Comparaison avec résultats DINSAR	159
III.4 CONCLUSIONS	162

Il a été précisé dans les chapitre précédents que le déclenchement des processus de retrait-gonflement, de même que leur création ou de leur réactivation, résultent de facteurs environnementaux multiples tels que le contexte climatique et les scénarios climatiques, le cadre géologique et géomorphologique, le contexte hydrologique et hydrogéologique, le type d'occupation du sol par le bâti, ainsi que le type de végétation présente à proximité du bâti. Nous avons montré que l'homme est parfois reconnu comme un facteur aggravant de ces processus de retrait-gonflement en grande partie due à une mauvaise connaissance du phénomène et par manque de prévention. Ce chapitre précise les facteurs aggravant au RGA à l'échelle régionale au 1:200000 et détaille les résultats obtenus par les techniques interférométriques DINSAR et PSI à cette échelle, un préalable obligatoire avant l'étude précise à l'échelle de la parcelle (effectué au chapitre IV).

Une fois les différents documents thématiques décrivant la zone d'étude de l'Est Parisien présentée (géomorphologie, géologie, données de sinistralité), on détaillera les résultats obtenus avec la technique différentielle DINSAR ainsi que ceux obtenus avec la technique PSI sous la forme de carte de vitesse linéaire pour l'étude des mouvements de terrain qu'il soit ou non lié aux effets de la sécheresse. Enfin, en introduction au chapitre IV

de ce mémoire dédié aux résultats des PSI à l'échelle de la parcelle on montrera l'ensemble des phénomènes détectés qui sont impliqués dans des mouvements du sol, et nous soulignerons les apports et les limites des techniques interférométriques à l'échelle régionale.

III.1 La région d'étude

La région « Est parisienne » est fortement soumise au phénomène de Retrait Gonflement d'Argile car c'est une région reconnue pour son sol argileux sensible et pour son fort taux d'urbanisation de type pavillonnaire individuel. Les départements de Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne et une petite portion de l'ouest du département de la Seine-et-Marne font l'objet de notre étude à l'échelle régionale.

Après avoir localisé les sites d'étude dans l'espace régionale, une analyse géomorphologique et géologique à l'échelle régionale est détaillée. Enfin une analyse de la sinistralité est effectuée pour caractériser l'ampleur du phénomène spatialement et temporellement. L'ensemble de ces informations est indispensable pour mieux connaître le contexte géographique et géologique de la zone d'étude dans son ensemble avant d'exploiter correctement les résultats interférométriques à cette échelle.

1.1 Localisation géographique

Trois sites présentés à la Figure 48 ont été sélectionnés sur des zones urbaines concentrant de nombreux dommages sur les bâtiments issus du RGA entre les départements du Val-de-Marne (94) et de Seine-Saint-Denis (93) s'étendant sur une dizaine de communes de l'Est Parisien.

La Liste des communes prises en compte dans l'étude est la suivante :

NOISY-LE-GRAND, ROSNY-SOUS-BOIS, BRY-SUR-MARNE, CHAMPIGNY-SUR-MARNE, FONTENAY-SOUS-BOIS, JOINVILLE-LE-PONT, NOGENT-SUR-MARNE, LE PERREUX-SUR-MARNE, LE PLESSIS-TREVISE, VILLIERS-SUR-MARNE, GAGNY, GOURNAY-SUR-MARNE, NEUILLY-SUR-MARNE.

Les communes couvertes par les trois sites d'étude sont renseignées dans la base de données regroupant des différentes données thématiques utiles à la problématique du RGA : l'occupation du sol, les données géologiques, géomorphologiques et la sinistralité recensée par le BRGM. Pour chaque zone, on présentera les documents thématiques ainsi que les résultats DINSAR et PSI.

La première zone retenue est centrée sur les communes de Nogent-sur-Marne et du Le-Perreux-sur-Marne. La seconde zone est centrée sur la commune de Villiers-sur-Marne et la

troisième sur la commune de Gournay-sur-Marne. L'emprise des zones a été choisie de telle sorte que le rendu cartographique des figures soit à une échelle au 1 : 50 000ème.

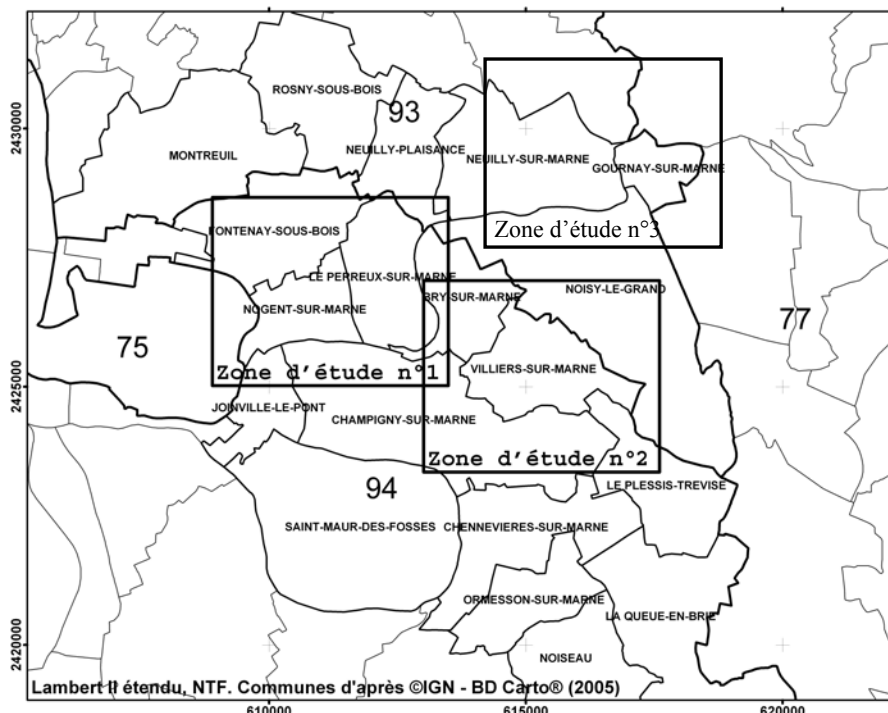


Figure 48 : Localisation des zones d'intérêt ; limite départementale en gras, limite des communes en trait fin.

1.2 Contexte géomorphologique et géologique

Le relief de la zone d'intérêt est constitué de trois principales unités de relief : la plaine alluviale, le plateau et ses versants (Figure 49B).

Les flancs des plateaux présentent des pentes prononcées recoupant les formations géologiques subhorizontales. En revanche, là où l'érosion fait apparaître des talwegs, les pentes sont plus douces et les formations sous jacentes aux limons de plateau affleurent davantage.

Au pied des plateaux se place la plaine alluviale qui est formée par le jeu d'érosion et de sédimentation liée à l'avulsion de la Marne (divagation de la rivière dans la plaine alluviale). Au quaternaire, les terrains tertiaires sont érodés et des matériaux détritiques fins se déposent dans la plaine alluviale. Leur altitude n'excède pas 30-50 mètres (altitude IGN69, nivellement au marégraphe de Marseille).

Au sommet des plateaux individualisés par cette érosion, affleurent des terrains fertiles constitués de limon de plateaux et de loess (limons sablo-argileux). Sur leurs flancs apparaissent une succession de formations géologiques qui appartiennent à la série

sédimentaire du bassin de Paris. Cette succession lithologique empilée tabulairement va de la formation la plus ancienne de l'Argile plastique d'âge Éocène (Yprésien) aux formations les plus récentes, les alluvions et colluvions quaternaires (cf carte géologique Figure 49A).

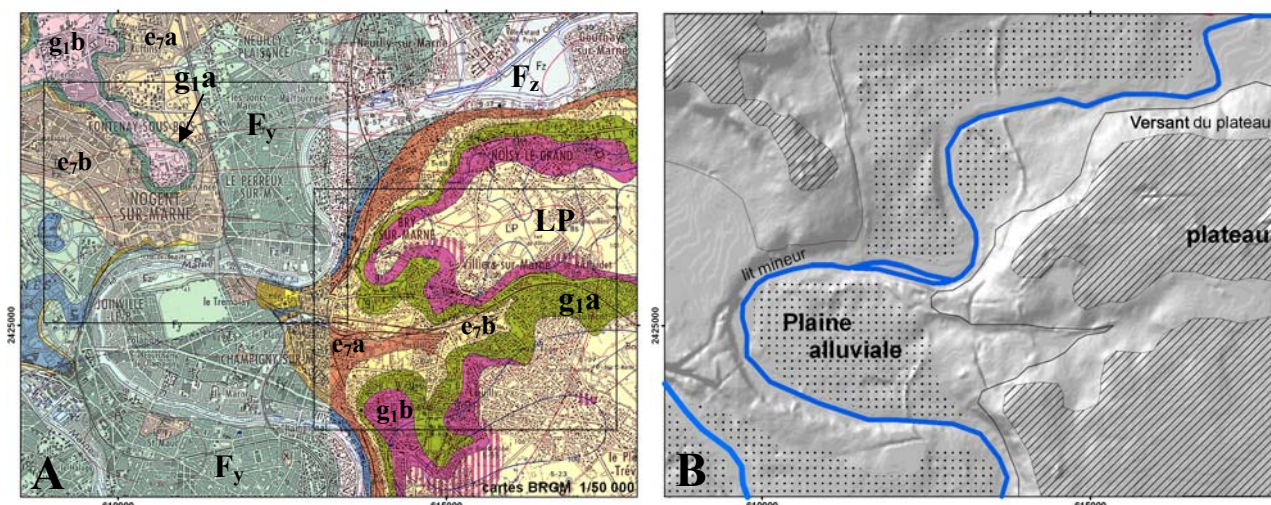


Figure 49 : (A) extrait légendé de la cartographie géologique du BRGM et (B) descriptif géomorphologique simplifié sur la zone d'intérêt.

La série des affleurements stratigraphiques de la zone d'intérêt donnée ci-dessous de manière synthétique est issue du rapport départemental BRGM du Val-de-Marne (Donsimoni et al., 2003) : [LP : Limons des plateaux ; F_y, F_z : Alluvions anciennes et alluvions plus récentes ; g_{1a} : L'argile verte de Romainville et les glaises à Cyrènes (Oligocène, Rupélien, Sannoisien inférieur) ; g_{1b} : Calcaire de Brie (Oligocène, Rupélien, Sannoisien) ; e_{7a} : Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies indifférenciées (Eocène supérieur, Priabonien, Ludien inf. à Ludien moy.), Marnes ludiennes (faciès de transition) et Masses&Marnes du gypse (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien moyen) ; e_{7b} : Marnes Supragypseuses (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien supérieur), les Marnes bleues d'Argenteuil et les Marnes blanches de Pantin]

La liste des formations géologiques affleurantes est non exhaustive, pour plus de détails, elles sont précisées dans le rapport départemental réalisé par le BRGM (Donsimoni et al., 2003) et rappelé au chapitre II.3. Parmi ces formations citées plus haut, le calcaire de Brie (g_{1b}) par sa nature calcaire est peu susceptible au phénomène RGA bien qu'il puisse contenir à la base quelques niveaux marno-calcaires, voire argileux et de présenter localement des poches de décalcification remplies de matériaux argileux. De même, les limons des plateaux (LP) qui sont constitués de matériaux limoneux ; il n'est donc pas permis de les considérer comme une formation réellement argileuse. Même si localement la distinction entre limons des plateaux et les argiles à meulière sous jacentes est délicate. Les autres formations géologiques, par leur nature marneuse ou argileuse, sont potentiellement sujettes au retrait gonflement tel que les argiles vertes, les Marnes bleues d'Argenteuil et les Marnes blanches de Pantin.

1.3 Contexte hydrogéologique

Le retrait d'une nappe aquifère en période de sécheresse peut aussi exposer les sols argileux à la dessiccation. Trois nappes aquifères sont recensées dans la zone d'étude (source : BRGM, Donsimoni et *al.*, 2003). Afin de pouvoir y faire référence en discussion lors de l'analyse, on les énumère ci-dessous par ordre de plus grande profondeur jusqu'à la nappe de subsurface.

La nappe de l'Éocène supérieur

L'eau de cette nappe circule dans les formations des Masses et Marnes du gypse ou du Calcaire de Champigny (e_{7a}). Peu importante, l'abaissement du niveau de cette nappe de coteau peut cependant entraîner une dessiccation de la Formation de l'Argile verte de Romainville (g_{1a}) qui est sus-jacente.

La nappe de l'Oligocène

L'essentiel de la nappe est contenue dans les Sables de Fontainebleau (Cojean, 1975), et dans les Marnes à Huîtres et le Calcaire de Brie (g_{2b}) sous-jacent. C'est une nappe libre, dont l'alimentation provient de l'infiltration des eaux météoriques à travers les limons des plateaux (LP) et la Formation de l'Argile à meulière de Brie. Le véritable mur de la nappe est formé par l'Argile verte de Romainville (g_{1a}), formation située sous les précédentes.

La nappe phréatique des plateaux

La nappe est contenue dans les limons des plateaux, son réservoir. L'Argile à meulière de Brie (g_{1b}) forme le mur de l'aquifère. Le volume d'eau contenu dans les limons est faible. La piézométrie est sensible à la pluviométrie dont elle dépend directement : pendant les périodes sèches, les piézomètres n'indiquent pas un niveau piézométrique commun. Pendant les périodes pluvieuses, la recharge de la nappe est maximum jusqu'à la surface du sol dans les zones déprimées et mal drainées. L'Argile à meulière de Brie est imperméable et souvent saturée.

La présence des nappes posent un véritable problème pour comprendre le véritable mécanisme des mouvements de la surface du sol. En effet le RGA est un phénomène exclusivement lié à la dessiccation des premiers mètres de la surface du sol et non un tassement du sol par retrait d'eau. Même si il y a un affaiblissement de la nappe sous jacente, la dessiccation des premiers mètres du sol sont deux phénomènes liés à la sécheresse, il faut pouvoir distinguer les cas où les sinistres sont réellement causés par la dessiccation de sols argileux et non le rabattement d'une nappe d'aquifère. L'interférométrie, de par sa vue synoptique et de par son suivi dans le temps permet de répondre à cette question.

1.4 L'occupation du sol

L'occupation du sol est une information indispensable qui permet de situer les enjeux. Il s'agit de cartographier les sites urbanisés et d'identifier les types de bâtiments vulnérables. Cette donnée se révèle utile pour interpréter les répartitions spatiales de sinistres vis-à-vis de l'aléa établi par le BRGM (CF figure). Dans la problématique RGA nous nous focalisons sur les bâtiments légers de type pavillonnaire, souvent faiblement fondés, caractéristiques de la région péri-urbaine parisienne.

Nous nous intéressons tout particulièrement à l'emprise du tissu urbain secondaire mais aussi les sols nus ou non végétalisés soumis à l'évapotranspiration. Selon le Schéma directeur de la région Île-de-France (SDRIF), la couronne péri-urbaine parisienne a accueilli 70% de la hausse de population et 91% de la hausse de l'emploi tandis que la couronne rurale accueillait 30% de la hausse démographique et 9% de la hausse de l'emploi (Dassonville, 2003). Les villes nouvelles ont joué un rôle structurant dans la couronne péri-urbaine : elles ont accueilli 45% de l'augmentation de la population et 50% de celle de l'emploi en ne mobilisant que 28% de l'urbanisation de la couronne péri-urbaine.

L'analyse des résultats du Mode d'occupation du Sol (MOS) de 1999 par l'IAURIF montre que à l'échelle de la région Île-de-France, une consommation des espaces urbanisables de 1750ha par an (1923ha hors poste « urbains ouverts », maintenus dans le décompte des zones naturelles). Cela montre le fort dynamisme de construction et l'attrait de la région pour le développement, la concentration et l'extension des zones urbaines pavillonnaires.

La classification du sol « MOS 2003 » de l'Institut d'Aménagement Urbain Région d'Île-de-France (IAURIF) est constitué de 83 postes, qui précisent la répartition du tissu urbain et des sols non imperméabilisés avec ou non présence de végétation arborée. Cette classification est issue de la photo-interprétation d'imageries aériennes, elle décrit l'occupation du sol, avec entre autre des informations sur le caractère individuel ou collectif des bâtiments. Disponible pour l'est parisien, cette classification permet de calculer la surface occupée par les principaux types de bâtis édifiés pour les deux zones d'études retenues. La répartition des classes se fait de la façon suivante (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), par ordre d'importance décroissante :

CODE	Libellé	Surf. (km2)	%
9	Habitat individuel	13,9	42,7
10	Habitat collectif	4,3	13,2
6	Parcs et jardins	3,1	9,5
20	Transports	2,6	8,0
12	Activités secondaires	1,8	5,5
1	Bois	1,4	4,4
7	Sport (espaces ouverts)	0,9	2,9
15	Equipement d'enseignement	0,8	2,4

8	Terrain vacant	0,7	2,1
4	Eau	0,7	2,1
18	locaux, administration	0,5	1,5
13	Activités tertiaires	0,4	1,4
5	Autre rural	0,4	1,4
17	Cimetière	0,2	0,7
21	Chantiers et divers	0,2	0,5
14	Sport (construit)	0,1	0,4
2	Grandes cultures	0,1	0,4
16	Equipement de santé	0,1	0,3
11	Habitat autre	0,1	0,2
19	Grands équipements	0,0	0,1
3	Autres cultures	0,0	0,1
TOTAL		32,6	100,0

Tableau 10 : Statistique d'occupation du sol sur les zones d'études à 21 postes classés par ordre d'importance de la superficie (Source : POS IAURIF).

Sur une surface de 32,6 km² représentative en banlieue Est de Paris, les bâtiments résidentiels représentent près de 55% de la surface urbanisée, et c'est l'habitat individuel qui arrive en première position avec près de 43% d'occupation du sol urbanisé, suivi de très loin par l'habitat collectif (13%). On constate également l'importance des espaces arborés publics qui représente 16% (parcs, forêts et plans d'eau). Ensuite viennent les transports et les activités secondaires avec 8,0% et 5,5%.

Ces chiffres traduisent d'une part le caractère majoritairement résidentiel du mode d'habitat dans les zones banlieusardes choisies ici et d'autre part le caractère individuel des bâtiments : en effet, ce tissu urbain est caractéristique d'une zone péri-urbaine secondaire, avec de nombreux pavillons accompagnés de jardin privé.

Cependant une des limites de cette classification pour la thématique du retrait gonflement tiens dans l'absence de la cartographie des surfaces non imperméabilisées et réellement exposées à la dessiccation, en particulier à proximité des pavillons souvent accompagnés de jardin privatifs. A l'échelle de la parcelle, cette classification ne permet donc pas de détailler facilement les facteurs intervenant dans la problématique RGA.

1.5 La sinistralité

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

Les déclarations des sinistres sur les biens privés auprès des assureurs, des collectivités et les constats d'experts permettent de dresser un premier bilan du phénomène. Ces données ont été rendues publiques par le BRGM pour le département de la Seine et de la Marne. Néanmoins, notons que les déclarations de sinistres ne sont pas objectives car elles peuvent d'une part intervenir plusieurs mois après la date effective du début du sinistre. Cela est en partie lié à une observation tardive ou d'une déclaration réalisée approximativement. Par ailleurs tout les propriétaires-victimes n'ont pas forcément fait de déclarations auprès de leur assureur. Par ailleurs, on notera qu'une à deux années peuvent s'écouler avant qu'une commune soit déclarée catastrophe naturelle par l'Etat.

On observe généralement que les dommages se répercutent à long terme après un épisode de sécheresse (Figure 50). L'étude des dates de sinistralité montre que le phénomène de 1989 précède des sinistres déclarés en 1991 et 1992 en saison humide. Le nombre de sinistres en 1989 est à peu près équivalent au nombre de sinistres survenus en 1991 et 1992. Il faut attendre l'année 2003 pour observer à nouveau une sinistralité comparable en nombre de déclarations à celle de 1989.

Il semblerait que le RGA provoque des sinistres sur une période de plusieurs années, longtemps après l'épisode de sécheresse : la sécheresse, qui est un événement ponctuel à l'échelle d'une saison se traduit par un risque RGA (mesurable par une intensité) sur plusieurs années en fonction de la susceptibilité du sol au retrait. La sécheresse provoque donc un retrait, qui est le moteur de la déformation. Cette phase initiale du RGA est précédé du gonflement qui intervient de manière inégale tant dans le temps que spatialement. D'autre part, la sécheresse de 1996/1997 n'a pas déclenché autant de sinistre lié au RGA qu'en 1989 dans le département de la Seine et Marne (77), si on s'en tient au nombre de sinistres déclarés.

Le satellite radar ERS lancé en juillet 1991 ne permet pas de travailler avec des données d'archives qu'à partir de l'année 1992. Seuls la sécheresse de 1996/97 et l'épisode caniculaire de 2003 seront donc étudiés plus particulièrement ici sur les deux zones présentées plus particulièrement.

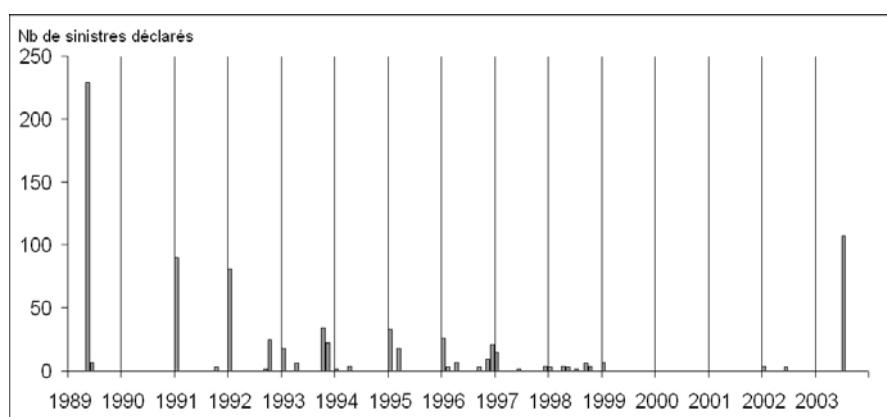


Figure 50 : Dates des déclarations de sinistre de bâtiments pour le département de Seine et Marne (77) entre 1989 et 2004. (Source : Rapport public départemental du BRGM)

Quelle est la répartition spatiale des sinistres au vu de la géologie et de la géomorphologie ? Pour ce faire, les positions géographiques des sinistres géolocalisés par adresse de voirie (Donsimoni *et al.*, 2003) ont été superposées aux cartes géologiques du BRGM (Figure 51A) et superposées à un modèle numérique de terrain en teinte hypsométrique (Figure 51B). La teinte hypsométrique est en vert pour les faibles altitudes (+20m), vers des altitudes plus élevées en teinte rouge (+70m). Un estompage (ombrage artificiel) a été ajouté à ce MNT coloré pour souligner les variations topographiques et notamment les ruptures de pente (Figure 51B).

La superposition des sinistres avec des documents thématiques (géologie et géomorphologie) montre une organisation spatiale de la sinistralité en fonction de la géologie et tout particulièrement en fonction de la configuration topographique. Cependant, la lecture de la répartition de la sinistralité n'est pas directe et doit être soumise à des précautions d'interprétation : d'une part la sinistralité dépend de la présence ou non de l'habitat, et d'autre part, elle est fonction de la vulnérabilité du bâti, à savoir la qualité des constructions. L'absence de sinistralité n'est pas une preuve que le terrain ne puisse pas être affecté par le phénomène de RGA. De même une forte concentration de bâtiments endommagés peut être liée à la présence d'un lotissement où les habitats présentent les mêmes dommages à cause d'un schéma architectural identique.

On peut constater que dans le Sud-est de la zone d'intérêt (Figure 51A), la formation géologique g_{1a} (argiles vertes) « localise » le plus de sinistres. En observant la topographie, on constate que ces sinistres se positionnent préférentiellement sur cette formation géologique, que le terrain soit en pente ou non. En revanche dans le nord ouest, à Nogent-sur-Marne, c'est la formation marneuse e_{7a} (Calcaire de Champigny et Marnes indifférenciée) et e_{7b} (Marnes Supragypseuses) qui concentre la sinistralité. L'observation sur la carte en teinte hypsométrique (Figure 51B) montre une organisation de la sinistralité directement en relation avec la topographie. En effet, les pentes topographiques apparaissent comme un facteur important des désordres recensés liés au RGA.

De même, on observe aussi cette relation entre pente et sinistralité à l'ouest de Bry-Sur-Marne entre la formation e_{7b} et g_{1a} (Argiles Verte de Romainville). Une déstabilisation

du versant est l'hypothèse vraisemblable. Il pourrait ainsi s'agir d'un fluage lent de terrain meuble ou plastique sur les versants entre vallées et plateaux, pouvant être liée à des glissements de terrain.

La présence de sinistres au sommet des plateaux est plus délicate à expliquer par le phénomène RGA, mais peut-être potentiellement lié d'une part à la dissolution de gypse des formations des marnes et caillasses du Lutétien (ces dissolutions peuvent entraîner l'apparition de fontis et provoquer des dommages en surface), d'autre part la présence à faible profondeur d'argiles gonflantes situées sous les Limons de Plateaux (LP) sont hautement susceptible d'intervenir dans les mouvements de terrain affectant la surface.

Un fait surprenant est la présence de sinistres en zone de plaine alluviale sur les alluvions/colluvion F_y et F_z , notamment au Perreux-Sur-Marne. Ces zones sont pourtant dépourvues de dénivelé topographique, le relief est subhorizontal. Cela suggère les effets possibles de rabattement de nappes en saison sèche (phénomène naturel), ou le rôle de prélèvements d'eau par pompage qui viennent accentuer le retrait de la nappe (phénomène anthropique). La présence d'argiles gonflantes colluvionnées et fluées dans la plaine alluviale peut aussi expliquer localement les mouvements de terrain qui sont observables. Enfin il ne faut pas éliminer dans ce cas, les défauts liés à la (mauvaise) qualité des constructions, facteur indépendant du phénomène RGA.

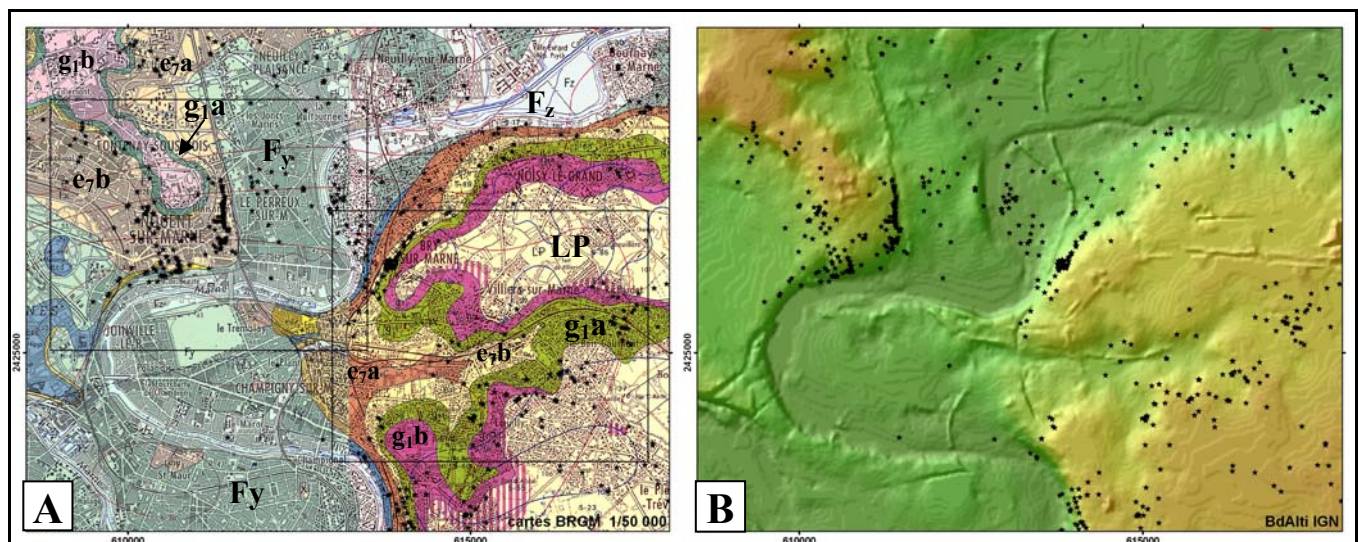


Figure 51 : Répartition de la sinistralité selon le contexte géomorphologique et géologique.

A- Répartition spatiale de la sinistralité (points noirs) recensée par le BRGM vis-à-vis des formations lithologiques.

B- Répartition spatiale de la sinistralité (points noirs) vis-à-vis de la topographie en teinte hypsométrique et estompage (données source : BdAlti IGN). Remarquer sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** B, la bonne corrélation entre la pente topographique et la sinistralité,

Cette étude simple montre l'importance de la nature des formations géologiques, de la présence ou non de pente et d'un effet possible de rabattement des nappes en zone alluviale. Ces deux zones encadrées (Figure 51A) de la région d'intérêt seront analysées par interférométrie.

III.2 Résultats par la méthode DINSAR

2.1 Les données radar concernant la zone d'étude

Le projet de recherche CAT1 que nous avons déposé en 2006 à l'ESA (ESA - projet cat1-AO numéro 4362) a permis d'obtenir un quota de 140 images radar et d'effectuer une commande complémentaire d'images radar plus récentes tout modes confondus (orbites descendante et ascendante). La banque de données a été ainsi actualisée et nos archives couvrent une période de 1993 à 2006. Les données ENVISAT ainsi acquises permettent de prolonger l'étude au-delà de la canicule de 2003.

Il a été expliqué en I.2.2 que trois critères de sélection interviennent dans le choix des images radar pour calculer un interférogramme de qualité : les périodes de sécheresse, la ligne de base et la valeur du doppler.

Les périodes de sécheresse est le critère le plus important de sélection des couples interférométrique. Il motive le choix des couples et justifie de recalculer des interférogrammes même si les autres paramètres sont en limite de qualité. En effet, chaque interférogramme calculé implique deux images. Le fait que l'une ou les deux images appartiennent à ces périodes sensible de sécheresse permet d'obtenir un interférogramme soulignant les phénomènes recherchés. En dehors de ces périodes de sécheresse, il sera intéressant de suivre sur le long terme les effets consécutifs au tassement, jusqu'à deux ans après l'épisode climatique déclencheur. Enfin, il sera également intéressant d'observer le retour à l'équilibre des sols sur les interférogrammes.

Enfin, la valeur du doppler centroïde, a été pris en compte dans la sélection des images radar. Sa connaissance est donc importante pour l'application interférométrique envisagée. En effet, les échos qui portent l'information de phase et d'amplitude sont enregistrés par le capteur radar en utilisant un effet doppler, qui est utilisé en traitement du signal pour reconstruire les images. Or, suite à une défaillance du satellite ERS-2 en janvier 2000 (Rosich *et al.*, 2000) (cf CHI 1.2), les valeurs du doppler centroïde ont des variations importantes, ce qui réduit le nombre d'interférogrammes calculé, ainsi que leur qualité.

Donc, même après une sélection par la ligne de base et les dates, tous les interférogrammes ne sont pas exploitables. Avec les données des missions ERS-1 et ERS-2 en mode ascendant et descendant et en appliquant les critères de sélection exposés plus haut, plus de 300 interférogrammes ont été calculés, mais principalement sur la période 1995 à 2000. Ces interférogrammes présentent des qualités variables, seuls certains étant réellement exploitables pour l'application envisagée.

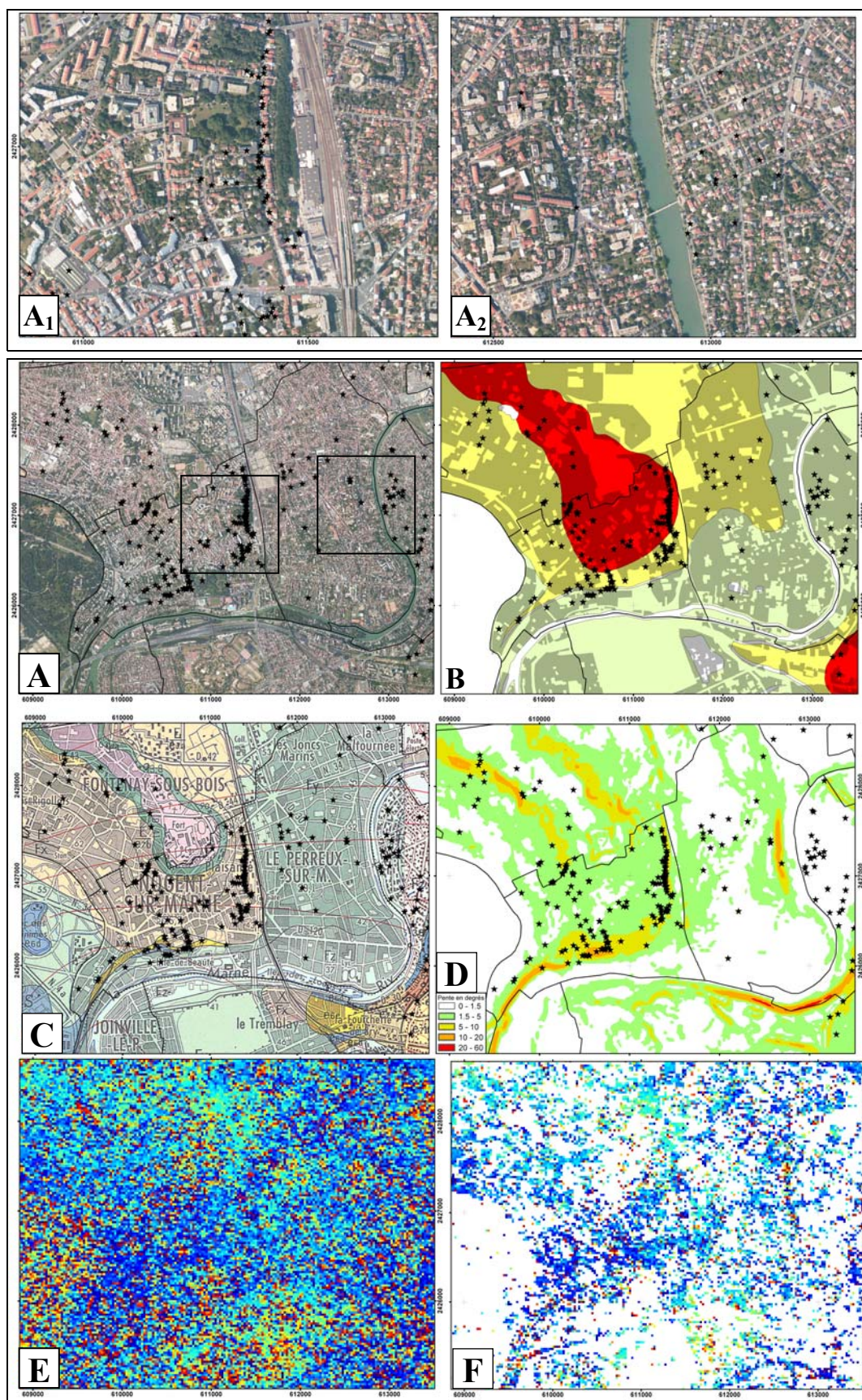


Planche 1: Zone de Nogent sur Marne – A, A1, A2 Ortho photographie, B - aléa BRGM avec le bâti (MOS IAURIF) C- Carte géologique, D - Carte de pente, E, F - interférogramme 7334_20360 avec et sans masque de cohérence de 0.6

2.2 Les résultats DINSAR

Les planches ci-dessous rassemblent un ensemble d'informations thématiques ainsi que des extraits d'interférogrammes pour analyser les effets du RGA sur les deux sites d'étude définis en III.1.1.

Planche n°1

La Planche 1 présente une série d'illustration sur la première zone d'étude, sous forme de vignettes focalisées sur les villes de Nogent-sur-Marne et le Perreux-sur-Marne. Deux agrandissements A_1 et A_2 sont extraits de l'orthophotographie (IGN) de la Planche 1, figure A.

Les maisons qui ont été déclarées sinistrées par le RGA entre 1989 et 2002 (étoiles noires) sont localisées et alignées perpendiculairement à une forte pente, sur le versant de la rivière de la Marne (Planche 1, A_1). Elles sont situées sur des roches argileuses gonflantes d'âge oligocène (g_{1a}) à éocène supérieure (e_{7b}), (Planche 1, C). Ces maisons individuelles sont encadrées par deux espaces arborés (Planche 1, A et A_1). La combinaison des trois facteurs que sont la végétation arborée, les fortes pentes, et un sol gonflant argileux, est certainement à l'origine de cette forte sinistralité.

Par ailleurs, cette zone appartient bien à un aléa fort d'après la cartographie du BRGM (Planche 1, B). L'interférogramme brut (Planche 1, E) et l'interférogramme masqué avec un seuil de cohérence de 0,6 (Planche 1, F) soulignent et révèlent une forte cohérence sur les maisons et bâtiments, contrastant avec la faible cohérence sur les zones boisées. La présence de petits groupes de pixels contigus de couleurs identiques sur les interférogrammes souligne la disparité des amplitudes de déplacements des bâtiments. Ces signaux sont cependant très peu discernables à cause du bruit lié à des zones incohérentes dans l'interférogramme.

La seconde illustration (Planche 1, A_2) est située sur la ville de Le Perreux-sur-Marne, dans la plaine alluviale de la Marne où se sont déposées les alluvions holocènes F_y et les alluvions récentes F_z (Planche 1, C). Les alluvions de la Seine ont peu de propriétés argileuses (voir partie géomécanique Annexe 12), car constituées de sables et graviers, correspondant à des dépôts de plaine d'inondation. L'agrandissement de l'orthophotographie (Planche 1, A_2) montre l'importance de l'habitat pavillonnaire et la présence d'arbres isolés. La sinistralité est caractérisée par des aléas faibles à moyen par le BRGM (Planche 1, D). L'information délivrée par les interférogrammes DINSAR (Planche 1, E et F) révèle une faible cohérence liée à l'occupation pavillonnaire jardinée. La sinistralité est très dispersée et difficile à interpréter.

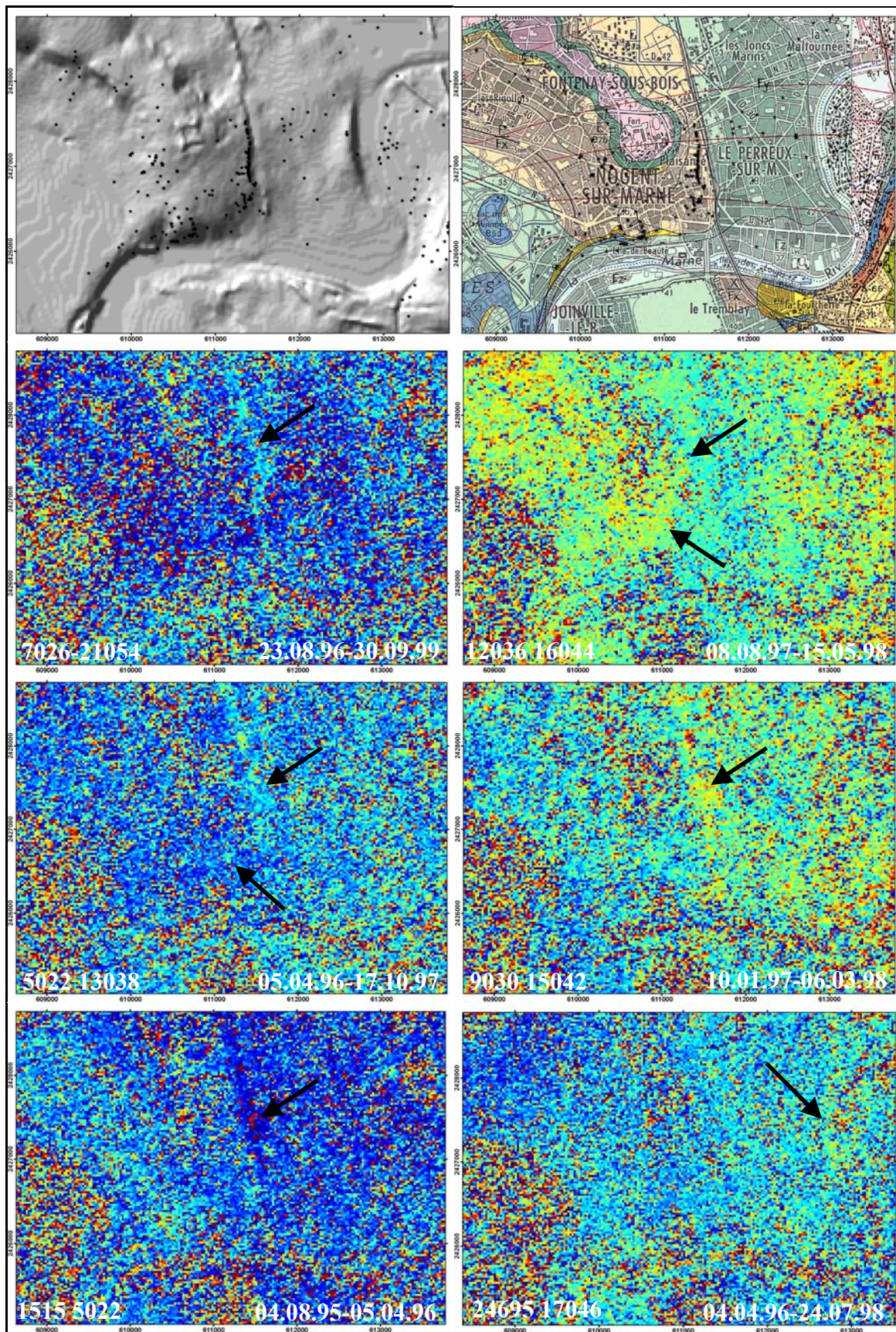


Planche 2 : Extraits d'interférogrammes sur la zone d'étude de Nogent-sur-Marne et (A) estompage de MNT révélant la topographie et (B) extrait de la carte géologique et de la sinistralité recensée par le BRGM.

Planche n°2

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

Ces six interférogrammes révèlent des déformations soulignées par des flèches noires. Les numéros d'orbite et les dates d'acquisition des couples sont indiquées respectivement en bas à gauche et en bas à droite des vignettes. Les cinq premiers extraits d'interférogrammes révèlent un déphasage entre la formation F_y et la formation e_7b . On peut observer la proximité de ce déphasage avec les sinistres localisés juste en amont, ainsi qu'avec une rupture de pente qui caractérise le changement lithologique entre les alluvions F_y et les marnes de l'Eocène supérieur e_7b . Ce déphasage est croissant (rapprochement du sol vers le capteur) entre les années 1996 et 1999 pour les quatre premières vignettes, et seul celui de l'interférogramme 1515 5022 entre le 04.08.95 et le 05.04.96 présente un déphasage négatif (éloignement du sol dans la direction de visée du capteur radar).

On montre ainsi un retrait très faible pendant la fin de l'année 1995 et avril 1996 de l'ordre de 0,3 cm et un gonflement des sols à peine perceptible de 0,4 cm dans le sens de visée du satellite. Ces valeurs sont bien en dessous des 15cm de déformations maximum cumulées observées au pied des édifices sinistrés. La dernière vignette représentée par le couple 24695/17046 pour la période entre du 04.04.1996 au 24.07.1998, montre un déphasage positif interprété comme un gonflement sur la rive Est de Le Perreux-sur-Marne. Il coïncide également avec des sinistres sur une zone alluvionnaire. On note des signaux de déphasage positif également sur les berges de la Marne.

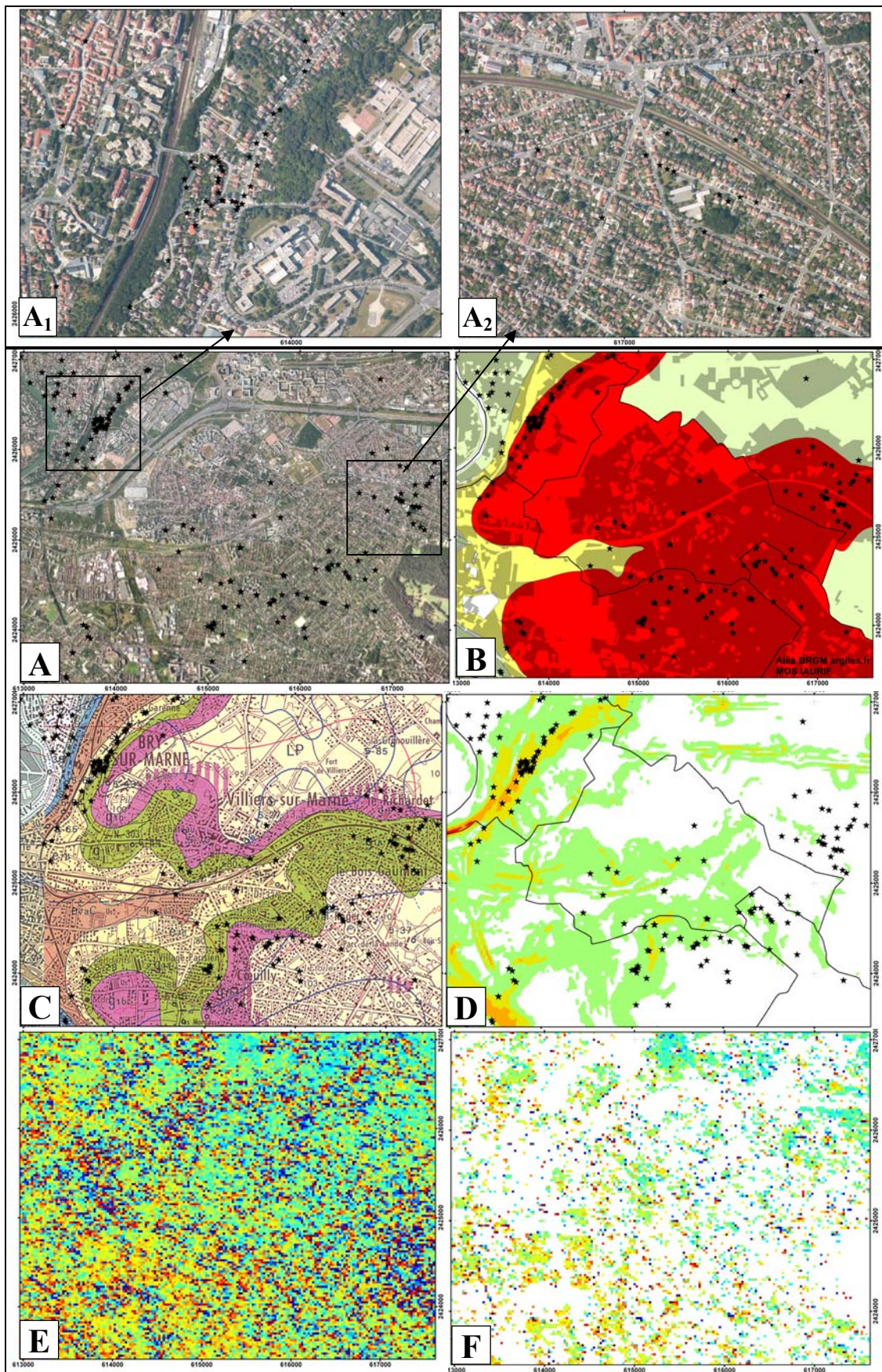


Planche 3: Zone de Bry-sur-Marne - A, A1, A2 Orthophotographie, B – aléa BRGM avec le bâti (MOS IAURIF), C - Carte géologique, D - Carte de pente, E et F - interférogramme 9338_21863 avec et sans masque de cohérence de 0.6

Planche n°3

La Planche 3 présente une série de vignettes sur les villes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Coeuilly. Deux zones issues de l'orthophotographie Planche 3, A) sont agrandies en A₁ et A₂.

La première zone localisée à Bry-sur-Marne, présente des bâtiments sinistrés alignés parallèlement aux courbes de niveau sur les coteaux du plateau (Planche 3, C), à proximité d'espaces arborés (Planche 3, A₂) et sur des sols susceptibles de retrait gonflement d'argile (Planche 3, C). Cette zone est cartographiée en aléa fort par le BRGM (Planche 3, C). Les trois facteurs : végétation arborée, pente forte, et présence d'un sol sensible au RGA sont très probablement à l'origine de la forte sinistralité, comme dans l'exemple précédent (Nogent-sur-Marne, Planche 3, A₁). Les interférogrammes (Planche 3, E et F) sont peu interprétables du fait de la perte de cohérence importante de ce milieu fortement pavillonnaire jardiné.

La seconde zone Planche 3, A₂) de sinistralité diffuse correspond à la ville de Villiers-sur-Marne au lieu dit « Bois de Gaumont », où affleurent des argiles gonflantes d'âge oligocène g_{1a} et g_{1b} (Planche 3, C). Il s'agit du sommet d'un talweg évasé à proximité du plateau sommital, où la topographie est faiblement différenciée (Planche 3, D). Le plateau est sous-tendu par des formations superficielles (les limons des plateaux, LP). C'est une zone fortement urbanisée, dont la sinistralité est localisée préférentiellement à proximité d'espaces végétalisés et arborés (Planche 3, A₂). Les différences de couleurs sur les pixels contiguës des interférogrammes (Planche 3, E et F) révèlent de fortes amplitudes de déplacements très probablement liées au RGA. Le BRGM cartographie ces sols avec un aléa faible à fort (Planche 3, B).

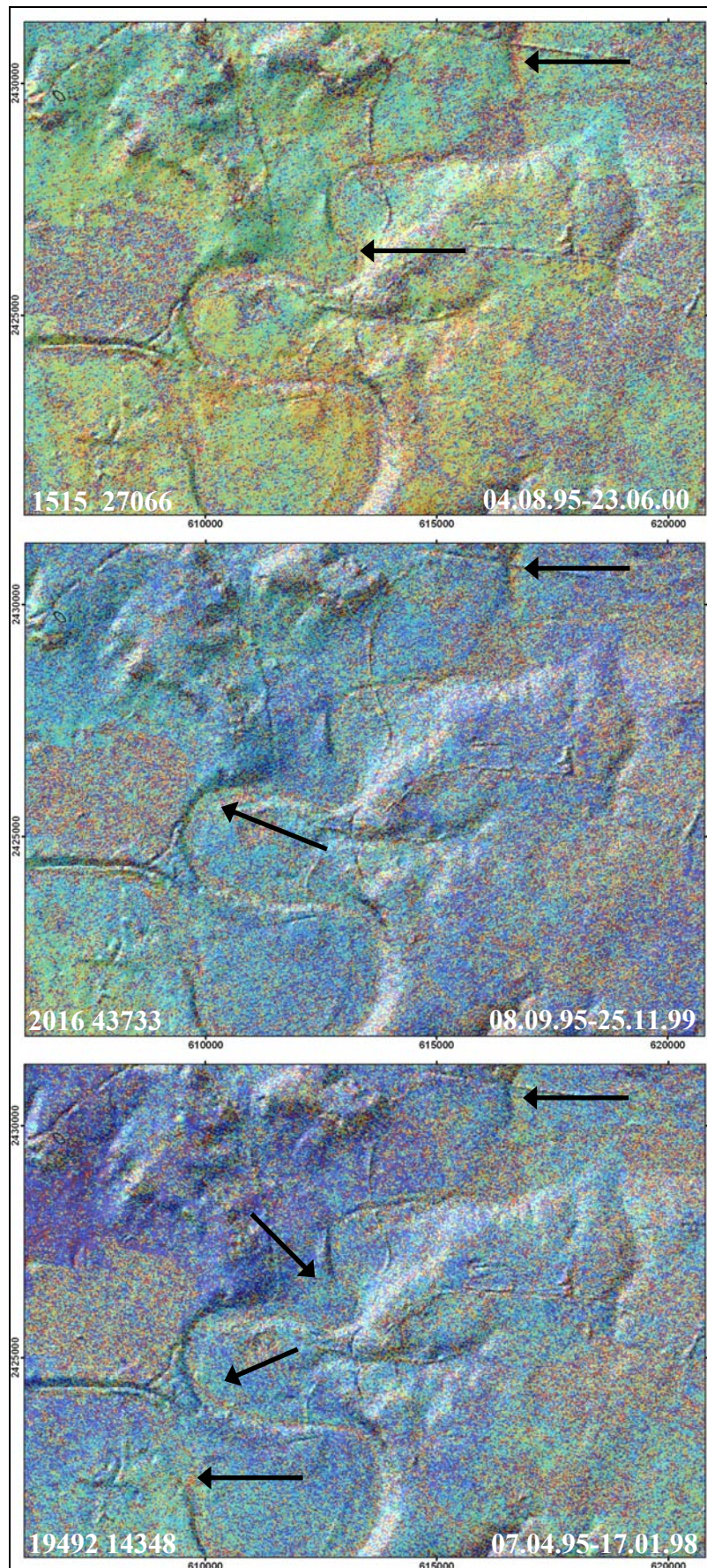


Planche 4 : Vue d'ensemble de la zone d'intérêt par interférométrie et avec un estompage de la topographie en transparence. Les flèches soulignent l'emplacement de déformation dans la plaine alluviale de la Marne.

Planche n°4

Cette dernière planche d'illustrations est constituée de trois interférogrammes indépendants auxquels il a été surimposé en transparence un estompage de la topographie, afin de révéler simultanément l'interférogramme et le relief. Il s'agit d'une vue d'ensemble des deux zones d'étude (Planche4). L'échelle de ces figures est au 1/75.000ème, contrairement aux planches précédentes (Planche 1, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, Planche 3) dont l'échelle de représentation est au 1/50.000ème.

Ces interférogrammes correspondent à des périodes de temps supérieures à trois ans. Les images maîtresses sont prises en hiver 1995, soit globalement quelques mois avant la sécheresse de 1996. Les images esclaves des couples sont en 1998, 1999 et 2000, en allant de bas en haut de la Planche 4. On observe en de nombreux endroits de la plaine alluviale de la Marne des déphasages décroissant, en particulier dans les courbures des méandres du fleuve. Cette réponse interférométrique correspond à un éloignement du capteur, donc interprétée comme une subsidence. L'amplitude est estimée à 0,4 cm à 0,7 cm, amplitude plus forte sur les berges de la Marne et dans les zones alluvionnaires récentes F_z . Cela souligne des déstabilisations des terrains à proximités de la Marne. Si ces résultats sont confirmés, cela pourrait suggérer que l'épisode de sécheresse a un effet bien après mars 1996, date qui correspondrait alors seulement au maximum du phénomène de retrait. L'étude de la pluviométrie efficace montre en effet que le déficit de pluviométrie débute en milieu de l'année 1995 (voir rapport annuel n°2 au 21.09.2007, partie 1.1.2), ce qui souligne l'importance de cette sécheresse hydrogéologique et ses conséquences sur les environs immédiats de la Marne.

Cependant, des études complémentaires sont à réaliser pour prendre en compte les effets de possible pompage de la nappe aquifère (voir partie 2.5). Seuls des relevés piézométriques et une connaissance de l'emplacement géographique des stations de pompage permettrait de préciser le phénomène. L'analyse des zones alluviales en terme de retrait gonflement n'est pas évidente.

2.3 Discussions

Conclusions résultats DINSAR et RGA.

La méthode interférométrique radar (DINSAR) a été appliquée sur la région Est parisienne dans un but de localisation, de caractérisation et de quantification des amplitudes des faibles déformations liées au Retrait Gonflement d'Argile (RGA). Les résultats obtenus sont disparates car, (1) les déformations engendrées par le RGA ont une faible extension spatiale, (2) elles sont de faibles amplitudes (centimétrique à pluri centimétrique), (3) il y a une forte variation temporelle (fonction des cycles de sécheresse), et enfin (4) la non constance des déplacements dans le temps.

Il est donc difficile d'obtenir avec cette méthode DINSAR une détection des déformations saisonnières. Les résultats sont beaucoup plus probants sur des interférogrammes dont la période est élevée (de 3 à 5 ans), afin de détecter et de mesurer un bilan « cumulé » des déformations. Constatons que certains aspects du cycle de retrait gonflement d'argile ne sont donc pas analysables par cette technique. L'interférométrie PSI semble plus adaptée à la problématique du RGA à l'échelle d'un bâtiment, pour permettre de suivre l'évolution temporelle de réflecteurs fortement rétro diffusant.

En ce qui concerne les résultats thématiques, ce travail s'est focalisé sur différents types géomorphologiques : 1) les plateaux présentant des effets locaux de RGA (les argiles sont subaffleurantes et couvertes par de faible épaisseur de formations superficielles - les limons des plateaux de la carte géologique) ; 2) les versants bordant les plateaux qui recoupent les formations géologiques argileuses gonflantes et donc engendrent de fortes déformations liées au retrait gonflement d'argile, accentuées par la forte pente ; et enfin 3) Les plaines alluviales composées d'alluvions en partie argileuses soumises à des effets de rabattement et de recharge de nappes phréatiques sous-jacentes. L'interférométrie radar (DINSAR) révèle des mouvements sur les versants, notamment en concavité de bas de pente, et dans la plaine alluviale de la Marne.

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

Plusieurs exemples sont issus de l'Est de l'Île-de-France, région fortement affectée par la sécheresse géotechnique. Constatons que la proximité de zones fortement arborées, à forte

penne et de formations géologiques argileuses gonflantes d'âge oligo-éocène sont autant de facteurs de prédisposition. L'interférométrie radar (DInSAR) est testée ici dans un but de localisation, de caractérisation et de quantification des amplitudes des déformations liées au RGA. Elle souligne des déplacements qui ne sont pas toujours faciles à interpréter. En effet, les résultats observés sont limités du fait (1) de la faible cohérence de la zone d'étude liée *pro parte* à la nature du tissu péri-urbain (habitat individuel, pavillonnaire disparate, jardiné et arboré); (2) du faible nombre d'images radar ERS et Envisat utilisées et actuellement disponibles sur les périodes de sécheresse et de déficit hygrométrique; (3) de la non continuité des déplacements engendrés par le RGA dans le temps, et enfin (4) de la forte évolution spatiotemporelle du phénomène. Soulignons que les limitations d'usage sont nombreuses, du fait de la perte de corrélation géométrique, temporelle et des artefacts atmosphériques, qui limitent l'interprétation des anomalies dans un milieu péri-urbain présentant beaucoup moins de réflecteurs que le milieu urbain plus dense. Il semblerait que seules des déformations affectant une zone supérieures à 1000 m² sont potentiellement analysables par cette méthode.

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

III.3 Résultat par la méthode PSI

3.1 Les résultats PSI

Avant de se focaliser sur les zones déjà étudiées en interférométrie différentielle DINSAR, nous allons étudier sommairement le calcul des vitesses moyennes de déplacement calculé sur l'ensemble de la zone. Les vitesses linéaires sont calculées par régression linéaire à partir des données PS, ce qui permet de montrer les tendances linéaires au cours du temps. Ces vitesses sont exprimées en mm/an et sont calculées sur la totalité des images radar : de 1995 à 2006 pour les données ascendantes (Figure 52) et de 1992 à 2006 pour les données descendantes (Figure 53). Les vitesses sont révélées par les teintes colorimétriques de rouge à bleu: en rouge des tendances linéaires positive de 6mm/an et en bleu les tendances négatives de -6mm/an.

En mode ascendant, constatons que les couleurs vertes et jaunes prédominent très largement, ce sont les zones stables. Elles correspondent à de très faibles déplacements annuels. Il existe quelques points disparates de couleurs bleues sombre ou rouge qui tranchent par rapport aux déplacements moyens : aux abords de la Marne au droit des berges les tendances sont visiblement à l'affaissement ainsi que dans la plaine alluviale avec des mouvements négatifs dans le sens de visée du capteur de -4 mm/an.

En mode descendant, les vitesses moyennes observées sont légèrement négatives ce qui indique que la référence utilisée pour le calcul des PS en mode descendant n'est pas totalement immobile. Malgré cette différence de mesure entre le mode descendant et ascendant on peut constater des mouvements identiques au niveau des berges de la Marne et sur la plaine alluviale ce qui valide les calculs réalisés (les images descendantes et ascendantes forment deux set de données distinctes)

Afin de mieux illustrer ces résultats, des agrandissements au 1/50 000 sont proposés à la Figure 55 et à la Figure 58 avec un fond d'image aérienne. Afin de reconnaître l'environnement direct des disparités précédemment observées, sont posées en vis-à-vis de ces agrandissements les mêmes images aériennes sans autre surcharge que la sinistralité (Figure 56 et Figure 59). Les cartes géologiques du BRGM détaillent la nature du sol connue de ces secteurs (Figure 57 et Figure 60).

Le premier site de Nogent-sur-Marne (Figure 55) permet de situer de nombreux sites en subsidence autour d'espace arboré. La végétation semble avoir un effet durable sur les sols en terme de tassement. Autres déformations visibles sont celles des berges, plus précisément sur les terrasses alluviales : les documents cartographiques du BRGM révèlent que ces sols soumis à l'affaissement sont principalement des alluvions anciennes Fy. Peut être que la perte en eau se réalise par la baisse de la porosité ce qui entraîne un tassement définitif et progressif de ces matériaux fortement saturés en eau.

Nous avons abordés la même démarche sur le plateau de Villiers-sur-Marne et de Noisy-le-Grand (Figure 58) situé à proximité de l'université Paris-Est site de Marne-la-Vallée : contrairement au site précédent la carte des vitesses moyennes est beaucoup plus disparate. Certes si la couleur vert-jaune est toujours dominante on s'aperçoit qu'il y a beaucoup plus d'hétérogénéités localement. Les vitesses linéaires mesurées sont inégales sur le talweg et sur l'affleurement des argiles vertes de Romainville (g1a). Ces mouvements sont donc à analyser plus précisément en prenant en compte la nature des coins réflecteurs et leurs comportements dans le temps. C'est ce que nous avons voulu étudier plus précisément.

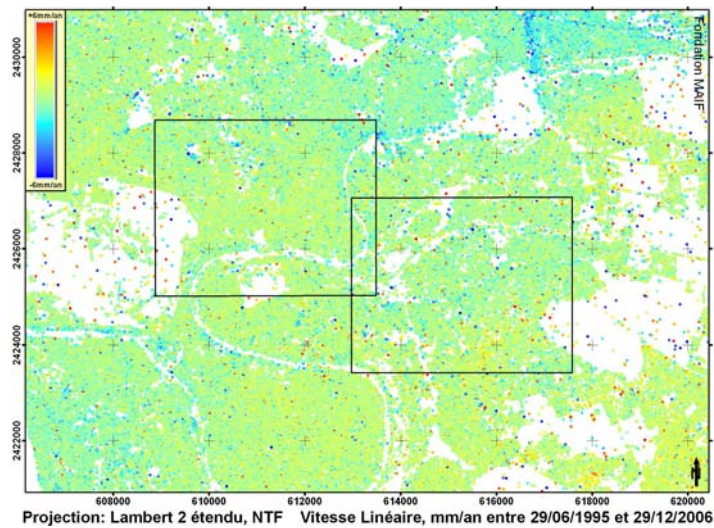


Figure 52 : Vitesse moyenne de PS en mode ascendant, satellite ERS1/2 ENVISAT.

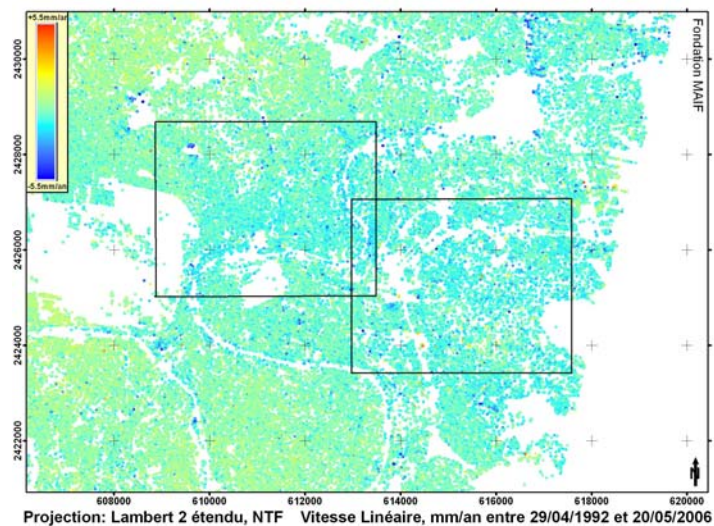


Figure 53 : Vitesse moyenne de PS en mode descendant, satellite ERS1/2 ENVISAT.

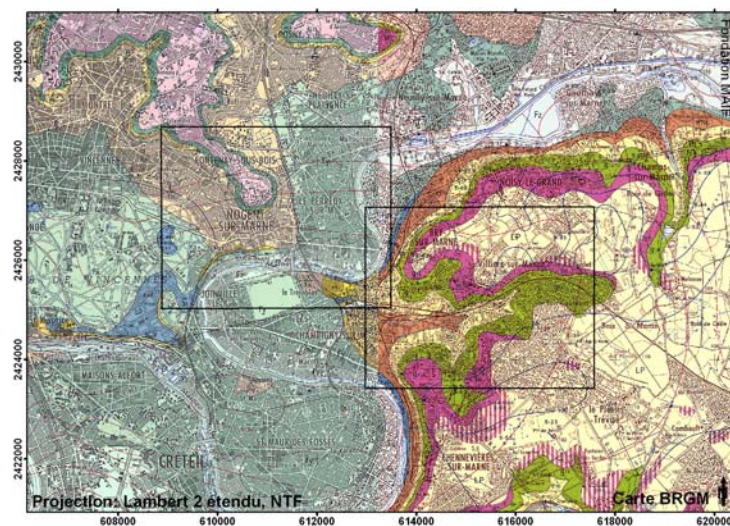


Figure 54 : Extrait de la carte géologique du BRGM permettant de reconnaître les formations argileuses gonflantes (g1a en vert). Les deux zones sélectionnées correspondent à celles décrites plus précisément ci-dessus par les cartes de vitesse linéaire PSI.

Détails sur le plateau de Nogent-sur-Marne

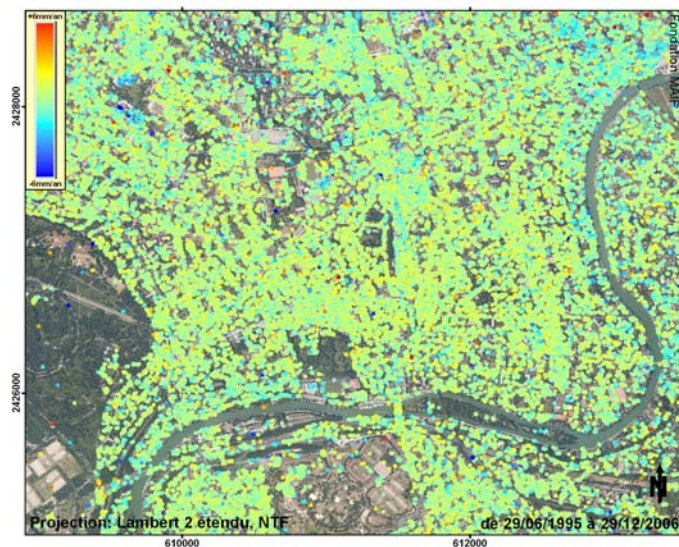


Figure 55 : Vitesse moyenne linéaire des PS ascendant en mm/an, (bleu : négatives de -6mm/an, vers rouge positive de +6mm/an), satellite ERS1/2 ENVISAT avec fond de carte orthophotographie IGN

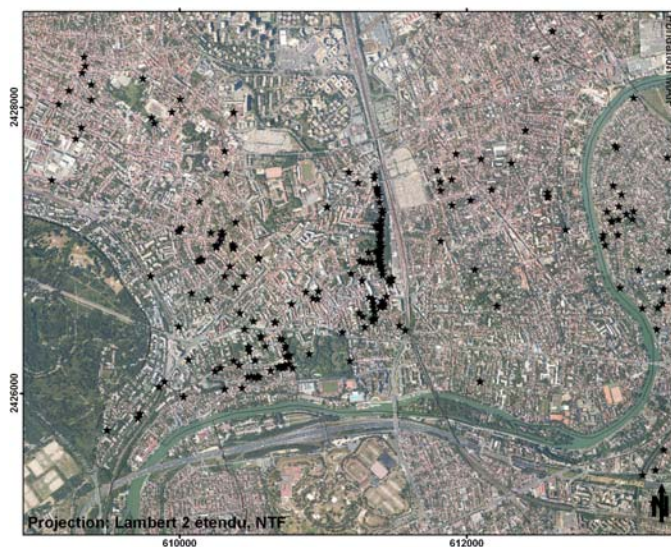


Figure 56 : Orthophotographie IGN et sinistralité. Emprise sur zone de Nogent/Marne et Bry/Sur Marne.

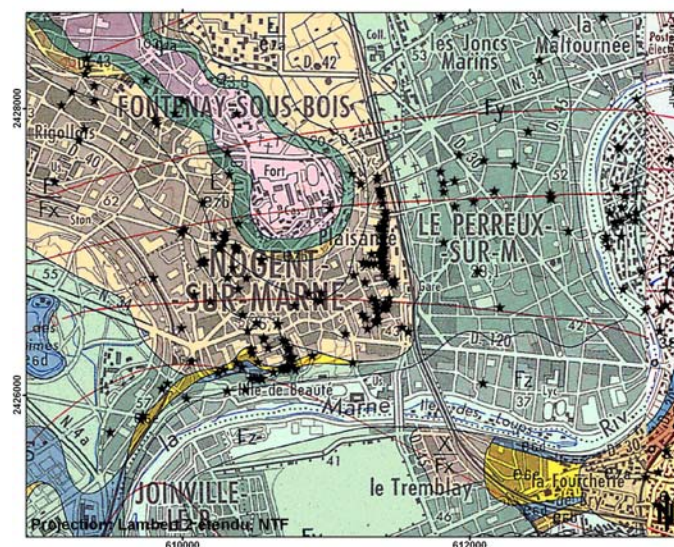
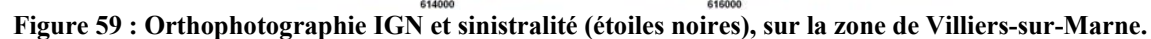


Figure 57 : Extrait de la carte géologique du BRGM au 1:50000 et sinistralité



3.2 Comparaison avec résultats DINSAR

Les techniques interférométriques DINSAR et PSI appliquées à l'est Parisien à une échelle régionale permettent d'établir un état des lieux des déformations. Cependant les résultats fournis par ces deux méthodes sont inégaux. L'objet de cette partie est de discuter des apports de chacune avant d'étudier les processus du RGA à l'échelle de la parcelle dans la chapitre IV.

La faible cohérence observée sur les interférogrammes, liée à l'occupation du sol, n'est pas propice à l'utilisation de l'interférométrie différentielle sur les zones de bâti pavillonnaire individuel (cf classification IAURIF et l'orthophotographie de l'IGN). En effet, la présence de bruit et le manque de continuité dans le signal ne permettent pas de suivre les faibles déformations dans le temps. Il s'avère que les zones qui sont le plus affectés par le retrait gonflement d'argiles, en l'occurrence les zones jardinées et arborées, caractérisées par une forte évaporation et évapotranspiration, sont mal révélées par cette méthode. Ainsi, le suivi (pluri)-annuel et donc sur du long terme n'est pas envisageable par DInSAR.

Toutefois, des événements de type sécheresse ou forte précipitation sur une période de temps courte peuvent être étudiés ; certains bâtiments se déforment, et localement, certaines déformations sont soulignées par cette méthode. Nous avons ainsi révélé des déformations très probablement liées au RGA sur les versants de Nogent Sur Marne et dans la plaine alluviale de la Marne à Gagny (cf. article en annexe).

Remarquons que si la cohérence radar est élevée sur des étendues spatiales suffisamment importantes, comme c'est le cas sur un habitat urbain dense et peu végétalisé (exemple d'une ville), cette méthode fonctionne parfaitement sur le long terme. Il faut éviter de suivre dans les temps les environnements végétalisés de type agricoles ou forestiers ou mixtes.

La seconde méthode que nous avons appliquée est établie à partir de l'évolution des Points Stables, remarquables par leur forte rétrodiffusion radar, et qui sont beaucoup plus intéressants et prometteurs en terme de suivi et d'étude des faibles déformations de surface. En effet, il est maintenant possible, sur cet environnement urbain et semi-urbain, de suivre des centaines de points et ainsi donc de localiser, de caractériser et de quantifier les déformations en ces points dans le temps et ce depuis le lancement du satellite radar ERS-1 en 1992.

Nous avons ainsi mis en évidence que les faibles déformations ne sont pas strictement limitées aux épisodes de sécheresse ou de précipitation mais correspondent bien à un phénomène continu dans le temps : les faibles déplacements sont permanents et fonction des paramètres cités dans cette étude.

Cependant la technique que nous avons utilisée n'est pas réellement opérationnelle immédiatement : des recherches doivent encore être développées pour des applications industrielles et opérationnelles pour le milieu industriel et assurantiel.

Les principales limites sur lesquelles nous travaillons actuellement sont les suivantes :

Tout d'abord des limites liées aux données disponibles :

- 1- Nous disposons d'un faible choix avec des dates et des heures imposées (images à 35 jours, images ascendantes acquises à 22 heures, et images descendantes acquises à 10 heures du matin), avec un plus faible nombre d'images ascendantes que descendantes. Les images de nuit sont néanmoins plus intéressantes car limitent les effets thermiques de chaleur sur les structures des bâtiments et les déplacements associés. Les événements sécheresse et précipitation sont souvent des événements courts dans le temps et ne sont pas forcément bien encadrés par des acquisitions d'archives. Notons enfin que les artefacts atmosphériques affectent potentiellement le signal radar susceptible d'entraîner un bruit sur les profils de déplacements des PS.
- 2- Des limites aussi dans les archives d'images : l'année 1994 n'est pas couverte, et la période 2000-2002 est problématique pour les images acquises par ERS-2 (problème de Doppler lié à une panne de gyroscopes) ;
- 3- La faible résolution décimétrique des images radar ERS

Des limites liées au relief et à l'environnement urbain :

- 1- Si le terrain est penté, la déformation se fera en 3 dimensions, or nous ne mesurons la déformation que le long de la ligne de visée du satellite, c'est-à-dire en une dimension. Pour s'affranchir partiellement de cette limitation nous développons une méthode permettant de croiser les orbites ascendantes et descendantes différentes (angle de l'ordre de 20° dans les azimuts de défilement du satellite) mais qui sous-tend d'autres limites. En effet ce ne sont généralement pas les mêmes points stables qui seront observés en orbites ascendante et descendante. La mise en place de coins réflecteurs à géométrie connue et visibles sur les deux orbites est la solution la plus simple retenue par les industriels actuellement. Le problème est qu'il n'y a pas d'images d'archives : il faut attendre d'avoir une acquisition d'une vingtaine d'images pour mener une étude par PSI.
- 2- Les problèmes de décorrélation temporelle et spatiale liée à l'évolution de la végétation, de l'augmentation de l'occupation du sol et de la pression urbaine, de la modification des plans locaux d'urbanisme, etc.

Enfin des limites liées à la technique de suivi des PS :

- 3- En effet actuellement tous les algorithmes de traitement des PS font l'hypothèse d'un mouvement linéaire dans les temps des points à étudier. Face à des comportements non linéaires, on assistera donc soit à une perte totale d'information, soit à un « lissage » du déplacement, en ne conservant que la composante de premier ordre. Or il existe peu de phénomènes géologiques

linéaires : le Retrait Gonflement d'Argile par définition n'est pas un processus linéaire puisqu'il dépend de l'humidité de l'air, de l'ensoleillement de la température extérieure, de la végétation, du type et de la qualité des constructions, etc. Nous arrivons à nous affranchir partiellement de ce problème en sélectionnant les points soumis aux plus forts écarts à cette linéarité .Cependant les points (et donc les zones) bougeant le plus sont mal renseignés. Nous travaillons activement sur des algorithmes permettant de s'affranchir ou de limiter cette contrainte.

Il n'en reste pas moins que la méthode interférométrique DinSAR et PSI reste actuellement et de loin la méthode la plus intéressante pour étudier les faibles déformations de surface et donc le RGA et avec le plus de potentialités. En effet toutes les méthodes classiques (comparaisons de nivellement, de MNT, etc.) sont beaucoup plus onéreuses, moins couvrantes spatialement, moins précises pour l'étendu des surfaces étudiées et sans archives.

III.4 Conclusions

L'interférométrie radar a permis (1) de mettre en évidence des déformations liées au RGA et (2), ces premiers résultats ont été analysés avec les données thématiques disponibles à l'aide d'un SIG et (3) de définir des sites spécifiques pour l'analyse du RGA à l'échelle du bâti, point de départ du chapitre IV du présent mémoire.

(1) Résultats obtenus par l'interférométrie radar différentiel.

Les travaux en interférométrie radar par la technique DINSAR ont permis de produire un nombre suffisant d'interférogrammes différentiels de hautes qualités (haute cohérence) pour permettre une étude complète de 1995 à 2000 à partir des données ERS. La période de sécheresse de 1996 ainsi que ses effets sur la topographie ont été étudiés. On note que suite à un accident du capteur ERS en 2000, la possibilité de constituer un couple interférométrique est plus difficile, ce qui a une incidence directe sur le nombre d'interférogrammes exploitables. L'étude la sécheresse de 2003 est donc difficile car il y a peu de données disponibles avant la sècheresse. Les données ENVISAT disponibles à partir de juin 2003 permettent imparfaitement d'analyser cette période où le phénomène RGA est important sur la période estivale.

Sur les interférogrammes, de nombreux signaux ont été interprétés comme des déformations, en particulier des mouvements liés à la période de sécheresse 1995/1996. Ainsi, quelques signaux détectés ont pu être mis en relation avec des effets de la sécheresse sur des zones accusant de forts dénivelés topographiques. De même, des résultats intéressants sont obtenus sur la plaine alluviale de la Marne, plus précisément à proximité des berges, où des mouvements inférieurs au centimètre ont été détectés. Ces déformations sont visiblement plus étendues et plus homogènes dans le temps, ce qui facilite leur analyse par l'interférométrie DINSAR. De plus, cela montre que la sécheresse provoque des mouvements de la surface du sol indépendamment de la présence d'un sol argileux. Rappelons que l'aléa sécheresse regroupe plusieurs problématiques : la sécheresse géotechnique liée à la présence de matériaux argileux gonflant, mais aussi des mouvements de terrain liés à l'affaiblissement hydrogéologique des nappes (sécheresse hydrogéologique). Si la distinction entre les effets de ces deux phénomènes est difficile, les dégâts sur le bâti résultent souvent de leurs combinaisons.

Enfin, à l'échelle du bâtiment, l'interférométrie montre des limites dans la détection des mouvements localisés induits par le RGA. Cela est particulièrement vrai pour les zones urbaines en sommet des plateaux où des déformations n'ont pas été détectées. En théorie, les déplacements engendrés par le RGA affectent une zone comprise entre la dizaine de mètres carrés et plusieurs centaines de mètres carrés en planimétrie pour des mouvements verticaux

de l'ordre au maximum de quinze centimètres. La technique DINSAR est pourtant sensible au demi-centimètre près. Cela signifie que soit les déformations ont une évolution irrégulière dans le temps par rapport à la répétitivité du satellite, soit qu'ils ne sont pas suffisamment étendus spatialement.

(2) L'analyse des données thématiques disponibles avec un SIG.

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) a permis de combiner des documents thématiques disparates avec les premiers résultats obtenus par l'analyse des interférogrammes. Il a été ainsi permis de localiser et de mieux comprendre les facteurs géomorphologiques et géologiques qui sont à l'origine de la sinistralité liée au retrait gonflement d'argile. On constate ainsi qu'un fort dénivelé topographique, la proximité de zones fortement arborées, et de terrains sous-tendus par des formations géologiques argileuses gonflantes sont autant de facteurs prépondérants.

En effet, un fort dénivelé topographique est un facteur de prédisposition important, car il joue un rôle sur la stabilité du terrain pendant le cycle de dessiccation/hydratation du sol. En effet les bâtiments construits sur des zones en pente sont particulièrement exposés aux effets de retrait du sol d'assise : les fondations étant réalisées à différentes profondeurs, l'épaisseur de la tranche des sols susceptibles d'être affectée par la dessiccation n'est pas constante. De plus, la circulation de l'eau de surface par ruissellement est perturbée par la présence du bâtiment, aggravant ainsi le déséquilibre hydrique du sol si faute d'aménagements.

A l'échelle régionale, l'étude géomorphologique du relief permet de mettre en évidence les zones à risque. Sa combinaison avec les interférogrammes est très révélatrice dans l'interprétation (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). A l'échelle locale, des données topographiques numériques plus précises sont nécessaires pour une étude de pente adaptée à la problématique RGA. Les données numériques disponibles (BdAlti©, IGN) qui modélisent le relief ne sont pas d'une résolution spatiale (25 mètres) et d'une précision altimétrique suffisante (± 5 mètres). L'étude fine de la topographie et des problèmes d'écoulement des eaux, nécessite un levé plus précis qui peut être obtenu par une mission de laser aéroporté (LIDAR) ou des levés topographiques.

Parmi les autres facteurs environnants participants au phénomène RGA, les surfaces végétalisées et arborées, caractérisées par leur forte évapotranspiration sont souvent la source des nombreux désordres constatés. Or ces zones ont une très faible cohérence en interférométrie radar, et donc peu analysable au sein des interférogrammes. Ils sont en revanche observés en imagerie aérienne, sans pouvoir pour autant déterminer l'essence et la hauteur de la végétation arborée.

Enfin, la nature du sol décrite par la carte géologique est certainement un point de départ dans l'étude de la susceptibilité au RGA. La méthodologie du BRGM est confirmée, la sinistralité étant globalement liée à l'aléa cartographié. L'analyse des facteurs participants

(topographie, végétation, type de sol) révèle que la description du tissu urbain et de son organisation est également nécessaire. Le MOS de l'IAURIF, permet de situer les zones urbanisées, c'est-à-dire l'enjeu et plus particulièrement les zones urbaines secondaires pavillonnaires. Mais il s'avère insuffisamment précis à l'échelle d'une propriété privée, car il n'indique pas la proximité et la densité des espaces arborés (deux paramètres qui jouent un rôle important dans l'évapotranspiration).

A partir de ces informations et des résultats obtenus par la technique DINSAR et avec l'aide d'un système d'information géographique, on peut envisager de produire une cartographie du risque liée au RGA dans l'est Parisien que seule l'interférométrie différentielle ne permet pas. Les résultats de l'interférométrie à partir suivi de points stables va permettre d'affiner ses résultats.

(3) Perspectives : choix de nouveaux sites pour l'analyse à l'échelle du bâti.

Les techniques DINSAR et PSI appliquée à la recherche de mouvements de la surface du sol et du bâti dans l'est Parisien ont montré des résultats satisfaisants : de nombreux mouvements de la surface du sol ont été détectés, tous n'étant pas liés au phénomène de retrait du sol lié à la sécheresse géotechnique. Cette étude à l'échelle régionale est un préalable obligatoire à l'étude des effets de la sécheresse à l'échelle de la parcelle.

Afin de mettre en évidence des mouvements par interférométrie radar, le choix des sites démonstrateurs est important selon les phénomènes naturels en cause. La région parisienne est reconnue pour présenter des mouvements de la surface du sol lié à :

- Des glissements de terrain,
- Des tassements de remblais et effondrement du sol lié aux anciennes activités de carrières,
- Effondrement du sol par dissolution des sous sols gypseux et évaporitique.
- déstabilisation des sols liés aux activités humaines et aménagement du territoire

La sécheresse est un aléa climatique qui est certainement la cause directe de la déshydratation de surface des sols argileux sensibles. Cependant cet aléa est un facteur aggravant dans le cas des glissements de terrain, retrait de nappes, subsidence par tassement des sols déjà soumis à une évolution. Dans le cas d'un glissement de terrain, c'est la géomorphologie du terrain ou la pente qui est en cause et indirectement la sécheresse. L'aléa sécheresse provoque un affaiblissement des ressources en eau dans la nappe, c'est-à-dire que le rabattement de nappe peut être la première cause de la déshydratation des sols avant le phénomène de RGA lui-même. La déstabilisation des sols

Un aspect important à résoudre dans la problématique du RGA est de faire la distinction entre ces différents phénomènes naturels sachant pertinemment qu'ils se combinent, c'est-à-dire que les mouvements de la surface du sol sont le résultat des différents processus décrits précédemment.

Le site localisé entre Nogent-sur-Marne et de Le Perreux-sur-Marne, n'est pas un bon site démonstrateur pour les mouvements de retrait gonflement argiles. Bien que présentant de nombreux sinistres déclarés liés à la sécheresse de 1989/91, 1996/97 et de 2003, et des sols sensibles classés en aléa fort par le BRGM, on note des mouvements liés à des déstabilisations de pente, des mouvement en surface lié à des tassements de remblais et remontée de cavité lié aux anciennes carrières. Le réseau routier profondément creusé et contrariant les sols est aussi mis en cause. Les observations terrains montrent des bâtiments collectifs suffisamment fondés présentant tout de même des déformations et fissurations importantes. Compte tenu d'un trop grand nombre de facteurs intervenant et d'un tissu urbain disparate, ce site n'est pas retenu dans l'étude interférométrique à l'échelle parcellaire.

Les sites de Villiers-sur-Marne/Noisy-le-Grand, site placé au sommet d'un plateau sur des argiles gonflante, présente un glissement de terrain par fluage mais de faible intensité (vitesse mesurée au chapitre IV). Les désordres ne peuvent pas être appréhendés par la seule étude des vitesses linéaires mesurés par la technique PSI. D'autre part, on note sur les interférogrammes DINSAR à différentes dates des déphasages disparates. Ces éléments justifient d'étudier ce site à une échelle plus fine, à l'échelle du bâti afin de déterminer ; (1) les caractéristiques de fluage de la zone mesurée dans l'angle de visée du satellite radar. (2) les effets non linéaires liés aux phénomènes de RGA.

Le troisième site de Gournay/Gagny-sur-Marne n'est pas recensé en site sensible par le BRGM. C'est un site localisé en plaine alluviale, soumis à des rabattements de nappe sous-jacente. Toutefois le nombre de sinistres officiellement liés à la sécheresse géotechnique est relativement important et persistant jusqu'en 2003. Les orthographies soulignent un tissu urbain secondaire fortement marqué par la présence de la végétation arborée. Compte tenu de l'importance de la problématique des nappes phréatiques et du RGA, ce site à été retenu pour faire l'objet d'une étude fine à l'échelle du bâti.

Il s'agit de déterminer dans le chapitre suivant de ce mémoire les effets des facteurs intervenant tels que les végétations, les effets de rabattement de nappe et les effets de la sécheresse géotechnique avec les profils de déplacements calculés par l'interférométrie PSI.

CHIV MITIGATION DU RISQUE A L'ECHELLE LOCALE

Sommaire

IV.1 SOMMET DE PLATEAU : CAS DE NOISY-LE-GRAND.....	168
1.1 Localisation et contexte de la zone d'étude.....	168
1.2 État des bâtiments.....	176
1.3 Influence de la végétation.....	179
IV.2 PLAINE ALLUVIALE : CAS DE GOURNAY-SUR-MARNE.....	181
2.1 Localisation et contexte de la zone.....	181
2.2 État des bâtiments.....	183
2.3 Influence de la végétation.....	187
2.4 Analyse des mesures PSI.....	190
IV.3 DISCUSSIONS.....	239

L'objet de ce chapitre est de localiser, caractériser, cartographier et quantifier localement, à l'échelle du bâtiment, les effets du phénomène de retrait gonflement d'argiles (RGA) par l'analyse du comportement des réflecteurs permanents mesuré par interférométrie PSI. Plus précisément, il s'agit de préciser l'influence des facteurs environnant les relations existantes entre les déplacements mesurés et les influençant les déplacements notamment ceux intervenant dans la problématique du RGA (tels que la nature du sol, le type de bâtiments, la proximité de la végétation). Deux sites ont été ainsi sélectionnés pour leur représentativité en fonction du type de sol affleurant et de la géomorphologie représentative de l'Est Parisien.

Le site de Noisy-le-Grand est localisé en sommet de plateau et le site de Gournay-sur-Marne sur la plaine alluviale de la Marne. Les sites sélectionnés sont caractérisés par un sol affleurant fortement susceptible au RGA, avec un environnement urbain pavillonnaire vulnérable à la sécheresse géotechnique, vulnérabilité confirmée par la forte sinistralité recensée. Pour chaque site, on présentera tout d'abord le lieu géographique, la géologie et le contexte urbain environnant. Les informations obtenues sur le terrain seront détaillées telles que les déformations observées, la proximité de la végétation et le type de construction. Enfin, une analyse comparative et une interprétation des résultats obtenus par interférométrie PSI permettront de souligner les relations potentielles entre les différents facteurs intervenants et à l'origine des désordres provenant du RGA.

IV.1 Sommet de plateau : cas de Noisy-le-Grand

Les travaux effectués sur le site de Villiers-sur-Marne/Noisy-le-Grand ont fait l'objet d'une présentation à la conférence SEC en 2008 (Kaveh *et al.*, 2008). L'analyse des PS y est effectuée afin de montrer le comportement des réflecteurs en zone argileuse sensible au RGA placé en sommet du plateau de Brie. Après avoir situé le site d'étude et rappelé son contexte géologique et géomorphologique, des profils PS utilisant les données des capteurs ERS1&2 et Envisat en orbite ascendante et descendante sont détaillés et comparés aux données climatiques disponibles.

1.1 Localisation et contexte de la zone d'étude

Localisation géographique

La zone d'étude sélectionnée s'étend sur les communes de Noisy-le-Grand et de Villiers-sur-Marne, et se situe sur la terminaison occidentale du plateau de Brie sous-tendue par deux formations d'argiles gonflantes (les argiles vertes de Romainville et les Marnes Blanches de Pantin) et entaillée par la Seine à l'Ouest et la Marne au Nord. La Figure 63 détaille de contexte de la zone d'étude.

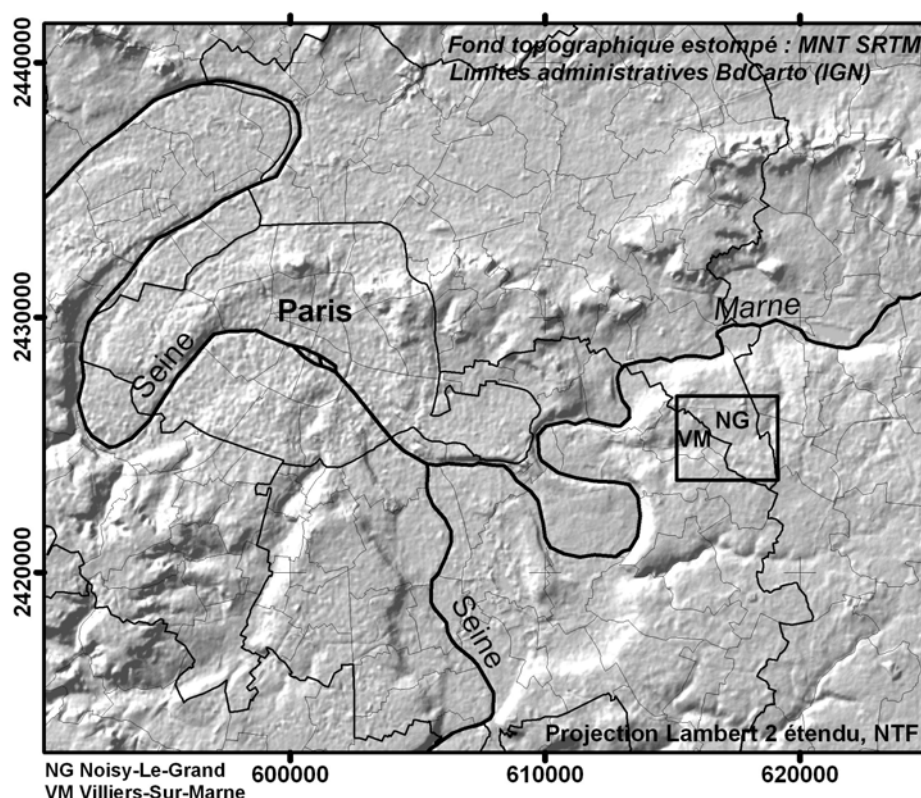


Figure 61 : Localisation de la zone d'étude dans l'Est Parisien : cadre noir, Villiers-sur-Marne (VM), Nogent-sur-Marne (NG).

Contexte géographique.

Puisque la rivière « Marne » ne s'écoule pas à Villiers-sur-Marne, la commune semble tenir son nom de son sous-sol surnommé localement « marne », qui un mélange naturel d'argile (les Argiles Verte de Romainville, noté géologiquement g1a) et de calcaire (Calcaire de Brie g1b). Cette commune située à 15km de Paris, dispose d'une excellente desserte à la Capitale, par autoroute A4 et par la ligne ferroviaire (RER-E). Villiers-sur-Marne marque l'une des portes d'entrée de la ville nouvelle de Marne-la-Vallée. La carte géologique avec son fond topographique IGN révèle les noms des quartiers. Le lieu dit « Les Richardets » tiens son nom des populations aisées parisiennes venant établir leur maison secondaire dans cette zone de villégiature. Un fait qui se traduit par la forte expansion démographique depuis la fin de la seconde guerre mondiale (Figure 62), ce qui montre la forte attractivité de cette commune pour les résidences pavillonnaires individuelles d'une classe moyenne. Autre lieu dit, « les bois Gaumont » se distingue par l'absence de végétation, l'ensemble étant aujourd'hui totalement urbanisé.

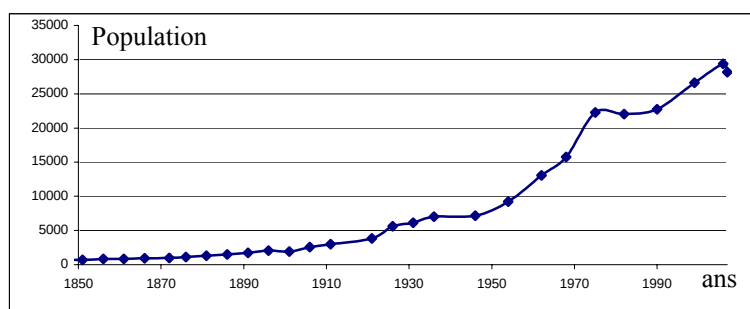


Figure 62 : Evolution de la population de Villiers-sur-Marne entre 1850 et 2007 (source INSEE)

Ce résumé sommaire du contexte géographique de la commune de Villiers-sur-Marne montre tout les éléments favorables à une sur-sinistralité liée au RGA : c'est un site sensible pour la construction avec l'affleurement des deux formations géologiques les plus susceptibles au phénomène de retrait-gonflement de la région Île-de-France (g1a et g1b, voir Annexe 12). C'est également une zone soumise à une forte croissance urbaine de type pavillonnaire, constructions insuffisamment fondées du fait de la faible contrainte réglementaire pour ce type d'ouvrage léger. Enfin, il s'agit d'un ancien espace naturel autrefois humide dédié à l'agriculture et la forêt, aujourd'hui totalement urbanisée (coté Villiers-sur-Marne).

Contexte géologique et géomorphologique.

Afin de mieux comprendre les processus en action sur la zone d'étude, une planche (Figure 63) présente un ensemble de documents thématiques utiles à la problématique du retrait-gonflement d'argile, documents extraits de la base de données géographiques intégrée dans un système d'informations géographiques (SIG) (Kaveh *et al.*, 2007). L'ensemble des documents sont extraits sur la même « emprise géographique » pour décrire le contexte géologique et géomorphologique de la zone d'étude de Noisy-le-Grand et de Villiers-sur-

Marne, ce qui facilite l'analyse et l'interprétation des résultats des déplacements obtenus par les PS. Les informations qui en sont extraites sont les suivantes :

- L'orthophotographie aérienne géoréférencée IGN décrit l'occupation du sol sur laquelle sont superposés les PS (points noirs de la Figure 63A),
- Une carte des pentes en degré (Figure 63B) issues du modèle numérique de terrain (BdAlti de l'IGN),
- La topographie en teinte hypsométrique et estompée (Modèle Numérique de Terrain, Figure 63C),
- Un extrait de la carte géologique du BRGM au 1/50.000ème, (Figure 63D, dont la légende est donnée dans le tableau ci-après),
- L'occupation du sol de l'IAURIF, avec en jaune les quartiers pavillonnaires individuelles (figure Figure 63E),
- et la carte de l'aléa RGA réalisée par le BRGM (Figure 63F), carte issue de la première version datant de 2003 (Donsimoni *et al.*, 2003, carte non actualisée).

L'extrait de l'orthophotographie IGN, Figure 63A détaille à l'échelle du 1/10000 le tissu urbain caractérisé par l'importance de l'habitat pavillonnaire individuel. Ces propriétés privées possèdent des espaces jardinés caractérisés par la végétation arborée, identifiable par la canopée de la végétation sur l'imagerie aérienne. La zone est également traversée d'est en ouest par la ligne ferroviaire SNCF (RER-E). Enfin, au centre de l'image est visible le toit d'un établissement public, l'école Paul Serelle, placée à proximité d'un jardin public constitué de chênes d'après le compte rendu de terrain. Ce bâtiment fera l'objet d'une discussion ci-après ainsi que l'influence de la chênaie sur la topographie du sol.

La vignette placée à droite de l'orthophotographie est une carte des pentes (Figure 63B) calculée à partir de la matrice topographique de l'IGN, la BdAlti. Cette carte souligne l'absence de dénivelé dans la zone d'étude (terrain quasi plat). La Figure 63C montre en teinte hypsométrique le relief de la zone : un dégradé de couleur allant du vert (altitude faible) au rouge (altitude forte) permet de visualiser les altitudes allant de 85m à 100m en système IGN69. Ce modèle numérique de terrain souligne une légère dépression sur laquelle s'étend l'espace urbain, cuvette qui s'ouvre à l'Ouest vers un talweg. On remarque que la ligne ferroviaire SNCF (RER-E) la traverse et passe par l'exutoire jusqu'au talweg. Il s'agit de l'emplacement d'un ancien petit ruisseau qui coulaient autrefois à Villiers-sur-Marne, « le Ru de la Lande », désormais canalisé et transformé en égout souterrain, en dessous de la voie de chemin de fer.

La carte géologique du BRGM (Figure 63D) montre l'extension sur la zone d'étude des Argiles Verte de Romainville, où se concentrent un grand nombre de sinistres, ici représentés par des étoiles noires sur toutes les vignettes. Les étoiles rouges localisent des sinistres liés au phénomène de RGA qui ont été observées après une campagne de terrain sur le terrain en avril 2008. Cependant un certain nombre de bâtiments observés déformés se place également à proximité de la ligne ferroviaire. La vignette présentant la classification

IAURIF à 11 postes (Figure 63E) confirme la nature pavillonnaire du tissu urbain, en accord avec la photo-interprétation réalisée sur l'orthophotographie.

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

Tableau 11 : Formations géologiques présentes à l'affleurement à Villier-sur-Marne dans la zone d'étude. (Source Donsimoni et al., 2003)

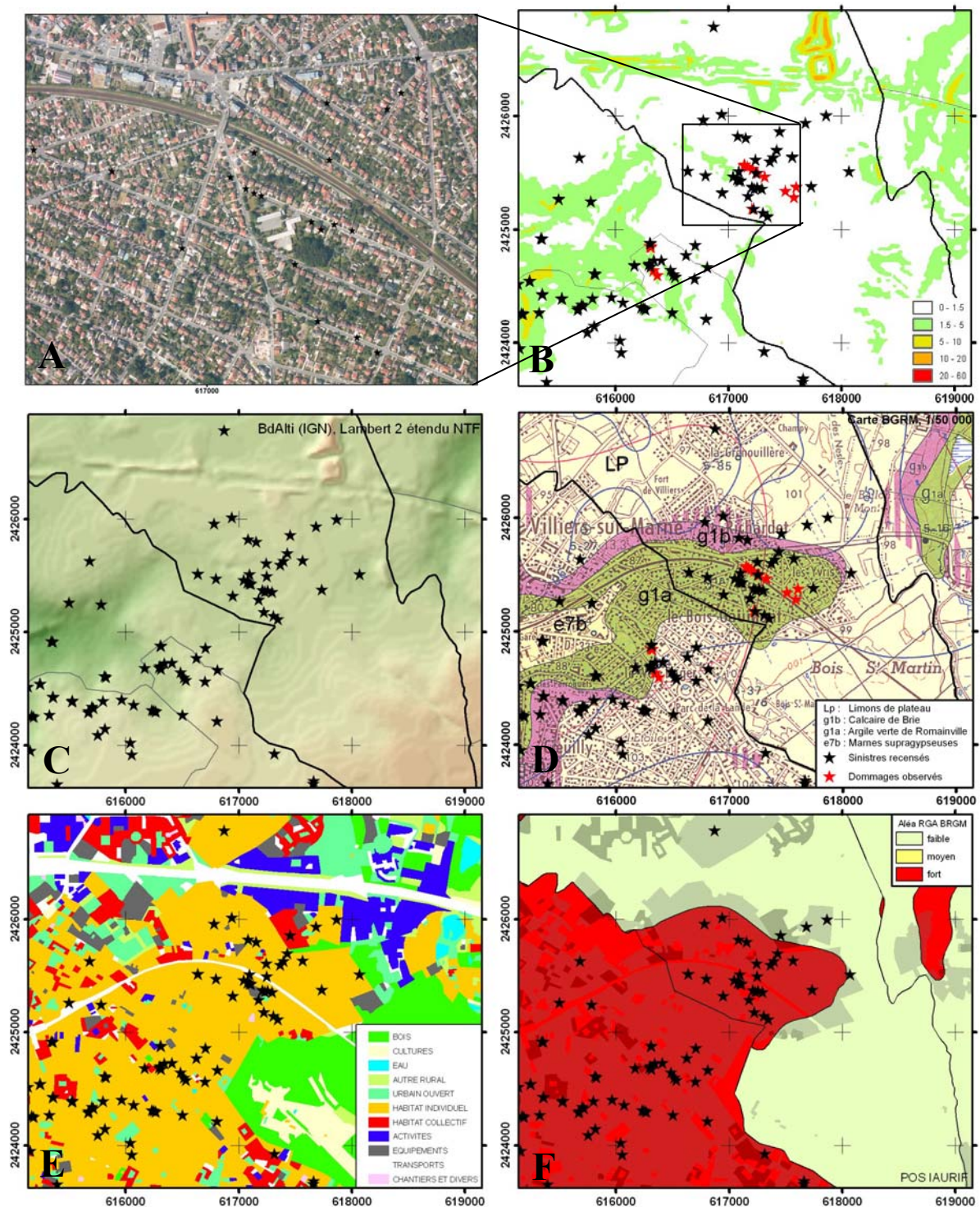


Figure 63 : Documents thématiques issus de la base de données thématiques RGA sur le site sélectionné sur les communes de Villiers-sur-Marne et de Noisy-le-Grand.

A - Orthophotographie aérienne 2003 IGN et localisation des PS analysés. B- Carte des pentes issues du MNT BdAlti (IGN). C- Extrait du Modèle Numérique de Terrain BdAlti en teinte hypsométrique sur lequel sont superposées les limites administratives municipales. D- Carte géologique du BRGM (Soyer et al., 1958). E- Carte d'occupation du Sol effectuée par l'IAURIF : la couleur orange signifie l'importance de l'habitat pavillonnaire individuel. F- Carte d'aléa Retrait Gonflement d'Argile effectuée par le BRGM en 2003, carte non actualisée (cf. argiles.fr), avec en rouge l'aléa fort et jaune pâle l'aléa faible, superposée à l'occupation du Sol - habitat pavillonnaire individuel et collectif effectué par l'IAURIF. Sur toutes les cartes, la sinistralité (1989-2003) est représentée par les étoiles noires.

Analyse des PS, à l'échelle des communes de Villiers-sur-Marne et de Noisy-le-Grand.

Il s'agit d'analyser le comportement des profils PS dans la région autour de la zone d'étude, afin de rendre compte des phénomènes existant agissant à plus large échelle avant de détailler les profils PS à l'échelle de la parcelle. L'emprise géographique est la même que la planche décrite précédemment (Figure 63). Cette portion de territoire a déjà été étudiée au chapitre III.2.2) à l'aide de la technique différentielle DINSAR ; cependant la forte présence de végétation réduit la cohérence des interférogrammes, et il n'a pas été possible d'approfondir l'analyse des déplacements de la surface du sol provoqués par le RGA. Il s'agit de préciser les mouvements de sol avec la technique PSI en montrant les cartes de vitesse linéaire et les profils de déplacement PS. Les données PS utilisées sont issues du calcul d'une base de données d'images ERS1&2 et Envisat, en mode ascendant et descendant entre juin 1995 et juin 2006.

L'orthophotographie de la Figure 64A permet de localiser différents réflecteurs permanents (points stables PS) obtenus sur la zone, ainsi que 8 PS particuliers numérotés de 1 à 8 dont l'évolution temporelle est donnée en Figure 65. Ces graphiques illustrent les déplacements de ces PS, en centimètres, le long de la ligne de visée du capteur radar entre 1995 et juillet 2006, avec en vis-à-vis des données climatologiques (température et pluie efficace).

Les PS 1 et 2 (Figure 65) sont localisés dans la commune de Villiers-sur-Marne. Les courbes **révèlent et confirment** des variations cycliques, avec des fluctuations de l'ordre de 0,7 cm d'amplitude le long de la ligne de visée du capteur. Les maxima topographiques sont observés en hiver, période humide et froide ce qui suggère une reprise d'humidité des sols par gonflements et les minima topographiques sont observés en périodes estivales (chaudes et sèches). On constate aussi que la période entre 2001 et 2003 est délicate à interpréter du fait du manque d'images exploitables, lié à la perte des gyroscopes du satellite ERS2 (en février 2000). On constate que les trois autres courbes (Figure 65) illustrent la similarité des comportements sur différents points PS choisis (PS 1 à 8).

La Figure 64B révèle les vitesses moyennes en cm/an, avec en surimposition les sites reconnus sinistrés sous forme d'étoiles noires. L'examen attentif des profils des vitesses linéaires (Figure 64B) montre généralement une répartition différente des couleurs au sud PS rouge, au NW PS vert et au NE PS de couleur jaune. Ainsi, la divergence des pentes de la courbe selon que les PS se placent en haut du plateau (PS 1 et 2, $V_L = +0,2\text{cm/an}$), au niveau du talweg (PS 3, 4, 6, 7 et 8, $V_L = -0,125\text{cm/an}$) et en bas de la pente (PS 5) (Figure 65). Nous mesurons ici un déplacement continu dans le temps qui affecte une large partie de talweg qui pourrait être un signe d'un fluage lent et régulier des terrains argileux : la formation des Argiles Verte de Romainville. Le mouvement est bien mesuré dans l'axe du satellite. La pente positive du profil 5 pose néanmoins problème : s'agit-il d'un signe du changement climatique ? Ou bien plus simplement s'agit-il des effets indésirables liés à l'instabilité de la référence qui a servi au calcul des PS qui pourrait potentiellement être mobile ? Des études complémentaires seraient nécessaires pour répondre à cette question.

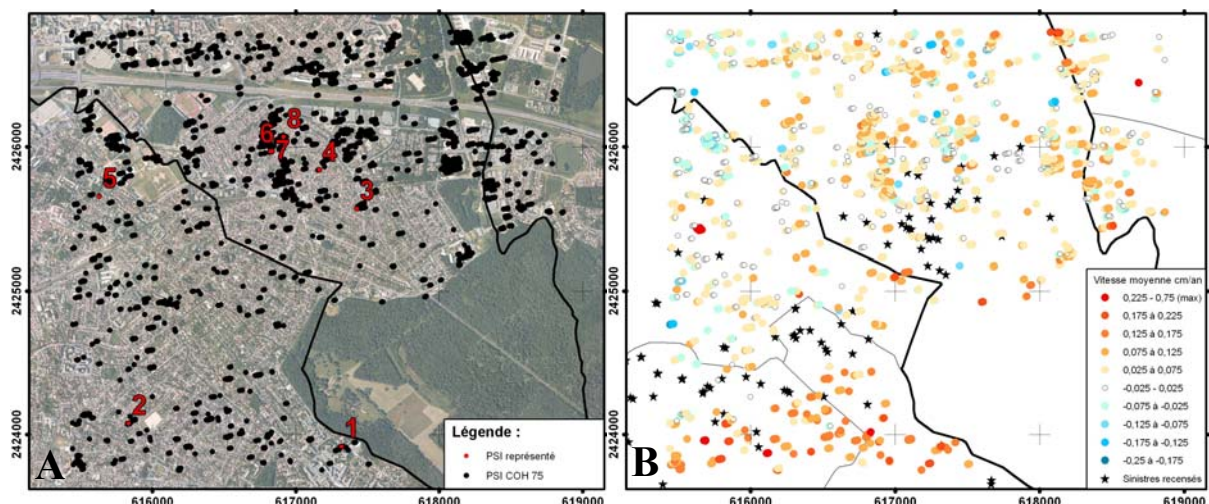


Figure 64 : Carte de localisation de PS et carte de Vitesse Linéaires des PS en mode ascendant entre 1995 et 2006.

A- L'Orthophotographie IGN précise la localisation des PS (seuil de cohérence à 0,75) détaillée ci-dessous. B- Carte des vitesses moyennes. Les valeurs de vitesses moyennes ne sont pas représentatives du phénomène de RGA car le phénomène est non linéaire. Seule ici une dérive altitudinale peut être révélée, dont l'origine est discutée ci-après.

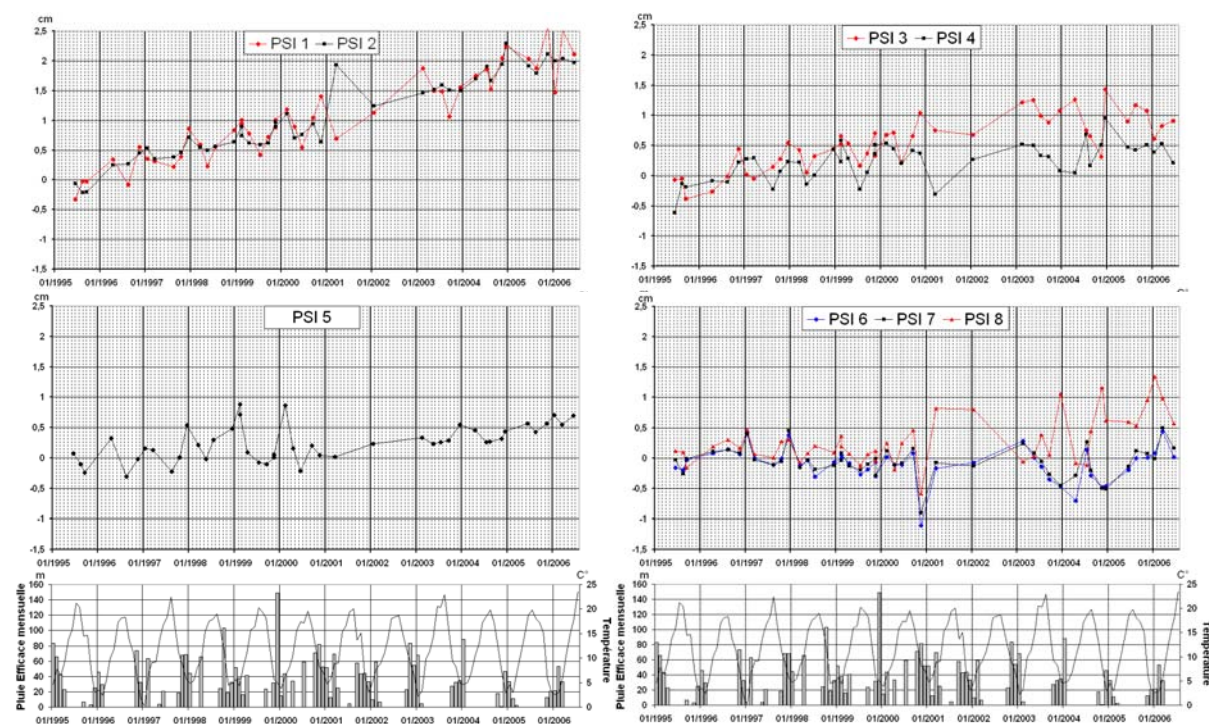


Figure 65 : Déplacements des PS numérotés de 1 à 8, localisés en figure 6.1 avec le diagramme de données météorologiques (histogramme de pluviométrie en mm/mois et Température de C°/mois).

Remarquez la saisonnalité des déplacements (soulèvement topographique en hiver : période pluvieuse et froide contrastant avec la période estivale chaude et sèche correspondant à un abaissement centimétrique de la topographie). Localement, l'acquisition d'image radar trop espacée par rapport au phénomène RGA peut masquer cette cyclicité.

Les mouvements enregistrés par la technique PS montrent donc des modifications annuelles de la surface du sol de l'ordre du demi-centimètre, mouvements liés au changement de conditions climatiques et d'ordre saisonnier. Remarquons qu'il existe des périodes sur lesquelles les déplacements observés sont non cycliques.

PS appliqués sur le plateau de Villiers-sur-Marne à l'échelle de la parcelle.

Pour mieux caractériser l'environnement de ces habitations principalement pavillonnaires individuel nous avons cartographiés les habitations dont les arbres sont proches à très proches et nous avons recherché aussi les habitations présentant des dépendances accolées et/ou des bâtiments accolés. En effet, ces deux facteurs sont importants pour le RGA car l'hétérogénéité des fondations et la proximité des arbres favorise la fissuration et les désordres en façade.

Nous avons décidé de nous focaliser sur une zone réduite facile d'accès située sur le plateau (caractérisée par un faible aléa RGA d'après la cartographie BRGM bien que fortement affectée car présentant de nombreuses habitations sinistrées RGA (étoiles noires). Nous avons ainsi cartographié précisément chaque bâtiment recherchant les fissures sur les façades visibles et enquêtant auprès des habitants. La cartographie Figure 66 (A) représente les bâtiments à priori affectés en noir et en gris ceux non affectés. La Figure 66 (B) représente les PS disponibles tant en mode ascendant (rouge) qu'en mode descendant (noir). On constate qu'il y a plus de pixels rouges (mode ascendant acquis de nuit) pour une cohérence supérieure à 0,4.

1.2 État des bâtiments

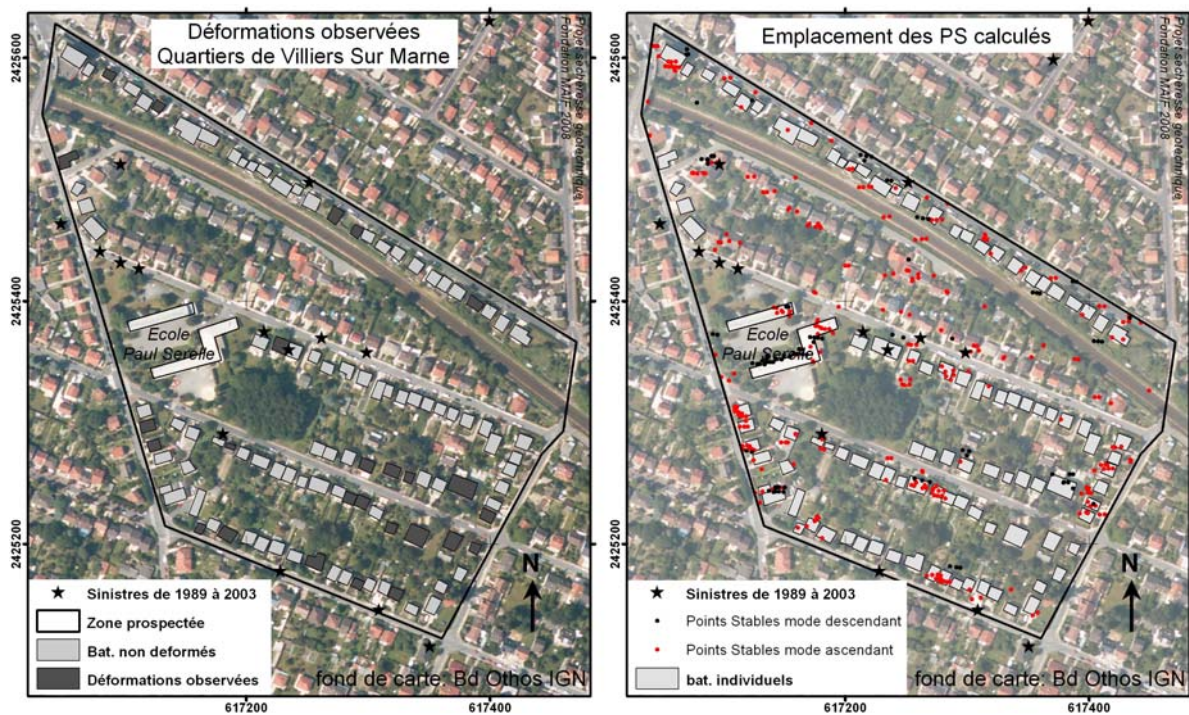


Figure 66 : (A) Bâtiments endommagés à Villiers-sur-Marne (B) Carte de localisation des PS, communes de Villiers-sur-Marne et de Noisy-le-Grand.

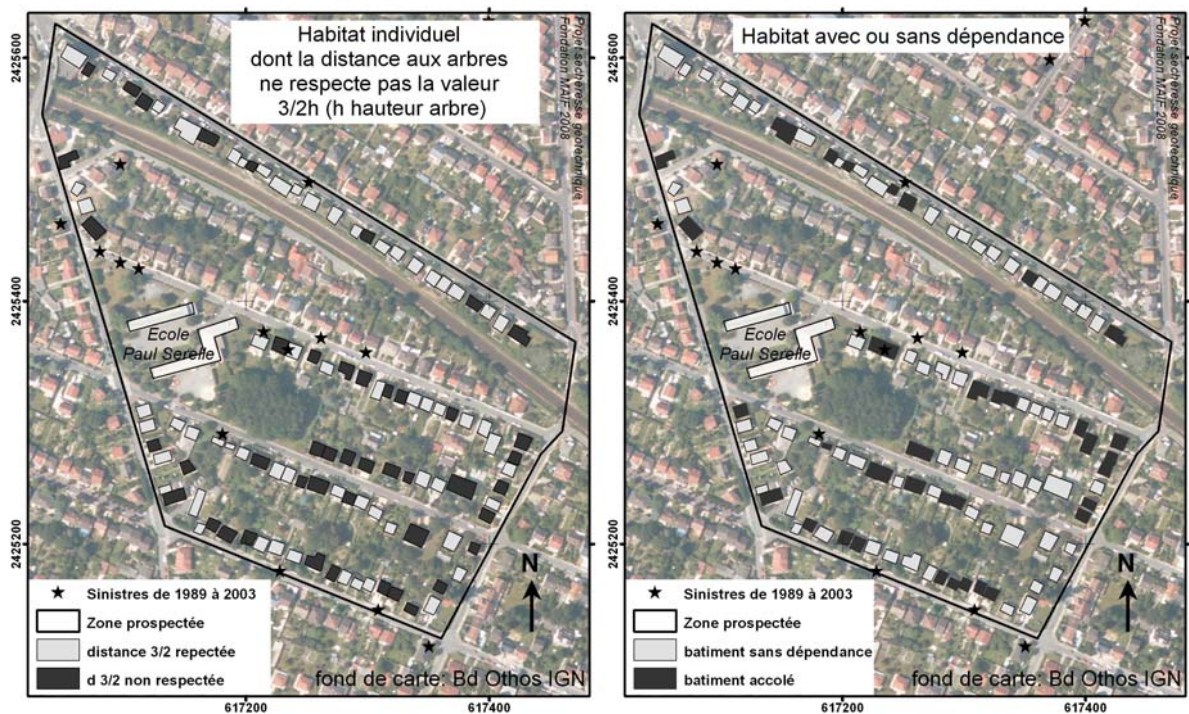


Figure 67 : (A) Habitats soumis à l'influence des arbres après enquête de terrain, (B) habitats avec dépendance ou sans voisinage.

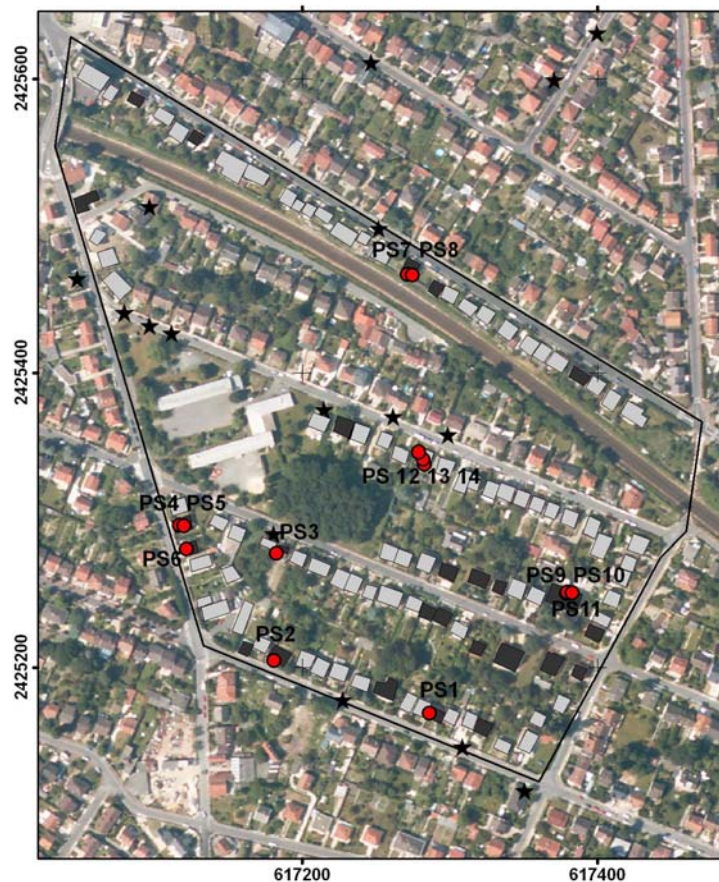


Figure 68 : Carte de localisation des PS ville de Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand.

En noir, les bâtiments légèrement fissurés, en rouge les PS les plus proches sélectionnés, les étoiles noires correspondent à la sinistralité officielle d'après les données BRGM, en gris les bâtiments dont il n'y a pas de déformation visible en façade.

Nous avons ensuite comparé la vérité terrain et les données interférométriques PS. Pour cela nous avons sélectionné sur la figure 8 les points PS qui sont situés à proximité des bâtiments reconnus sur le terrain affectés par des fissures et avons essayé de mieux comprendre les déplacements révélés par le calcul.

Donc, tous les profils des PS situés immédiatement à proximité des bâtiments reconnus déformés suite à l'enquête terrain ont été sélectionnés ici.

Reconnaissons qu'il n'est pas facile de comprendre la logique des faibles déplacements centimétriques. Toutefois il est surprenant de constater que les PS7 et PS8 présentent une certaine cyclicité saisonnière en hiver le point mesuré s'éloigne du satellite (à traduire en terme de subsidence car le relief est subhorizontale, il n'y a donc pas de composante planimétrique ici) contrairement à la saison estivale où l'on a un rapprochement du point du satellite et donc une surrection. Il s'agit là exactement du comportement que nous pourrions attendre de la surface topographique soumise au phénomène de RGA. Actuellement nous ne pouvons parler que de coïncidence mais il y aurait certainement fort à faire pour instrumenter et valider ce résultat. De plus, l'analyse des profils PS en mode descendant sur un bâtiment supposé stable pose des difficultés comme le souligne la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** avec des pics de 2cm qui ne peuvent être expliqués par le RGA.

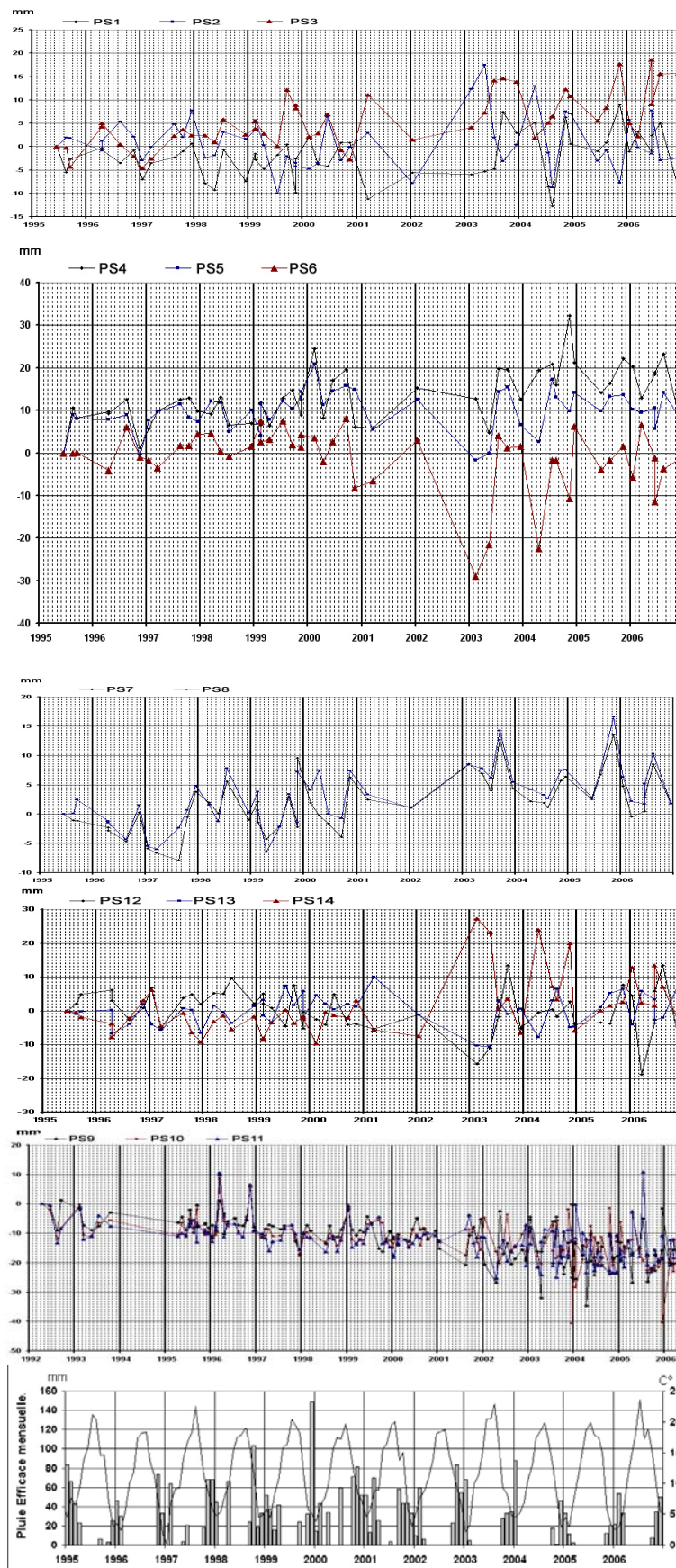
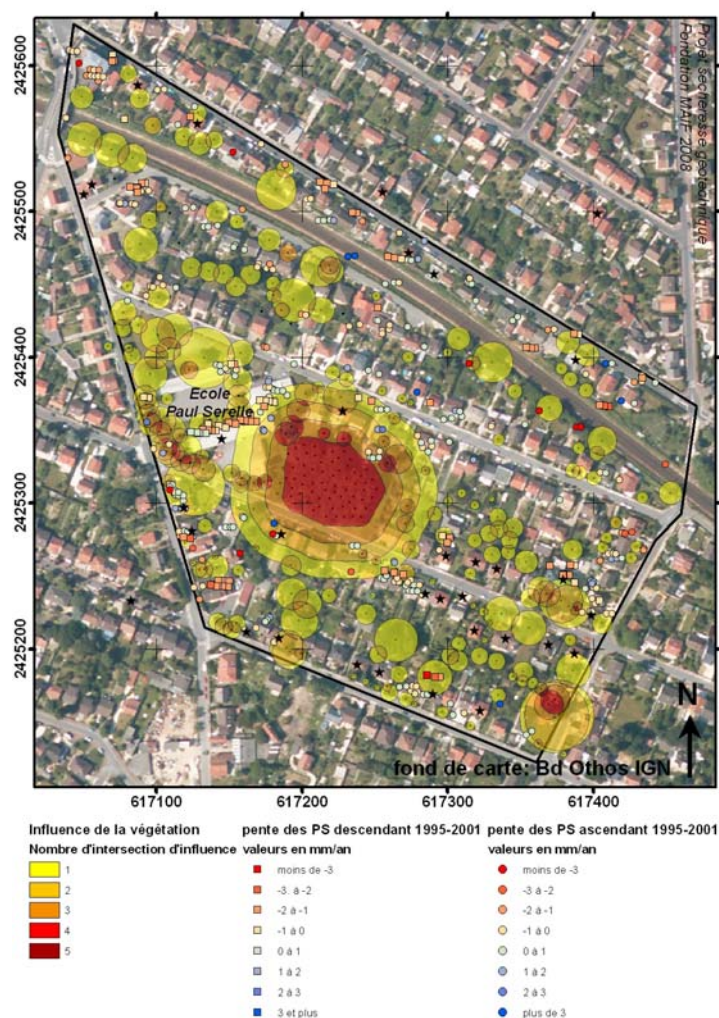


Figure 69 : Profils de PS descendant appartenant à des bâtiments localisés déformés après enquête de terrain, à Noisy-le-Grand. Remarquer que le bâtiment correspondant à la dernière courbe ne présente pas de déformations visible sur la façade coté rue.

1.3 Influence de la végétation

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'influence de la végétation arborée sur les habitations et avons effectués le relevé les hauteurs des arbres et le recensement des différentes espèces pour l'ensemble du quartier étudié. Comme nous l'avons vu les différentes espèces d'arbres présentent un périmètre d'agressivité racinaire (potentiel de succion différentiel des racines) différent. Cette information cartographique est livrée directement sous la forme de buffer correspondant à l'aire d'action racinaire **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On constate que si certains bâtiments déformés correspondent effectivement à l'action de la végétation, d'autres bâtiments déformés sont situés hors du périmètre d'action théorique racinaire. Il faut trouver d'autres explications pour ces déformations. Un travail d'enquête auprès des occupants ainsi qu'une étude des archives des photographies aérienne est en cours pour recenser l'historique de l'occupation du sol de ces bâtiments...



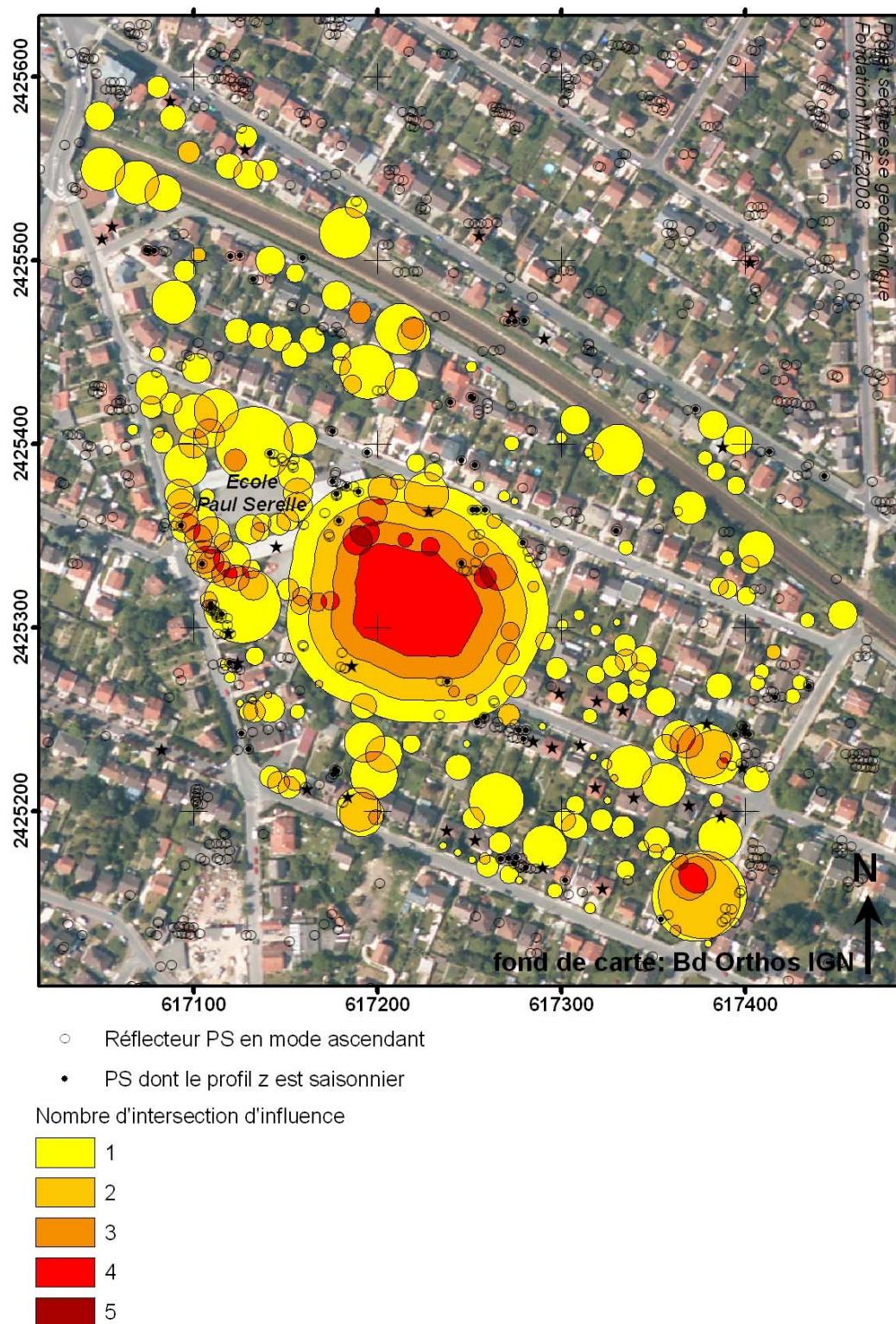


Figure 71 : Localisation des PS (points noirs) aillant un comportement cyclique saisonnier vis à vis de l'influence de la végétation.

La figure 11 souligne les intersections de buffer d'agressivité racinaire et souligne l'importance de la succion d'un petit bois qui présente une subsidence de plusieurs décimètres. Ceci démontre certainement la remontée de la topographie liée à l'urbanisation et l'abatage des bois après la seconde guerre mondiale et pourrait expliquer la faible tendance générale des PS à la surrection (cf. réponse ci-dessus).

IV.2 Plaine alluviale : cas de Gournay-sur-Marne

Un seul site a été sélectionné dans l'Est parisien pour sa sensibilité au phénomène de retrait gonflement des argiles et pour sa représentativité de l'unité géomorphologique « plaine alluviale ». Ce site est localisé dans la commune de Gournay-sur-Marne, commune connue pour sa forte sinistralité et qui a été déclarée en état de Catastrophe Naturelle « CatNat » de 1989 à 2003. Ceci est expliqué par le caractère pavillonnaire individuel des habitats vulnérables à la sécheresse et par la nature argileuse du sol affleurant. Pour des raisons de temps lié aux conditions de travail sur le terrain, seule une portion limitée correspondant à huit quartiers de cette commune -soit 150 bâtiments en tout- sera analysée minutieusement ci-après.

2.1 Localisation et contexte de la zone

La commune de Gournay-sur-Marne est située dans le département de la Seine-Saint-Denis (région Île-de-France). La Figure 72 présente différents documents thématiques décrivant le contexte de cette commune à l'échelle du 1/50.000. La Figure 72A montre la forte sinistralité liée à la sécheresse géotechnique avant septembre 2003, les données sont issues des rapports départementaux du BRGM (Donsimoni *et al.*, 2003). La Figure 72B est un extrait de la carte géologique du BRGM (Soyer *et al.*, 1958) au 1/50 000ème qui détaille la nature géologique du sol sub-affleurant. La zone d'intérêt étant située dans la plaine alluviale, les sols sont principalement constitués d'alluvions modernes (F_z) recouvrant des terrasses anciennes (F_y) riches en argiles. Ce sont des formations géologiques superficielles comportant des horizons marno-argileux et des dépôts détritiques argileux, sensibles au phénomène de retrait gonflement. Cependant on remarque que le Sud de la zone sélectionnée se situe en partie sur les flancs de plateau, des terrains légèrement en pente de l'Eocène supérieure (E_{7b}) affleurant. Un extrait de la classification d'occupation du sol à 11 postes de 2003 réalisée par l'IAURIF (Figure 72C) montre un tissu urbain pavillonnaire individuel. Enfin la Figure 72D est un extrait d'orthophotographie aérienne de l'IGN datant de juin 2003 qui révèle une forte présence de la végétation au sein des espaces privés jardinés mais également la présence de nombreuses rangées d'arbres bordant les avenues du domaine public.

La sélection de la zone d'intérêt est justifiée par la concentration importante de sinistres dans cette commune et de par la nature argileuse des sols décrits par la carte géologique du BRGM. La nature pavillonnaire des bâtiments est typique d'un tissu urbain secondaire péri-urbain et donc bien représentatif de l'Est parisien. Enfin, on remarque que cette classification à 11 postes de l'IAURIF de 2003 détaille peu la présence d'espace jardinée au sein des propriétés privées. Le recours à un support précis d'imagerie aérienne avec les orthophotographies (50cm pixel sol) est donc nécessaire.

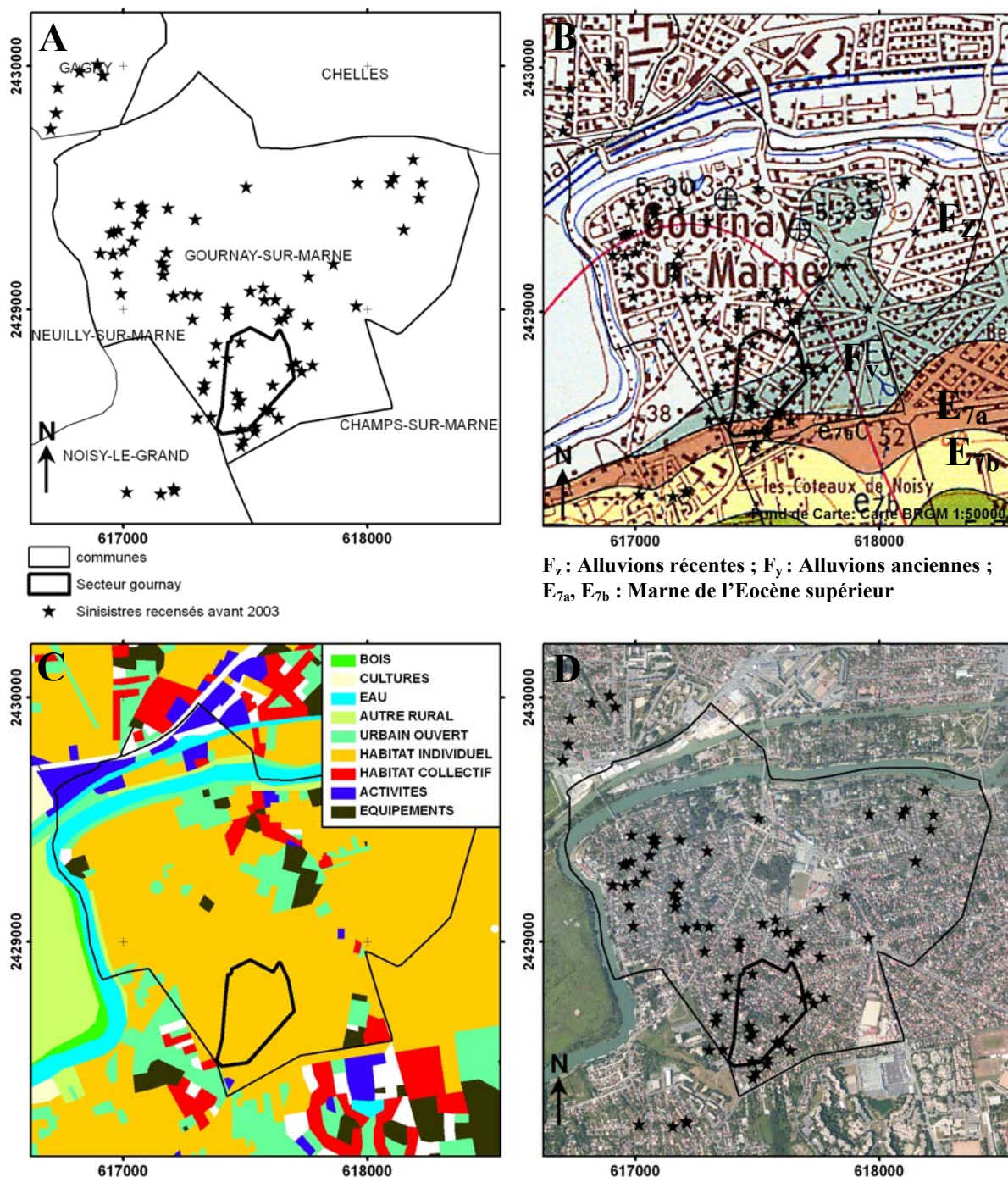


Figure 72 : Planche descriptive du site de Gournay-sur-Marne, A- Localisation de la zone d'intérêt dans la commune de Gournay-sur-Marne et sa sinistralité, B- Extrait de la carte géologique au 1/50000ème du BRGM de Lagny, C- Carte d'occupation du sol par l'IAURIF de 2003 sous forme d'une classification à 11 postes, D- Orthophotographie aérienne de l'IGN de l'année 2003.

Notez en A que la zone étudiée est située dans une zone où se concentrent un grand nombre de sinistres recensés lors des CatNat. En B, l'extrait de la carte géologique de Lagny à l'échelle du 1/50 000ème du BRGM montre la succession lithologique révélée dans la zone d'intérêt est tracée en gras. En C, l'occupation du sol à 11 postes de l'IAURIF datant de 2003 souligne le caractère pavillonnaire mais qui ne décrit pas véritablement la présence de végétation au sein des espaces privés révélés par la figure D avec l'orthophotographie aérienne de l'IGN.

2.2 État des bâtiments

L'observation de l'état du bâtiment réalisée le 2 et 3 juin 2009 dans un quartier de la commune de Gournay-sur-Marne a mis en évidence un grand nombre de pavillons présentant des dégâts caractéristiques causés par le phénomène RGA (cf. CHAPITRE I.3.2.2).

La mission de terrain a permis de réaliser des observations relatives (a) à l'état des bâtiments en constatant leur degré de déformation ou de fissuration en façade et (b) à la présence de la végétation arborée (espèce, hauteur, localisation). Ces informations, issues d'une enquête de terrain, qui ont été ensuite numérisées en laboratoire puis organisées dans une base de données utile à l'analyse spatiale des données PS. Chaque information recueillie fait l'objet d'un renseignement dans la base de données, d'une cartographie et d'une analyse détaillée.

La Figure 73 montre la cartographie de ces quelques maisons déformées. La classification adoptée permet de souligner les bâtiments fortement endommagés ou modérément déformés présentant des symptômes indiscutables de dégâts liés au RGA, tout en isolant les bâtiments sur lesquels il n'a pas été possible de constater des dégâts liés au RGA (non visibles ou rénovés). Il semble ne pas y avoir une organisation logique dans la répartition spatiale des bâtiments déformés sauf dans la partie Sud de la zone d'intérêt, qui concentre un grand nombre de bâtiments modérément à fortement déformés. La majorité des pavillons non visibles sont placés à l'intérieur des quartiers. Il convient d'établir la relation entre les déplacements mesurés par interférométrie et ces constatations de déformations.

La Figure 74 présente les résultats statistiques obtenus pour les 151 propriétés privées observées tandis que la Figure 73 montre ces mêmes résultats sous forme cartographique.

Les statistiques de la Figure 74 révèlent que plus d'une maison sur deux a été observée fortement ou modérément déformée (55%) tandis qu'un tiers (35%) est visiblement non déformés. Dans 10% des cas il n'a pas été possible d'observer des déformations soit parce que le bâtiment est visuellement occulté ou non visible de la rue ou soit parce qu'il est rénové.

Selon la gravité de la fracturation observée dans le bâti, une échelle graduée des déformations a été établie pour mieux apprécier l'intensité des effets du RGA sur les bâtiments :

Bâtiments fortement déformés

Les bâtiments fortement déformés présentent un grand nombre de fissurations liées aux tassements RGA, en particulier dans les angles des portes et des fenêtres, là où la rigidité du bâtiment est moindre. Les fissures observées sont continues, le long de la façade du bâtiment et visible au pied de façade jusqu'aux ancrages de la charpente de la toiture. Ces

fissures sont ouvertes, avec des décalages de part et d'autres observables qui se traduisent par une déformation irréversible du bâtiment. Les ravalements ne permettent pas de masquer les déformations, souvent visibles même après réparation. Des fenêtres sont raccourcies et des entrées condamnées sont la preuve de déformations importantes de ce type de bâti.

Bâtiments modérément déformés

On distingue donc les bâtiments fortement fissurés des bâtiments modérément déformés par le nombre important de fissures visibles sur les façades des pavillons ainsi que l'ouverture apparente de ces fissures. Les bâtiments appartenant à la classe « modérément déformés » peuvent présenter quelques fractures visibles par exemple sur la façade du bâtiment mais de manière discrète et peu continue. Les déplacements sont moins marqués et peuvent être masqués par le ravalement récent de la façade. Cependant des signes de déformation sont toujours visibles de manière indirecte : des marches d'escalier endommagés, un garage « mal accolé », ou une fissuration du mur d'enceinte et d'une annexe.

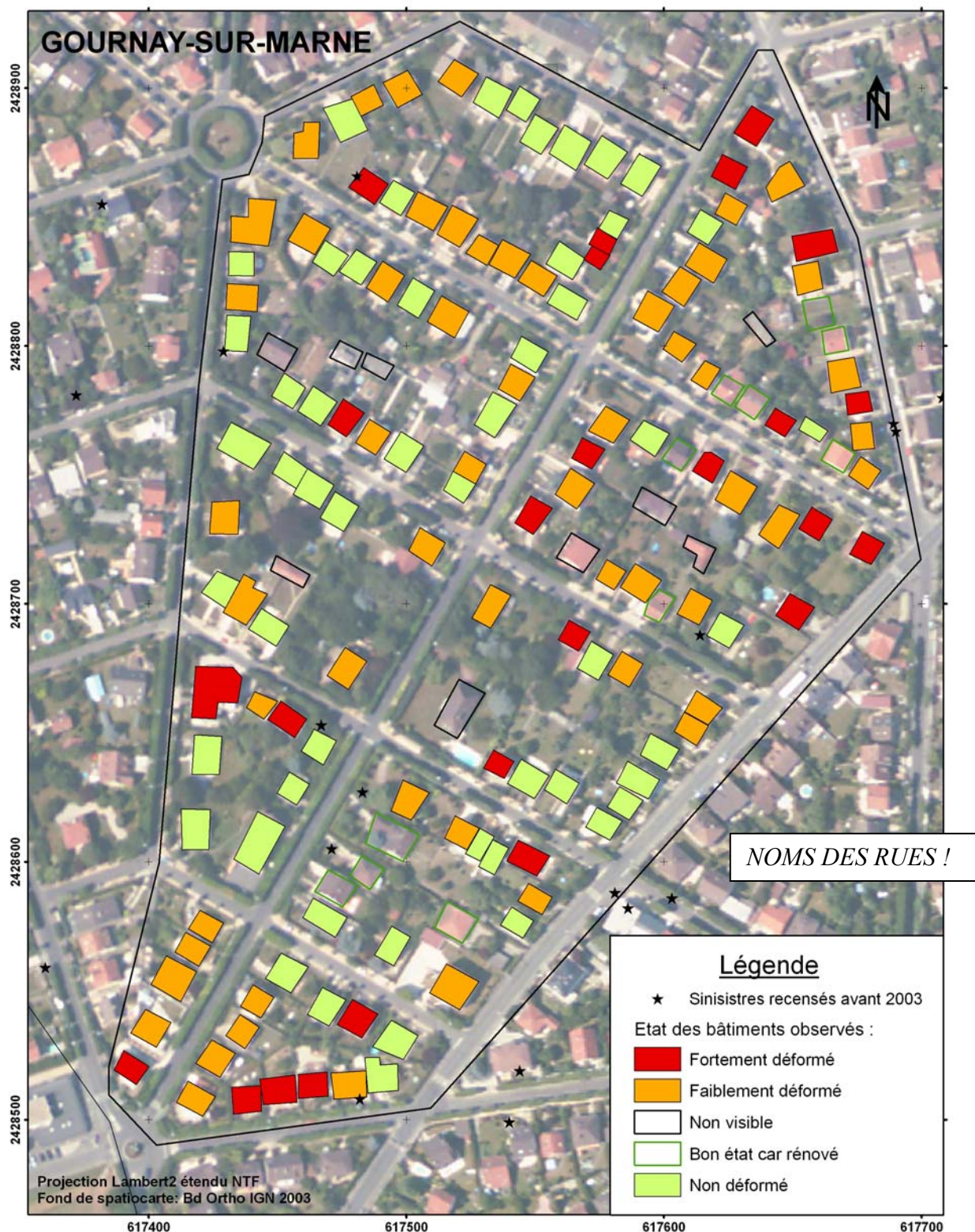


Figure 73 : Cartographie des déformations observées à Gournay-sur-Marne (93460).

Cette cartographie a été réalisée à partir des observations faites le 2 et 3 juin 2009 depuis la voie publique. Notez que certains bâtis n'ont pas pu être observés car occultés par des haies et que le ravalement de certain pavillon masque les déformations liées au retrait gonflement d'argiles. Enfin, l'information « Bon état car rénové » a été représentée séparément afin de relativiser l'information « bâti non déformé ».

Bâtiments rénovés

Cette classe de bâtiments ne montre pas de signes extérieurs de déformations à cause d'un ravalement ou de travaux récents. Il est difficile de le distinguer des maisons saines non affectées par des effets du RGA. Il a donc été décidé de le placer à part dans cette catégorie afin de mieux individualiser les bâtiments réellement déformés.

Bâtiments sains

Il n'a pas été observé sur les façades de ces bâtiments de déformations apparentes. Cette classe de bâtiments n'est donc visiblement pas atteinte par le RGA depuis le dernier ravalement.

Bâtiments non visibles

Il n'est pas toujours possible sur le terrain d'accéder visuellement aux bâtiments qui sont parfois protégés par des haies et des clôtures, même si dans quelques cas il a été possible de constater les dégâts à l'intérieur des propriétés privés après avoir expliqué le sujet de nos recherches aux propriétaires. Afin de représenter les observations qui n'ont pas pu être faite sur le terrain, il a été décidé de représenter cette catégorie de propriétés privées non renseignée, ce qui montre également l'importance des enquêtes auprès de la mairie et des habitants.

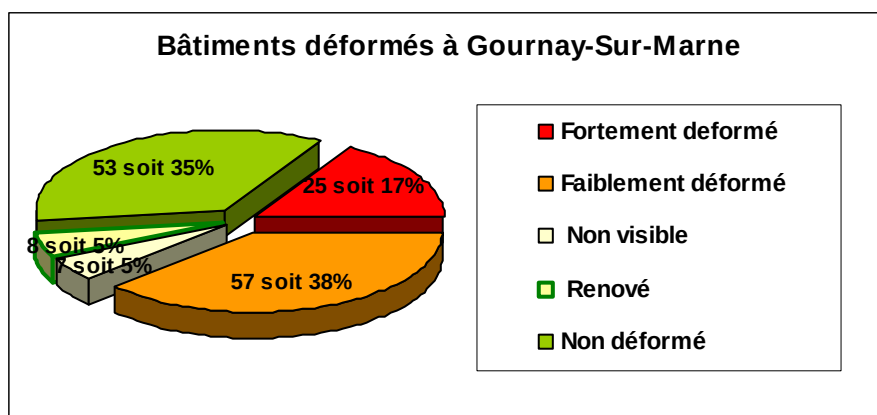


Figure 74 : Statistiques des observations relatives à l'état des bâtiments.

Sur un total de 150 propriétés privées réparties dans dix quartiers d'habitations pavillonnaires, 57% et 25% des bâtis sont respectivement faiblement à fortement déformés. Donc plus de la moitié des cas recensés sont concernés par les effets du retrait gonflement du sol. Plus d'un tiers des propriétés sont toutefois sans déformations visibles, voir rénové pour 5% des cas. Seul 5% des bâtiments sont non observés, pour la plupart des annexes placées à l'intérieur des propriétés. Il ressort de cette étude l'important taux de bâtiments endommagés, et qu'il est possible par la voirie public de constater correctement ces déformations.

2.3 Influence de la végétation

Le recensement de la végétation à Gournay-sur-Marne a été réalisé en même temps que les observations de l'état de déformation des bâtiments. A partir d'une pré-étude de la canopée à partir de l'ortho photographie aérienne de l'IGN, les informations de hauteurs et d'essences de la végétation ont été relevées sur le terrain puis numérisée (Tableau 12) afin d'établir une cartographie de l'influence de la végétation arborée (Figure 75).

Le Tableau 12 détaille la nature des essences observées sur le terrain ainsi que les effectifs dénombrés. L'indice d'agressivité et le rayon d'influence moyen calculés (noté $R_{influence}$) pour chaque essence a été représenté également dans ce tableau. On constate que les essences qui ont le rayon d'action le plus important sont les chênes, charmes, les saules et dans une moindre mesure les marronniers. Ces données sont à prendre toutefois avec précaution compte tenu du faible échantillonnage statistique de certaines essences, avec parfois un seul arbre par essence.

Essence	Abréviation	Nombre	Indice d'agressivité	$R_{influence}$ (μ , σ) en m
Chêne	Ch	2	2	30 ± 4
Saule Pleureur	Spl	1	2	24
Saule	Sl	2	2	$17,3 \pm 0,7$
Marronnier	Mr	7	1,5	$14 \pm 2,8$
Erable	Er	8	1	$12 \pm 2,5$
Charme	Ch	1	2	12
Troène	Tr	1	1	11
Acacia	Ac	2	1	$10,8 \pm 3,2$
Pin	P	10	1	$10,3 \pm 2,7$
Cerisier	Ce	39	1	$10 \pm 2,8$
Noyer	Ny	1	1	10
Epicea	Ep	17	1	$9,9 \pm 2,3$
Sapin	Sp	6	1	$9,7 \pm 1,8$
Tilleul	Ti	8	1	$9,3 \pm 3,6$
Noisetier	N	6	1	$9,2 \pm 1,7$
Hêtre	He	1	0,5	9
Bouleau	Bou	15	1	$8,8 \pm 1,6$
Néflier	Nfl	1	1	7,8
Prunier	Pr	19	1	$7,7 \pm 1,5$
Frêne	Fr	5	1	$7,6 \pm 1,4$
Orme	Or	1	1	7,5
Cyprès	Cy	6	1	$7,3 \pm 1,4$
If	if	4	1	$6,2 \pm 0,9$
autres	?	32	1	$5,8 \pm 2,1$
Olivier	Ol	2	1	$5,7 \pm 1,4$
Lila	Li	3	1	$5,4 \pm 1,3$
Figuier	Fg	1	1	4,7
Thuya	Thy	4	1	$2,8 \pm 0,4$

Tableau 12 : Végétation recensée à Gournay-sur-Marne (avril 2008).

Ce tableau donne le type d'essences de végétation arborée rencontrée et leur abréviation respective utilisée en cartographie (Figure 75). Les entrées sont triées par rayon d'influence décroissant noté $R_{influence}$. Remarquez que les essences d'arbre aux rayons d'influence les plus élevés sont celles qui ont un indice d'agressivité supérieur à un.

Les données de végétation recensée au Tableau 12 montrent une forte présence d'arbres fruitiers (Prunier, Cerisier) et des arbres d'ornementation (Thuya, Cyprès) et des arbres liés à des fêtes traditionnelles (sapin, et divers pins). On note aussi la présence de jeunes arbres fruitiers qui ont poussé sans l'attention des propriétaires (deux pommiers), mais qui seront certainement supprimés à maturité car très proche d'une sortie de voie de garage. La végétation de la voirie publique est caractérisée par des arbres étêtés avec des essences conventionnelles comme les marronniers, bouleau et érables. Ce sont généralement des essences résistantes à la pollution urbaines. Toutefois on note certaines irrégularités dans l'alignement de la plantation, des arbres étant visiblement absents par endroit. Il est toutefois difficile d'affirmer s'il existe un lien entre la mort de ces arbres avec la sécheresse ou avec leur entretien. Vient s'ajouter à ce recensement des essences d'arbre atypiques mais en quantité unitaire. Ce sont souvent des arbres exotiques, liés à l'ornementation des espaces privatifs selon les goûts des propriétaires.

La cartographie de l'influence de la végétation arborée est montrée sur la Figure 75. Les essences d'arbres sont notées avec les abréviations données dans le Tableau 12. Cette cartographie révèle la forte emprise de l'influence de la végétation arborée qui est estimée à 45% de la surface de la zone d'intérêt. Cette influence est inégale selon les quartiers étudiés de par la présence d'arbre d'importante hauteur.

Quelques soient les arbres considérées, on remarque que peu d'entre eux arrivent à une pleine hauteur de maturité. Ceci est expliqué par le manque d'espace ou de sol à l'air libre disponible pour chaque arbre en place : pour devenir adulte, un grand arbre aura besoin d'environ 100 mètres carrés de sol sur une profondeur supérieur à un mètre. Leur croissance se heurte donc à un manque d'eau qui peut provenir soit de l'arrosage soit de la chute de pluie météorique. Pour déterminer les sols en compétition entre les arbres pour l'absorption de l'eau, les zones de recouvrement d'influence ont été représentées. On montre ainsi que localement il existe de forte concentration de la végétation arborée, information utile lors de l'interprétation des mesures PS.

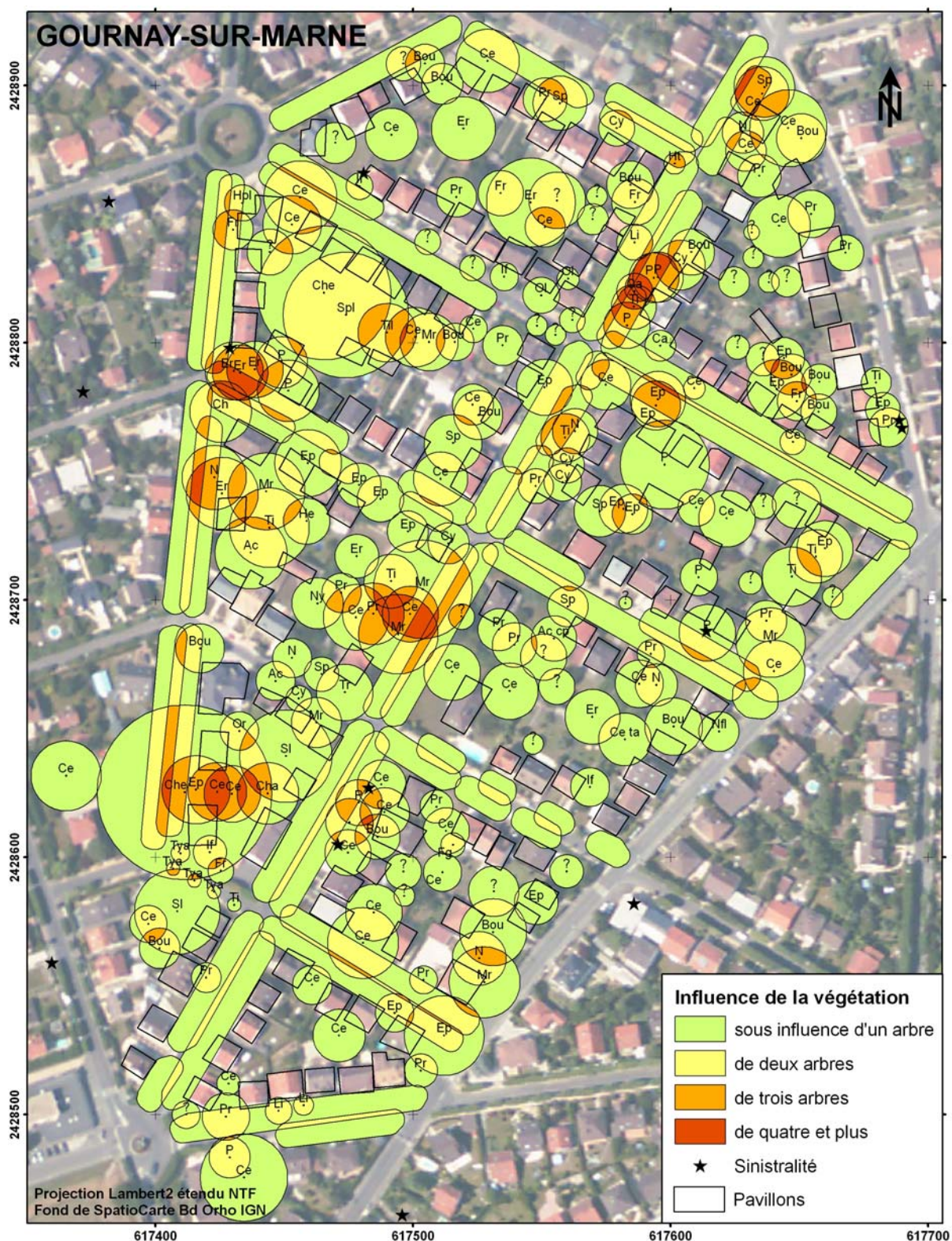


Figure 75 : Carte d'influence de la végétation d'un quartier de Gournay-sur-Marne (93460)

La spatiocarte des aires d'influence de la végétation arborée de Gournay-sur-Marne a été réalisée à partir des observations faites depuis la voie publique le 2 et 3 juin 2009. L'influence théorique de la végétation arborée est établie avec un modèle concentrique en fonction de la hauteur et l'agressivité propre à chaque essence d'arbre. La notation des essences est disponible au Tableau 12. Les informations relatives aux bâtiments ont été placées en transparence afin d'alléger la représentation graphique. Enfin, le fond cartographique est une photographie aérienne issue de la BdOrtho de l'IGN de 2003.

2.4 Analyse des mesures PSI

Les données obtenues à l'issue de la chaîne de traitement SPN sont des mesures de déplacement de réflecteurs dans le sens de la ligne de visée du capteur. Les réflecteurs qui sont géométriquement les plus aptes à renvoyer le signal vers le satellite sont suivis dans le temps. Les réflecteurs étudiés sont soit des points hauts, placés sur les bâtiments ou soit des points bas, au niveau du sol. Les mouvements liés à la sécheresse géotechnique sont des mouvements saisonniers qui peuvent être localement modifiés par l'action de la végétation. Les questions que nous nous posons sont les suivantes : peut-on décrire les déplacements des bâtiments provoqués par le RGA avec la technique PSI ? Comment réaliser un tel travail ?

L'analyse des mesures de déplacement PS est effectuée par la visualisation graphique des profils de déplacement au cours du temps. Les données brutes sont visualisées sans compensation ou correction. Cette visualisation a pour but de comparer les profils PS entre eux selon leur nature (point bas, point haut) et de confronter ces mesures avec le contexte environnant : données climatiques, présence de la végétation, pente, type de bâtiment.

L'analyse du comportement des réflecteurs permanents serait impossible sans avoir déterminé au préalable la nature des réflecteurs permanents et leurs emplacements relatifs vis à vis des objets (toitures, voiries, ...) et des facteurs environnants. Ce travail de localisation et caractérisation est réalisé à l'aide d'un Système d'Information Géographique (ArcGis® d'ESRI France) permettant de visualiser le contenu d'une base de données géoréférencées (cf. Chapitre II.3). L'analyse spatiale à l'aide d'un SIG permet de confronter les données connues, les observations de terrain numérisées et les documents thématiques (géologie, occupation du sol, imagerie aérienne ou satellite). En comparant les profils PS bâtiment, au cas par cas avec ces facteurs environnant, on détermine les causes à l'origine des désordres liées à la sécheresse géotechnique. De plus, la connaissance des réflecteurs de référence du sol est indispensable pour décrypter de manière différentielle le comportement des réflecteurs PS des bâtiments. Enfin, les informations obtenues par cette analyse spatiale détaillée sont étudiées statistiquement afin de dégager des modèles pouvant expliquer le fonctionnement du phénomène naturel de retrait gonflement des sols argileux.

L'analyse des mesures PSI est donc effectuée pour les étapes suivantes : (a) une étude préliminaire avec un pré-regroupement des réflecteurs PS par famille afin de déterminer les points de référence PS, (b) une analyse différentielle des réflecteurs PS des bâtiments s'appuyant sur les références définies auparavant. (c) une synthèse des résultats qui permet de diagnostiquer l'effet relatif des différents facteurs environnants.

2.4.1. Regroupement par famille de points homologues

Il est pertinent dans un premier temps de regrouper les réflecteurs PS par famille de points homologues. La méthode d'analyse mise au point dans cette étude consiste à corrélér

les données PS (495 PS pour Gournay-sur-Marne) afin de déterminer des profils homologues qui puissent être regroupés par famille. Ce regroupement dépend du comportement des réflecteurs PS au cours du temps mais aussi de leur nature : point haut, point bas. Cette classification est basée d'une part sur le positionnement des réflecteurs sur l'orthophotographie aérienne permettant de préciser leur nature et d'autre part en fonction de leur comportement $\Delta_z(t)$. La corrélation des profils est réalisée visuellement avec l'affichage multiple des réflecteurs sous forme de profils puis représenté cartographiquement sous un SIG. Ce regroupement peut être précisé en fonction de l'analyse spatiale réalisée.

Lots n°1 : Lots de points PS au sol soumis à l'influence du RGA et dans l'aire d'influence de la végétation.

L'examen attentif des profils a mis en évidence 95 PS dont le comportement est similaire sur la période 1996 à 1999. On a pu constater au cours de cet examen que 36 autres profils présentaient le même type de comportement mais de manière inversée. Compte tenu du nombre de profils similaires observés il est donc justifié de les regrouper au sein d'une même famille de réflecteurs. La Figure 79 présente leur localisation sous forme de points rouges. On peut constater que pour 95% des cas qu'il s'agit de coins réflecteurs situés au sol, et pour 72% des cas, qu'ils sont localisés en bordure de l'influence de la végétation. **Nous avons choisi de nommer cette famille de réflecteurs « PS sol soumis au RGA avec influence de la végétation ».**

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre une synthèse résumant 14 courbes en noir parmi 95 profils corrélés afin d'illustrer les tendances discutées ci-dessous. La courbe rouge est une moyenne des déplacements des 95 profils à partir desquelles a été calculé un écart type pour représenter la barre d'erreur. Des données climatiques sont juxtaposées dans la partie inférieure du graphique afin de préciser les possibles relations entre les déplacements mesurés et les saisons. Ces profils soulignent une influence du phénomène de retrait gonflement. On montre ainsi que le comportement du sol argileux au cours du temps est fonction des précipitations et les températures. Remarquez le retour à l'équilibre des sols par gonflement en février 1997 et 1998 peu après les premières pluies hivernales ainsi qu'un tassement consécutif à un retrait d'eau du sol en période estivale. La période octobre 1999 à avril 2000 se distingue de ces cycles par une abondance de précipitation précoce par rapport aux normales saisonnières.

On remarque des cycles de tassement et de gonflement d'une amplitude moyenne de un centimètre. Les profils en noir présentent des variations de plus ou moins deux centimètres. Ces amplitudes sont clairement mises en relation avec la proximité de la végétation qui accentue le phénomène de RGA. **Ce profil PS de référence représente la famille de PS traduisant un comportement d'un sol soumis à l'influence de la végétation arborée, qui est noté « Profil Référence Végétation » ou par l'abréviation PRVg ci-après.**

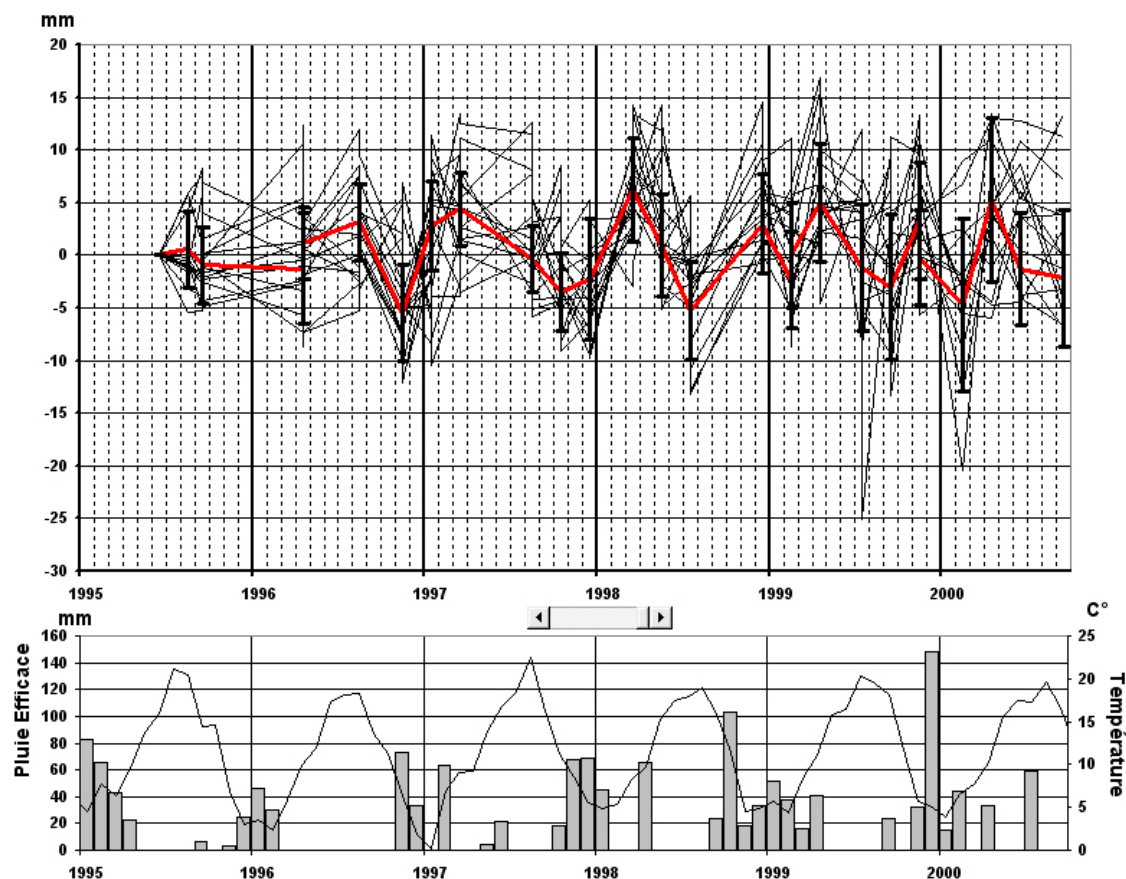


Figure 76 : Synthèse graphique de profils PS de sol soumis au RGA

Le calcul du profil moyen de cette famille de 95 réflecteurs révèle des comportements cycliques saisonniers, c'est-à-dire un déplacement positif (vers le capteur) en période hivernale et déplacement négatif (éloignement du capteur) en période estivale plus chaude et sèche. Ces réflecteurs sont ensuite localisés à la Figure 79.

Lots n°2 : Lots de points PS au sol soumis à l'influence du RGA mais hors de l'influence de la végétation.

Des points PS homologues ayant une tendance de déplacement distincte de celle de la référence d'un sol soumis à l'influence de la végétation ont pu être identifiés lors de l'analyse spatiale. Quelques uns de ces réflecteurs sont présentés à la Figure 77. L'un des profils « numéroté FID 296 » est utilisé comme référence (courbe rouge, Figure 77) pour identifier les autres profils appartenant à cette famille. Ce profil type est réutilisé par la suite dans la représentation graphique des PS afin de déterminer à quelle tendance appartiennent les réflecteurs PS des bâtiments. Notez la présence de déplacements positifs sous forme de pic en décembre 1996, en décembre 1997, en juillet 1998, en février 1999, septembre 1999 et enfin février 2000. Ces périodes correspondent aux recharges de la nappe sous jacente qui intervient un à deux mois après les premières précipitations efficaces. **La courbe rouge à la Figure 77 est un profil PS de référence représentant la fluctuation du sol hors influence de la végétation, noté PRSol.**

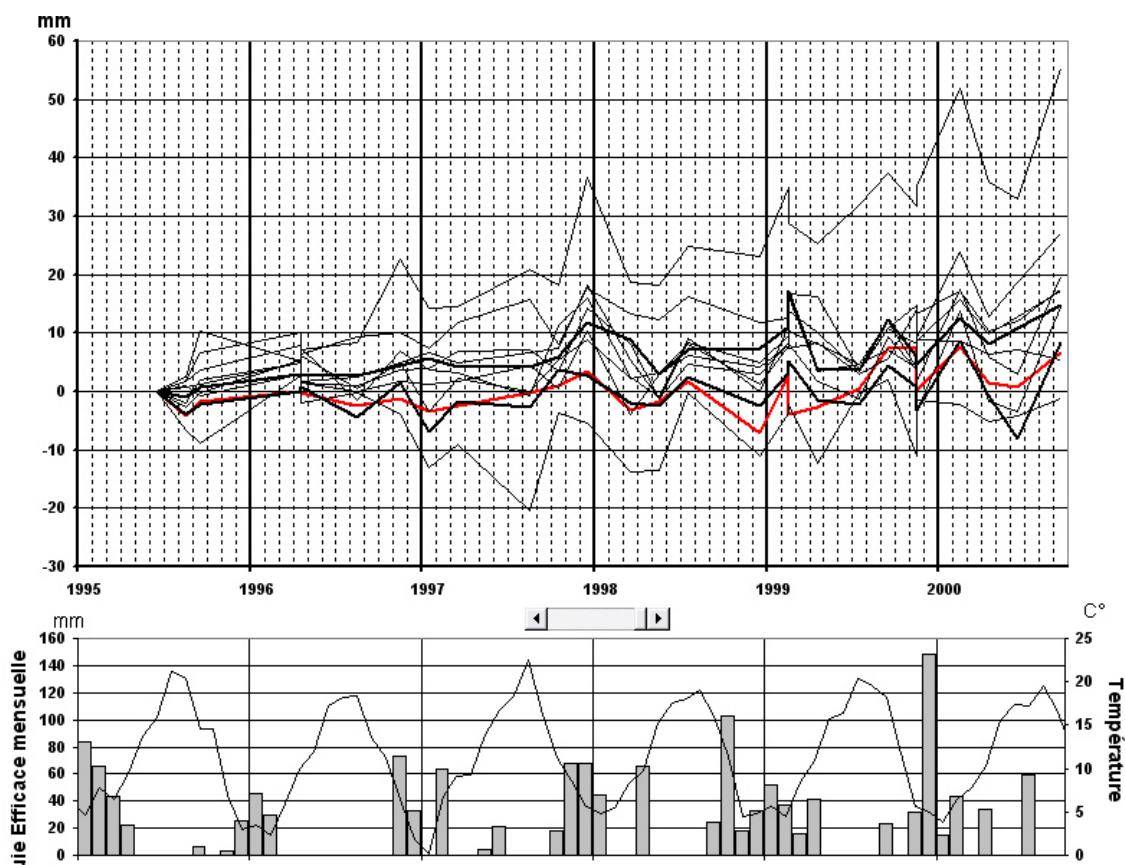


Figure 77 : Regroupement des points homologues de type FID 296, famille de points PS référence sol « PRSol » soumis au RGA sans l'influence de la végétation ».

La courbe rouge est un profil sélectionné parmi cette famille de réflecteurs homologues qui sert de référence à l'analyse différentielle des profils PS des bâtiments. Notez que l'amplitude de la courbe rouge est la plus faible parmi les différents tracés avec une moyenne de $\pm 5\text{mm}$. Cette courbe a aussi la vitesse linéaire la plus faible en valeur absolue. Enfin notez les similitudes entre les courbes noires pour des déplacements positif sous forme de pic bien corrélés mais notez aussi des disparité pour les déplacements négatifs, les creux des courbes n'étant pas rigoureusement identiques : les tassements sont non homogènes contrairement au retour à l'équilibre de l'humidité des sol.

La cartographie de ces deux familles présentée à la Figure 78 montre une bonne corrélation entre la répartition des PS de type PRVeg avec l'influence de la végétation. De même une bonne corrélation est observée entre les PS de type PRSol et l'absence d'influence de la végétation sauf dans la partie Sud de la zone où affleurent les roches de l'éocène supérieur E_{7b} . Il apparaît donc déjà à cette étape de l'analyse que les quatre quartiers inférieurs de la zone d'intérêt seront à analyser séparément lors du dépouillement des mesures PS. Cette cartographie souligne aussi le lien entre le degré de déformation est la proximité des profils PS de type PRVeg qui montrent nettement plus de cas de maison fortement déformé. Cette hypothèse sera à confirmer lors de la synthèse des résultats statistiques de l'analyse différentielle des PS.

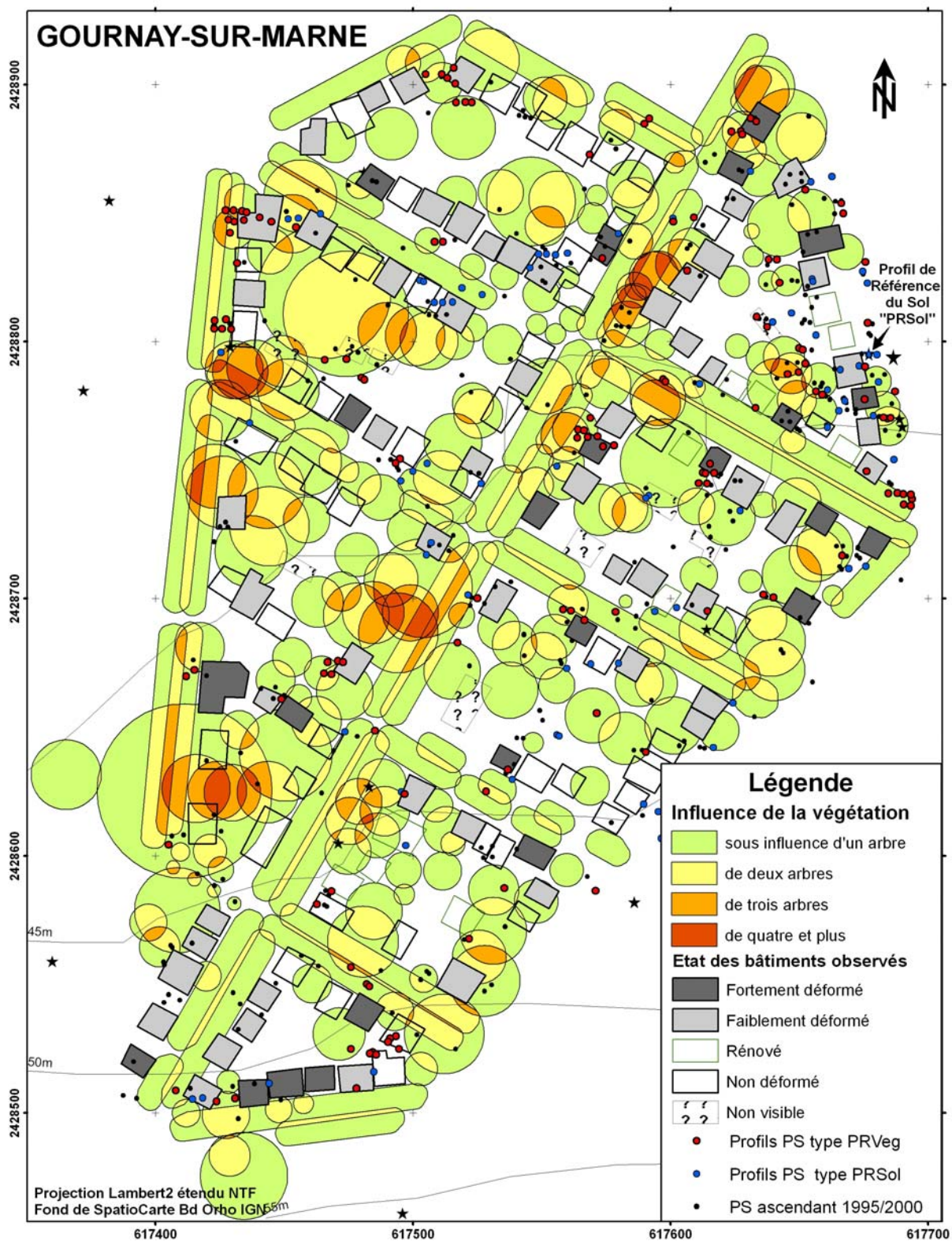


Figure 78 : Répartition des familles de points PS homologues, comparée à l'influence théorique de la végétation arborée et comparé aux déformations observées sur les bâtis.

Notez la relation entre le positionnement des profils PS « PRVeg » et les zones d'influence de la végétation. De même notez l'étroite relation entre le positionnement des profils PS « PRSol » et les zones hors influence de la végétation.

2.4.2. L'analyse différentielle

Le comportement général des sols soumis au RGA sous influence et hors influence de la végétation est un résultat majeur dans l'analyse des différents profils PS des bâtiments : ce sont ces profils PS de référence qui permettent de décrypter les profils PS des bâtiments examinés. Connaissant la nature des réflecteurs visualisés sur l'orthophotographie aérienne de l'IGN, on peut ainsi réaliser une étude différentielle du comportement des réflecteurs des bâtiments soumis à des déplacements de type RGA en fonction de leur degré de déformation observée mais aussi en fonction de leur proximité à la végétation. Plus précisément, il s'agit d'examiner si les réflecteurs permanents des bâtiments réagissent de manière solidaire à la sollicitation du sol et s'ils présentent entre eux une même tendance. Tout écart entre profil peut être interprété comme de la déformation : il peut s'agir d'une rupture dans le cas d'une forte amplitude de déplacement ($>10\text{mm}$) ou soit un tassement différentielle si le phénomène est plus progressif sur de longues périodes pluri mensuelle.

Pour réaliser cette analyse différentielle, on examine les réflecteurs permanents appartenant à chaque bâtiment, que l'on numérote sous forme de station. Plus le nombre de réflecteurs est important, plus il est simple d'apprécier les déplacements des différents coins d'un même bâtiment. La carte de la Figure 79 montre la position et le numéro de chaque station, tout en rappelant les déformations observées sur le bâti ainsi que l'influence théorique relative de la végétation arborée. Pour l'étude de Gournay-sur-Marne, on compte 9 quartiers comptant 155 bâtiments, dont 66 bâtiments qui ont pu être décrits par les mesures PS. Le plus souvent on dispose d'un seul réflecteur à analyser (32 cas soit 48,5% des cas), quelque fois deux réflecteurs (25 cas) et rarement avec trois réflecteurs (5 cas). Les bâtiments sont donc suivis dans 42,5% des cas par la méthode interférométrie PS, mais lorsqu'ils le sont, seule une petite moitié est suffisamment bien documentée par les réflecteurs pour permettre une description détaillée du comportement du bâti au cours du temps.

Ainsi, selon le nombre de réflecteurs disponibles, il est possible d'avoir plus d'une figure par station afin de détailler précisément au cas par cas le comportement du bâtiment et de ses environs immédiats. Chaque figure présente trois profils PS au maximum pour éviter les surcharges graphiques avec si possible une courbe de référence du Sol pour souligner l'influence du RGA. Cette méthode permet une analyse complète des mesures physiques de déplacement PSI tout en prenant en compte les facteurs environnants et les données recueillies sur le terrain. Les premiers cas examinés sont détaillés précisément pour expliciter la méthode, les cas suivant étant présentés plus synthétiquement pour présenter la totalité des mesures.



Figure 79 : Carte de localisation des réflecteurs PS.

Cette carte de synthèse localise les réflecteurs PS (points noirs et rouges) ainsi que les numéros des stations des pavillons étudiés. L'influence théorique de la végétation arborée et l'état des bâtiments observés lors de la visite terrain du 2 et 3 juin 2009 sont rappelés dans ce document de synthèse. Notez l'emplacement privilégié des PS ayant un comportement type RGA (point rouge) dans l'aire d'influence de la végétation. Les courbes de niveaux issues de la matrice topographique de la BdAlti© IGN permettent d'apprécier la pente orientée vers le nord. Enfin, notez l'emplacement de la référence locale utilisée pour l'analyse des PS.

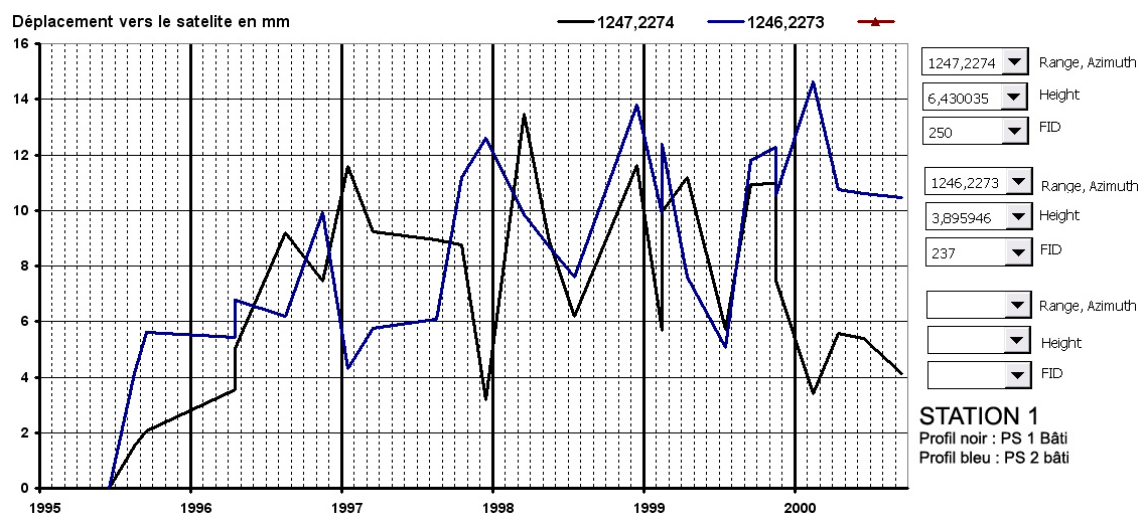


Figure 80 : Deux profils PS1 et PS2 d'un bâtiment observé déformé et sous l'influence de la végétation.

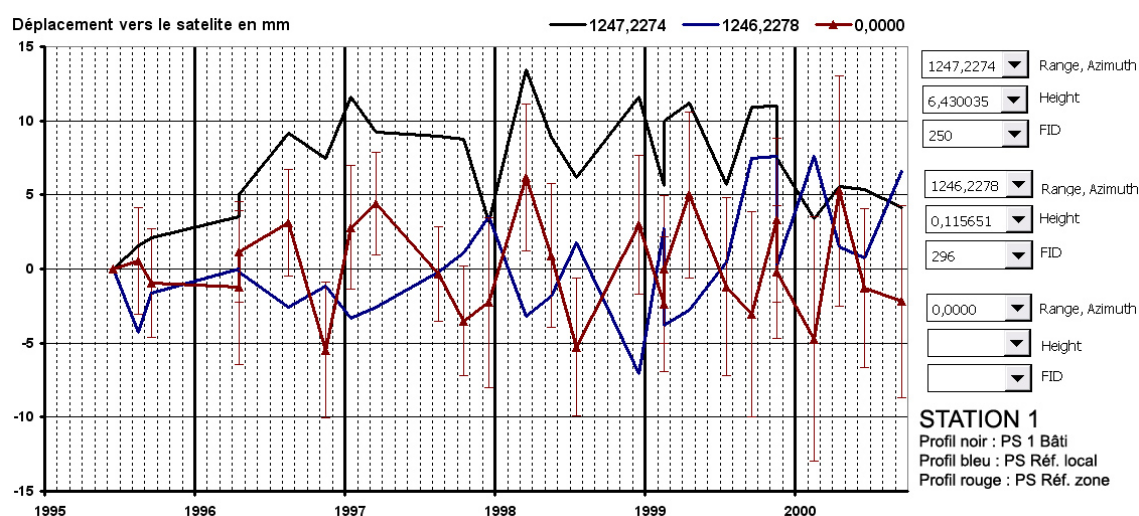


Figure 81 : Profil PS1 (courbe en noir) comparé aux références PS du Sol influencé par la végétation (courbe rouge) et non influencé par la végétation (courbe bleue).

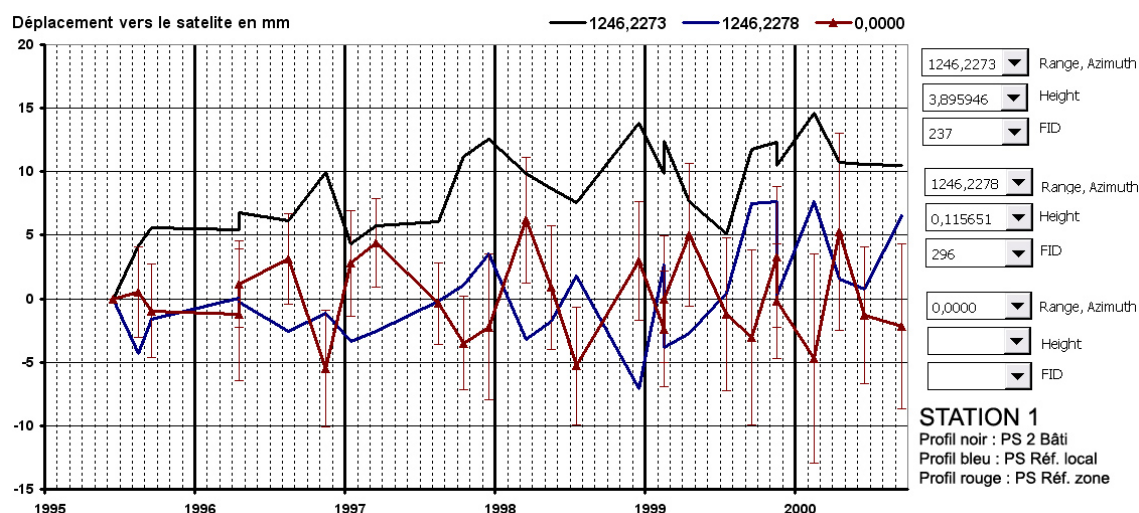


Figure 82 : Profil PS2 (courbe en noir) comparé aux références PS du Sol influencé par la végétation (courbe rouge) et non influencé par la végétation (courbe bleue).

La Figure 80 ci-dessus montre deux profils PS (courbe noire et bleue) d'un pavillon reconnu sinistré lors d'une reconnaissance de Catastrophe Naturelle en 2003, observé sur le terrain comme étant fortement déformé. Le pavillon est pour moitié sous une forte influence

de la végétation. La courbe en noir représente le réflecteur PS1 du bâtiment dans l'influence de la végétation tandis que la courbe bleue est le réflecteur PS2 du bâti situé dans la partie non influencée par la végétation. Ces deux profils présentent des tendances similaires de déplacement avec du maximum en fin d'année 1997, 1998 et 1999. Toutefois des disparités peuvent être observées. Celles-ci peuvent être expliquées grâce aux profils de référence du sol.

Le profil PS1 de la Figure 80 est comparé aux références à la Figure 81 afin de comprendre l'origine de l'influence sur cette partie du bâtiment. On observe une bonne corrélation de la courbe PS1 (en noir) avec le profil sol influencé par la végétation (courbe rouge) à la Figure 81. Cette partie du pavillon est effectivement sous l'influence de la végétation comme le montre le document d'influence théorique de la végétation à la Figure 75.

Le profil PS2 de la Figure 80 est comparé aux références à la Figure 82. On observe une bonne corrélation entre le profil PS du bâtiment (courbe en noir) avec la référence locale du sol non soumis à l'influence de la végétation (courbe bleue) sauf en 1999 où le profil PS sol influencé par la végétation (courbe rouge) est visible dans le profil PS du bâtiment.

Donc ce bâtiment est sous l'influence de la végétation d'un côté et sans influence de l'autre sur un terrain soumis à des déplacements de type RGA. Cet exemple montre bien un comportement asymétrique du bâtiment qui se fissure sous les effets d'un tassement différentiel.

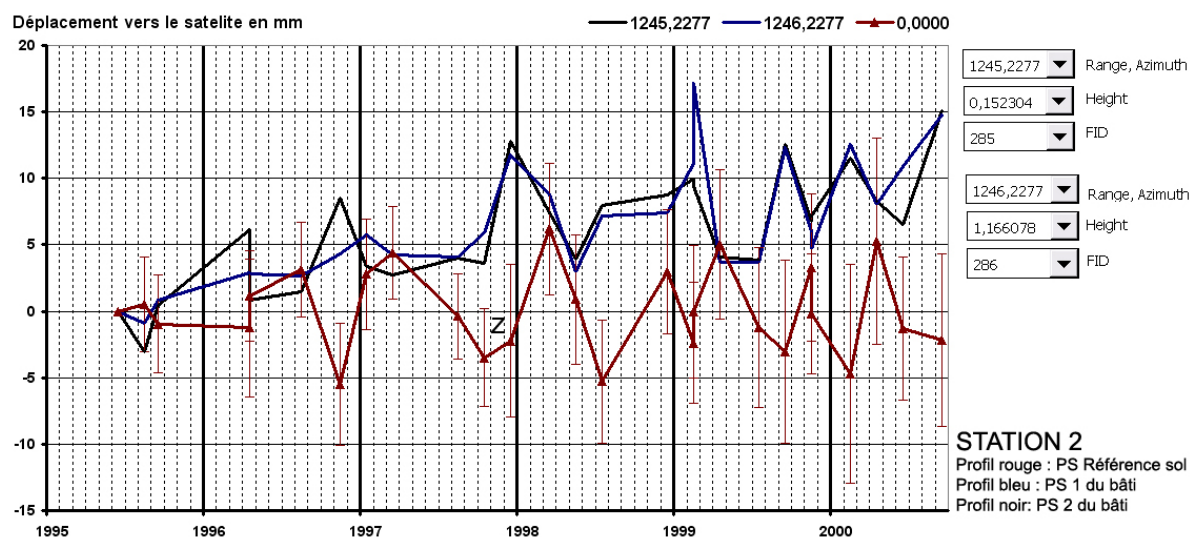


Figure 83 : Deux profils PSI d'un bâtiment déformé (courbe noire et bleue) soumis au RGA.

Les courbes bleue et noire montrent le comportement de deux réflecteurs appartenant à une même maison, ce qui permet d'apprécier l'exactitude de l'information de déplacement obtenue par la méthode PSI. Le bâtiment est reconnu sinistré (CatNat) et a été observé comme faiblement déformé lors de la sortie terrain. La courbe rouge rappelle le comportement général du sol soumis au RGA. On constate une corrélation négative entre le comportement des réflecteurs de la cible étudiée (bâtiment peu déformé) avec la courbe de référence du sol

du quartier. Une deuxième interprétation de cette absence de corrélation est un déphasage dans la réponse du sol d'une période de trois mois. Il est donc nécessaire de regarder de plus près le comportement du sol à proximité de l'ouvrage étudié (figure suivante).

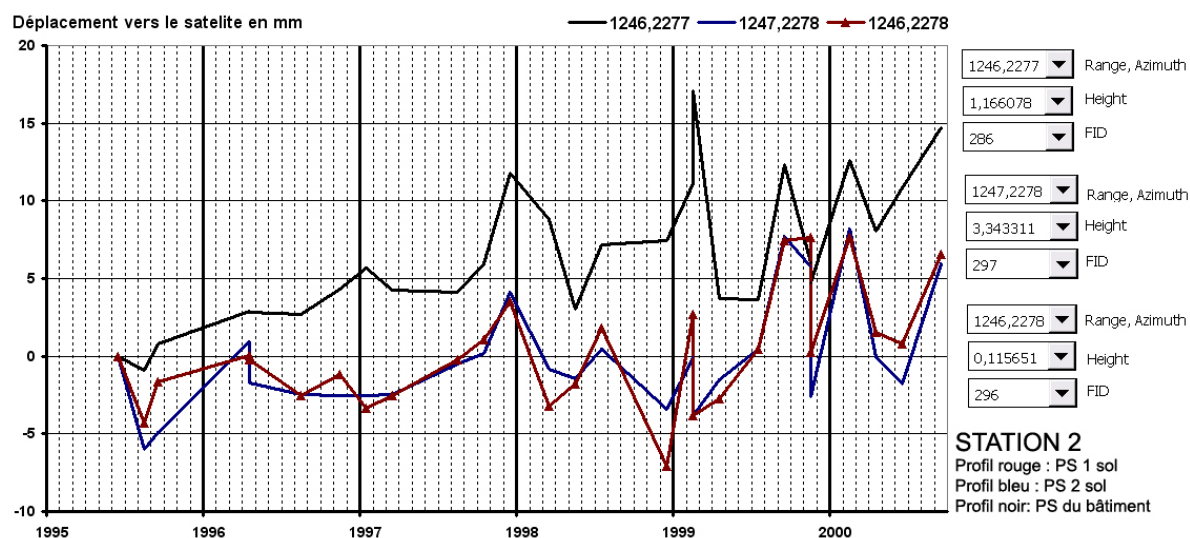


Figure 84 : Profil PSI d'un bâtiment légèrement déformé (courbe en noir) soumis au RGA comparé aux profils de sol à proximité (courbe bleue et rouge).

La Figure 84 montre le comportement d'un des deux réflecteurs appartenant à un bâtiment faiblement déformé (courbe noire) comparé à deux profils de sol (courbe rouge et bleu) à proximité de la maison. Cette figure met mieux en valeur le profil PS du bâtiment grâce à la juxtaposition des profils PS de référence de sol locaux. On peut ainsi constater la bonne concordance entre les variations de ces profils sauf à la fin de l'année 1998, qui est certainement la signature d'un événement à l'origine des légères déformations. Le choix d'une référence locale (si possible) est ainsi la manière la plus satisfaisante de discuter en terme de déplacement. Les deux Figure 83 et Figure 84 montrent que localement le sol n'a pas le même comportement que la courbe des sols de référence de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, comportement d'un sol soumis au RGA avec l'influence de la végétation. Cela est expliqué par la faible présence de végétation à proximité dans le cas présent (CF carte synthèse de position PS).

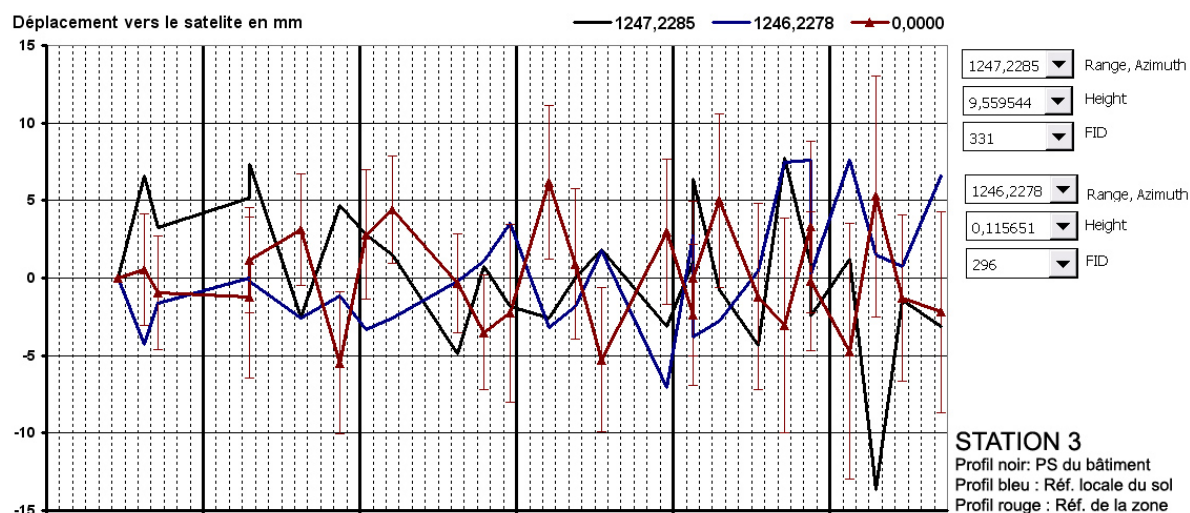


Figure 85 : Profil PS (courbe en noir) comparé à la référence PS locale (courbe en bleu) et comparé à la références PS de la zone (courbe en rouge).

Le profil PS en courbe en noir à la Figure 85 est comparé aux profils PS de référence du sol disponibles. La maison étudiée ici a été bâtie après 2003 et n'est donc pas analysable par les PS entre 1995 et 2001. Sur le terrain il s'agit d'un pavillon rénové et qui est suffisamment éloigné de la végétation arborée. La corrélation entre le profil PS du sol à l'emplacement de la maison est en accord avec le profil PS de référence locale sauf sur la période de avril-mai 2000 avec un déplacement de -15 mm en mai 2000.

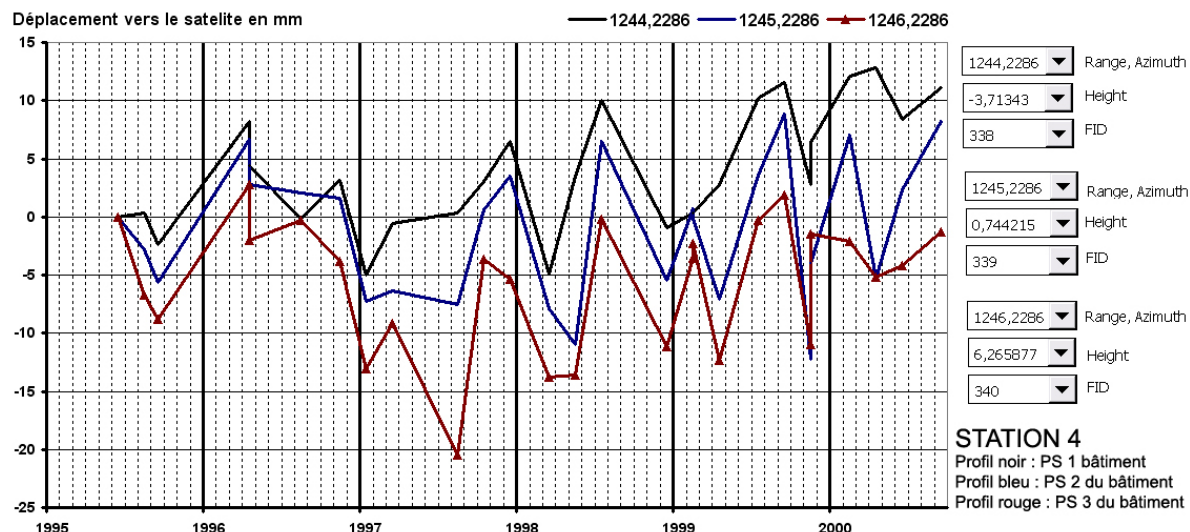


Figure 86 : Profils PS1 (courbe en noir), PS2 (courbe en bleu) et PS3 (courbe rouge) d'un même bâtiment observé légèrement déformé.

La Figure 86 montre trois profils PS décrivant des déplacements de réflecteurs appartenant à la même maison qui a été observée faiblement déformée lors de la mission terrain. Ce bâtiment est en limite d'influence de la végétation arborée mais reste à une distance suffisante. On note en période estivale de 1997 des écarts importants de l'ordre de 20 mm, puis en janvier 1999 un écart de l'ordre de 5 mm et enfin en janvier 2000 un écart de

10mm. Les signes de tassements différentiels de 1999 et 2000 sont attribués à l'évènement de 1997.

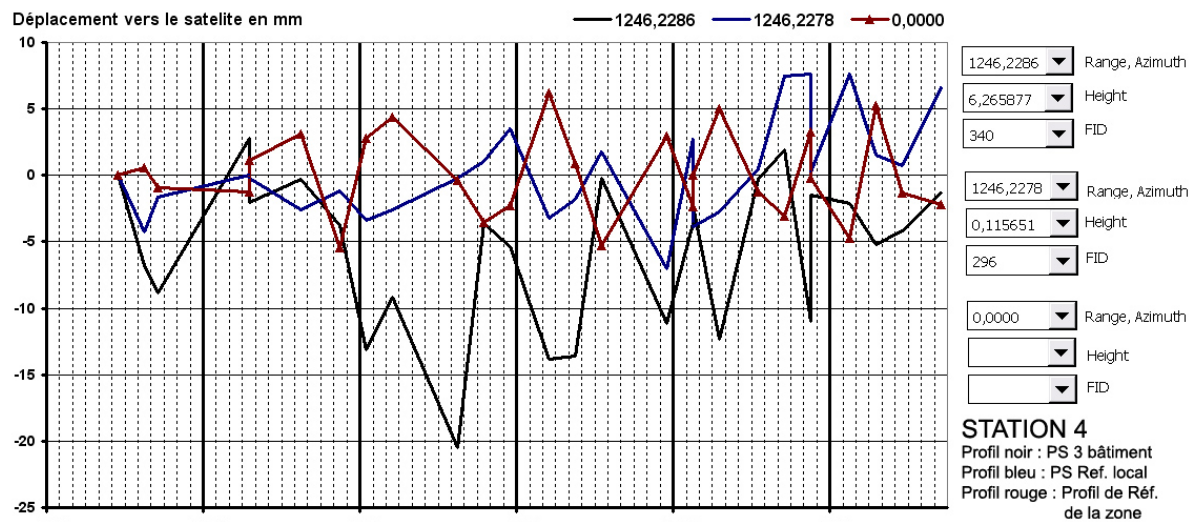


Figure 87 : Profil PS3 d'une maison déformée (courbe en noir) comparé au profil PS du sol à proximité du pavillon (courbe bleue) et comparé au profil PS de référence d'un sol soumis au RGA avec influence de la végétation (courbe rouge).

La Figure 87 montre l'analyse différentielle effectuée entre le comportement des PS du bâtiment (PS3 de la Figure 86) avec les références PS du sol disponibles. Le comportement des profils PS du bâtiment correspond au profil PS sol de référence locale. Les déplacements du bâtiment sont globalement solidaires avec celui du sol. Seule la période de mars/août 1997 montre un écart important de 20mm entre profils. Cette analyse révèle qu'il n'y a pas d'influence de la végétation, car le comportement des profils PS du bâtiment ne correspond pas au profil PS de référence d'un sol influencé par la végétation (courbe rouge Figure 86). Ceci est en accord avec les observations de terrain.

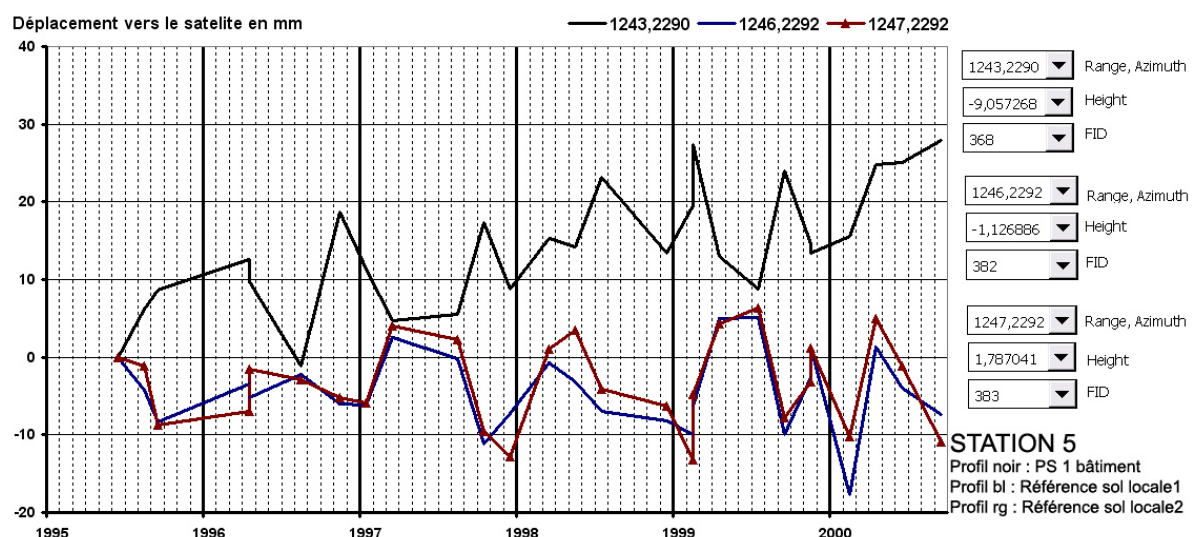


Figure 88 : Profil PS d'une maison déformée (courbe en noir) comparée aux profils PS du sol à proximité du pavillon (courbe bleue et rouge).

La Figure 88 présente le profil PS d'une maison déformée (courbe en noir) comparée aux profils PS du sol à proximité du pavillon. Ce pavillon est pour moitié dans l'aire d'influence de la végétation. Ce pavillon est peu documenté par les PS, un seul profil PS ne

permettant pas d'apprécier les déplacements respectifs des différents angles de la maison. Le profil PS de la résidence privée n'est pas corrélé avec le comportement des profils PS du sol à proximité. Une comparaison avec les autres références du sol est nécessaire (voir suite ci-dessous).

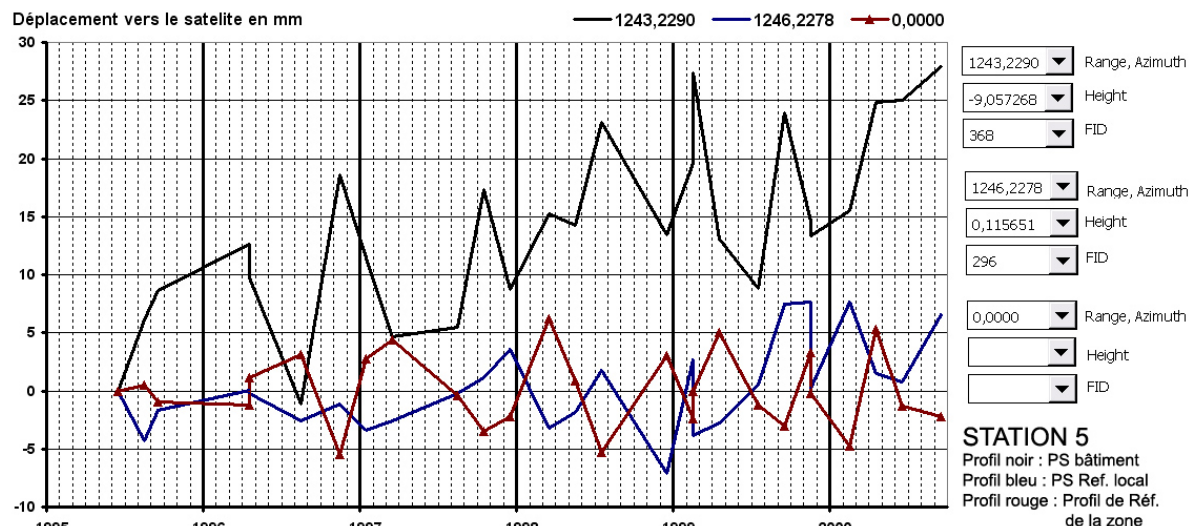


Figure 89 : Profil PS d'une maison fortement déformée (courbe en noir) comparée aux profils PS de référence du sol local (courbe bleue) et de la zone (rouge).

L'analyse des profils de la Figure 89 révèle l'adéquation entre le profil PS du bâtiment (courbe noire) avec celui de la référence locale (courbe bleue) sauf pour les périodes de sécheresse géotechnique d'août 1996 et août 1997. Le pavillon n'est donc que très peu influencé par des déplacements liés à la présence de végétation, sauf toutefois en mars 1998 avec un léger pic coïncidant avec le profil PS du sol de référence de la zone (courbe rouge, Figure 89). Enfin on remarque que les profils PS de référence situés à proximité (courbe bleue et rouge Figure 88) sont corrélés avec le profil moyen d'influence de la végétation (courbe rouge, Figure 89), ce qui montre bien que l'environnement direct de la maison est soumis au RGA avec influence de la végétation arborée.

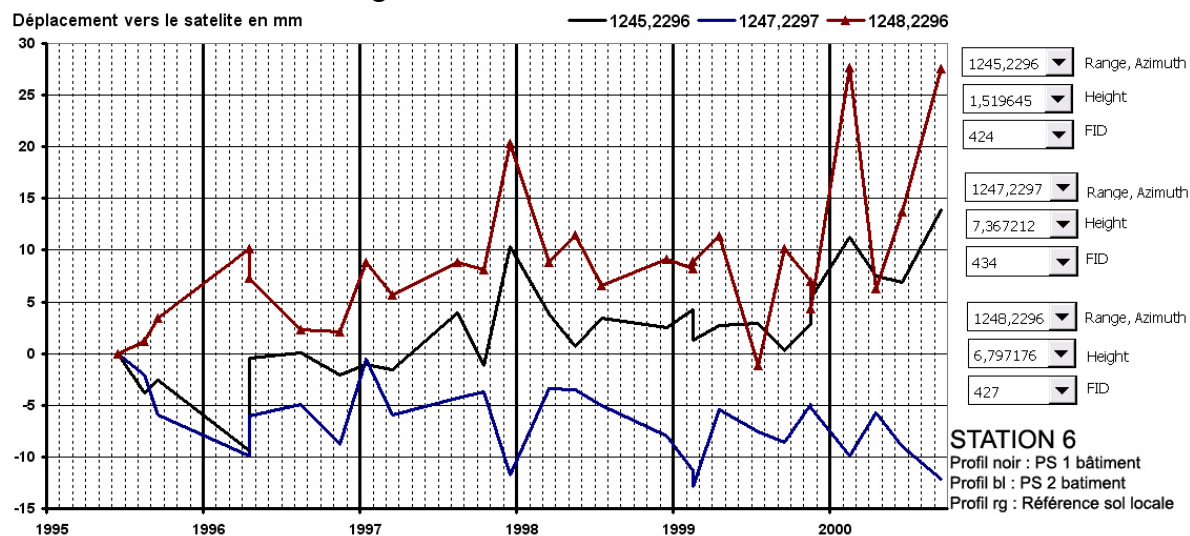


Figure 90 : Deux Profils PS d'une maison observée déformée (courbe noire et bleue) comparée à une référence locale du sol (courbe rouge).

Le cas suivant détaille à la Figure 90 montre deux profils PS différents pour un même bâtiment, comparé à un profil PS du sol à proximité. Cette propriété est légèrement déformée et elle est à distance raisonnable de la végétation. L'analyse comparé des profils PS du pavillon et du profil PS du sol révèle qu'en décembre 1997, un gonflement supposé du sol à solliciter une partie de la propriété (courbe noire) tandis que l'autre partie de la maison s'est affaissée (courbe bleu). L'écart entre les mouvements relatifs dans l'axe de visée du satellite est de 16 mm. Enfin, après 1999, la courbe de référence du sol est difficile à interpréter, les profils PS appartenant à la maison étant décorrélés avec le profil PS sol référence à proximité.

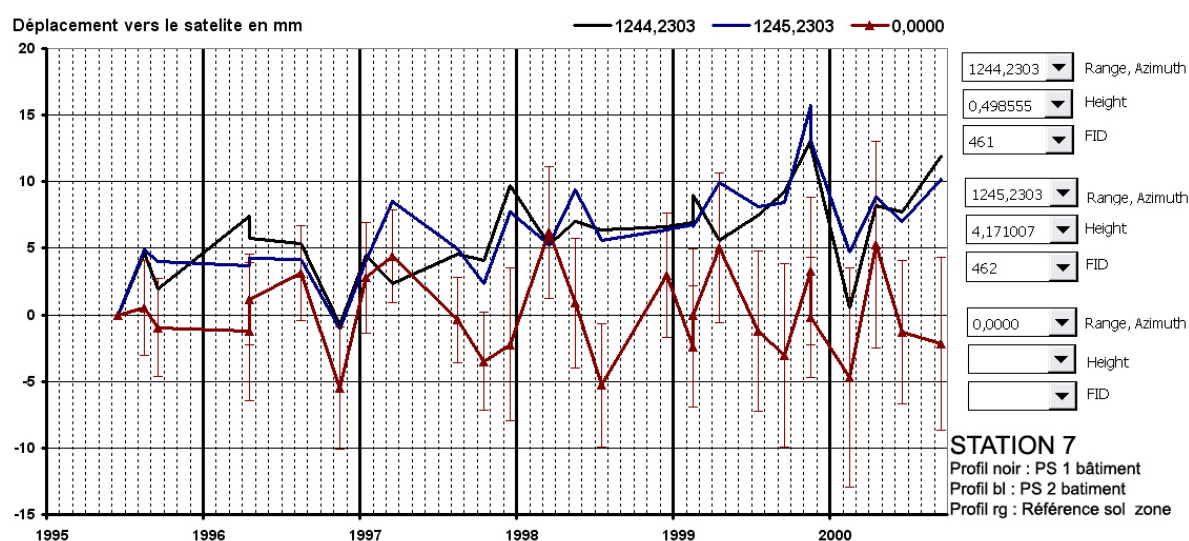


Figure 91 : Deux Profils PS d'une maison sinistrée (courbe noire et bleue) comparé au profil de référence du sol de la zone d'étude (courbe rouge).

A la Figure 91 deux Profils PS d'une maison sinistrée (courbe noire et bleue) sont comparé au profil de référence du sol de la zone d'étude (courbe rouge). La propriété privée se trouve dans une zone soumise à l'influence de la végétation. Des fissurations ont pu être observées lors du terrain. L'analyse PS révèle un léger écart entre profils PS (courbe noire et bleue) en mars 1997, suite à un retrait du sol en décembre 1996 de 8mm. Il faut attendre janvier 2000 pour observer un nouveau retrait du sol de 12mm.

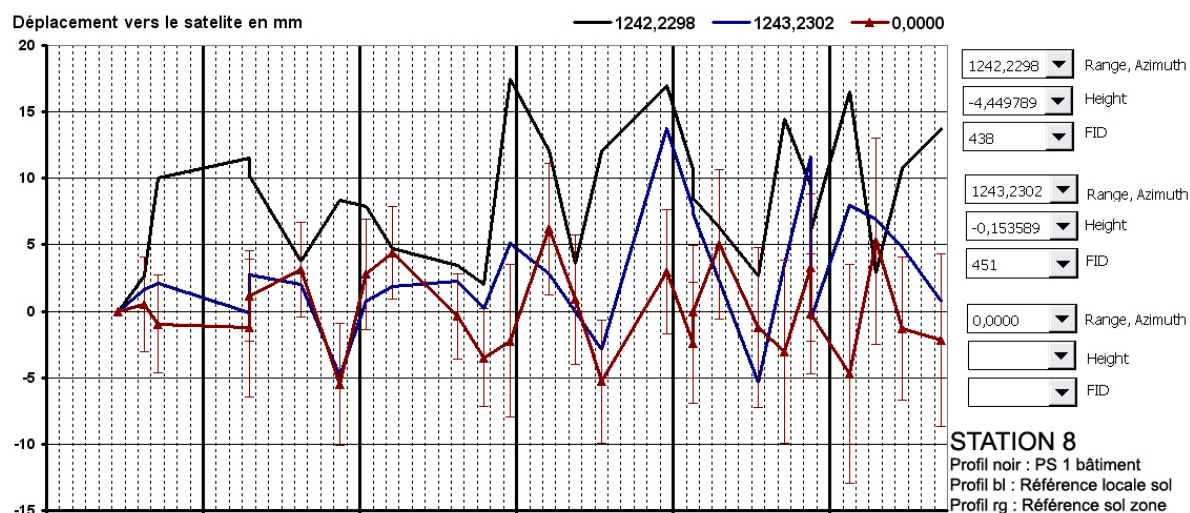


Figure 92 : Profil PS d'un pavillon observé déformé (courbe en noir) comparé au PS sol de référence local (courbe en bleu) et au PS sol de référence de la zone (courbe en rouge).

Le pavillon détaillé par le profil PS à la Figure 92 (courbe noire) est observé déformé dans l'aire d'influence de la végétation arborée. Le profil PS du bâtiment (courbe noire) a une bonne concordance avec les profils PS de référence du sol (local et de la zone) avec toutefois un écart en 1996/1997 période de sécheresse géotechnique. L'amplitude des déplacements du profil PS sol de référence locale est d'une amplitude similaire à celui des déplacements mesurés sur le réflecteur du bâtiment sauf à la fin de l'année 1998.

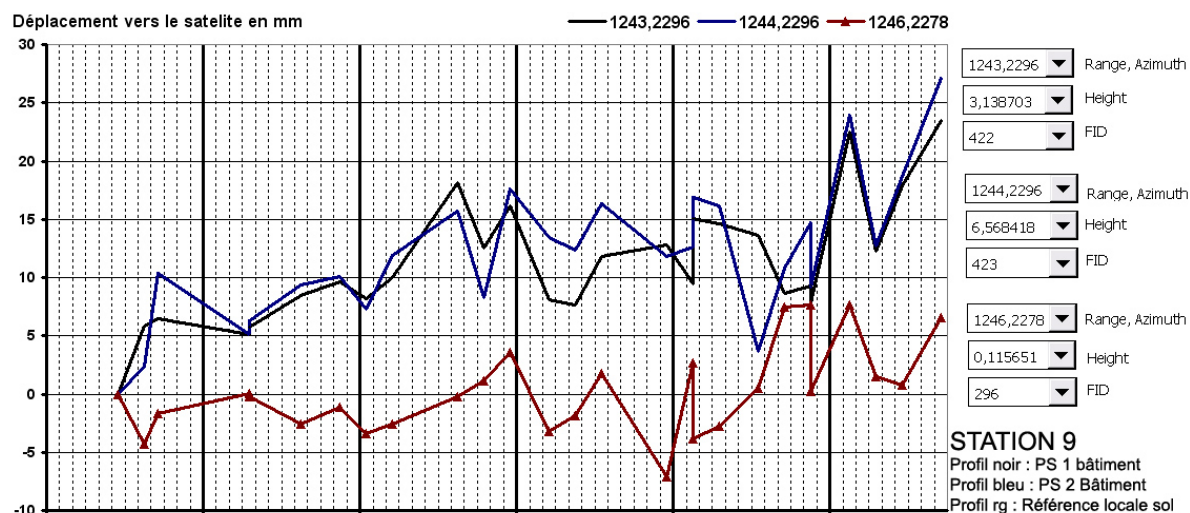


Figure 93 : Deux Profils PS d'une maison sinistrée (courbe noire et bleue) comparé au profil de référence locale du sol (courbe rouge).

La Figure 93 présente est un cas d'école dans l'interprétation des profils PS. Grâce à deux réflecteurs disposés sur le bâtiment considéré, il est possible de reconstruire l'historique de déformation du bâtiment à partir de la référence locale PS. Une soustraction des deux modèles $PS_{\text{bâtiment}} / PS_{\text{sol référence}}$ permet de déterminer une désolidarisation en juillet/août 1997 des deux profils, puis des dommages certainement tardifs lors du gonflement à la période

humide de mars 1998. Il faut attendre un an, c'est à dire mi-année 1999 pour retrouver des comportements similaires et compatibles entre la référence PS du sol et les PS du bâtiment. Les observations effectuées sur le terrain font état d'un bâtiment modérément endommagé par le RGA, mais il n'est pas exclu qu'il y a eu des travaux de remise en état avant le contrôle terrain. Cette interprétation est facilitée par l'absence d'influence de végétation, le modèle de profil PS pour la zone (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) n'intervient pas.

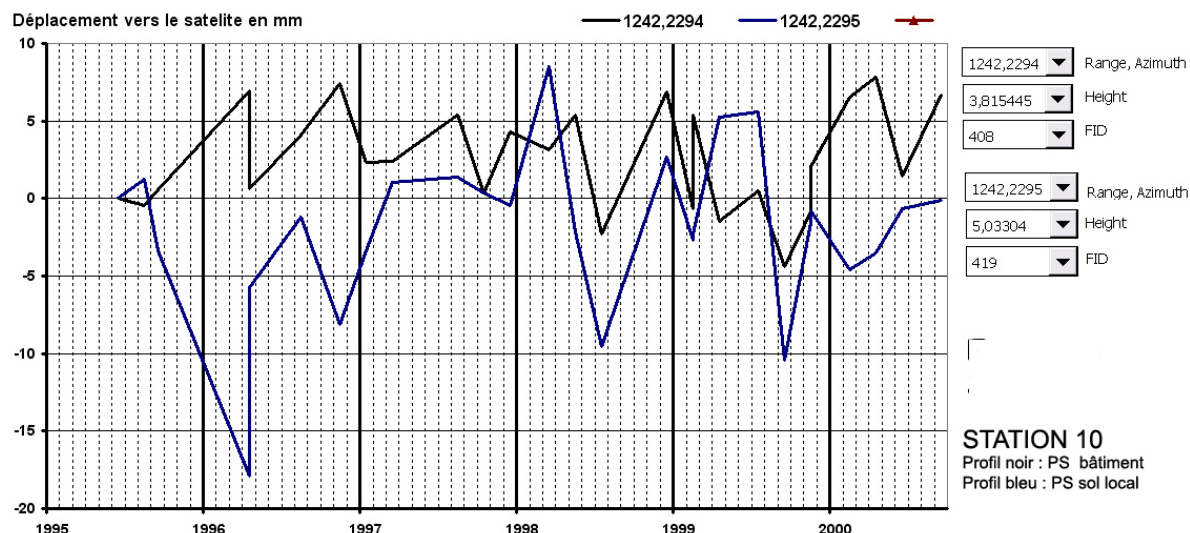


Figure 94: Profil PS d'un bâtiment non déformé (courbe en noir) comparé à un profil PS sol d'une référence locale (courbe bleue).

Le profil PS du bâtiment à la Figure 94 en courbe noire montre des variations de $\pm 3\text{mm}$ jusqu'en 1999. Il s'agit d'un bâtiment non déformé -ou rénové-, placé à la limite d'influence de la végétation mais à une distance suffisamment importante (supérieur à une fois la hauteur de l'arbre). D'avril à octobre 1999, on peut observer un déplacement négatif, puis positif à la fin de cette même année ; ces déplacements sont en accord avec le profil PS de la référence locale (courbe bleue). Cependant ces variations sont difficiles à décrypter avec un seul profil pour le bâtiment et la seule référence locale montre des déplacements atypiques par rapport aux autres références PS « sol » en particulier pour la période 1995/1996.

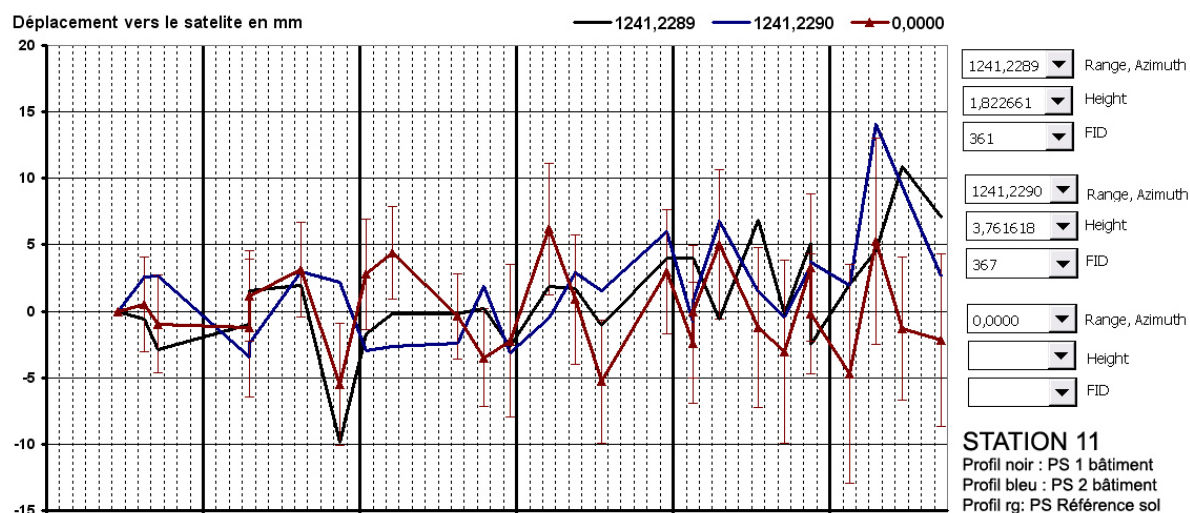


Figure 95 : Deux profils PS d'un bâtiment modérément déformé (courbe noire et bleu) comparés avec le profil PS de référence de la zone (courbe rouge).

La Figure 95 montre le cas d'un pavillon décrit par deux profils PS (courbe bleu et noir). Ce pavillon est pour moitié sous une forte influence de la végétation, on juxtapose donc à ces profils PS la courbe PS « sol » de référence de la zone (courbe rouge). La visite terrain a permis d'observer des déformations modérées liées à la sécheresse géotechnique. La comparaison avec le profil PS sol de référence montre un bon accord entre les déplacements de part et d'autres. L'analyse des PS révèle un décalage de trois mois dans les déplacements PS du bâtiment mesuré par le satellite en mai-juillet 1999. La courbe bleue est celle qui est plus proche de l'influence de la végétation et montre une avance de deux mois dans les déplacements ainsi qu'une amplitude légèrement plus important de retrait gonflement. Ce tassement différentiel est certainement à l'origine des dommages observés en juin 1999.

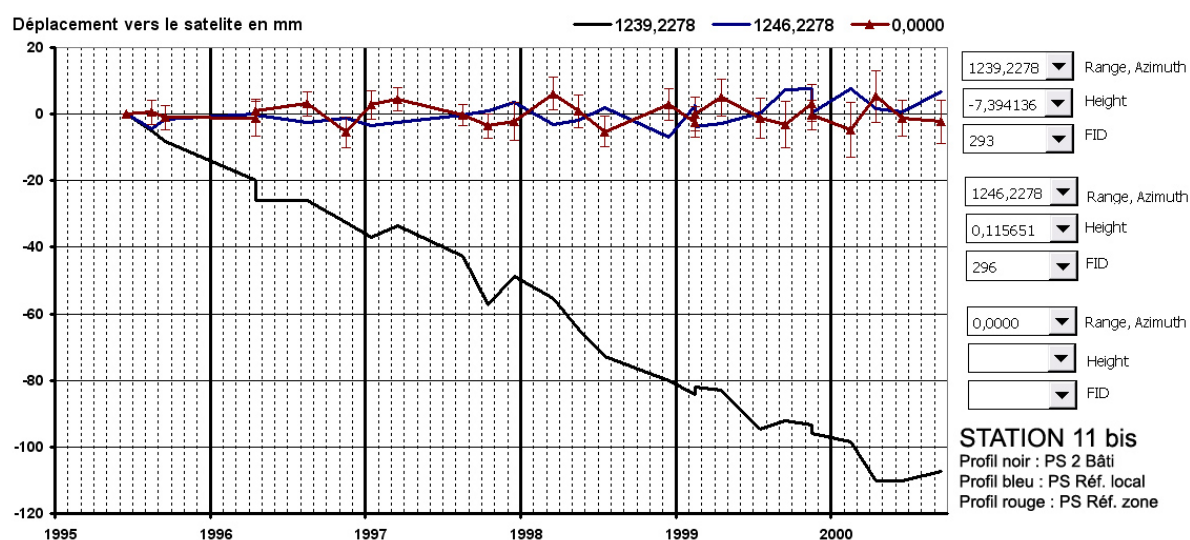


Figure 96 : Profil PS d'un bâtiment rénové et non soumis à l'influence de la végétation (courbe en noir), comparé au profil PS de référence locale (courbe bleue) et de la zone (courbe rouge).

La Figure 96 décrit un profil de PS d'un bâtiment (courbe en noir). Ce profil est marqué par un déplacement linéaire au cours du temps fortement négatif de l'ordre de -20mm

par an. Cette valeur n'est pas explicable compte tenu du contexte environnant au pavillon, il s'agit certainement d'une erreur de mesure liée à une mauvaise compensation du calcul de la chaîne de traitement PSI. Il est également difficile d'interpréter ce comportement par manque de réflecteurs PS sur le bâtiment. Remarquons toutefois des tendances similaires en 1999 entre le profil PS de référence locale (courbe en bleu) et le profil PS du bâtiment (courbe en noir). Cela est en accord avec l'absence d'influence de la végétation.

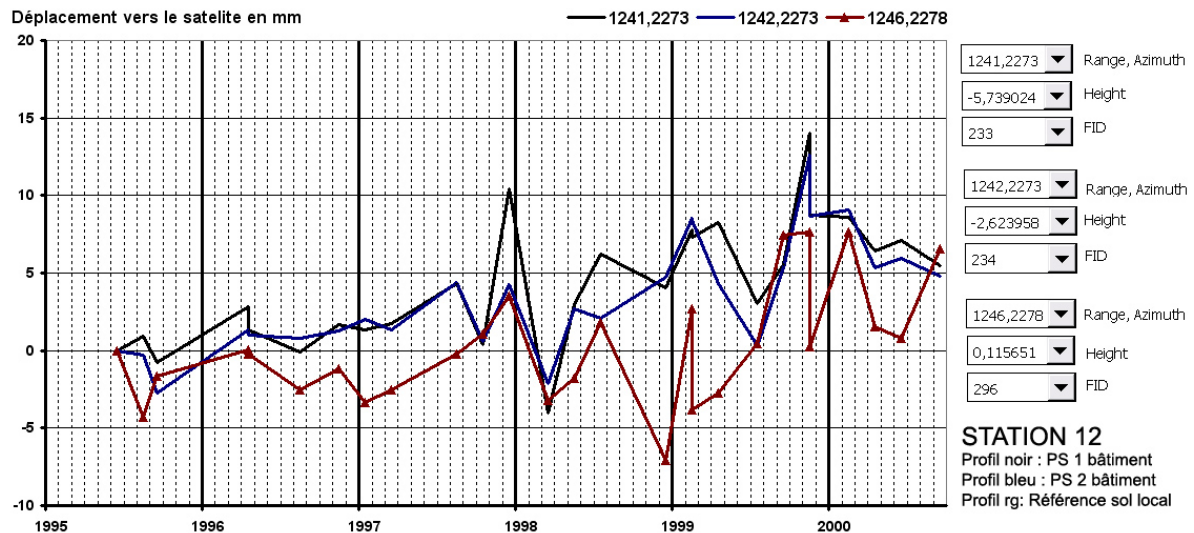


Figure 97 : Deux profils PS (courbe noire et bleue) d'un bâtiment observé déformé, soumis à l'influence de la végétation. La courbe rouge représente le profil PS de référence.

La Figure 97 décrit un même bâtiment avec deux profils PS (courbe bleue et noire). Comme dans le cas précédent, une partie du bâtiment est sous influence de la végétation et on peut observer un événement en mars 1998 de retrait qui est suivi par un décalage dans le temps des réponses PS1 et PS2 du bâtiment à la date de mars 1999. Il a été observé sur des profils PS de sol à proximité des réponses mixtes corrélés avec les PS sol de référence local et de la zone. L'analyse PS révèle donc que le terrain avoisinant le pavillon est partiellement soumis à des déplacements liés à l'influence de la végétation arborée.

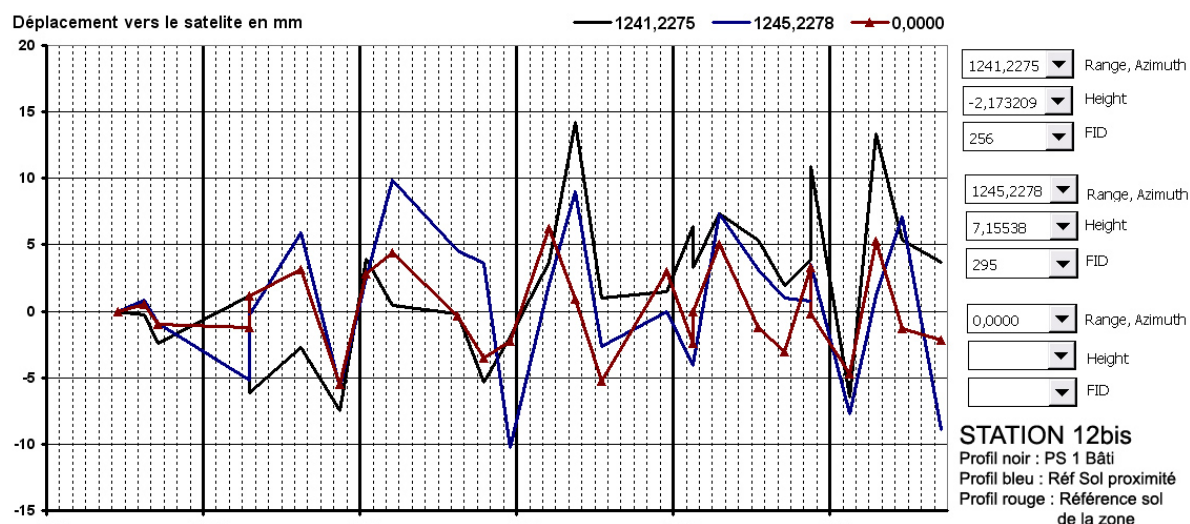


Figure 98 : Profil PS d'un bâtiment dissimulé (courbe noire) sous l'influence théorique de la végétation, comparé à un profil PS de référence sol à proximité (courbe bleue) et avec un profil PS de référence de la zone (courbe rouge).

La Figure 98 montre un profil PS (courbe noire) d'un bâtiment visiblement en bon état car rénové et dans l'aire d'influence théorique de la végétation. Son analyse révèle que son comportement est similaire à celui des profils PS d'un sol à proximité (courbe bleue) et similaire à celui du profil PS de référence d'un sol soumis à l'influence de la végétation (PS référence de la zone, courbe rouge), ce qui permet d'en déduire que les déplacements du bâtiment sont solidaires avec son support. Cependant, il y a deux arguments qui tendent à montrer que ce pavillon est déformé : (1) Ces profils de référence sont soumis à l'influence de la végétation, donc des tassements différentiels, (2) l'amplitude du déplacement mesuré dans l'axe de visée est supérieure à la valeur de 10mm, mesuré en 1998 à 19mm, ce qui est une valeur très forte pour que la rigidité du bâtiment supporte un tel déplacement.

On peut supposer que le bâtiment est déformé (pas de vérification faite à ce jour) mais nous ne pouvons pas l'affirmer avec certitude puisque nous ne disposons que d'un seul profil PS pour ce pavillon, plusieurs auraient permis de quantifier le tassement différentiel.

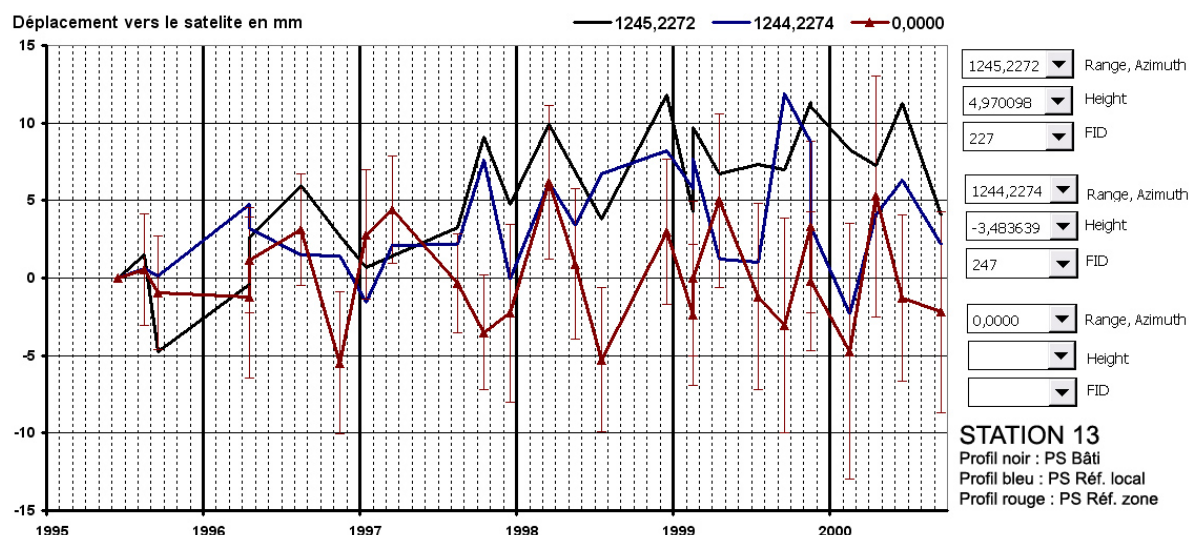


Figure 99 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire) vu non déformé et à moitié sous influence de la végétation arborée, comparé au profil PS de référence du sol à proximité du bâtiment (courbe bleu) au profil PS de référence d'un sol soumis à l'influence de la végétation (courbe rouge).

La Figure 99 montre un profil PS d'un bâtiment corrélé avec sa référence locale (courbe bleue) ce qui souligne la solidarité entre le bâtiment et son sol. La corrélation du profil Ps du bâtiment avec la référence PS de la zone n'est pas évidente sauf à partir de 1998 date à laquelle on observe des similitudes : en septembre 1996 et en fin 1999. Des similitudes sont observées avec la courbe PS de référence d'influence de la végétation (courbe rouge) sous forme de pics de courbe un peu plus prononcés ce qui est une signature des effets épisodiques de la végétation en période de post-sécheresse.

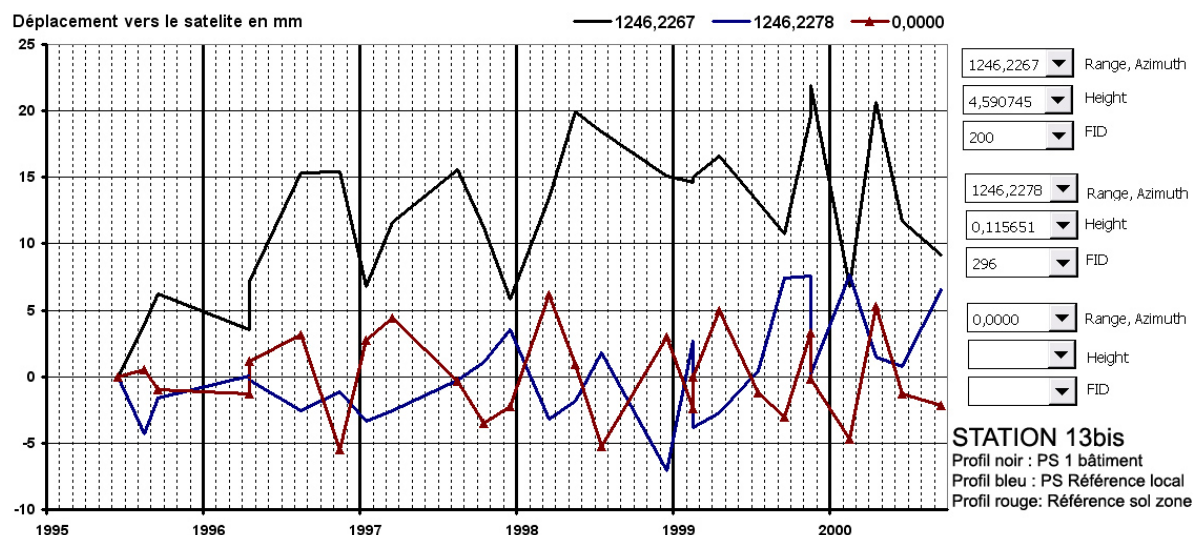


Figure 100 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire, comparé au profil PS de référence du sol local (courbe bleu) et au profil PS de référence d'un sol soumis à l'influence de la végétation arborée (courbe rouge)

La Figure 100 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) corrélé avec le profil PS de référence de la zone (courbe rouge). Le bâtiment est légèrement déformé et en bordure d'influence de la végétation du domaine public le long de la route.

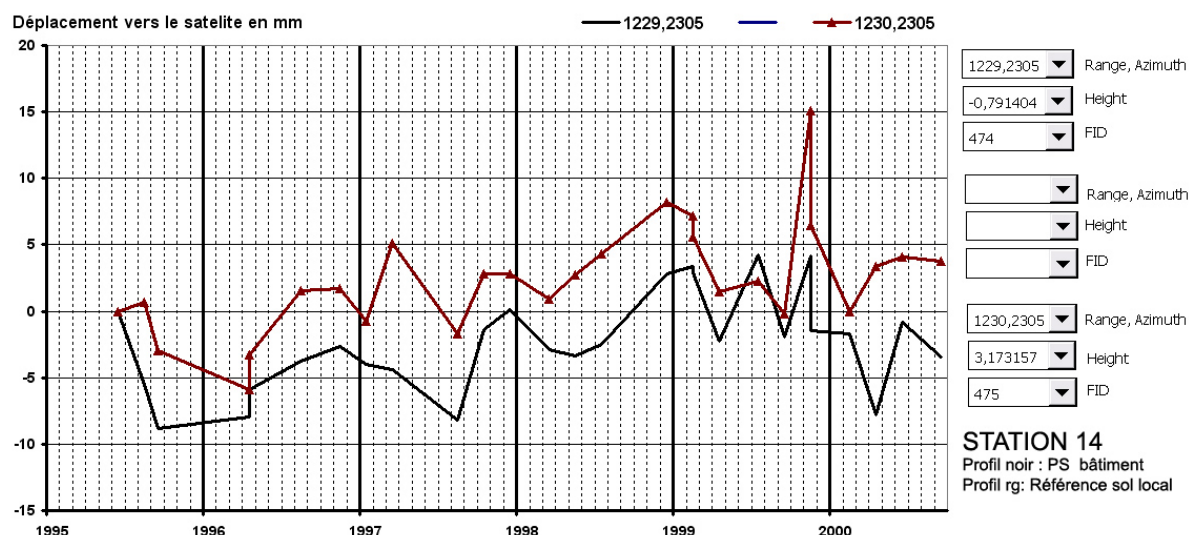


Figure 101 : Profil PS (courbe noire et bleue) d'un bâtiment observé déformé, courbe juxtaposée à un profil PS d'un point bas à proximité (courbe rouge).

La Figure 101 détaille un profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) qui est reconnu sinistré lors d'une reconnaissance de Catastrophe Naturelle par l'Etat. La forte influence de la végétation peut expliquer cette sinistralité. Cependant un seul profil PS décrivant le comportement du bâtiment ne nous permet pas d'approfondir l'historique des déplacements. On peut constater simplement que le profil PS bâti/sol semble en accord sauf pour mars 1997 et novembre 1999.

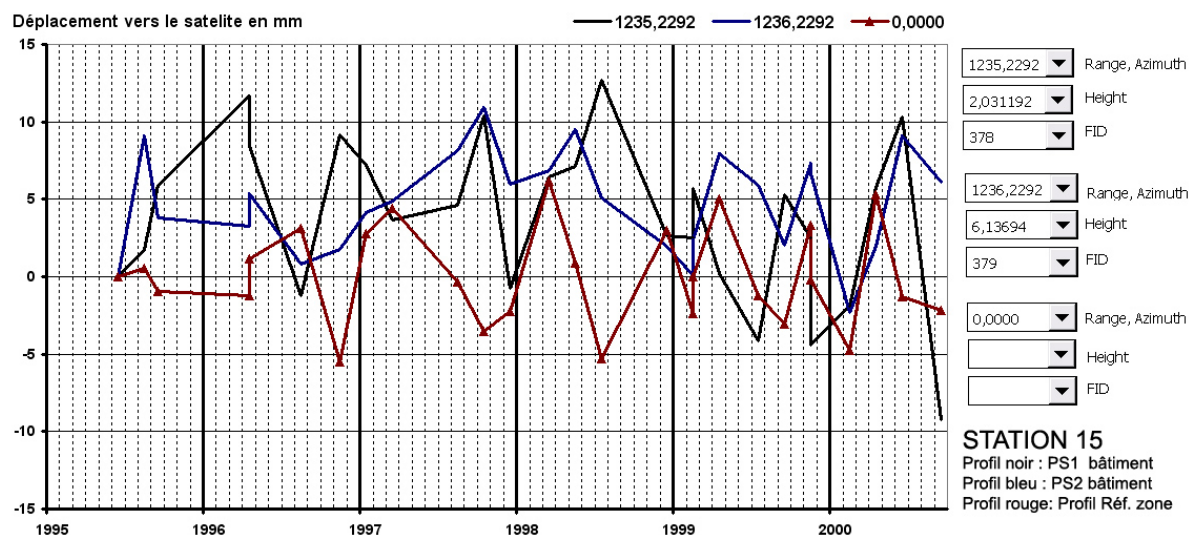


Figure 102 : Deux profils PS d'un bâtiment modérément déformé sous l'influence de la végétation.

La Figure 102 présente deux profils PS (courbe bleue et noire) pour un pavillon modérément déformé sous l'aire d'influence théorique de la végétation. La comparaison avec le profil Ps de référence de la zone montre qu'à partir de 1999 la végétation arborée influence le comportement des réflecteurs du pavillon étudié. On peut observer un décalage des signaux PS des bâtiments à partir de décembre 1997 jusqu'à fin 1999. Ces variations de déplacements sont toutefois modérées de ± 5 mm.

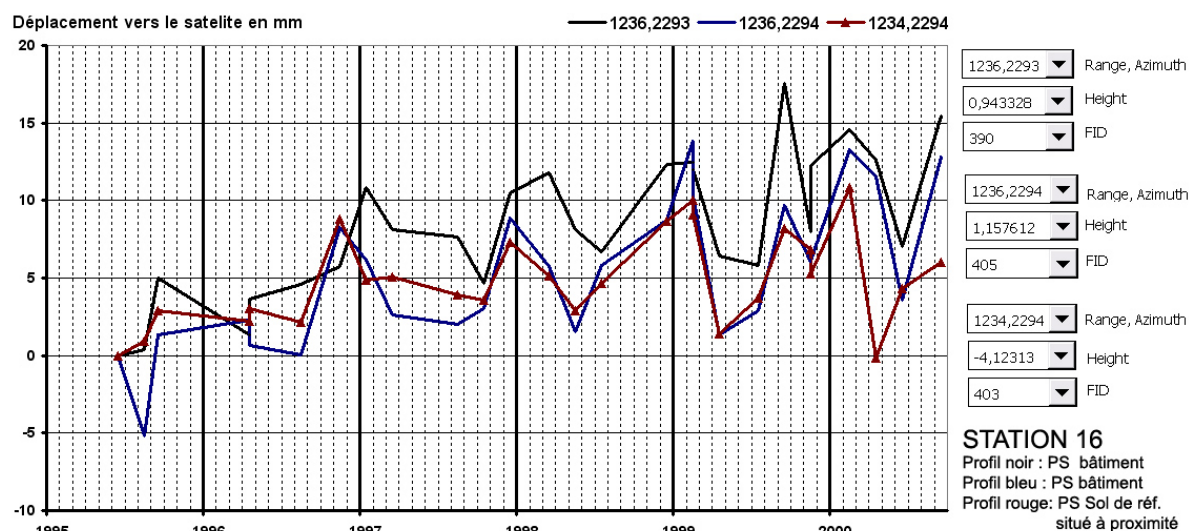


Figure 103: Deux profils PS (courbe noire et bleue) d'un bâtiment non déformé et suffisamment éloigné de l'influence de la végétation, comparé à un profil PS de sol (courbe rouge).

La Figure 103 décrit un même bâtiment avec deux profils PS (courbe bleue et noire). Il s'agit d'un pavillon non déformé, placé en limite d'influence de la végétation. Le comportement de ce bâtiment décrit par deux PS montre une régularité des déplacements positif en période humide et négatif en mars/avril de chaque année. Ce comportement n'est pas observé sur les profils de référence sol. L'amplitude des variations mesurées dans le sens de visée du capteur va de $\pm 3\text{mm}$ à $\pm 5,5\text{mm}$. Ces profils seront à examiner avec attention avec les données climatiques disponibles.

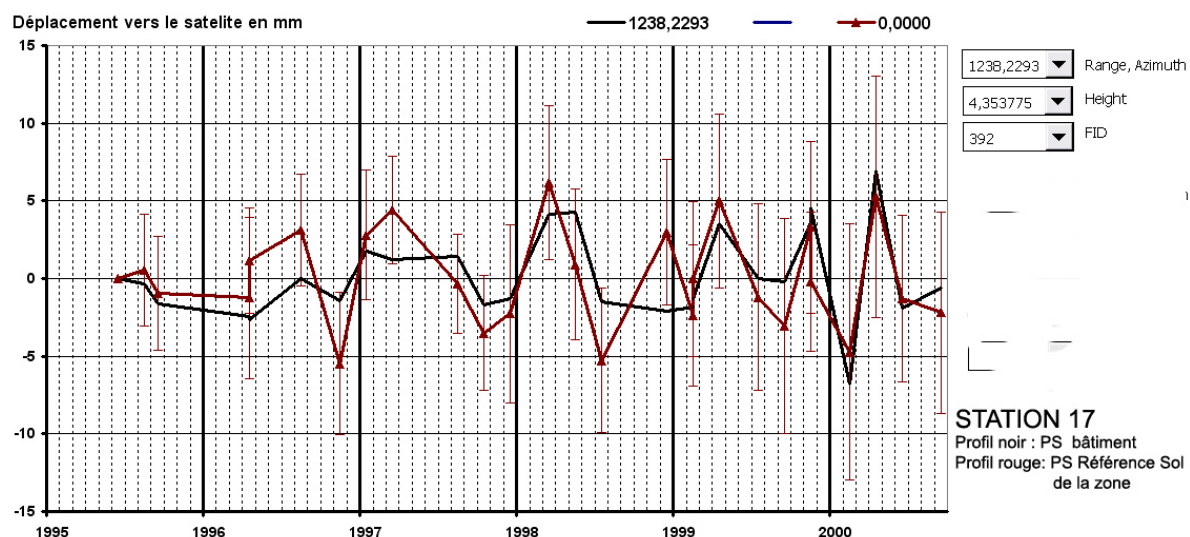


Figure 104 : Profil PS (courbe noire) d'un bâtiment observé déformé, comparé avec le profil PS de référence de la zone (courbe rouge).

Un profil PS (courbe en noir) à la Figure 104 décrit le comportement d'une maison vue fortement déformée sur le terrain et à la limite de l'influence de la végétation arborée. On juxtapose le profil PS de référence de la zone, courbe rouge (obtenue à la **Erreur ! Source du**

renvoi introuvable.). La comparaison avec cette référence PS « sol » montre une bonne corrélation des déplacements sauf pour un évènement en décembre 1999. On en déduit que ce pavillon est soumis à l'influence des haies d'arbres de la voie publique. Les arbres sont en effet étêtés à 6 mètres de hauteur mais sont relativement mature, l'influence a probablement été sous-estimée. La maison est soumise à l'influence du RGA, on peut noter un écart important entre les deux profils en décembre 1998. On constate que le bâtiment est sollicité des déplacements de 5 mm dans le sens de visée du satellite.

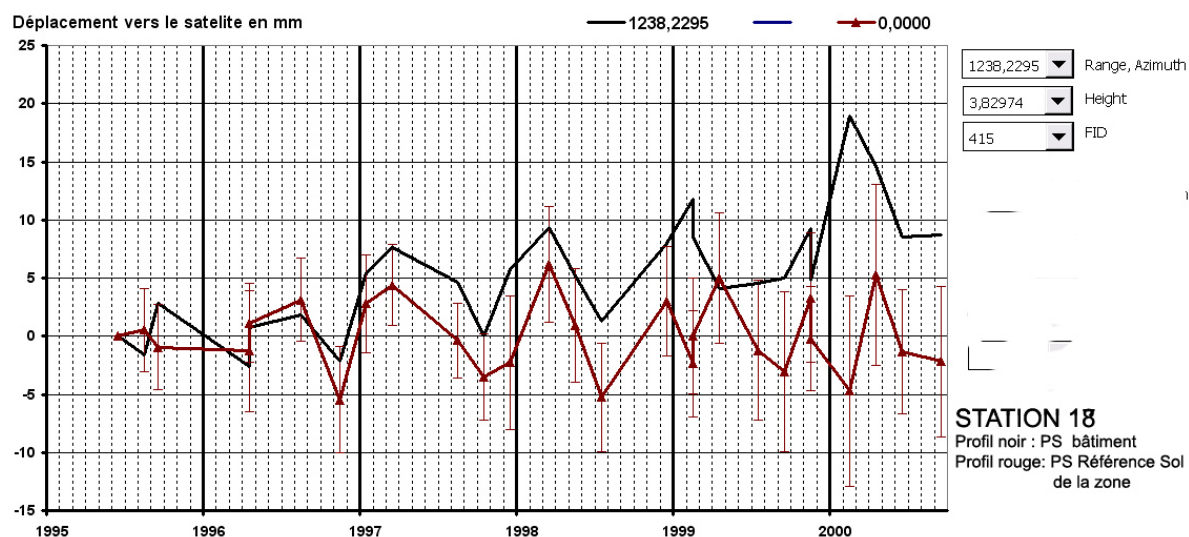


Figure 105 : Profil PS (courbe noire) d'un bâtiment observé déformé, comparé avec le profil PS de référence de la zone (courbe rouge).

La Figure 105 montre un profil PS (courbe en noir) d'un pavillon fortement déformé dans l'aire d'influence de la végétation arborée. La comparaison avec le profil PS de référence de la zone qui est marquée par l'influence de la végétation (courbe en rouge) montre des mouvements disparates de gonflements en janvier 1999, en septembre 1999 et début de l'année 2000.

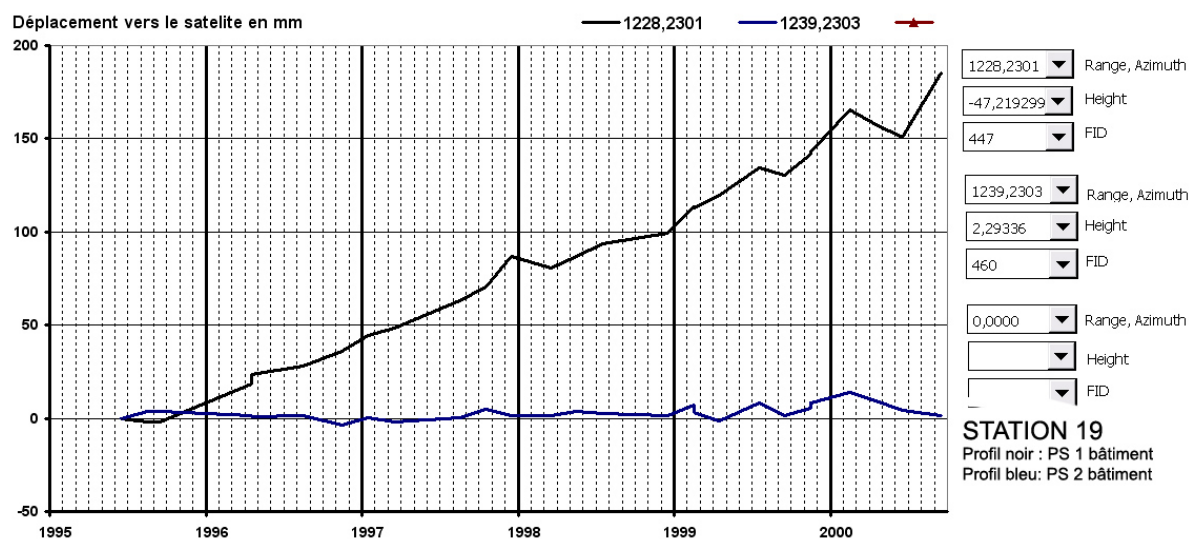


Figure 106 : Deux profils PS de deux bâtiments observés sans déformation.

La Figure 106 montre deux profils PS appartenant respectivement à deux bâtiments observés non déformés -ou rénovés – dans une parcelle hors influence de la végétation arborée. Le profil PS en courbe noire reste difficile à interpréter, du fait de valeurs aberrantes de mesure tandis que le second bâtiment en courbe bleue montre des déplacements exagérés à partir de 1999. Ces profils PS n'ont pas pu être utilisés pour l'étude.

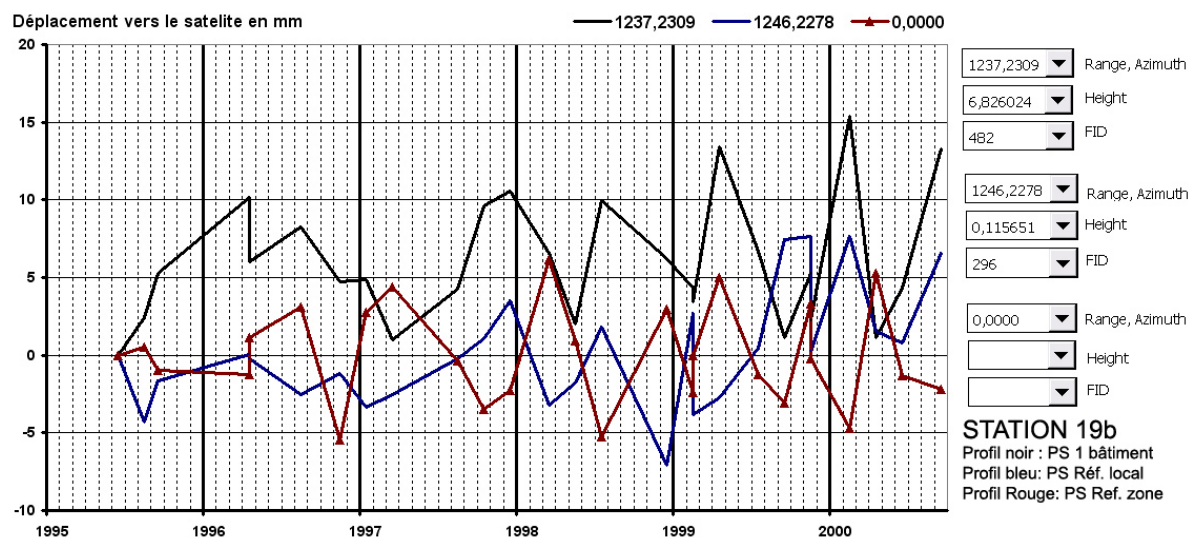


Figure 107 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS de référence local du sol (courbe en bleu) et au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

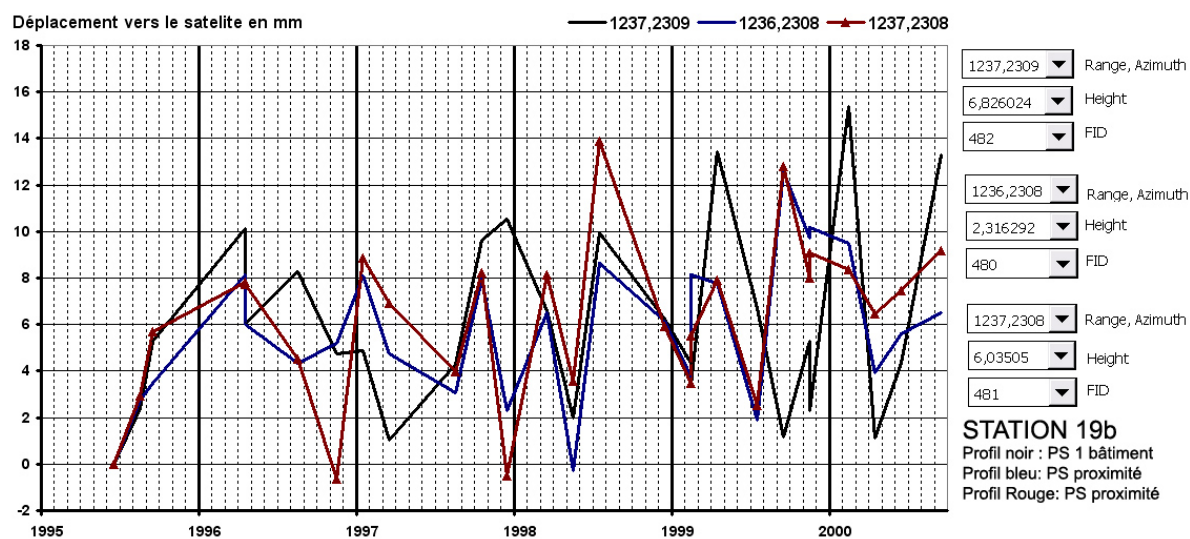


Figure 108 : Un profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé à deux profils PS de référence situé à proximité (courbe bleue et en rouge).

La Figure 107 montre un profil PS d'un pavillon (courbe noire) observé non déformé, placé dans l'aire d'influence de la végétation arborée. La comparaison avec les profils PS de référence local et de la zone (courbe bleu et rouge) révèle que le comportement du pavillon est un mixte des tendances de ces deux références. Une comparaison avec des profils PS localisés à proximité (Figure 108) montre que le comportement du bâtiment n'est plus corrélé avec celui de son support à partir de septembre 1999 jusqu'à mars 2000 lors d'un épisode de gonflement.

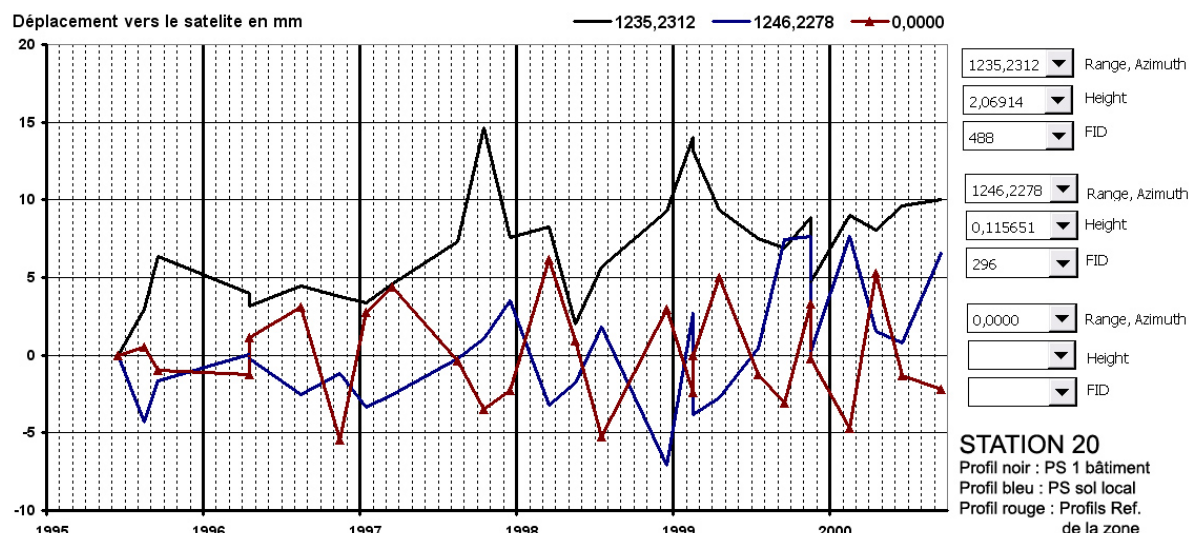


Figure 109 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire, comparé au profil PS de référence du sol local (courbe bleu) et au profil PS de référence d'un sol soumis à l'influence de la végétation arborée (courbe rouge)

La Figure 109 montre un profil PS de bâtiment dont le comportement est une composition des deux courbes de référence local et de la zone (courbe bleue et rouge). Toutefois les similitudes du profil Ps du bâtiment avec le profil PS du sol local à partir de 1999 sont fortes. Ces mesures de déplacements PS sont en accord avec les données observées sur le terrain : il s'agit d'un pavillon dans la zone d'influence de la végétation qui est modérément déformé. On note l'événement de gonflement d'octobre 1997 et de février 1999.

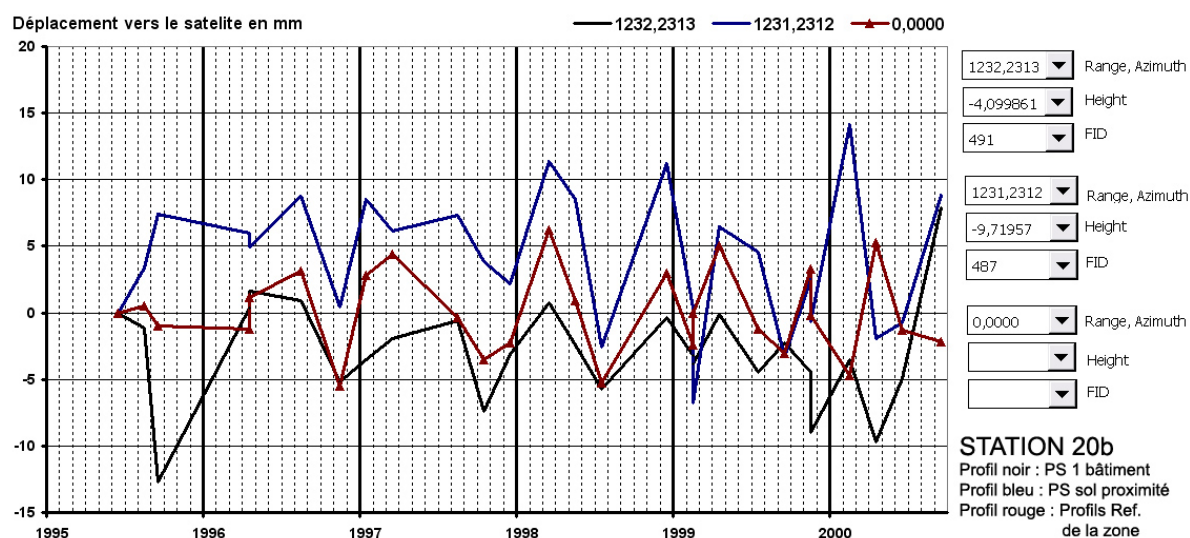


Figure 110 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire) comparé à un profil PS du sol à proximité (courbe bleu) et à un profil PS de référence de la zone (courbe rouge)

La Figure 110 montre le profil PS d'un bâtiment modérément déformé dans la zone d'influence de la végétation. Le profil PS du bâtiment (courbe noire) ainsi que le profil PS de référence du sol à proximité présentent les mêmes tendances que le profil PS de référence RGA avec influence de la végétation. Les mesures PS sont en accord avec les observations terrain. Les amplitudes de déplacement sont toutefois modérées de ± 5 mm sauf en septembre

1995 avec plus de $\pm 10\text{mm}$ de déplacements positifs. On note également qu'en 1999 les déplacements du bâtiment décrit par les PS ne sont plus en accords avec ceux du sol.

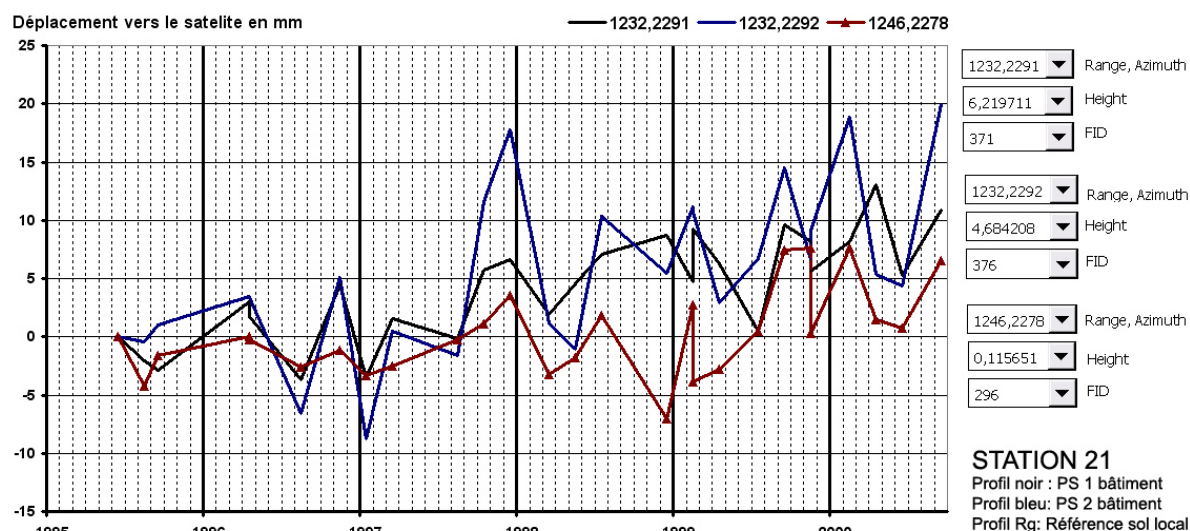


Figure 111 : Deux profils PS (courbe noire et bleue) d'un bâtiment observé modérément déformé, comparé avec le profil PS Sol de référence local (courbe rouge).

La Figure 111 permet de décrire l'historique de déformation d'un bâtiment à l'aide de deux profils PS (courbe noire et bleue) en juxtaposant ces déplacements avec le profil PS de la référence locale (courbe rouge). L'analyse différentielle montre qu'à la mi-année 1998, les déplacements mesurés sur le bâtiment sont désolidarisés de ceux mesurés sur le profil PS de référence du sol. Le gonflement en fin d'année 1998 entraîne certainement des dommages dans le bâti. Les courbes bleue et noire marque un déplacement différent en début d'année 2000. Le pavillon est en effet observé déformé et proche de la limite d'action de la végétation, ce qui est un argument confirmant un phénomène de tassement différentiel du sol.

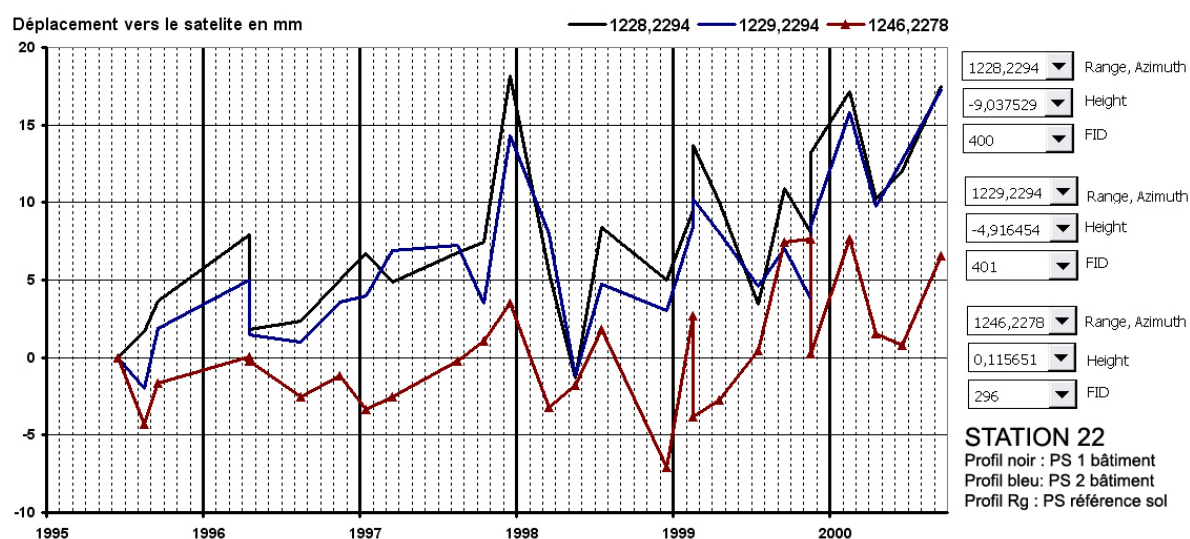


Figure 112 : Deux profils PS d'un bâtiment observés non déformés (courbe bleue et noire) comparé au profil PS sol de la référence locale (courbe rouge).

La Figure 112 permet de décrire l'historique de déformation d'un bâtiment à l'aide de deux profils PS (courbe noire et bleue) en juxtaposant la courbe de déplacement PS de la référence locale (courbe rouge). Le comportement similaire des deux profils PS appartenant au bâtiment et les tendances identiques avec le profils PS de référence du sol, démontre un déplacement global solidaire avec le sol. Les observations de terrain reportent que le bâtiment n'est pas déformé et que l'influence de la végétation y est faible. On peut toutefois observer un léger décalage entre profils PS des bâtiments en début d'année 1997 mais sur une période de faibles variations d'amplitude de déplacement.

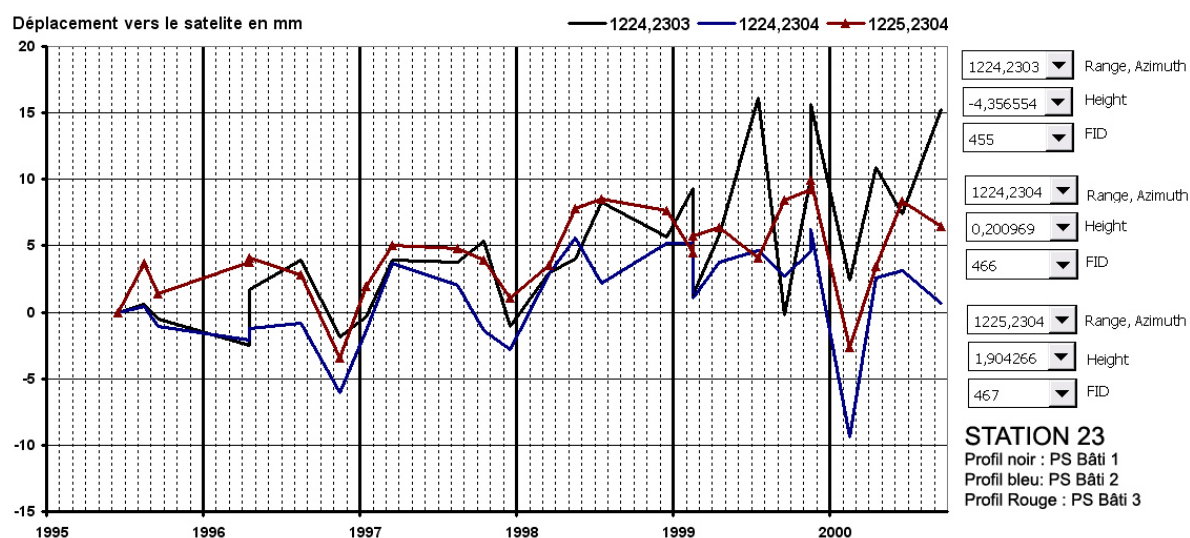


Figure 113 : Trois profils PS d'un bâti modérément déformé.

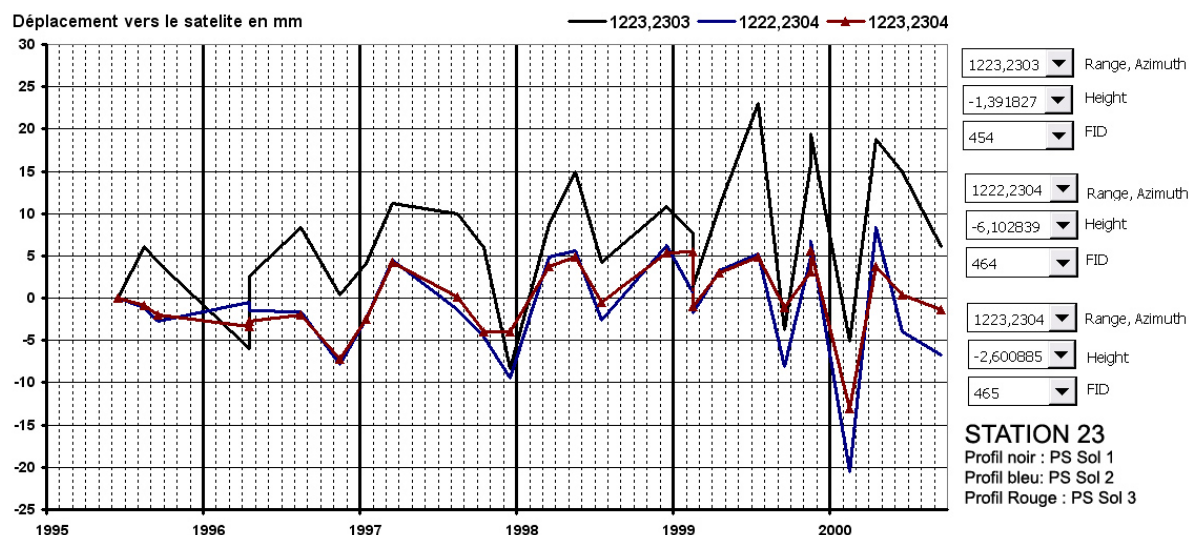


Figure 114 : Trois profils PS du sol à proximité du bâtiment étudié.

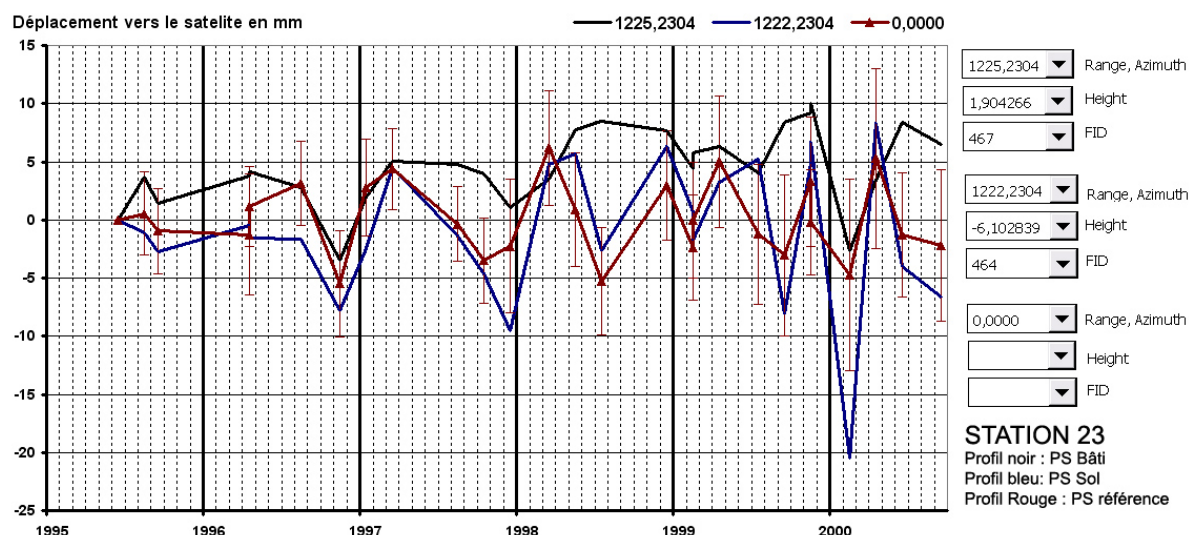


Figure 115 : Juxtaposition d'un profil PS du bâtiment déformé (courbe en noir), un profil PS du sol sous influence de la végétation (courbe en bleu) et d'un profil PS de référence des sols de la zone (courbe rouge).

Le bâtiment décrit ici est relativement bien documenté par les mesures PSI. Il s'agit d'un pavillon déformé en zone influencée par la végétation. On dispose de trois réflecteurs sur le bâti présenté à la Figure 113 et de cinq réflecteurs au sol, dont trois sont montrés à la Figure 114. Enfin il est intéressant de valoriser ces deux premiers graphiques avec une figure comparative Figure 115 montrant un profil PS Sol, un profil PS Bâti et un profil PS de référence de la zone. Cette dernière permet une analyse différentielle.

L'analyse des trois profils PS des bâtiments (Figure 113) révèle des tendances identiques de subsidence et de surrection d'ordre de $\pm 6\text{mm}$ en relation avec les périodes humide et sèche. Ces déplacements cycliques sont corrélés avec le comportement du sol de la Figure 114. Cependant, en examinant de près les déplacements de profil PS du bâti, on note des disparités de comportement -alors que les réflecteurs représentent bien le même bâtiment-, en 1997, 1998 et en particulier sur l'année 1999. Ce sont les déplacements négatifs en période estival qui montrent le plus de disparités, véritable signature d'un tassement différentielle.

Enfin on observe à la Figure 115 que localement, les profils PS bâti et PS sol ont une excellente concordance avec le profil PS de référence de la zone. Cela montre bien que l'influence de la végétation provoque des tassements différentiels responsables de déplacements dommageables pour la stabilité du bâti.

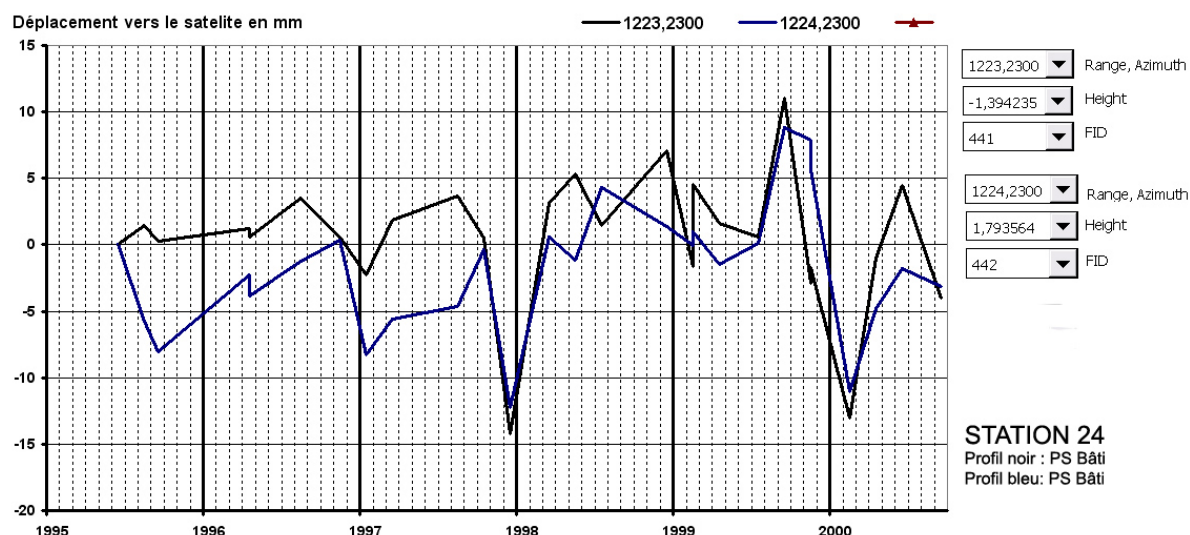


Figure 116 : Deux Profils PS d'un bâtiment observé non déformé, partiellement sous influence de la végétation.

La Figure 116 montre deux profils PS d'un bâtiment vu non déformé sur le terrain et qui est pour moitié dans l'aire d'influence d'un arbre. L'étude des profils révèle des déplacements négatifs en fin d'année 1997 et 1999. Cependant ces événements sont corrélés avec les déplacements du sol à proximité comme le montre la Figure 114. La maison se comporte donc solidairement avec le sol, on en conclue que le bâtiment n'est pas soumis à des mouvements dommageables de retrait gonflement lors de ces deux événements. Cependant les écarts entre les deux profils PS (courbe noire et bleue, Figure 116) révèlent des tassements différentiels, notamment sur la période 1995/1998. Cet exemple montre bien que les effets du RGA impliquent des événements ponctuels avec de fort mouvement verticaux puis des périodes de tassement/gonflement hétérogène à l'origine de tassement différentiel. Ce bâtiment n'étant pas observé endommagé en 2009, il y a lieu de penser que soit il est suffisamment rigide pour supporter des mouvements différentiels de $\pm 5\text{mm}$ soit qu'il y a eu des rénovations, masquant ainsi les effets de la déformation.

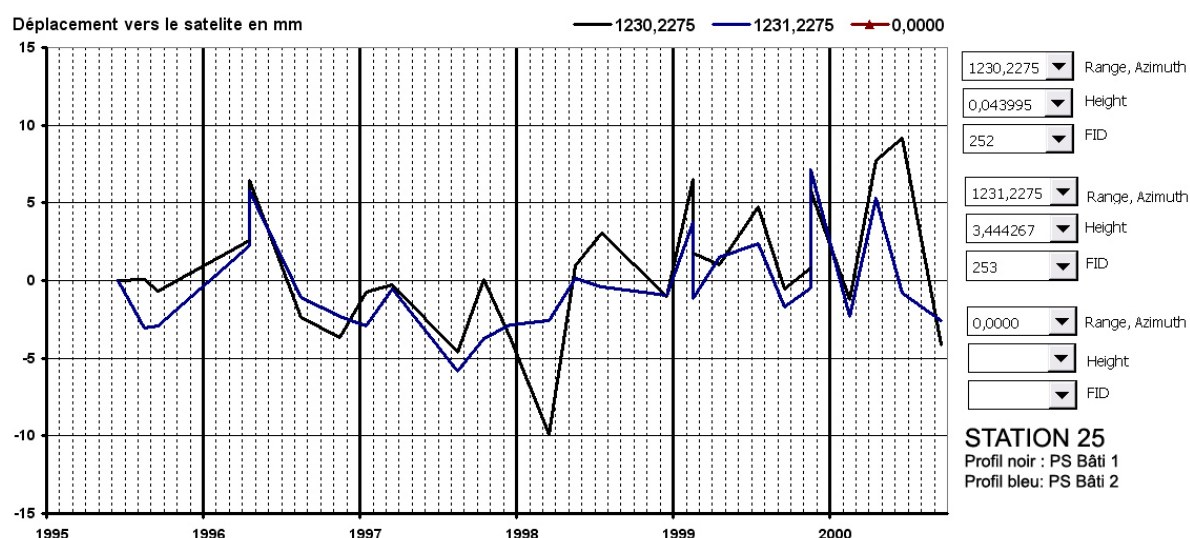


Figure 117 : Deux Profils PS d'un bâtiment observé modérément déformé, partiellement sous influence de la végétation.

La Figure 117 montre deux profils PS d'un bâtiment vu modérément déformé sur le terrain et qui est pour moitié dans l'aire d'influence d'un arbre. On peut noter des faibles amplitudes de déplacement sauf en mars 1998, date à laquelle on observe un désaccord entre profils. Cet évènement est probablement la cause des dommages observés. Cependant la relation entre ces profils PS de bâtiment et le comportement avec les profils PS de référence du sol est peu évidente, il aurait été souhaitable d'avoir plus de profils PS à interpréter pour ce bâtiments. On note également que le bâtiment étudié est un pavillon accolé à un autre observé sans déformation. On peut penser que les déplacements enregistrés par la seule composante de visée du capteur sont insuffisants pour décrypter le comportement du pavillon.

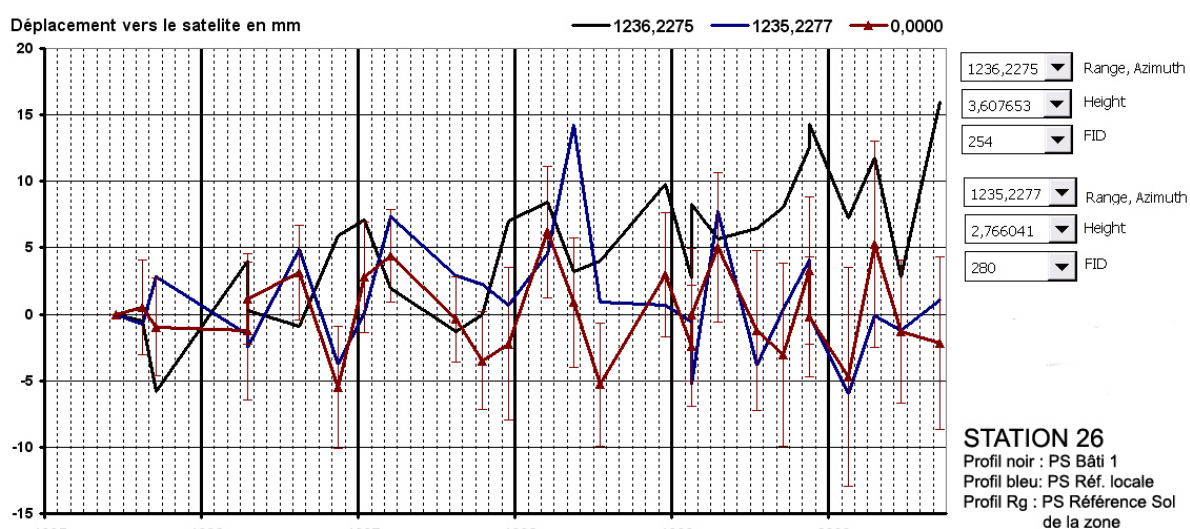


Figure 118 : Profil PS d'un bâtiment déformé soumis à l'influence la végétation (courbe noire), comparé aux profils PS de la référence locale du sol (courbe bleue) et de la zone (courbe rouge).

La Figure 118 montre le comportement saisonnier et cyclique d'un profil PS d'un bâtiment déformé (courbe noire). Ce bâtiment est un pavillon placé pour moitié dans la zone d'influence de la végétation. Les déplacements mesurés pour le bâtiment sont en accord avec ceux des profils de référence local et de la zone (courbe bleue et courbe rouge) mais avec un déphasage de deux mois avant l'année 2000. Ce bâtiment subit donc la double influence d'un mouvement du sol lié au cycle saisonnier humidification/dessiccation de la formation argileuse sous jacente et de l'influence de la végétation arborée.

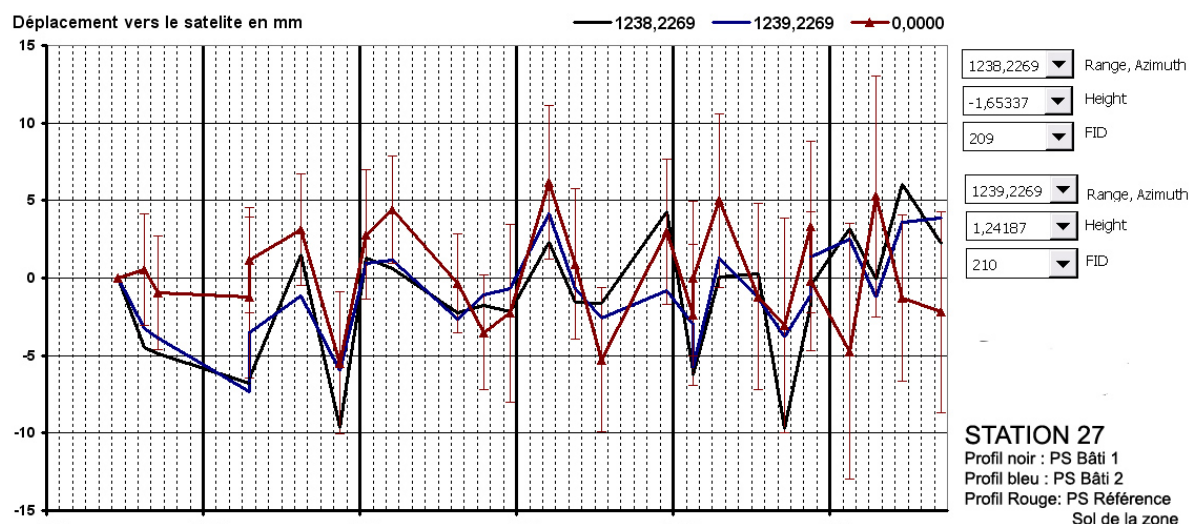


Figure 119 : Deux profils PS d'un bâtiment déformé et sous l'influence de la végétation arborée (courbe noire et bleue), comparées avec le profil PS de référence du sol de la zone (courbe rouge).

Le Figure 119 montre deux profils PS d'un bâtiment déformé et dans la zone d'influence de plusieurs arbres. Le comportement des deux profils est identique ce qui permet d'apprécier la fiabilité de la mesure PS sur ce bâtiment. Il y a une bonne corrélation avec le profil PS de référence de la zone. Cela montre l'influence de la végétation qui provoque des tassements différentiels, en particulier à la date de décembre 1998 où l'on peut remarquer un écart entre les profils PS du bâti de 5mm et un écart de 7mm en septembre 1999.

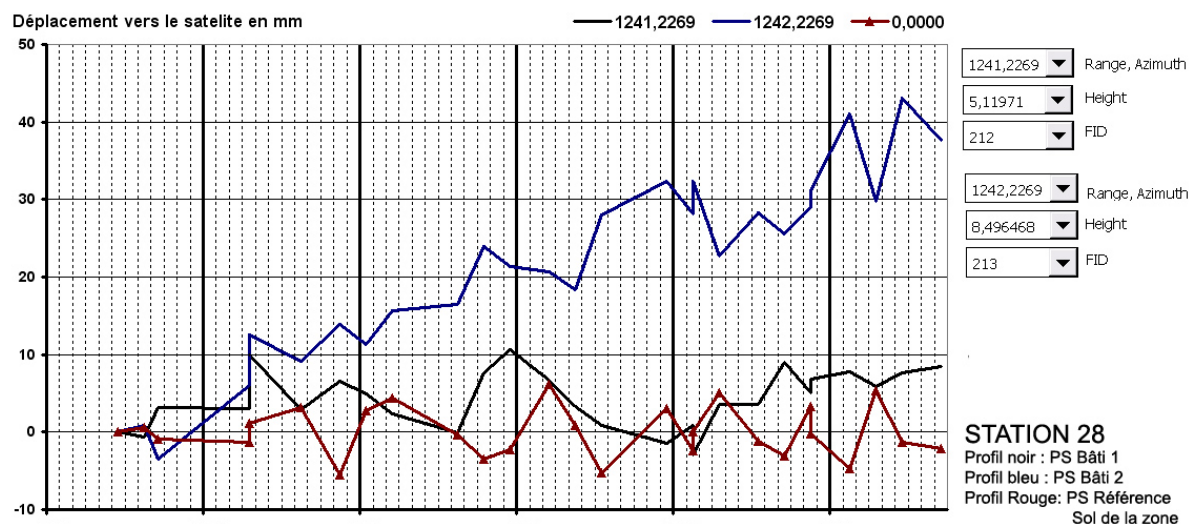


Figure 120 : Deux profils PS d'un bâtiment modérément déformé et à moitié sous influence de la végétation arborée (courbe noire et bleue), comparé à la courbe de référence PS de la zone (courbe rouge).

La Figure 120 montre deux profils PS d'un bâtiment déformé (courbe noire et bleue). Un premier profil montre une variation saisonnière en fin d'année 1997 et 1998 de 5mm, puis une relative stabilité jusqu'en 2001. Le second profil PS en bleu semble aberrant et peu exploitable. Cependant on note une variation positive –impossible à quantifier- en fin d'année 1999 alors que le premier profil en noir ne montre pas un tel comportement. Ces deux graphiques sont difficiles à interpréter par manque de profils PS complémentaires. La

comparaison avec les profils PS de référence à proximité, local et de la zone n'a pas donné de corrélation significative, ce qui indique que les déplacements du bâtiment ne peuvent être correctement décrits par la seule mesure dans l'axe de visée du satellite.

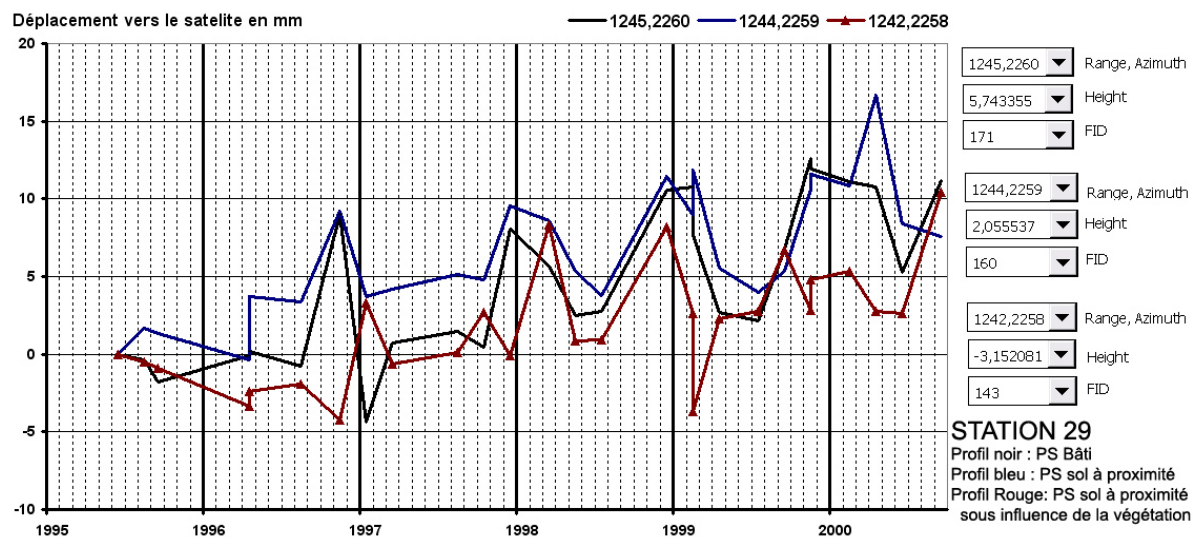


Figure 121: Profil PS d'un bâtiment fortement déformé (courbe noire) comparé au profil PS d'un sol à proximité hors influence de la végétation (courbe bleue) et au profil PS d'un sol à proximité dans le rayon d'influence de la végétation arborée (courbe rouge).

La Figure 121 montre un profil PS d'un bâtiment déformé situé hors de l'aire d'influence théorique de la végétation arborée (courbe noire). On observe une variation altimétrique coïncidant avec les périodes hivernales de novembre 1996 et en fin d'année 1997, 1998, 1999 et 2000. L'amplitude des déplacements dans la ligne de visée du capteur est estimée à 8mm en moyenne avec un maximum de 13mm en fin d'année 1996. Ces déplacements correspondent en tout point avec le comportement d'un réflecteur PS du sol localisé à proximité du pavillon (courbe bleue). Enfin on représente un réflecteur PS d'un sol soumis à l'influence de la végétation (courbe rouge) toujours à proximité du bâtiment étudié : on observe un déphasage des pics en fin d'année 1996 et 1997 entre les profils PS du Sol soumis ou non à l'influence de la végétation. Ceci est intéressant car cela montre que la végétation retarde les effets de retour à l'équilibre lors des années déficitaires en pluie telle que les années 1995 à 1997. Ce déphasage n'est plus observé sur les années plus humides de 1999 à 2000.

Pour conclure sur ce cas, le bâtiment répond solidairement avec les déplacements mesurés sur le sol et il n'y a pas de tassement différentiel lié à la végétation. Cependant l'amplitude de 1,3mm en 1996 est trop important pour la rigidité du bâtiment ce que confirme les déformations observées sur le terrain.

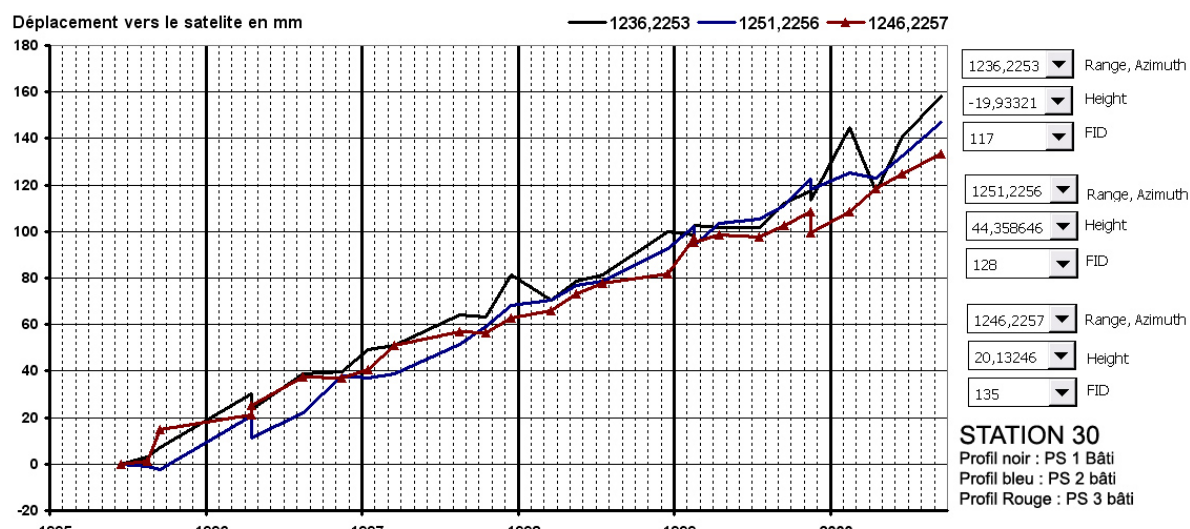


Figure 122 : Trois profils PS d'un bâtiment déformé soumis à l'influence de la végétation arborée.

Trois profils non interprétables car aberrants, déplacement vers le capteur...

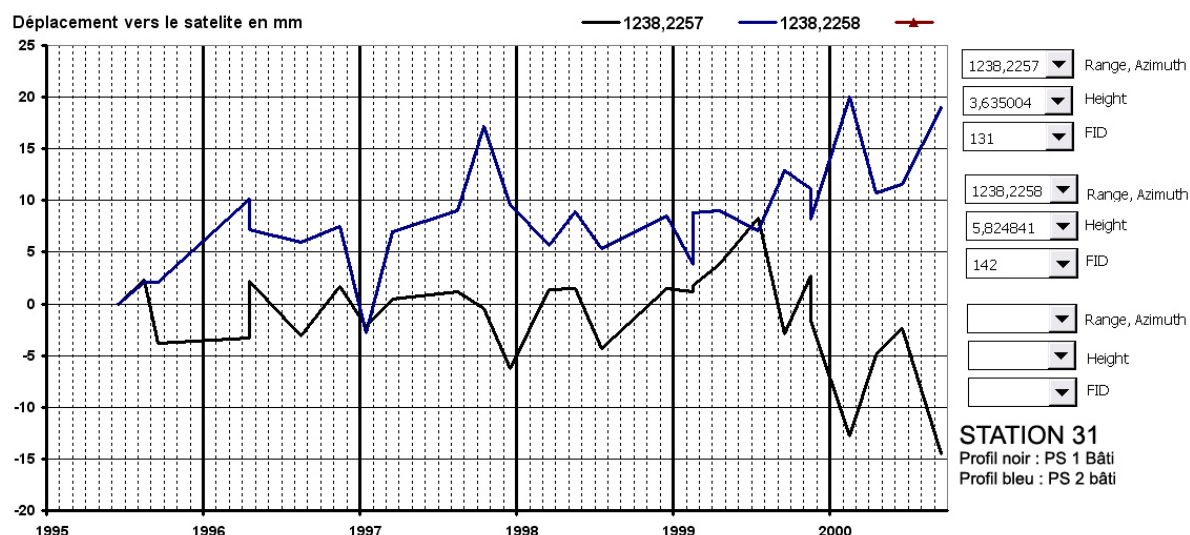


Figure 123 : Deux profils PS d'un bâtiment déformé dans le rayon d'influence théorique d'un arbre.

Le bâtiment est modérément déformé et sous influence de la végétation. La Figure 123 révèle un comportement très disparate des deux profils PS (courbe noire et bleue) pour un même bâtiment surtout à partir d'août 1999. Il est difficile à interpréter ce cas de par l'absence de profil PS de référence au niveau du sol.

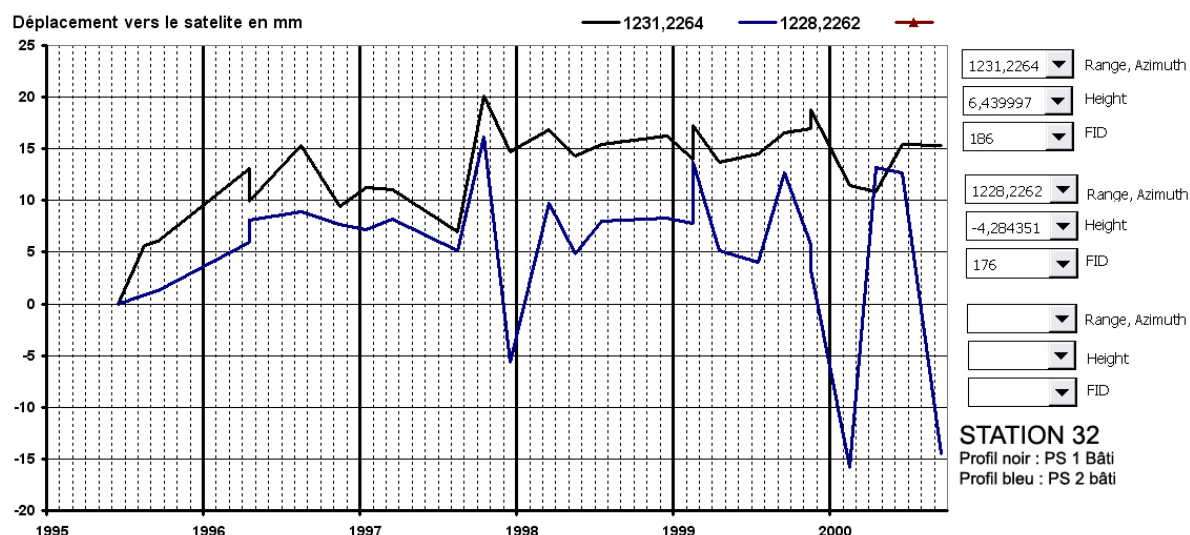


Figure 124 : Deux profils PS d'un bâtiment modérément déformé partiellement soumis à l'influence de la végétation arborée.

Le bâtiment est modérément déformé et en partie sous l'influence de la végétation. La Figure 124 révèle un comportement très disparate des deux profils PS (courbe noire et bleue) pour un même bâtiment, notamment en fin d'année 1997 et début 2000. Il est difficile d'interpréter ce cas de par l'absence de profil PS de référence au niveau du sol.

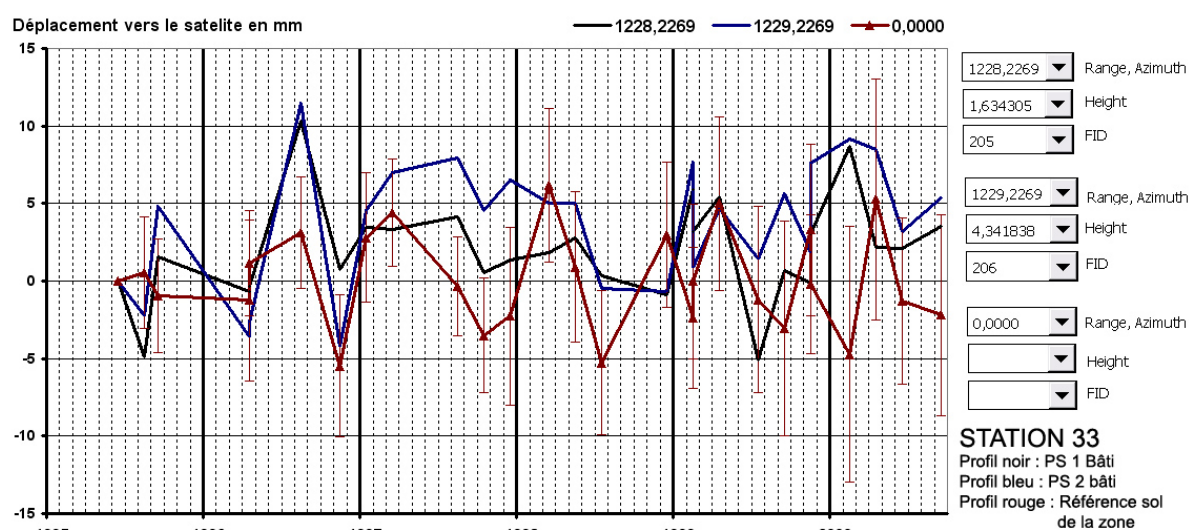


Figure 125: Deux profils PS d'un bâtiment déformés et soumis à l'influence de la végétation arborée (courbe bleue et noire), comparés à la référence PS sol de la zone (courbe rouge).

Le bâtiment est modérément déformé, placé dans le rayon d'influence de la végétation arborée. La Figure 125 révèle un comportement très disparate des deux profils PS (courbe noire et bleue) pour un même bâtiment, notamment au cours de l'année 1997 et août 1999. La juxtaposition avec le profil de référence PS sol de la zone montre quelques corrélations en fin d'année 1996 et 1997.

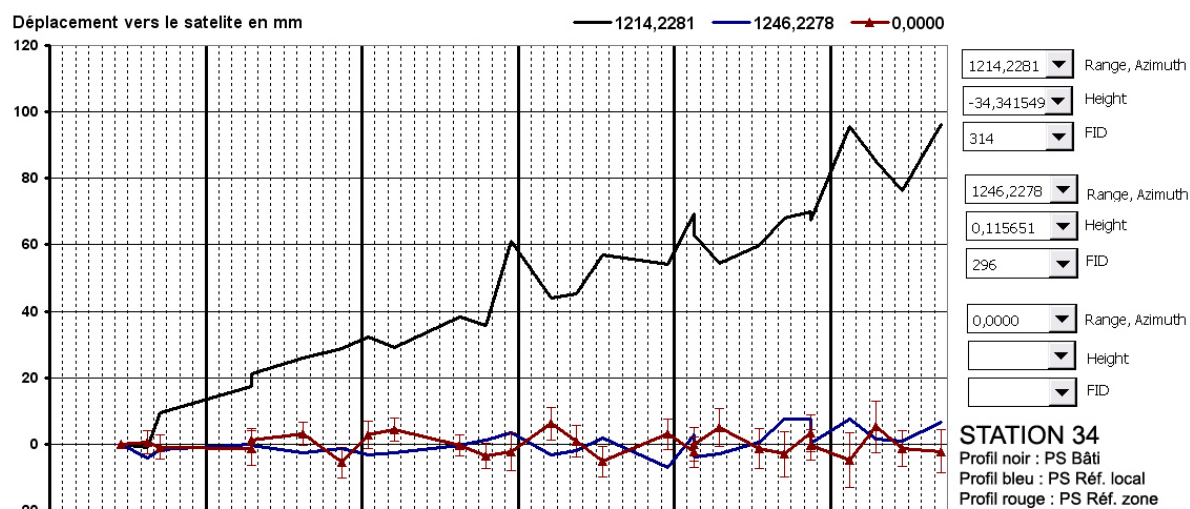


Figure 126 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire) et profil PS de référence local du sol (courbe bleue) et le profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe rouge).

La Figure 126 montre un profil PS de bâtiment aberrant. La chaîne de traitement PS n'a pas permis de calculer correctement ce profil (courbe noire) il en résulte une vitesse linéaire exagéré ainsi qu'une exagération des mouvements relatifs. Il n'est pas possible qu'un bâtiment puisse augmenter de 10cm d'altitude en 5ans. Cependant il est intéressant de comparer cette courbe aberrante avec la référence PS du sol local (courbe bleue). On peut observer des signaux identiques, en particulier les pics puisque les mouvements négatifs sont mal pris en compte lors de cette mesure. Cela signifie que le bâtiment a un comportement identique et solidaire avec le sol. Les observations de terrain n'ont pas permis de constater des déformations sur les façades du pavillon. La carte d'influence de la végétation montre que ce bâtiment est légèrement à la limite de l'influence d'un arbre, mais il n'y pas de similitude entre le profil PS du bâti et la courbe de référence d'influence de la végétation de la zone (courbe rouge). Les observations terrain valident les interprétations du profil PS du bâtiment.

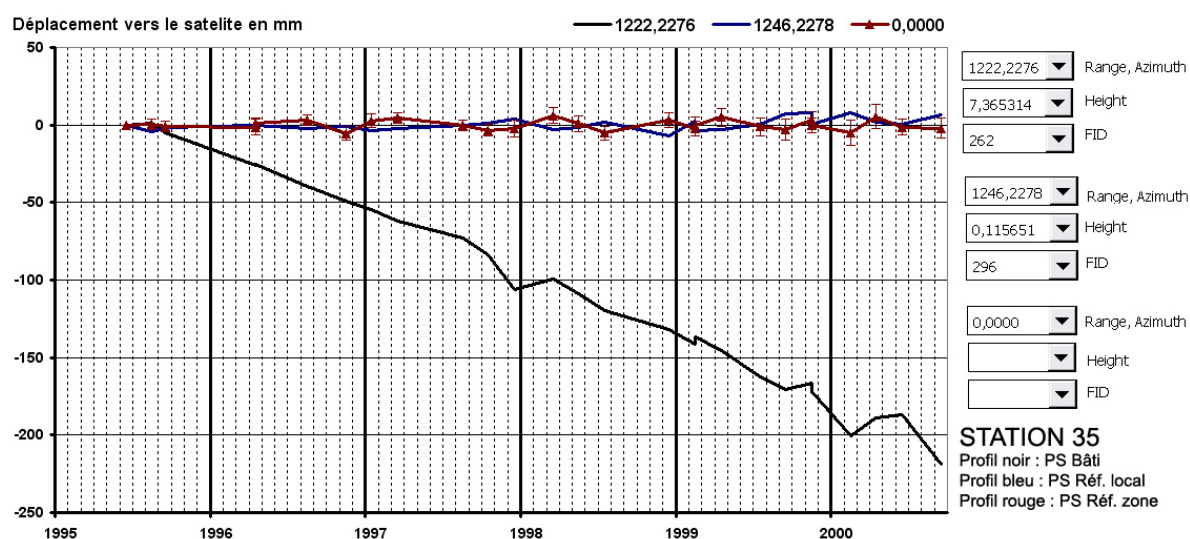


Figure 127 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS de référence local du sol (courbe en bleu) et au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 127 montre un profil PS de bâtiment (courbe en noir) probablement aberrant comme dans le cas précédent. On mesure une vitesse linéaire négative de 40mm par an de déplacements dans le sens de visée du satellite. Cependant il est intéressant de comparer cette courbe noire avec la référence PS du sol de référence de la zone (courbe rouge). On peut observer des signaux identiques en mars 1998 et novembre 1999. Il s'agit d'une signature d'influence de la végétation arborée enregistrée dans le profil PS du bâtiment. Des déformations sur les façades du pavillon ont été observées et il a été constaté que le bâtiment est sous influence de la végétation. Les observations terrain valident donc les interprétations du profil PS du bâtiment.

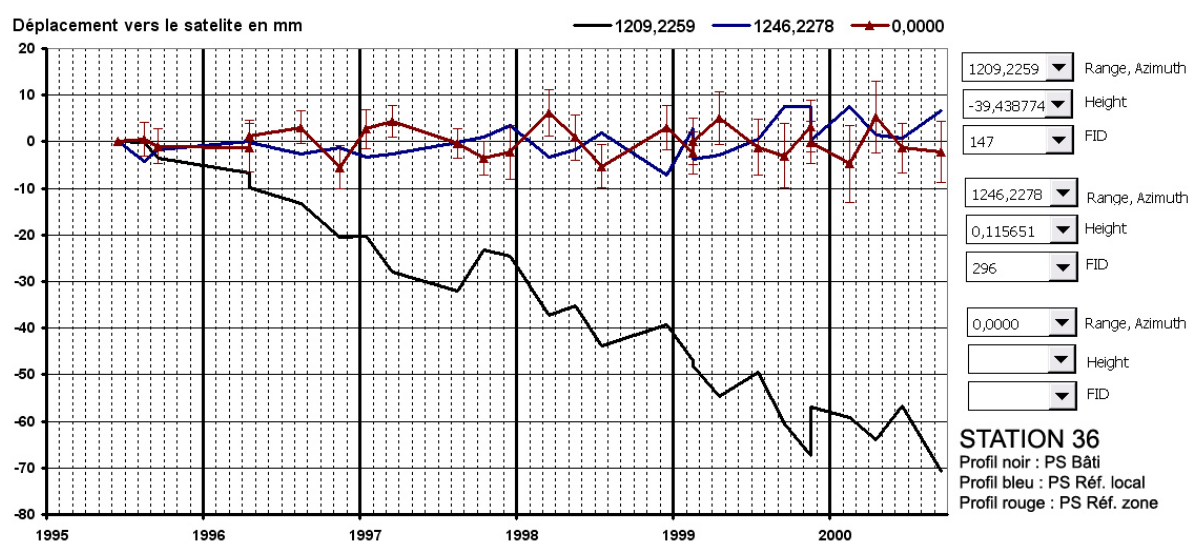


Figure 128 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS de référence local du sol (courbe en bleu) et au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 128 montre un profil PS de bâtiment (courbe en noir) difficilement interprétable comme dans le cas précédent. On mesure une vitesse linéaire négative de 12mm par an, valeur de déplacements dans le sens de visée du satellite. Il existe une relation mixte avec les références du sol local et de la zone (courbe bleue et rouge) mais faiblement corrélé. Cet unique profil PS est donc insuffisant pour diagnostiquer ce bâtiment observé déformé et partiellement sous influence de la végétation.

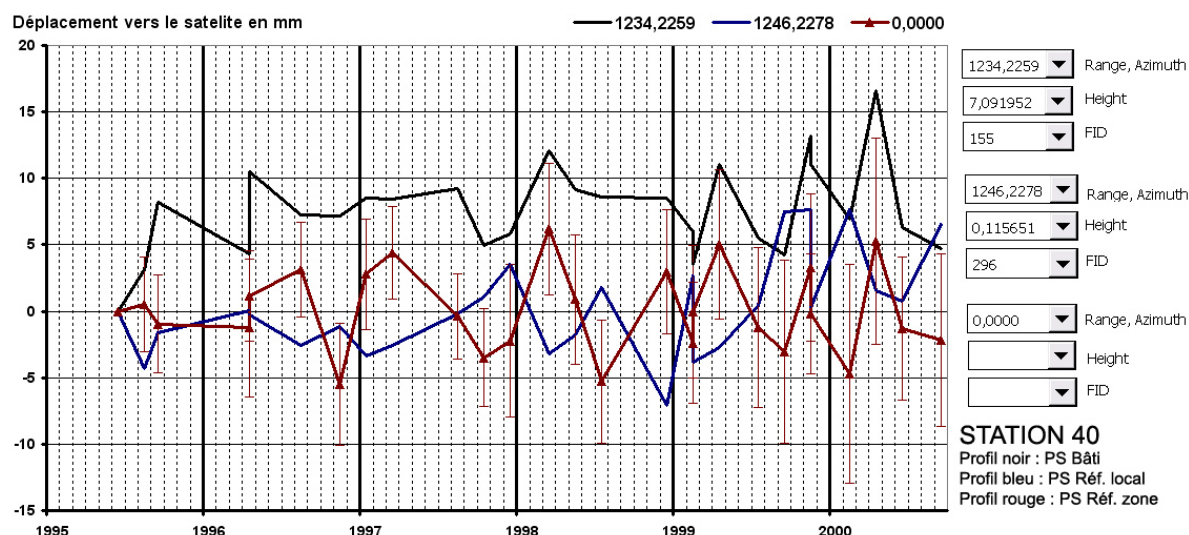


Figure 129 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS de référence local du sol (courbe en bleu) et au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 129 montre le profil PS d'un pavillon (courbe noire) fortement déformé et partiellement sur une aire de forte influence de la végétation arborée. On observe une tendance mixte du comportement du profil PS du bâtiment : de 1995 à juin 1997 le profil PS du bâtiment suit la tendance du profil PS de référence local (courbe bleue) puis avec le profil PS sol de référence de la zone (courbe rouge) à partir de juin 1997. Cela souligne le début d'influence de la végétation sur ce bâtiment, qui devient très nette à partir de 1998 jusqu'à 2000. Il est cependant difficile de développer le diagnostic de ce bâtiment avec un seul réflecteur PS. Les observations faites sur le terrain ont établi des fortes déformations de ce pavillon qui est également soumis à une forte influence de la végétation.

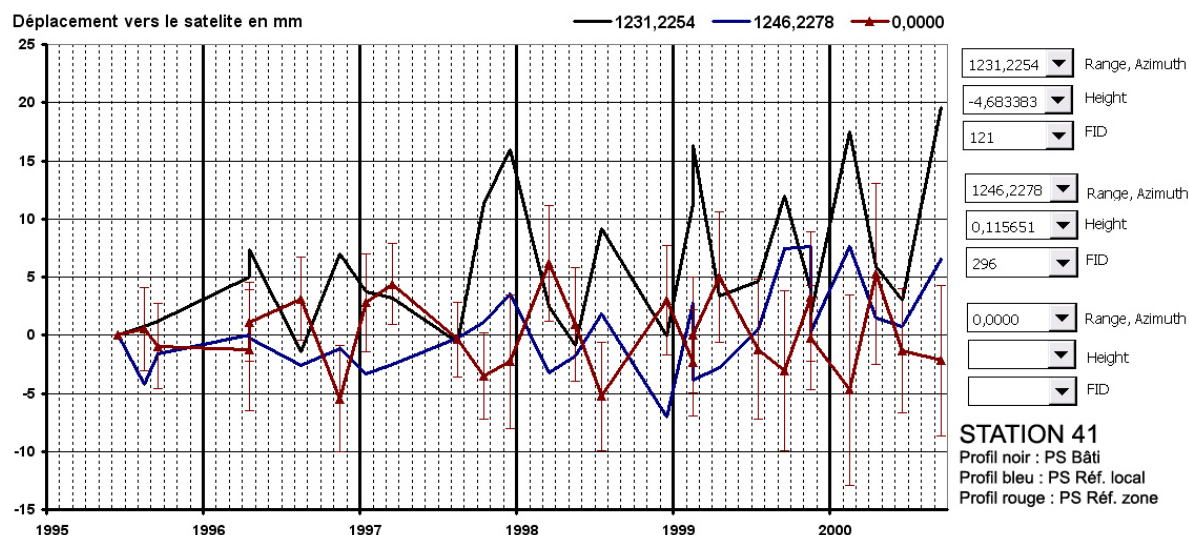


Figure 130 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS de référence local du sol (courbe en bleu) et au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 130 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) observé non déformé et hors influence de la végétation. Ce profil est comparé aux références locales et de la zone (courbe bleu et rouge). Cette comparaison révèle une corrélation très nette avec le profil PS

sol de référence hors influence de la végétation (courbe bleu). L'absence de corrélation avec la courbe rouge indique qu'il n'y a pas d'influence de la végétation arborée, ce qui va dans le sens des observations faites sur le terrain. On observe des déplacements positifs de l'ordre de 15 mm, ce qui est fort élevé pour la résistance rigide d'un bâtiment. Toutefois, les déplacements étant solidaire avec le support, on calcule une amplitude de déplacements dans le sens de visé du satellite de ± 10 mm. Ces fortes variations sont observées en septembre décembre 1997, février 1999 et février 2000.

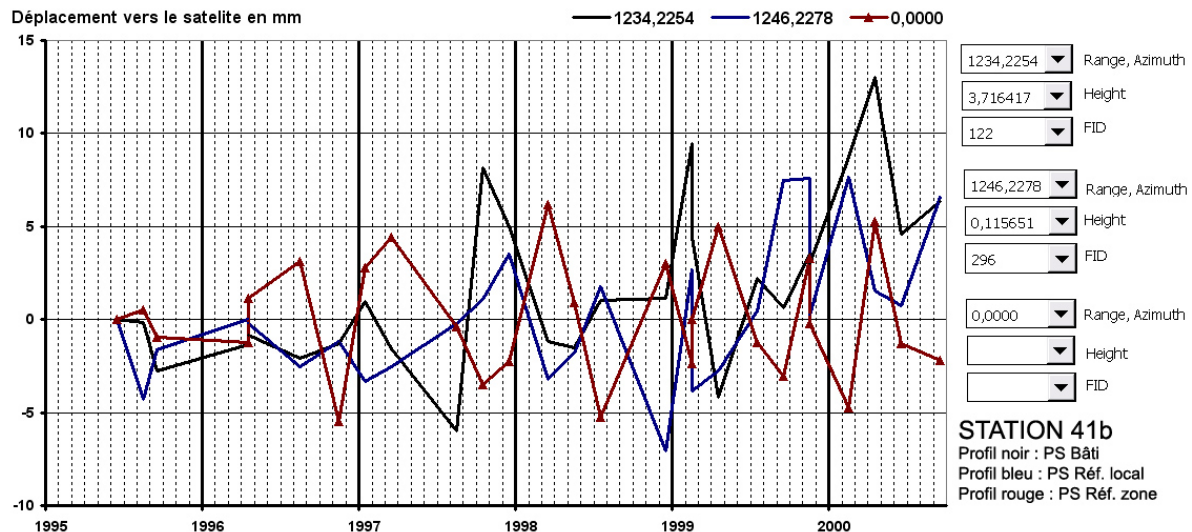


Figure 131 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS de référence local du sol (courbe en bleu) et au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 131 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) observé modérément déformé et dans l'influence de la végétation. Ce profil de déplacement est très similaire avec le celui détaillé à la Figure 130. La comparaison de ce profil PS du pavillon avec les références locale et de la zone (courbe bleu et rouge) révèle une corrélation avec le profil PS de référence local et une corrélation mixte à partir d'août 1999. On observe des déplacements positifs de l'ordre de 15mm. L'influence de la végétation est certainement à l'origine des déformations observées mais le manque de réflecteur limite l'analyse du comportement différentiel du sol.

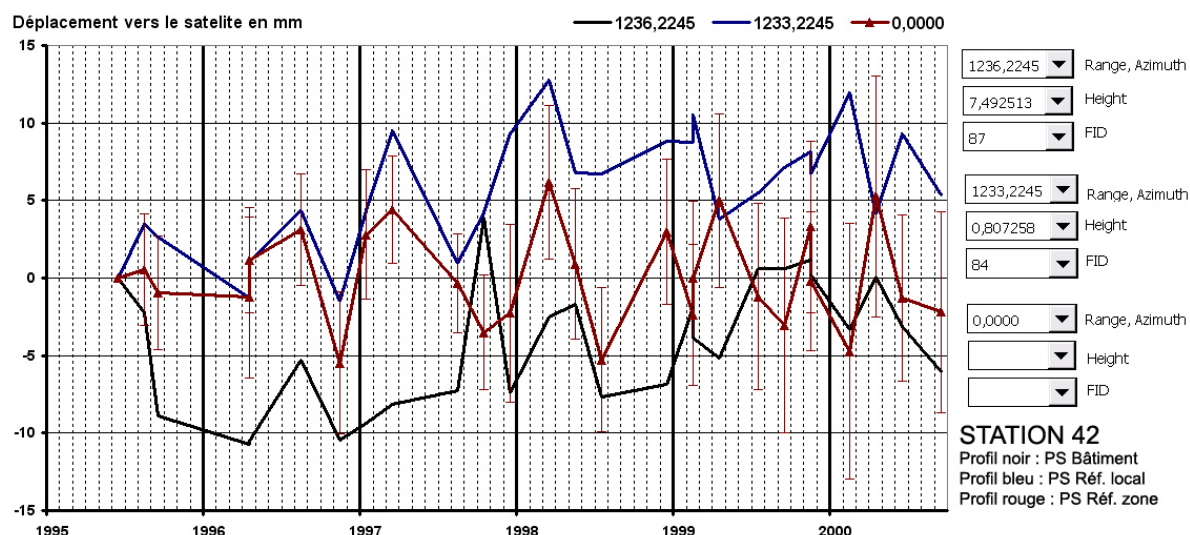


Figure 132 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS du sol situé à proximité (courbe en bleu) et comparé au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 132 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) observé non déformé et pour moitié sous influence de la végétation. Le profil PS du sol de référence local (courbe bleu) est un réflecteur du sol situé à proximité de la maison qui montre une forte corrélation avec le profil PS sol de référence de la zone (courbe rouge). On peut en déduire que le sol est localement soumis à des variations de type RGA influencé par la végétation. Le profil PS du bâtiment montre un épisode en octobre 1997 sous forme d'une variation positive de $\pm 10\text{mm}$ dans le sens de visée du capteur. Puis en début d'année 2008, un épisode de retrait gonflement corrélé avec les références (courbe bleue et rouge). Les déplacements ont globalement des valeurs de l'ordre de 5mm . Le bâtiment est donc soumis à l'influence de la végétation, élément favorable à des tassements différentiels, les variations mesurées montrant un événement en octobre 1997. Un seul réflecteur ne permet pas d'aller plus en détails dans ce diagnostic, mais les fortes variations mesurées montre la vulnérabilité du bâtiment sur un site sensible au phénomène.

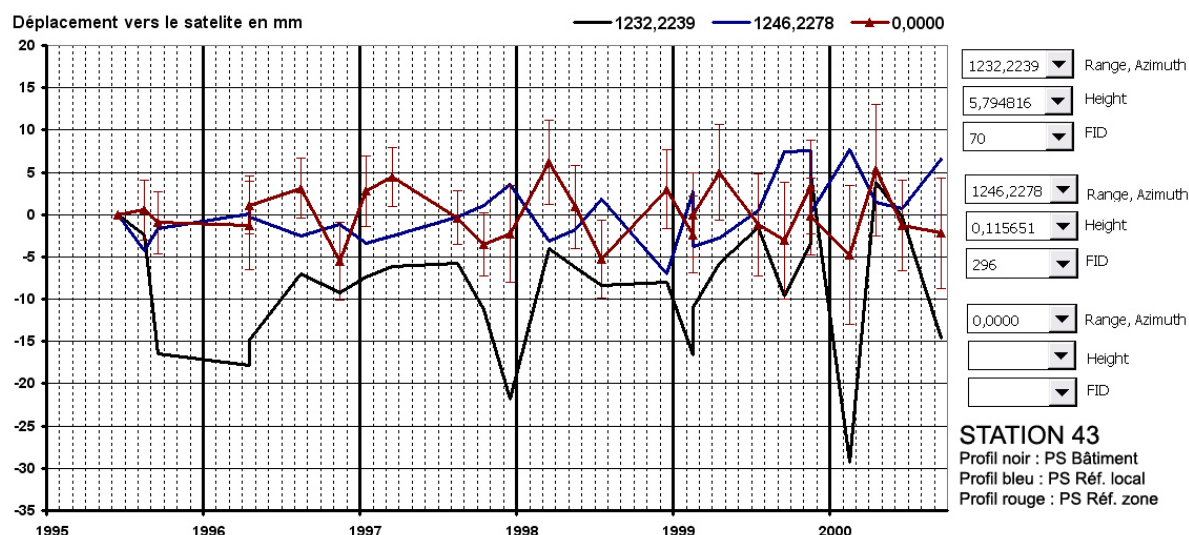


Figure 133 : Profil PS d'un bâtiment (courbe en noir) comparé au profil PS de référence local (courbe en bleu) et comparé au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 133 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) observé non déformé et à une distance suffisante de l'aire d'influence de la végétation. Le profil PS du bâtiment est anti-corrélé avec le profil PS du sol de référence local (courbe bleu). L'antisymétrie (corrélation inverse) des déplacements signifie que la réponse est diamétralement opposée à celle de la référence. Un tel comportement est physiquement difficilement explicable : est-il possible que la maison s'affaisse alors que le sol s'expande ? S'agit-il d'un basculement de pavillon ? Une autre possibilité est que le déplacement n'est mesuré que le long de l'axe de visée du satellite : s'agit-il d'un déplacement non vertical en relation avec le comportement du sol ? Nous ne pouvons pas formuler une réponse au comportement du réflecteur de ce bâtiment, seul sera considéré la cohérence de ce profil PS avec la référence locale du sol (courbe bleue).

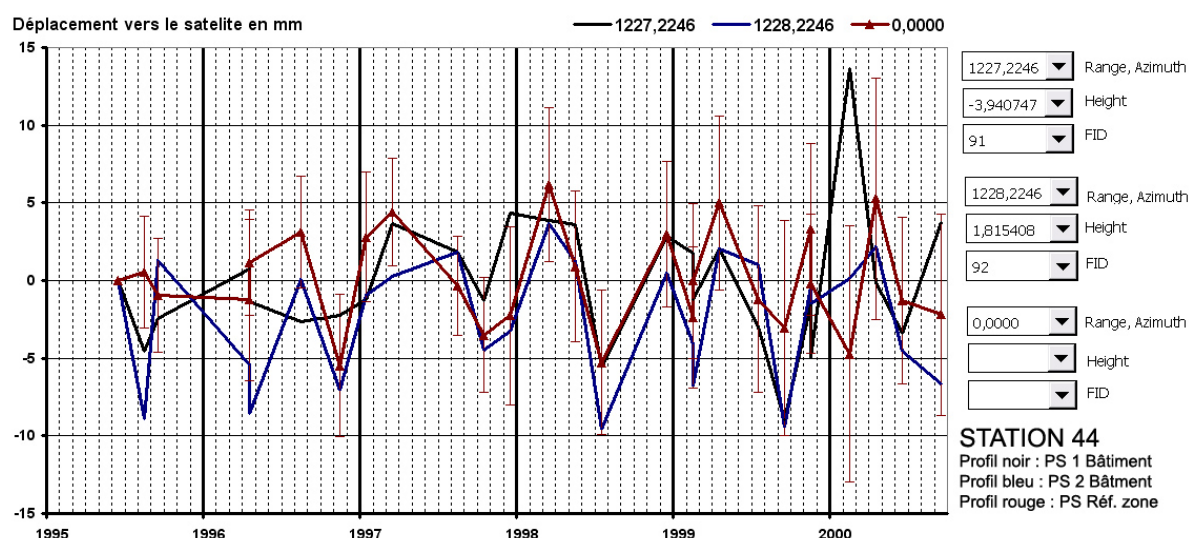


Figure 134 : Deux profils PS d'un bâtiment (courbe noire et bleue) comparé au profil PS de référence d'influence de végétation de la zone (courbe en rouge).

La Figure 134 montre deux profils PS (courbe noire et bleue) d'un bâtiment fortement déformés et éloigné d'influence de la végétation arborée. Toutefois une importante haie

dissimile l'espace jardinée ou est installée une piscine. Ce pavillon est bien documenté par deux profils PS, il est possible d'apprécier l'exactitude des mesures d'interférométrie PSI. L'analyse des profils PS comparé à la référence PS du sol influencé par la végétation (courbe rouge) révèle que le bâtiment est soumis à l'influence de la végétation. D'autre part, on remarque des écarts entre profils en période estival 1996 (période de sécheresse géotechnique reconnu) ainsi qu'en début d'année 2000, période de forte pluviométrie. Ces événements sont certainement à l'origine des tassements différentiels ayant entraîné les déformations du pavillon.

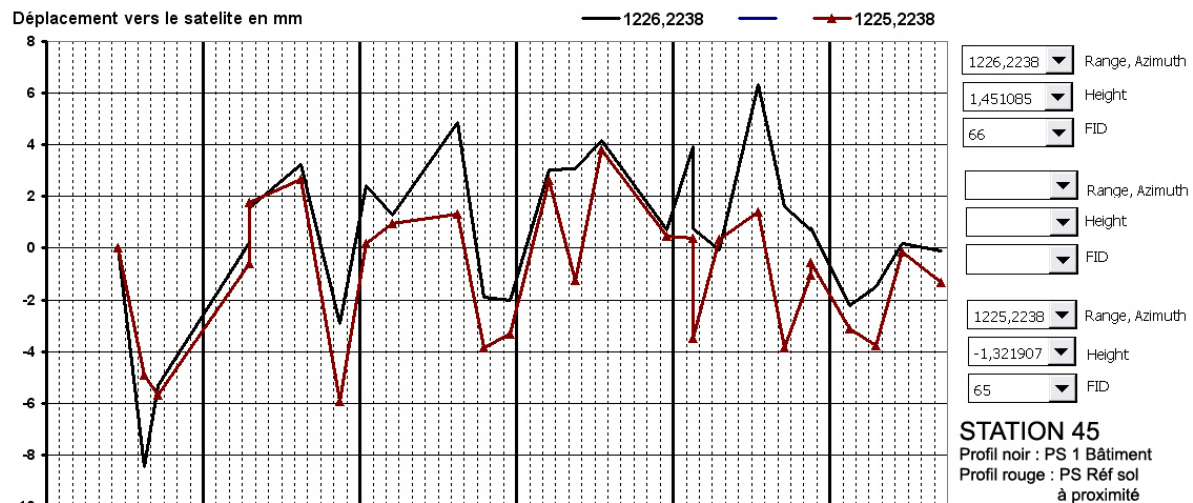


Figure 135 : Un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) comparé au profil PS de référence à proximité (courbe en rouge).

La Figure 135 montre les déplacements d'un réflecteur d'un bâtiment (courbe noire) comparé à un profil PS du sol à proximité du pavillon étudié. On observe un bon accord entre les deux profils hormis en juin 1998 et août 1999 avec un écart inférieur à 5mm ce qui n'est pas suffisant pour entraîner des dommages dans l'ouvrage. Le bâtiment est observé sans déformation et éloigné de la végétation arborée.

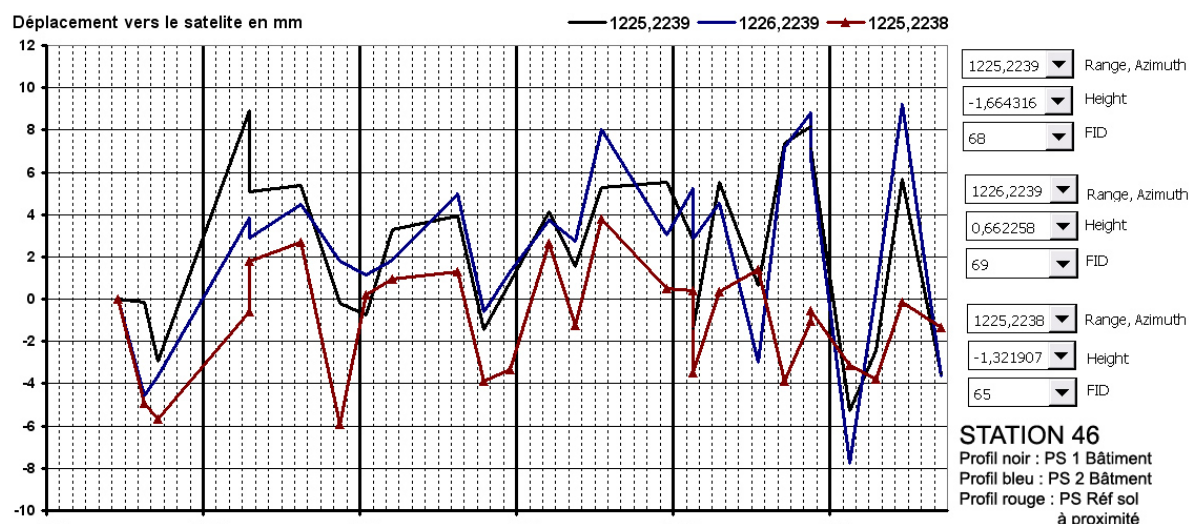


Figure 136 : Deux profils PS d'un bâtiment (courbe noire et bleue) comparé au profil PS de référence à proximité (courbe en rouge).

La Figure 136 montre les déplacements de deux réflecteurs d'un bâtiment (courbe noire et bleue) comparé à un profil PS du sol à proximité du pavillon étudié identique au cas précédent. On observe un bon accord entre les deux profils sauf sur la période 1999 à 2001 où le bâtiment présente un déplacement de plus de 10mm. Ces variations correspondent à une tendance observée dans le profil PS de référence de la zone sous influence de la végétation (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le bâtiment n'est pourtant pas dans la zone d'influence de la végétation arborée mais se trouve accolée à un bâtiment qui est dans l'emprise de cette influence. Est-ce là l'effet collatéral du bâtiment voisin ? Rien ne permet de l'analyser par absence de données décrivant le pavillon contigu à celui ci.

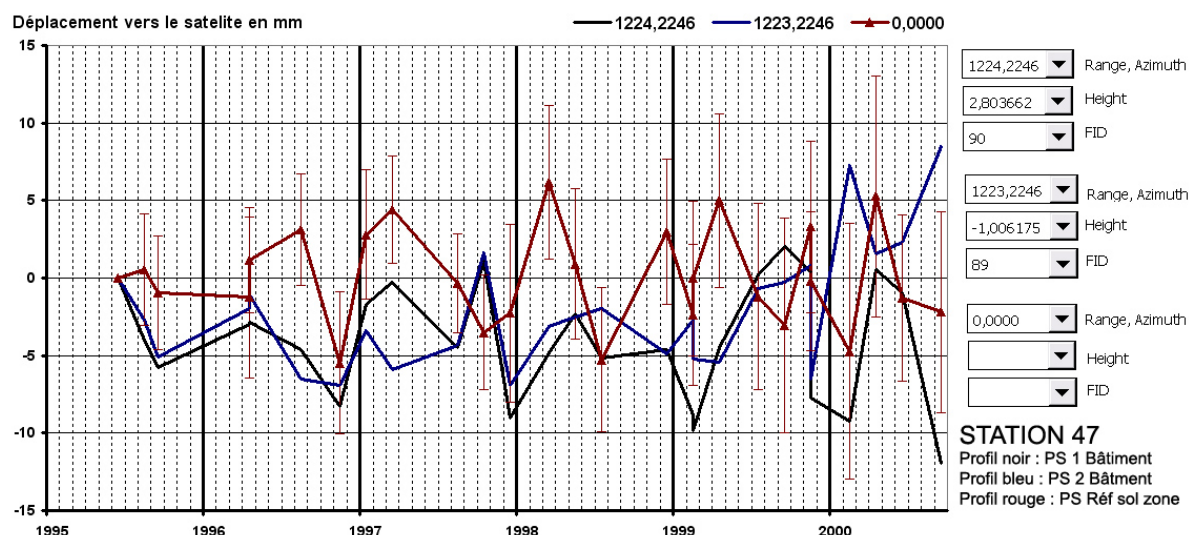


Figure 137 : Deux profils PS d'un bâtiment (courbe noire et bleue) comparé au profil PS de référence de la zone (courbe rouge).

La Figure 137 montre deux profils PS d'un bâtiment observé modérément déformé. Ce pavillon est dans l'air d'influence de la végétation. Deux interprétations pour ces profils sont à prendre en considération :

- Lorsque les profils PS des bâtiments suivent la tendance du profil PS sol de référence soumis à l'influence de la végétation arborée, on observe un écart entre les profils PS du bâtiment, ce qui est un signe d'un tassement différentiel. On constate ce phénomène en janvier 1997, période de gonflement après un épisode de sécheresse géotechnique de 1996. De même la période humide de février 2000 avec un écart allant jusqu'à 15mm entre les deux profils PS des bâtiments.
- Toutefois l'interprétation précédente est délicate par manque de référence sol à proximité du bâtiment. Une autre interprétation est possible. On constate que les pics négatifs sont systématiquement présents sur les périodes humides de décembre à janvier. S'agit-il d'un mouvement inverse du bâtiment, qui réagit par subsidence lorsque le sol reprend son humidité (phénomène de basculement) ?

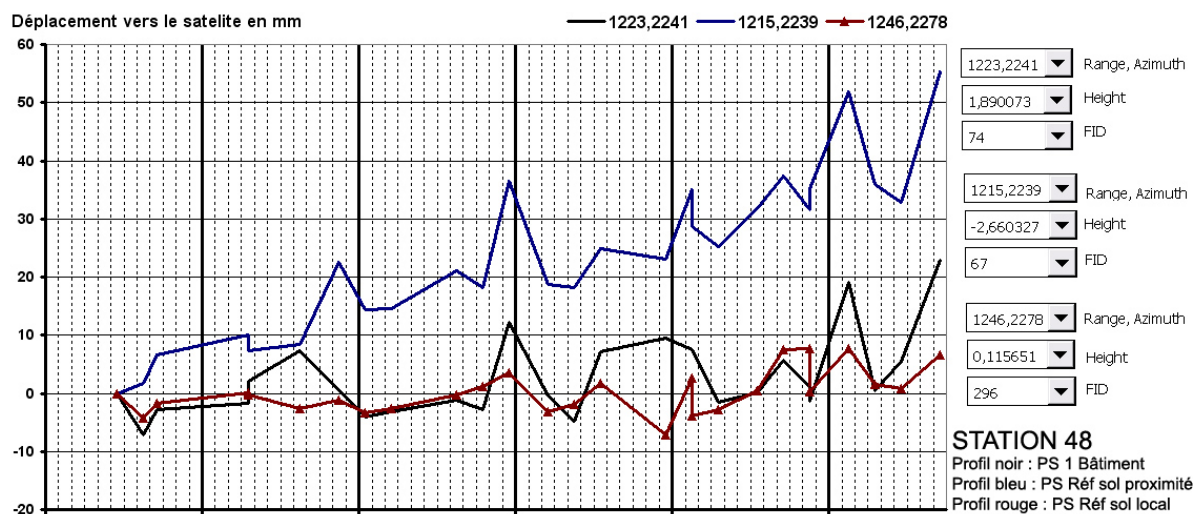


Figure 138: Un profil PS d'un bâtiment observé rénové (courbe noire) comparé avec un profil PS de référence à proximité (courbe en bleu) et avec un profil PS sol de référence local.

La Figure 138 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noir) qui est corrélé avec le comportement des profils PS de référence du sol (courbe bleu et rouge). La référence PS sol « local » est un réflecteur soumis au phénomène RGA hors influence de la végétation (Figure 75). Ce pavillon est peu visible sur le terrain car occulté visuellement par une rangée de haie. Le pavillon est pour moitié sous influence de la végétation arborée. Les profils PS ne montre pas de comportement lié à l'influence de la végétation. On peut noter en fin d'année 1997, 1998 et février 2000, d'importants déplacements vers le capteur de l'ordre de 15 à 20mm mais qui restent liés au déplacement du support du pavillon. Ce bâtiment réagit solidairement avec son support, il n'y a probablement pas de tassement différentiel.

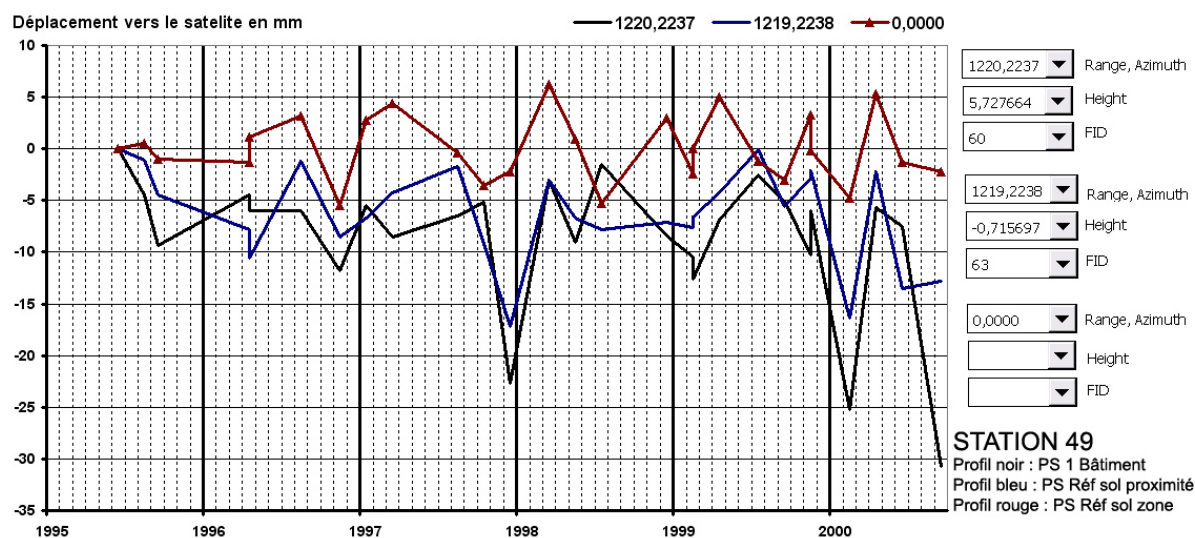


Figure 139 : Un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) comparé avec un profil PS de référence à proximité (courbe en bleu) et avec un profil PS sol de référence de la zone.

La Figure 139 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) que l'on compare à la référence PS du sol situé à proximité (courbe bleue) et à la courbe de référence PS de la zone (courbe rouge). Il s'agit d'un bâtiment observé non déformé et partiellement soumis à l'influence de la végétation arborée.

On observe une corrélation très nette avec le comportement des profils PS de référence du sol situé à proximité (courbe bleue) mais moins évidente avec la référence PS sol de la zone qui est une signature du phénomène RGA sous influence de la végétation (Figure 75). Le fait que le profil PS soit identique avec celui de son support montre des déplacements solidaires ce qui va dans le sens de la non-déformation. De plus la faible influence de la végétation confirme la faible corrélation avec le profil PS de la zone (courbe rouge). Mais comment expliquer ces tendances négatives (sol&pavillon) en fin d'année 1997 et début 2000 ?

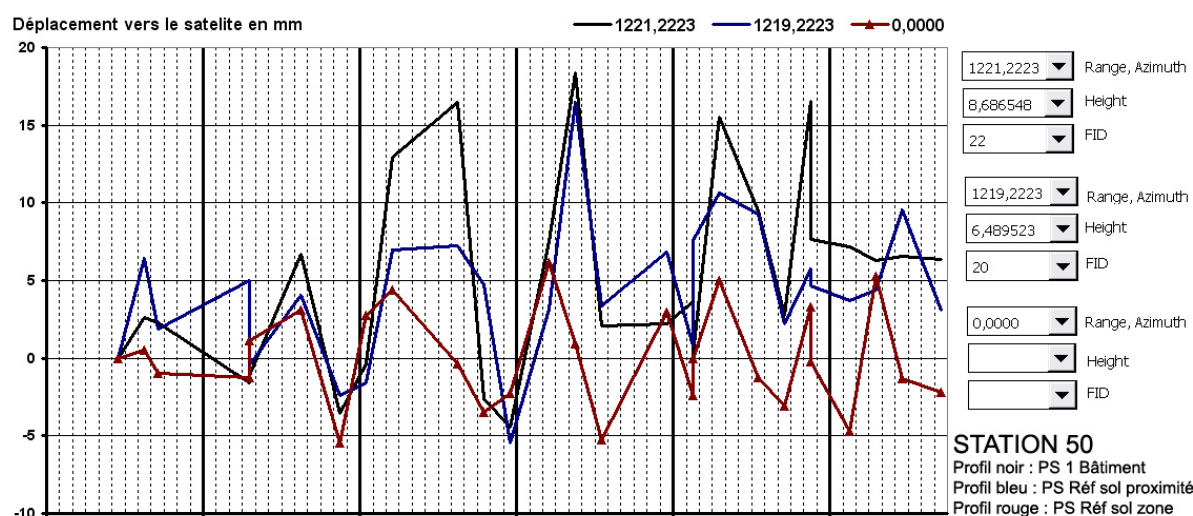


Figure 140 : Un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) comparé avec un profil PS de référence à proximité (courbe en bleu) et avec un profil PS sol de référence de la zone

La Figure 140 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) que l'on compare à la référence PS du sol situé à proximité (courbe bleue) et à la courbe de référence PS de la zone (courbe rouge). Il s'agit d'un bâtiment observé non déformé et partiellement et placé pour moitié dans l'aire d'influence de la végétation arborée.

On observe une corrélation très nette entre les trois types de profil, ce qui montre que les déplacements du pavillon sont solidaires avec son support, ce qui va dans le sens de l'absence de déformation. Cependant, l'influence de la végétation est notable car on retrouve bien la signature du profil PS de la zone (courbe rouge) dans le profil PS du bâtiment surtout sur la période de 1999 à 2000. Cela est en accord avec ce qui est observé sur le terrain. Cependant ce qui est plus difficile à interpréter, ce sont les différences d'amplitude de mesure de déplacement PS du bâtiment et de son sol de référence. On peut l'expliquer par une différence d'angle de mesure, les déplacements étant réalisés dans l'axe de visée du satellite.

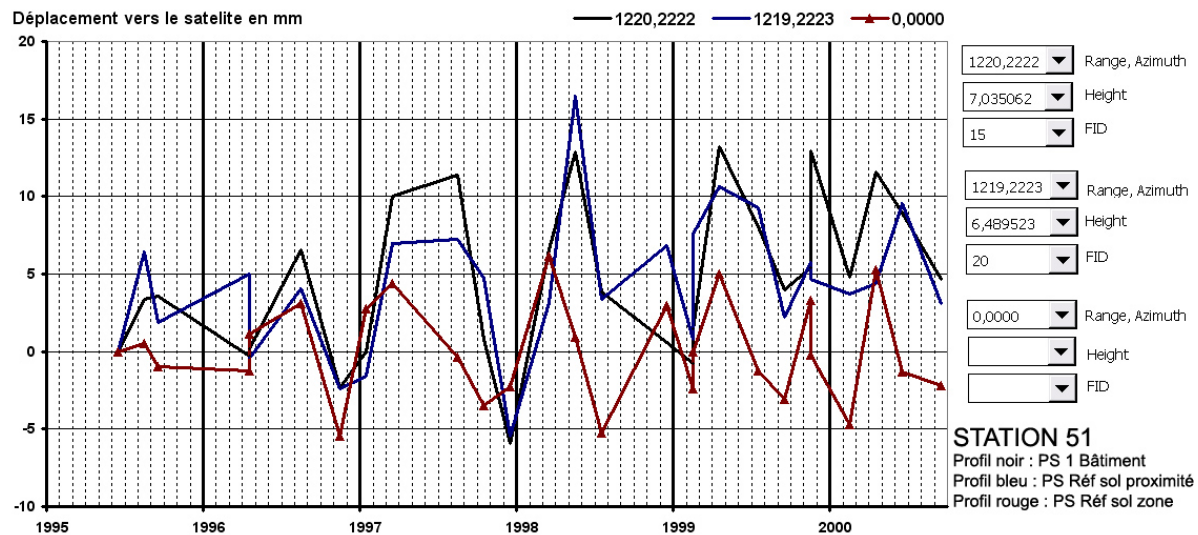


Figure 141 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire) comparé avec un profil PS de référence à proximité (courbe en bleu) et avec un profil PS sol de référence de la zone

La Figure 141 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) que l'on compare à la référence PS du sol situé à proximité (courbe bleue) et à la courbe de référence PS de la zone (courbe rouge). Il s'agit d'un bâtiment observé non déformé et non soumis à l'influence de la végétation arborée. L'analyse est identique au cas précédent, les mêmes observations sont faites : le profil PS du bâti révèle une influence de la végétation.

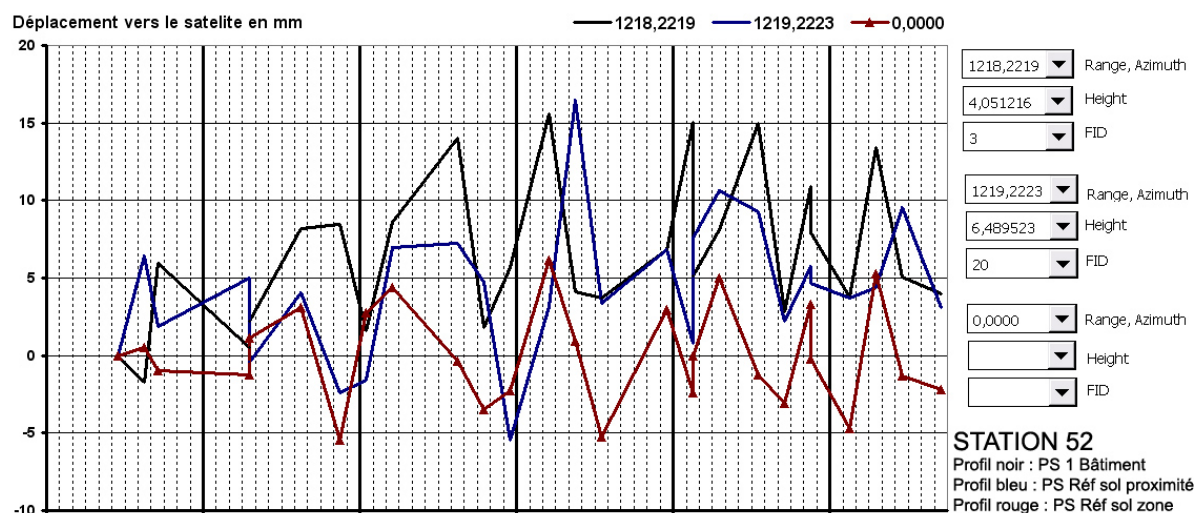


Figure 142 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire) comparé avec un profil PS de référence à proximité (courbe en bleu) et avec un profil PS sol de référence de la zone

La Figure 142 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) que l'on compare à la référence PS du sol situé à proximité (courbe bleue) et à la courbe de référence PS de la zone (courbe rouge). Il s'agit d'un bâtiment observé modérément déformé et non soumis à l'influence de la végétation arborée. On peut observer une nette corrélation entre les profils avec toutefois des écarts dans le temps entre le profil PS du bâtiment et celui de la référence PS sol à proximité. Ces déphasages sont certainement le signe de tassement différentiel mais le faible nombre de PS du bâtiment ne permet pas d'aller plus loin dans l'analyse.

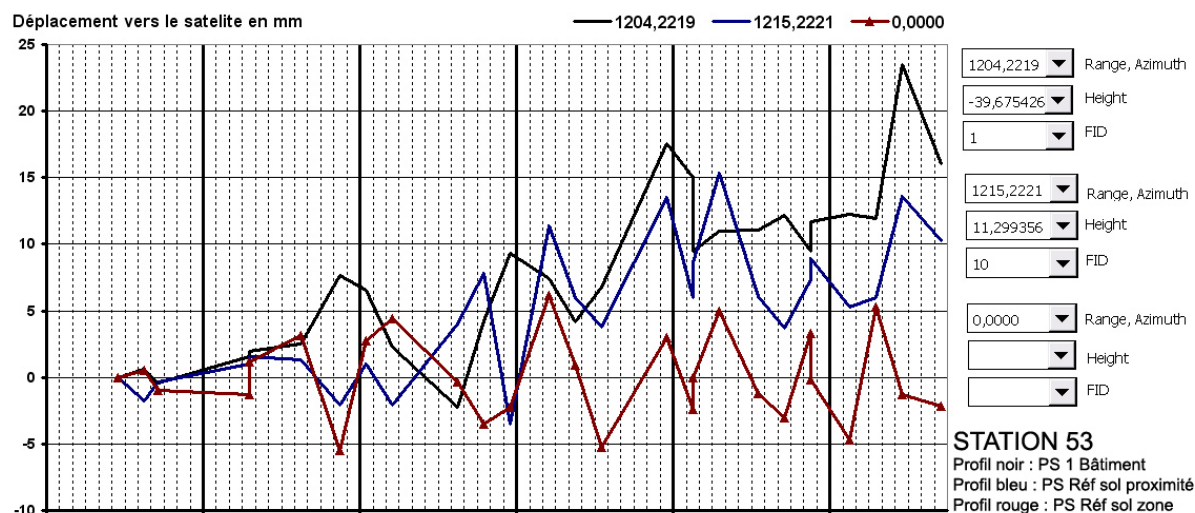


Figure 143 : Profil PS d'un bâtiment (courbe noire) comparé avec un profil PS de référence à proximité (courbe en bleu) et avec un profil PS sol de référence de la zone

La Figure 143 montre un profil PS d'un bâtiment (courbe noire) que l'on compare à la référence PS du sol situé à proximité (courbe bleue) et à la courbe de référence PS de la zone (courbe rouge). Il s'agit d'un bâtiment observé fortement déformé et soumis à l'influence de la végétation arborée. On peut observer une nette corrélation entre les profils PS du sol et du profil PS de référence de la zone. En revanche le profil PS du bâti n'a pas le même

comportement, on peut observer des déphasages et l'absence de déplacements alors que le support se tasse.

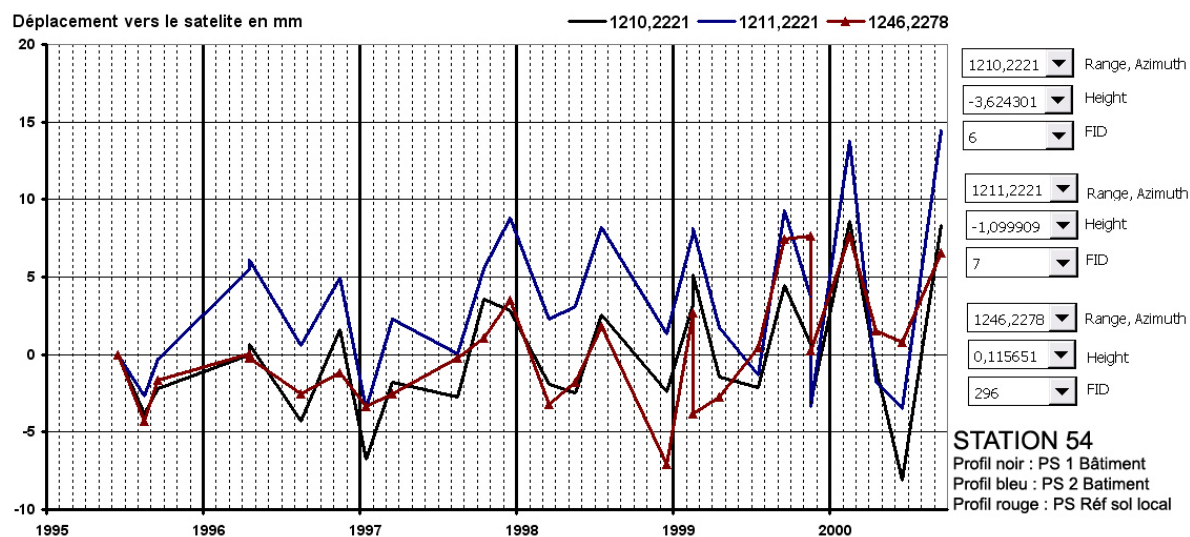


Figure 144 : Deux profils PS d'un bâtiment (courbe noire et bleue) comparé avec un profil PS de référence local (courbe rouge)

La Figure 144 montre deux profils PS d'un bâtiment (courbe noire et bleue) que l'on compare à la référence PS du sol local qui n'est pas influencé par la végétation (courbe rouge). Il s'agit d'un bâtiment observé modérément déformé et à la limite d'influence de la végétation arborée. On peut observer une nette corrélation entre les profils PS du bâtiment avec le profil PS de référence local. Ce bâtiment selon l'analyse PS ne présente pas de raison d'être déformé. Une étude des PS entre 2001 et 2009 est nécessaire pour compléter le diagnostic.

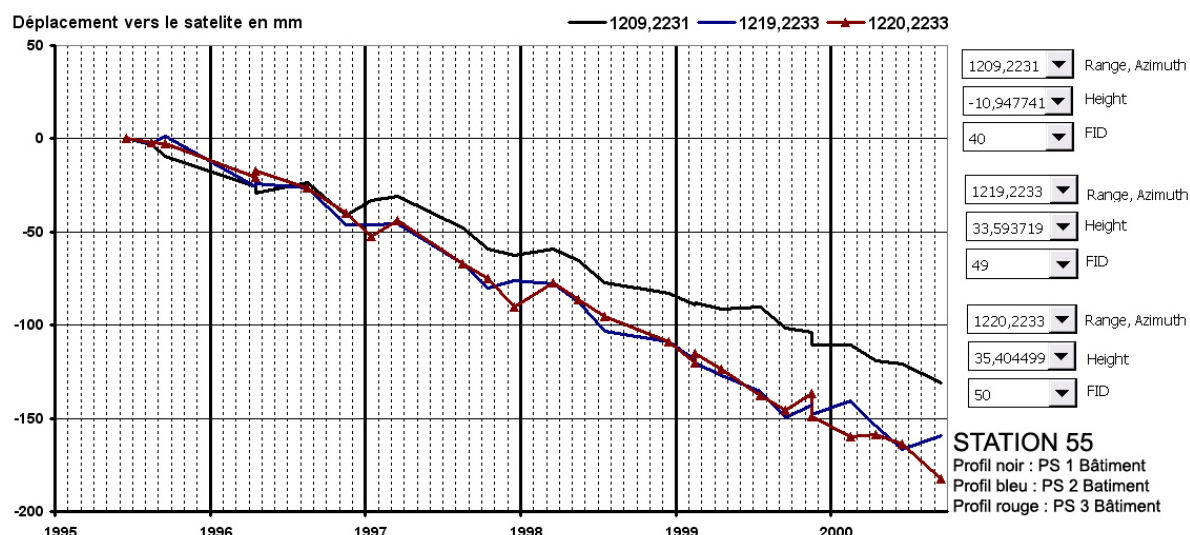


Figure 145 : Trois profils PS d'un bâtiment modérément fissuré

La Figure 145 montre trois profils PS d'un bâtiment avec des tendances linéaires négatives. Il s'agit d'un bâtiment déformé soumis à l'influence de la végétation arborée.

2.4.3. Synthèse des résultats Gournay-sur-Marne

Il s'agit de déterminer les relations entre le comportement de profil PS et les facteurs environnants. Pour ce faire une synthèse des résultats obtenus par l'analyse différentielle est présentée au Tableau 13. Ce tableau présente pour chaque type de famille PS « PRVeg » et « PRSol » les résultats obtenus pour la partie Nord et Sud de la zone. Cette différenciation fait suite à l'analyse spatiale, où des résultats disparates ont été obtenus selon l'emplacement des stations dans la zone d'intérêt à cause de la nature du sol affleurant : Au nord de la zone d'étude, affleurent les alluvions modernes F_z sur la plaine alluviale monotone, tandis qu'au Sud ce sont des terrasses alluviales plus anciennes F_y et Oligocène Eocène E_{7b} , marquée par une pente assez accusée de l'ordre de 4% (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour chaque partie étudiée, on considère le degré de déformations et la proximité de la végétation.

On constate que la majorité des stations ont pu être caractérisées par les références PS du sol : Parmi ces 66 bâtiments, 28 ont montré des tendances corrélées avec la référence RGA sous influence de la végétation (référence de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), 12 stations corrélées avec les seules fluctuations de RGA du sol (référence de la Figure 77), soit 40 stations dont le comportement est expliquées. Cinq stations sont des cas mixtes d'influence de ces deux catégories. Les dix-neuf autres stations présentent des comportements non liés à ces références et doivent être analysés selon leurs références PS sol à proximité.

Dans la partie nord, on compte vingt-deux stations dont les profils PS montrent une influence de la végétation et six dans la partie Sud. On compte douze stations décrites par la seule fluctuation du sol RGA (sans influence de la végétation) dont dix localisées dans la partie nord et 2 dans le Sud. On comprend que la partie Sud de la zone d'intérêt comportant moins de stations, les analyses sont limitées à cause du sous échantillonnage des données.

On a mis ainsi en évidence deux groupes caractéristiques de stations grâce aux corrélations effectuées avec les profils de référence PRVg et PRsol: (1) un premier groupe de stations soumis à des déplacements liés à la végétation arborée, (2) un second groupe de stations soumis à des déplacement RGA sans influence de la végétation, (3) un troisième groupe de stations montrant des similitudes avec les deux précédents groupes (cas mixte d'influence RGA et de végétation).

Lorsque l'on examine la relation entre ces trois groupes de station et l'information de déformation observée sur le terrain, on compte dans le Nord dix sept stations (77%) sur les vingt-deux stations interprétées qui ont un profil PS corrélé avec PRVg, on montre que ce sont pour moitié des maisons très fortement déformées (11 sur 22). Seuls trois cas concernent des maisons non déformées et un seul cas d'une maison rénovée. Pour le second groupe de stations dont les PS sont corrélés avec PRSol, on compte cinq cas sur dix de maisons déformées mais une majorité est modérément déformée (4 cas sur 5). Parmi les quatre stations ayant un comportement mixte PRVg/PRsol, trois cas sont des pavillons fortement déformés et un pavillon rénové. Il faut toutefois relativiser ce résultat compte tenu du faible nombre de

cas. Dans le Sud, parmi les 6 stations au comportement RGA sans influence de la végétation, on obtient 2 cas de maisons déformées et quatre cas sans déformation observée.

On souhaite également examiner la relation entre les groupes de stations et la proximité de la végétation. Dans la majorité de cas, 16 cas sur 22, les stations au comportement influencé par la végétation sont effectivement dans l'aire d'influence de la végétation théorique obtenue à la Figure 75. Il faut préciser que dans la majorité des cas, il s'agit de pavillons placés à la limite ou à cheval sur l'aire d'influence de la végétation. Cela montre que l'effet de tassement différentiel est maximum sur les bordures des zones d'influence et non à l'endroit de recouvrement des aires d'influence de la végétation arborée. Pour les stations dont les profils PS suivent PRsol, on observe une moitié de cas hors de la zone d'influence de la végétation (5 cas sur 10), une partie en limite d'influence de la végétation (3 cas sur 5) et le reste (2 cas) sous influence de la végétation.

Type Sol Type Influence	Partie Nord (Terrasses alluvionnaires F _z)									Partie Sud (F _y , Oligocène Eocène E _{7b})								
PRVeg (28)	Déformation				Influence Vég.					Déformation				Influence Vég.				
	Ø	R	1	2	Ø	ct	½	1	2	Ø	R	1	2±	Ø	ct	½	1	2
Nombre de cas :	3	1	6	11	0	6	8	4	4	4	0	1	1	1	3	2	0	0
PRsol (12)	Déformation				Influence Vég.					Déformation				Influence Vég.				
	Ø	R	1	2	Ø	ct	½	1	2	Ø	R	1	2±	Ø	ct	½	1	2
Nombre de cas :	4	1	4	1	5	3	0	2	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0
Cas mixte (5) PRVeg/ PRsol	Déformation				Influence Vég.					Déformation				Influence Vég.				
	Ø	R	1	2	Ø	ct	½	1	2	Ø	R	1	2	Ø	ct	½	1	2
Nombre de cas :	1	0	1	3	0	0	3	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 13 : Caractérisations des stations interprétées par les PS comparées aux observations faites sur le terrain relatives au déformation et à l'influence de la végétation arborée.

Légende des abréviations pour les déformations ;

Ø : absence de déformation, R : Rénové, 1 : déformations modérées, 2 : déformations importantes du bâtiment.

Légende des abréviations pour l'influence de la végétation arborée ;

Vég. Végétation, Ø : absence d'influence, Ct : bâti au contact de l'aire d'influence de la végétation arborée, ½ bâtiment placé pour moitié dans une aire d'influence de la végétation, 1 : bâtiment sous l'emprise de l'influence de la végétation, 2 : bâtiment sous l'influence de plusieurs arbres.

IV.3 Discussions

L'analyse des données PS confrontées aux données de terrain, a mis en évidence des déplacements de retrait gonflement liés aux saisons hivernales et estivales. En comparant les profils PS des bâtiments et les profils PS du sol, il a été possible dans la majorité des cas d'analyser **de manière différentielle** le comportement des bâtiments indépendamment des déplacements verticaux du sol. La recherche de point de référence du sol a permis d'identifier des profils types : (1) Un profil PS représentatif des fluctuations du sol noté PRSol (2) Un profil moyen extrait d'une famille de 95 PS homologues qui permet de décrire les mouvements RGA influencés par la végétation noté PRVeg (3) une multitude de profils PS locaux qui sont localement des références de par leur proximité au bâtiment, véritable profil témoin. Il a été démontré que de nombreux profils PS sont la combinaison des cas PRVeg et PRSol selon la proximité de la végétation arborées et de sa concentration.

Nos résultats montrent bâtiment par bâtiment, l'efficacité de la méthode pour tracer l'historique des déplacements. Nous montrons que les profils PS de bâti qui suivent PRVeg représentent les cas les plus gravement déformés et sont bien observés à proximité de l'aire d'influence de la végétation. On montre aussi que de fortes variations saisonnières supérieures à 10mm ont eu lieu sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces fluctuations du sol caractérisées par PRsol sont à l'origine des déformations modérées selon la qualité du bâtiment, mais ces dégâts peuvent être beaucoup plus prononcées en présence de la végétation. Des cas restent cependant non expliqués certainement par manque d'information sur la structure et les fondations des bâtiments. Les profils PS ont été caractérisés pour moitié grâce aux références PS PRVeg et PRsol.

Des événements de tassement en période sèche de 1996, 1998 et fin 2000 ont été identifiés. Les bâtiments disposant de plus d'un réflecteur permanent ont permis de souligner des tassements différentiels, généralement un an à deux ans après un événement de retrait gonflement. Ces mouvements différentiels sont observés pour des bâtiments fortement déformés et souvent placés à proximité de la végétation. Des bâtiments modérément déformés sont le plus souvent éloignés de la végétation mais soumis à des déplacements verticaux mesurés supérieurs à 10 mm dans le sens du capteur du satellite. Les bâtiments observés non déformés ont des variations altimétriques d'une amplitude inférieure à 5 mm, et ces déplacements sont corrélés avec ceux du sol. C'est à dire que les bâtiments peu ou non sensibles au RGA sont solidaires avec leur support.

Conclusions

L'objet de cette thèse est de localiser, caractériser, cartographier et quantifier les faibles déformations de la surface du sol liées aux mouvements de retrait-gonflement d'argiles par la mesure interférométrique radar. En effet, ce phénomène géologique engendre de faibles déformations de la surface du sol qui sont étudiable localement à l'aide de méthodes géotechniques et des essais mécaniques en laboratoire mais qui sont dispendieuses en temps et en moyen qui ne permet pas une cartographie d'extension spatiale suffisante. Deux nouvelles méthodes de calcul interférométrique (les méthodes DINSAR et PSI) ont été appliquées dans l'Est Parisien pour quantifier les mouvements et suivre le comportement du bâti soumis au phénomène de sécheresse géotechnique. Les résultats obtenus sont probants pour quantifier ces mouvements liés à la sécheresse géotechnique mais ces techniques s'emploient à des échelles spatiales variables, sous certaines conditions techniques et avec des limites qui leur sont spécifiques. Les mesures obtenus ont été comparées et analysées à l'aide d'une base de données exploitée par un SIG intégrant les conditions environnantes afin de mettre en évidence les facteurs participant au risque géotechnique. Si la qualité du bâtiment (ou sa vulnérabilité) et la nature argileuse du sol (susceptibilité du sol au RGA) sont à prendre en compte en premier lieu, ce sont les facteurs tels que la proximité de la végétation, l'effet de la nappe phréatique sous-jacente et la pente accentué des terrains qui joue un rôle aggravant dans la sinistralité. Il est difficile d'isoler et de distinguer le rôle de chacun des ces facteurs aggravant pour démontrer la cause exacte de la sinistralité, les dégâts observés étant le plus souvent le résultat de leurs effets combinés.

Cette conclusion rappelle les résultats interférométriques obtenus en terme technique, en particulier ceux obtenus sur la mesure des déplacements non linéaires liés au phénomène RGA, mais aussi les résultats méthodologiques sur la manière d'analyser les profils de déplacements PS, jusqu'à la représentation spatiale de désordres sous forme cartographique. Après avoir rappelé ces résultats techniques et méthodologiques, une discussion sur la thématique de prévention est réalisée en guise de perspective pour aider et améliorer la compréhension de l'impact de la sécheresse en région Ile-de-France.

Conclusions techniques sur les méthodes de télédétection DINSAR et PSI.

La mesure par télédétection radar des déformations liées au phénomène de retrait-gonflement d'argile RGA pose deux problématiques à résoudre : d'une part mesurer la faible déformation de la surface du sol et d'autre part suivre dans le temps le comportement du bâti. Si les techniques interférométriques DINSAR et PSI se sont révélées complémentaires et adaptées pour quantifier des mouvements de faibles amplitudes, elles ne donnent pas les mêmes résultats de par leurs précisions spatio-temporelles distinctes.

Nous avons montré que la technique DINSAR est un bon préalable pour détecter à l'échelle régionale tout les types de mouvements urbains. Cependant cette technique est d'une

résolution spatiale et temporelle insuffisante pour détecter des mouvements discrets et non linéaires à l'échelle de la parcelle et du bâtiment. L'absence de cohérence spatiale due à la végétation et à la présence des espaces jardinés pose problème pour étudier les déplacements relatifs dans ce type de tissu urbain. Seuls les mouvements suffisamment étendus, linéaires et continus dans le temps peuvent être détaillés et représentés sous forme de carte de différence de phase entre deux dates par des interférogrammes. Une solution consiste donc à sélectionner des images radar dans une géométrie très proche (une ligne de base inférieure à 50m) et avec une période de temps supérieure à trois ans. On a ainsi pu montrer des mouvements de subsidence sur les berges de la Marne et dans la plaine alluviale de la Marne en période de sécheresse de 1996. Ces résultats sous forme d'interférogrammes DINSAR sont toutefois occultés par les décorrélations temporelles et géométriques qui induisent des « bruits » rendant incertaines les interprétations des interférogrammes, tant dans la délimitation de l'emprise spatiale des mouvements que dans la quantification de mouvements. Même filtrés et moyennés, ces documents ne peuvent servir directement à une cartographie thématique pour représenter complètement le risque géotechnique.

Ces interférogrammes DINSAR ont été ensuite comparés avec la carte de vitesse moyenne de déplacement obtenue par la technique PSI par régression linéaires des profils PS : les résultats obtenus avec la technique PSI corroborent ceux obtenus en interférométrie DINSAR : des cartes de vitesse moyenne sur l'ensemble de l'Est Parisien ont permis de montrer la subsidence à l'aplomb des plaines alluviales à partir de l'année 1996. Les archives de données radar de 1993 à 2006 avec une répétitivité d'acquisition tout les 35 jours permettent de souligner l'effet de la sécheresse de 1996 et de ses effets jusqu'en 1998.

A l'échelle locale, seule la technique PSI donne des résultats satisfaisants pour suivre dans le temps le comportement d'un sol argileux soumis à la sécheresse mais aussi le comportement du bâti au cours du temps. C'est une technique capable de répondre aux besoins des analystes du RGA de par sa précision millimétrique, de par sa fréquence d'échantillonnage mensuelle exploitant au mieux les archives radar sur de longues périodes. Des mouvements non linéaires de retrait-gonflement et leur impact sur le bâti ont été ainsi identifiés et analysés en prenant en compte les facteurs environnant tels que la nature du sol, la proximité de la végétation, la pente du terrain, le type de bâtiments et les installations associées (trottoir périphérique, aménagement de protection contre la dessiccation superficielle). Les résultats montrent des mouvements de terrain de type RGA en 1996 provoquant des désordres urbains entre 1996 et 1998.

Cependant lors de ce travail minutieux un certain nombre de limitations qui réduisent l'efficacité de mesure de la technique PSI ont été observés. Les voici par ordre d'importance décroissante :

- La mesure des déplacements est faite selon l'axe de visée du satellite. Si les mouvements de retrait-gonflement du sol sont supposés verticaux, en revanche le comportement d'une maison soumis à des tassements différentiels ne l'est pas dans l'absolu. Il en résulte des observations différentes selon la géométrie d'acquisition radar, en mode

descendant et ascendant, car une seule composante de la déformation est mesurée dans la ligne de visée. Cette étude a privilégiée le mode ascendant pour mesurer les déformations de jour. L'interprétation du comportement des réflecteurs appartenant à un bâti est parfois délicate en l'absence d'une référence PS du sol : il en résulte une description non quantitative, permettant de détecter un ou plusieurs événements mais sans forcément expliquer qualitativement les profils de déplacements dans leur ensemble.

- La seconde limitation majeure est le problème de positionnement planimétrique des réflecteurs PSI en {XY} : malgré un géocodage à l'aide d'image aérienne, on obtient une précision de positionnement planimétrique d'un mètre, ce qui est suffisant au niveau du sol mais insuffisant pour localiser et caractériser précisément le réflecteur appartenant à un bâtiment. Cette précision est d'autant plus inexacte que l'élévation des réflecteurs sur le bâti est importante, plus d'un mètre parfois en {XYZ}.

- On a démontré l'importance de disposer de références locales du sol, car la seule référence utilisée pour le calcul des PS n'est pas suffisante pour réaliser une interprétation différentielle entre le mouvement du sol et le comportement des bâtiments. La recherche d'une référence locale est longue et nécessite une validation par des données terrain (nivellement, GPS).

- La disponibilité des données radar et la qualité de ces images pour l'application interférométrique est un aussi un facteur limitant : on note un problème de gyroscopes sur le satellite radar ERS2 à partir de février 2000, ce qui pose un problème de continuité des mesures PSI, notamment pour l'analyse de la sécheresse de 2003. En conséquence, certaines images ne sont pas utilisables à cause de problème de valeur trop importante de Doppler.

- L'interprétation des profils PS est soumise aussi à précaution, il peut y avoir un saut de plusieurs centimètres, un « shift » important de 2,8cm dans le cas d'ERS 1&2, qui est lié au recouvrement de la phase. Ces erreurs de calcul seront encore à améliorer dans l'algorithme du calcul PSI.

- Enfin le calcul par la méthode PSI est long : 4 jours pour une scène de 60 images à réaliser pour le mode ascendant et descendant. Il en résulte des données volumineuses difficiles à traiter dans leur intégralité. Mais ceci ne tends plus à ne plus être une limitation du fait des progressions technologiques de l'informatique (capacité de stockage, temps de calcul). En effet l'acquisition des données auprès des agences spatiales tend à être le véritable facteur limitant, d'un point de vu cout et temps.

En perspective de développement de la technique PSI, il faut noter que de nouveaux algorithmes de calcul prenant en compte un modèle non linéaire de déplacement est en cours de développement (Javier Duro, ALTAMIRA, comm. Pers.). Ceci se révélerait particulièrement adaptée à la problématique du retrait-gonflement argile. Enfin, il faut encore améliorer des outils de visualisation et de sélection sous SIG pour optimiser leur analyse, ainsi que le développement d'outil d'analyse statistique pour traiter les données PSI et tout

particulièrement le comportement des profils en grande famille cohérente dans leur intégralité.

Conclusions méthodologiques

Le travail d'analyse des interférogrammes et des profils PS doit être effectué avec une démarche d'analyse spécifique qui a été mis au point lors de ce travail de thèse.

D'une part, il est nécessaire de connaître les périodes de sécheresse localement, ou du moins de présenter les valeurs climatiques de base pour appuyer l'interprétation. Les données de température, de précipitation et d'évapotranspiration sont nécessaires pour effectuer les travaux en amont de l'analyse des résultats interférométriques. De même, une connaissance de la topographie est obligatoire pour comprendre la géométrie du sol et de l'acquisition radar vis-à-vis du relief. On peut regretter l'absence de données topographiques à haute résolution de type Laser aéroporté (Lidar) dans cette étude sur l'Est Parisien. Un modèle numérique de terrain d'une cellule de résolution au pas de un mètre, et d'une précision altimétrique décimétrique serait un moyen efficace pour caractériser la géométrie des habitations et mieux caractériser la nature des réflecteurs, mais aussi d'obtenir une mesure de la hauteur de la végétation arborée. Les données radiométriques (images satellites et aériennes) permettent de caractériser la nature du sol et des réflecteurs existant. L'imagerie aérienne (orthophotographie IGN) est obligatoire pour géocoder les données PS et identifier les bâtiments présents. Enfin les informations de sinistralité renseignent les zones d'enjeu et guide en parti l'examen des profils PS.

L'ensemble de ces informations géographiques doivent être organisées et référencées dans une base de données pour permettre l'analyse des processus de retrait-gonflement. Si à l'échelle régionale ces informations sont utiles, à l'échelle de la parcelle elles sont obligatoires. Chaque analyse de profil PS en milieu urbain donne donc lieu à une expertise au cas par cas, en intégrant des informations et des observations terrain que seul un SIG permet de stocker, afficher et analyser spatialement : la position et l'agencement des bâtiments, la localisation des PS et la présence de la végétation arborée...

La méthode d'analyse des PS mise au point consiste en une analyse différentielle du comportement des PS « sol » et des PS représentant des réflecteurs « bâti ». La recherche de profils de PS de références de type « sol » est nécessaire pour mieux comprendre le comportement du bâti, ce choix étant réalisé sous SIG et validé sur le terrain. La qualité des résultats obtenus dépend grandement du nombre de PS disponible sur le bâti et du choix des références locales au sol.

Conclusions thématiques

L'analyse des PS a permis de montrer des relations entre la sinistralité liée au RGA et des facteurs environnant :

La nature du sol argileux et sa susceptibilité du sol au retrait-gonflement est le facteur de prédisposition majeur au phénomène de retrait-gonflement des sols. Ces terrains argileux sont exposés à l'évapotranspiration des espaces arborés et la dessiccation de surface surtout en milieu urbains pavillonnaire individuel sans fondations marqué par la forte présence d'espace ouvert jardiné.

La proximité de la végétation est dans la moitié des cas à l'origine de la sinistralité ou de l'aggravation des désordres. Parmi les cas des bâtiments endommagés, la présence d'un arbre à une distance inférieure à une fois la hauteur de l'arbre est une situation fréquente dans les propriétés privées des zones étudiées. Pour certaine essence les plus « agressive », l'influence de la végétation décrite par les PS montre une distance égale à 1,5 fois à 2 fois la hauteur de l'arbre. Il est démontré dans ce travail, que l'influence de la végétation arborée est particulièrement forte sur son pourtour d'influence, un grand nombre de pavillons en contact de cette zone d'influence sont observés déformés. De même, l'arbre à l'origine des déformations n'est pas nécessairement celui qui est le plus proche du pavillon, il faut bien prendre en compte la hauteur et l'essence de l'arbre. La cartographie de la végétation est un fait nouveau qui souligne les difficultés de l'aménagement des espaces verts dans un milieu urbain où les bâtiments sont insuffisamment fondés, qui peut être résolu en amont avec les conseils de spécialistes pépiniéristes.

Le type de bâtiment (charpente, maçonnerie, nombre d'étage, fondation, garage enfouis, fondations...) et son agencement vis-à-vis des bâtiments mitoyens (annexes, autres bâti) et ses aménagements (évacuation d'eau de pluie, trottoir périphérique) est à prendre en compte lors des observations terrain pour réaliser correctement le travail d'analyse des profils PS. Le type de toiture est également à noter pour comprendre le comportement des réflecteurs de type bâti afin de s'assurer de l'absence de dilatation thermique (d'un ordre de grandeur voisin de plus ou moins un millimètre pour des structures en verre et acier). Cependant, la presque totalité des pavillons sont en tuiles ou revêtements faiblement sensibles à la chaleur, et les mesures effectuées de jour en mode ascendant écarte cette hypothèse. Si le travail effectué montre que des bâtiments équipés de trottoirs périphériques sont le moins souvent déformés ou peu déformés -alors que toutes les conditions aggravantes sont réunies (présence d'arbres par exemple), on remarque que c'est la qualité des maçonneries et de la charpente du bâti qui conditionne l'apparition des fissures. Certains bâtiments en ciment et crépi expriment plus les déformations alors que les parpaings et briques peuvent les dissimuler. Enfin, notre travail n'a pas pu prendre en compte les profondeurs de fondations, information pourtant essentielle pour juger de la vulnérabilité d'un bâtiment soumis au RGA.

Enfin l'influence de la nappe phréatique sous-jacente est l'un des aspects les plus délicat posé dans le diagnostic de la sinistralité du RGA. L'analyse PS a révélé des

mouvements même de la surface du sol hors-influence de la végétation ; ce qui tend à montrer qu'une zone sinistrée en zone alluviale ou au sommet d'un bassin perché avec des nappes temporaires est plus exposée. Un battement de nappe peut préserver un sol d'une intense déshydratation, il peut aussi l'accentuer en déplaçant l'équilibre de sol en cas de retrait de l'eau. Ainsi on montre sur les zones étudiées que les deux phénomènes, RGA et battement de nappes se combinent et qu'il est difficile de déterminer l'origine réelle des déformations observées.

Conclusions générales et perspectives

La pression immobilière autour des grands centres d'agglomération a favorisé le développement continu de zones pavillonnaires individuelles sur des sols autrefois dédiés à l'agriculture ou des espaces naturels peu adaptés à la construction. La seule visualisation de l'imagerie aérienne montre que les sols sont désormais « prisés » non pour leur qualité intrinsèque pour la construction mais par la proximité de la capitale et des infrastructures de transports. Des zones soumises à des risques naturels tels que des glissements de terrain ou des inondations font l'objet d'extension urbaine intense. Dans la problématique du RGA, des sols argileux soumis à des rabattements de nappes sont vendus et déclarés constructibles, charge aux constructeurs d'adapter le bâtiment aux contraintes du sol. Ceci n'est pas sans risque, puisque depuis 1976, le nombre de sinistre lié au RGA est en constante augmentation avec des coûts toujours plus importants liés à l'importance de la valeur immobilière.

Lors des missions terrain, les discussions tenues avec les habitants de quartiers sinistrés ont montré le fort intérêt que portent les propriétaires pour mieux connaître l'état de leur habitat ainsi que les mesures de préventions à prendre pour le préserver leur habitat des effets de la sécheresse géotechnique. D'autre part, les propriétaires ont exprimé de vives inquiétudes sur les démarches à effectuer auprès de leurs assureurs. Cet intérêt est justifié puisqu'un grand nombre ont réussi à faire valoir leur droit en s'appuyant sur de bonnes connaissances du phénomène RGA, comme bien prendre les photos, décrire avec exactitude les dégâts observés (de préférence ceux en relation avec la pathologie de la sécheresse géotechnique) et surtout d'effectuer les démarches administratives à temps.

Nos observations terrain dans les quartiers sinistré de Villiers-sur-Marne, Gournay-sur-Marne, Bry-sur-Marne et Gagny, montrent une sinistralité plus forte que celle officiellement recensée, ce qui nous amène à penser qu'un nombre important de propriétaires sont mal indemnisés voire non indemnisés. On peut penser qu'un grand nombre d'entre eux seront certainement plus vigilants dans les années à venir à faire valoir leur droit afin de préserver la valeur de leur patrimoine immobilier.

En partant d'un deuxième constat, celui de l'occurrence de l'aléa sécheresse RGA lors des dernières sécheresses des années 1990/2000, il faut s'attendre à ce que le risque naturel sécheresse géotechnique soit un facteur de désordre majeur affectant la valeur du patrimoine immobilier au même titre que les inondations. Sa gestion au sein du système CatNat sera

encore mise en cause, car la sécheresse géotechnique n'est pas similaire aux autres risques naturels:

- On ne voit pas formellement les dégâts liés à un épisode tel qu'une inondation,
- Les dommages peuvent être diffus sur le territoire et non concentré sur une zone sinistrée,
- Il n'y a pas d'état de lieu des bâtiments avant événement, des fissurations pouvant être faussement attribuées à des événements plus tardifs pour obtenir une indemnisation,
- Les dommages peuvent être à retardement avec des déformations échelonnées dans le temps, fonction des cycles humidification/sécheresse.

Sur ce dernier point, on peut noter que les différents acteurs impliqués dans la gestion du risque (Etat, caisse central de réassurance CCR et assureurs) ont longtemps essayés d'associer un événement climatique de sécheresse à une date précise alors que le phénomène de sécheresse géotechnique dispose de « périodes de retour » étalée dans le temps, avec des temps de réponse sur plusieurs années, consécutifs à des mouvements de retrait-gonflements et retour à l'équilibre des sols différés dans le temps : une sécheresse géotechnique affecte la consistance du sol durablement dans le temps qui prend un temps certain pour revenir à son équilibre avec le climat ambiant.

En conséquence, non seulement une mise en œuvre des moyens de prévention dans les zones à risque est nécessaire, mais il est aussi indispensable d'établir un meilleur suivi des bâtiments de leur construction, de leur entretien et de leurs aménagements. Il est surprenant que les biens immobiliers, compte tenu de leur importance dans l'économie -un des fondamentaux économiques des pays industrialisés- ne fasse pas l'objet d'une réglementation plus précise comme dans celle qui est imposée aux propriétaires de véhicules motorisés : carte grise précisant la nature technique du véhicule, la carte verte de l'assurance et contrôle technique (et...).

En effet, trop peu d'informations sont conservées suite à la construction : la profondeur des fondations, le plan d'architecture, le type de tuyauterie et de canalisation, la méthode d'évacuation des eaux de pluie, le type de matériaux et agencement de la maçonnerie qui pourrait faire l'objet d'une BDD municipale. Concernant l'aménagement direct des bâtiments, il y a aussi un effort à renseigner au cours du temps pour suivre la présence de la végétation arborée avoisinante, telle que reporter les déformations éventuelles des annexes et trottoirs périphériques qui souvent sont symptomatiques des effets de la sécheresse géotechnique. Il y a pourtant une forte demande de la communauté scientifique et du milieu des assurances pour centraliser ces informations.

Il faut aussi souligner le manque de regroupement des informations relatives aux tests géotechniques effectués, la plupart de ces informations étant disséminées dans les banques de données des différentes sociétés géotechniques. Pour souligner ce fait on peut noter les efforts de synthèse du BRGM pour rassembler les informations géotechniques afin d'établir des

fiches géotechniques. L'institut a rencontré des difficultés dans la réalisation de ce travail de synthèse, du fait d'un grand nombre de paramètres géotechniques à prendre en compte.

Les travaux scientifiques récents consécutifs à la sécheresse géotechnique de 2003 ont permis d'avancer considérablement dans la compréhension du phénomène RGA. Il faut maintenant aller plus loin dans la mise en œuvre et l'application de ces résultats, action que seuls les législateurs peuvent prendre à l'échelle nationale :

- Etablir les caractéristiques de l'habitat et de ses modifications,
- Permettre aux citoyens de déclarer les déformations observées dès leur apparition et d'assurer un suivi de l'observation de ces dégâts,
- Centraliser les mesures géotechniques effectuées,
- Regrouper les informations des assureurs dans un fichier centralisé permettant un retour d'expérience de la sécheresse géotechnique,
- Diffuser les moyens de préventions en matière d'aménagement de l'habitat,
- Mettre à jour les DUT de construction dans les zones à risque, en particulier celles concernant les habitats pavillonnaires qui restent insuffisamment fondés pour les sols argileux rencontrés.

L'application de ces mesures a certainement un coût important, mais cohérent par rapport aux enjeux immobiliers. Et compte tenu de l'importance du patrimoine immobilier dans l'économie française, la réalisation de ces actions devrait permettre à l'avenir d'éviter ou de limiter le scénario de 2003 (fond de la CCR insuffisant) et ainsi de préserver le système d'indemnisation solidaire dans le régime des déclarations CatNat.

La progression de l'interférométrie radar PSI avec la prise en compte de modèle de déformation linéaire, le lancement de nouveaux satellites SAR (COSMO-SkyMed), le développement des outils d'analyse et de traitement SIG, permettent d'envisager à terme une cartographie plus détaillée des déplacements de la surface du sol et donc de mieux cartographier les risques à l'échelle de la parcelle. Mieux connaître les risques pour mieux indemniser. La réalisation de ce travail de thèse a montré l'énorme potentiel de la télédétection radar pour le suivi et la localisation des déplacements, mais sa qualité est grandement liée à la disponibilité des informations relatives aux bâtiments, informations qu'il n'est pas toujours possible d'acquérir sur le terrain. Il est donc indispensable de les centraliser et de les rendre accessible afin d'établir avec exactitude le risque sécheresse géotechnique.

Bibliographie

- ALLAIN, S. (2003). Caractérisation d'un sol nu à partir de données SAR polarimétriques. Etude multi-fréquentielle et multi-résolutions. Thèse de l'Université de Rennes I, 176p.
- ALLEN, 1997. Earth surface processes. Blackwell.
- AMELUNG, F., GALLOWAY, D.L., BELL, J.W., ZEBKER, H.A. AND LACZNIK, R.J. (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, 27(6) : pp.483-486.
- ARNAUD, A. (1997). Etude et analyse des artefacts dans la construction de l'image interférométrique radar, Ph.D. Thesis, D. Massonnet th. dir., LIMA-IRIT, ENSEEIHT, France, 194p.
- ARNAUD, A., DURO, J., INGLADA, J., EINEDER, M., ADAMS, N., HANSSEN, R. (2003). "ASAR/ERS interferometry over stable points network". IGARSS 2003, Toulouse (France), 21-25pp.
- BALMER, R. (1992). A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms, IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, vol 30, N°4, july 1992.
- BALMER, R., EINEDER, M. AND BREIT, H. (1996). The X-SAR Single Pass Interferometer on SRTM: Expected Performance and Processing Concept, in: EUSAR'96, Königswinter, Germany, pp.181 - 184.
- BAMLER, R. ET HARTL P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems 14(4): pp. R1 - R54.
- BAUER-PLAINDOUX C., TESSIER D. & GHOREYCHI M., (1998), Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : importance de la relation calcite-argile, C.R. Acad. Sci. Paris, série Ila, 326.
- BAUP, F., (2007). Apport des données Envisat/ASAR pour le suivi des surfaces continentales : application à la zone Sahélienne, Thèse d'état, Université Toulouse III, Paul Sabatier, 202p.
- Beauchamp, 2002. REF INTROUVABLE !
- BENCHABANE A. (2006). Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères. Thèses de doctorat, Université Louis Pasteur.
- BEN-DOR E.; PATKIN K.; BANIN A.; KARNIELI A. (2002). Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data - a case study over clayey soils in Israel, *International Journal of Remote Sensing*, Volume 23, Number 6, 30, pp. 1043 - 1062(20).
- BEN-DOR E.; PATKIN K.; BANIN A.; KARNIELI A., 2002. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data - a case study over clayey soils in Israel, *International Journal of Remote Sensing*, Volume 23, Number 6, 30, pp. 1043 - 1062(20).
- BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R. SANSOSTI, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 40, 2375-2382pp.
- BIDDLE P.G. (1983) – Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. *Géotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 107-126
- BIGOT G, ZERHOUNI M.I. (2000) Retrait, gonflement et tassement des sols fins. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°229, 105-114.
- BOURRELIER, P.-H., DENEUBOURG, G., DE VANSSAY, B. (2000). Les catastrophes naturelles, le grand cafouillage. Editions OEM, ISBN 2-7464-0163-0. 262 pages.

- BOUTIN, C. (2007). Rapport du gouvernement au parlement sur l'indemnisation des dommages aux bâtiments causés par la sécheresse sur venue durant l'été 2003. Ministère de l'Economie, des finances et de l'emploi Ministère de l'Intérieur, de l'outremer et des collectivités territoriales, Ministère du Budget, des comptes publics et de la fonction publique, Ministère de l'Ecologie, du développement et de l'aménagement Durables Ministère du Logement et de la ville. 66pages.
- BOYLES J., STOW R., WRIGHT P. (2000). Insar imaging of London movement for structural damage management and water resource conservation. Unpublished., 7p.
- BULTEL F., (2001). Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels, thèse de doctorat, Ecole National des ponts et chaussées. Pages ???
- CAILLERE S. HENIN S., RAUTUREAU M. (1989). Les argiles, éditions SEPTIMA, Paris.
- CAILLERE, S; HENIN, S; RAUTUREAU, M. (1982). Minéralogie des argiles. 1-Structure et propriétés physicochimiques. Masson PARIS (FRA) 184 p.
- CAILLERE, S; HENIN, S; RAUTUREAU, M. (1982). Minéralogie des argiles. 2-Classification et nomenclature. Masson PARIS (FRA) 189 p.
- CALLOT, G., CHAMAYOU, H., MAERTENS, C., SALSAC, L. 1982. Mieux comprendre les interactions sol - racine. Incidence sur la nutrition minérale. Edition INRA, Paris, 325 p.
- Carte Géologique 1 : 50000 de Corbeil-Essonnes XXIII-14, n°219, 3^e édition, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1987, emprise Lambert I zone nord (587000,120000) (613000,100000).
- Carte Géologique 1 : 50000 de Paris XXIII-14, n°183, 2^e édition, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1966, emprise Lambert I zone nord (590000,140000) (613000,120000)
- CEBTP sous l'égide de l'AQC, l'APSAD, l'AFAC, la CCR et la FNB (1991) – Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse. *Guide pratique CEBTP*, 3 fascicules
- CHABRILLAT S., GOETZ A. F. H., KROSLEY L. AND OLSEN H. W. (2002). Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, Volume 82, Issues 2-3, p. 431- 445.
- CHAPMAN D.L. (1913). LI. A contribution to the theory of electrocapillarity. *Philos. Mag.* 25 (1913), p. 475.
- CHATTERJEE R.S., FRUNEAU B., RUDANT J.P., ROY P.S., FRISON P-L, LAKHERA R.C., DADHWAL V.K. AND SAHA R. (2006). Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, Volume 102, Issues 1-2, pp. 176 - 185.
- CHERTKOV V. Y. AND RAVINA I. (1999). Morphology of horizontal cracks in swelling soils. *Theoretical and applied fracture mechanics* 31, pp. 19-29.
- CHOISNEL E., NOILHAN J. (1995) – La prévention des sécheresses. *La Recherche*, 272, vol. 26, p. 34-40
- CLIMATE CHANGE (2007). Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution du groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, *Cambridge university press*, ISBN 978 0521 88010-7 (édition reliée), 978 0521 70597-4 (édition brochée).
- CLIMATE CHANGE (2007). Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution du groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, *Cambridge university press*, ISBN 978 0521 88010-7 (édition reliée), 978 0521 70597-4 (édition brochée).
- CLIMATE CHANGE (2007). Mitigation of Climate Change Contribution du groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation du GIEC, *Cambridge university press*, ISBN 978 0521 88011-4 (édition reliée), 978 0521 70598-1 (édition brochée).

- CLIMATE CHANGE (2007). The Physical Science Basis, Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, *Cambridge university press*, ISBN 978 0521 88009-1 (édition reliée), 978 0521 70596-7 (édition brochée).
- COJEAN R. (2007). Introduction à la sécheresse géotechnique, *Revue Française géotechnique*, n°120-121, 4ème trimestre 2007. pp. 7-9.
- COJEAN R., AUDIGUIER M., GEREMEW Z., LARIBI S., THENEVIN I., CUI Y.J., TANG A.M, TA A.N, HECK J.-V, TAILLEFER N., DEFFONTAINES B., KAVEH H.F., FRUNEAU B., (2009). Rapport collectif coordonné par Cojean R., en partenariat entre Armines – Mines ParisTech / Centre de Géosciences, L'Ecole des ponts ParisTech/ UR Navier - Géotechnique, le CSTB et UPE-MLV/OTIG. Rapport de synthèse final du projet « aléa et risque sécheresse » - Projet Fondation MAIF, Rapport N°.R090130RCOJ, *Centre de géosciences, Mines Paris Tech*, Fontainebleau, France.
- COJEAN R., AUDIGUIER M., GEREMEW Z., LARIBI S., THENEVIN I., CUI Y.J., TANG A.M., TA A.N., HECK J.-V., TAILLEFER N., DEFFONTAINES B., KAVEH F., FRUNEAU B., (2009) : Rapport collectif coordonné par Cojean R., en partenariat entre Armines – Mines ParisTech / Centre de Géosciences, l'Ecole des Ponts ParisTech/ UR Navier - Géotechnique, le CSTB et UPE-MLV/OTIG. Rapport de synthèse final du projet « Aléa et risque sécheresse » - Projet Fondation MAIF. Rapport N°. R090130RCOJ, Centre de Géosciences, Mines ParisTech, Fontainebleau, France ;
- COLESANTI C., FERRETTI A., PRATI C. AND ROCCA F. (2002). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, Volume 68, Issues 1-2, pp. 3-14.
- COLESANTI C., FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2003). Monitoring Landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers Technique, *Engineering Geology*, Vol. 68, pp. 3 -14.
- COLESANTI, C., FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F. (2001). Comparing GPS, optical leveling and permanent scatterers. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International. Volume 6, 9-13, pp. 2622 - 2624.
- COLESANTI, C., FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F. (2001). Comparing GPS, optical leveling and permanent scatterers. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International. Volume 6, 9-13, pp. 2622 - 2624.
- COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on Volume 41, Issue 7, Part 1, pp.1685 - 1701.
- Collectif (1974) - Mécanique des sols. Eyrolles, 173 p.
- Comprendre l'interaction des arbres, du sol d'argile sensible et des fondations et agir en conséquence :
- COSTET J. ET SANGLERAT G., (1981). Cours pratique de mécanique des sols, Dunod.
- CURIE P. ET CURIE J., (1881). Contractions et dilatations produites par des tensions électriques dans les cristaux hémiedres à faces inclinées », dans Comptes rendus de l'Académie des Sciences, vol. XCIII, séance du 26 décembre 1881, p. 1137.
- DOPPLER C.J. (1842). Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels, Royal Bohemian Society of Learning.
- GART, JASON H. (2006). Electronics and Aerospace Industry in Cold War Arizona, 1945-1968: Motorola, Hughes Aircraft, Goodyear Aircraft." Phd diss., Arizona State University.
- CURLANDER, J. C. ET R. N. McDONOUGH (1991). Synthetic Aperture Radar: systems and signal processing, John Wiley & Sons Inc., New York.
- CUTLER ET RICHARDSON (1989). Tree Roots and Buildings, Édition Longman; 16 oct. 1989, ISBN-10: 0582034108, 88p.

- DASSONVILLE A. (2003). Les espaces périurbains et ruraux du SDRIF, Rapport du groupe de travail, Direction régionale de l'Équipement d'Ile de France, 58p.
- DJEDID A. (2006). Sols, l'Identification des sols gonflants : Pour une démarche unifiée. 24ième Rencontres Universitaires de Génie Civil, 8p.
- DONSIMONI M. AVEC LA COLLABORATION DE CLOZIER L., MOTTEAU M., VINCENT M. (2003). Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne. BRGM/RP-52224-FR, 133 p., 5 fig., 16 tabl., 2 ann., 4 planches. h.t.
- DONSIMONI M., CLOZIER L., MOTTEAU M., VINCENT M., (2003). Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne. BRGM/RP-52224-FR, 133 p., 5 fig., 16 tabl., 2 ann., 4 pl. h.t.
- DONSIMONI M., CLOZIER L., VINCENT M., AVEC LA COLLAB. DE MOTTEAU M., GALLAS J.-C. (2001). Cartographie de l'aléa retrait gonflement argiles dans le departement de la Seine-Saint-Denis. BRGM/RP-51198-FR, 125 p., 7 fig., 13tabl. ; 2 ann. 5 planches h.-t.
- DONSIMONI M., CLOZIER L., VINCENT M., MOTTEAU M., GALLAS J.-C., (2001). Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Seine-Saint-Denis. BRG M/RP-51198-F R, 125 p., 7 fig., 13 tabl., 2ann., 5 planches h.-t.
- DONSIMONI M., GIRAUD F., AVEC LA COLLAB. DE HATTON C., TROUILLARD-PERROT C., VINCENT M. (2005). Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Yvelines. BRGM/RP-53074-FR, 287 p., 7 fig., 24 tabl., 6 ann., 3 planches. h.-t.
- DURAND C. FORSAN T., RUFFET C., ONAISI A., AUDIBERT A. (1995). Influence of clays on borehole stability: a literature survey part one: Occurrence of drilling problems, physico-chemical description of clays and their interaction with fluid. Rev. IFP, Vol.50, n°2, Mars-Avril 1995.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (1999). Measuring Subsidence with SAR Interferometry : Application of the Permanent Scatterers Technique, *International Geoscience Symposium, Hamburg*, pp. 1528-1530.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2000). Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, N°5.
- FERRETTI, A. AND PRATI, C. AND ROCCA, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, no. 1, 8-20pp.
- FERRETTI, A., PRATI, C. AND ROCCA, F. (2000). Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 2002-2012pp.
- FIELDING E. J., BLOM R. G., AND GOLDSTEIN R. M. (1998). Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. *Geophysical research letters*, Vol. 25, No. 17, pp. 3215-3218.
- fossilières à la Croix de Berny. *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, fasc. 13, pp. 272-274
- FRECON J.-C. ET KELLER F. (2009). Sécheresse de 2003 : un passé qui ne passe pas, Rapport d'information du sénat, session ordinaire n°39, 2009-2010, 181p. <http://www.senat.fr/rap/r09-039/r09-0390.html>
- FRUNEAU B., DEFFONTAINES B., RUDANT J-P. AND LE PARMENTIER A-M. (2005). Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry. *Comptes Rendus Geosciences*, Volume 337, Issue 13, pp. 1173-1183.
- FRUNEAU, B. (1995). Interférométrie différentielle d'images SAR. Application au glissement de terrain de la Clapière, Thèse de doctorat de Paris 7, 237 p.

- FRUNEAU, B., SARTI, F. (2000), Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry : isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation, *Geophys. Res. Lett.*, 27, pp. 3981 – 3984.
- GAMBA P., HOUSHMAND B., SACCANI M. (2000). Detection and extraction of buildings from interferometric SAR data. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on Volume 38, Issue 1, Jan 2000 Page(s):611 – 617 Digital Object Identifier 10.1109/36.823956
- GAOMBALET J. (2004). Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage. Thèse d'état. 326p.
- GARNIER, M., (1967) Mémorial n° 50 de la météorologie nationale ; sélection de données statistiques, 1967, 294 pages.
- GILBERT, B.K., BUCHANAN, T.J. (1977). Impacts de la sécheresse 1976-77 aux Etats-Unis. *Water International*, 1941-1707, Volume 2, Issue 2, 1977, pp3–33.
- GIROUD J.P. ET BOTTERO A. (1972). Influence des propriétés physico-chimiques des argiles monominérales sur leur comportement mécanique. *Bull. liaison Labo. P. et Ch* 62, pp.105 -116.
- GOLDSTEIN, R. M. ENGELHARDT, H., KAMP, B. AND FROLICH, R. M. (1993). Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream, *Science*, 262:1525 - 1530.
- GOLDSTEIN, R. M., AND WERNER, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophys. Res. Lett.* 25, no. 21, pp. 4035 - 4038.
- GOUY G. (1910). Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. *Journal de physique théorique et appliqué*, vol.9, pp.457-468.
- Guide prévention, sécheresse et construction, MEDD, 1993.
- HABIB P. (1992) – Les sécheresses de 1989 et 1990. *Rev. Fr. Géotech.*, 58, p. 7-30
- HANSEN J., SATO M., RUEDY R., LO K., LEA D.W., AND MEDINA-ELIZADE M, (2006). Global temperature change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 006; 103; 14288-14293; originally published online Sep 25, 2006; doi:10.1073/pnas.0606291103.
- HANSSEN, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Remote Sensing and Digital Image Processing, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 308p.
- HAROULES, G. G. ET BROWN, W. E. (1969). The simultaneous investigation of attenuation and emission by earth's atmosphere at wavelengths from 4 cm to 8mm, *Journal of Geophysics Research*, 74, 4453-4471.
- HART, E. W., W. A. BRYANT, AND TREIMAN J. A. (1993). Surface faulting associated with the June 1992 Landers earthquake, California, *Calif. Geol.*, 46,10-16.
- HARTL, P. AND XIA, Y. (1993). Besonderheiten der Datenverarbeitung bei der SAR-Interferometrie. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 61(6), pp. 214 - 222.
- HERTZ H.R. (1888). Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der electrodynamischen Wirkungen", *Annalen der Physik*, vol. 270, no. 7, p. 551-569.
- HOUDAS Y. (1991), Doppler, Buys-Ballot, Fizeau. Historical note on the discovery of the Doppler's effect », dans *Annales de cardiologie et d'angéiologie*, vol. 40, no 4,p. 209–13.
- HOOPER, A., ZEBKER, H., SEGALL, P. AND KAMPES, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31 :L23611, 2004. doi : 10.1029/2004GL021737.
- JANSSEN V., GE L., RIZOS C. (2004). Tropospheric corrections to SAR interferometry from GPS observations. *GPS Solutions* 8: pp.140 - 151. DOI 10.1007/s10291-004-0099-1

- JOZJA, N., (2003). Étude de matériaux argileux Albanais. Caractérisation "multi-échelle" d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité." Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.
- KAMPES B.M. (2006). Radar interferometry, Persistent Scatterer technique, ISBN: 140204576X, Springer Verlag edition.
- KARIUKI P. C. AND VAN DER MEER F.D. (2003). Swelling Clay Mapping For Characterizing Expansive Soils; Results From Laboratory Spectroscopy and Hysens Dais Analysis. Presented at the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, May 13-16.
- KARIUKI P. C., WOLDAI T. AND VAN DER MEER F. (2004). The Role of Remote Sensing in Mapping Swelling Soils. *Asian Journal of Geoinformatics*, Vol. 5, No. 1, Published by ARSRIN, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand.
- KARIUKI P. C., WOLDAI T. AND VAN DER MEER F., 2004. The Role of Remote Sensing in Mapping Swelling Soils. *Asian Journal of Geoinformatics*, Vol. 5, No. 1, Published by ARSRIN, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand.
- KARIUKI P.C., VAN DER MEER F. (2004). A unified swelling potential index for expansive soils. *Engineering Geology*, Volume 72, Issues 1-2, pp.1 - 8.
- KOMORNIK A. ET DAVID D. (1969). Prediction of swelling pressure of clays. Proc. ASCE, Journal of soil Mech.& Found. D., Vol. 95, n° SM1, pp. 209-225.
- LARDEUX, C. FRISON, P.-L. TISON, C. SOUYRIS, J.-C. STOLL, B. FRUINEAU, B. RUDANT, J.-P. (2010). Classification of Tropical Vegetation Using Multifrequency Partial SAR polarimetry Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE Issue: 99, pp. 133-137
- LEROUX, M. (1991). Déficit pluviométrique hivernal sur la France : autopsie de la situation anticyclonique du 19 décembre 1989 au 25 janvier 1990 / The winter rainfall deficiency in France : autopsy of the anticyclonic situation from the 19 December 1989 to the 25 January 1990. In: Revue de géographie de Lyon. Vol. 66 n°3-4, 1991. A propos de la séquence neigeuse de décembre 1990 : Une approche des événements extrêmes. pp. 197-206.
- LYONS S., SANDWELL D. (2003). Fault Creep Along the Southern San Andreas from InSAR, Permanent Scatterers, and Stacking, *In Press, Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B1, 2047, doi:10.1029/2002JB001831.
- MAGNAN J.P. (2002), *L'organisation du travail en géotechnique : développement, normalisation et artisanat*, Lettre de la Géotechnique 26 et 27, Société Internationale de la Mécanique des Sols et de la Géotechnique
- MAGNAN J.P. (2002). *L'organisation du travail en géotechnique : développement, normalisation et artisanat*, Lettre de la Géotechnique 26 et 27, Société Internationale de la Mécanique des Sols et de la Géotechnique.
- MAKKI L. (2009). Comportement de retrait gonflement des sols en période de sécheresse, Thèse d'état, Université Pierre et Marie Curie, 266p.
- MANUNTA M., ZENI G., SANSOSTI E., LANARI R., ARDIZZONE F., CARDINALI M., GALLI M., GUZZETTI F. AND REICHENBACH P. (2006). Ground deformation analysis in the Umbria region (central Italy) carried out via the SBAS DInSAR approach. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 10026, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-10026
- MASSONNET D., FEIGL K. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Review of Geophysics*, Vol. 36, No. 4, pp. 441 - 500.
- MASSONNET D., FEIGL K., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Review of Geophysics*, Vol. 36, No. 4, pp. 441 - 500.

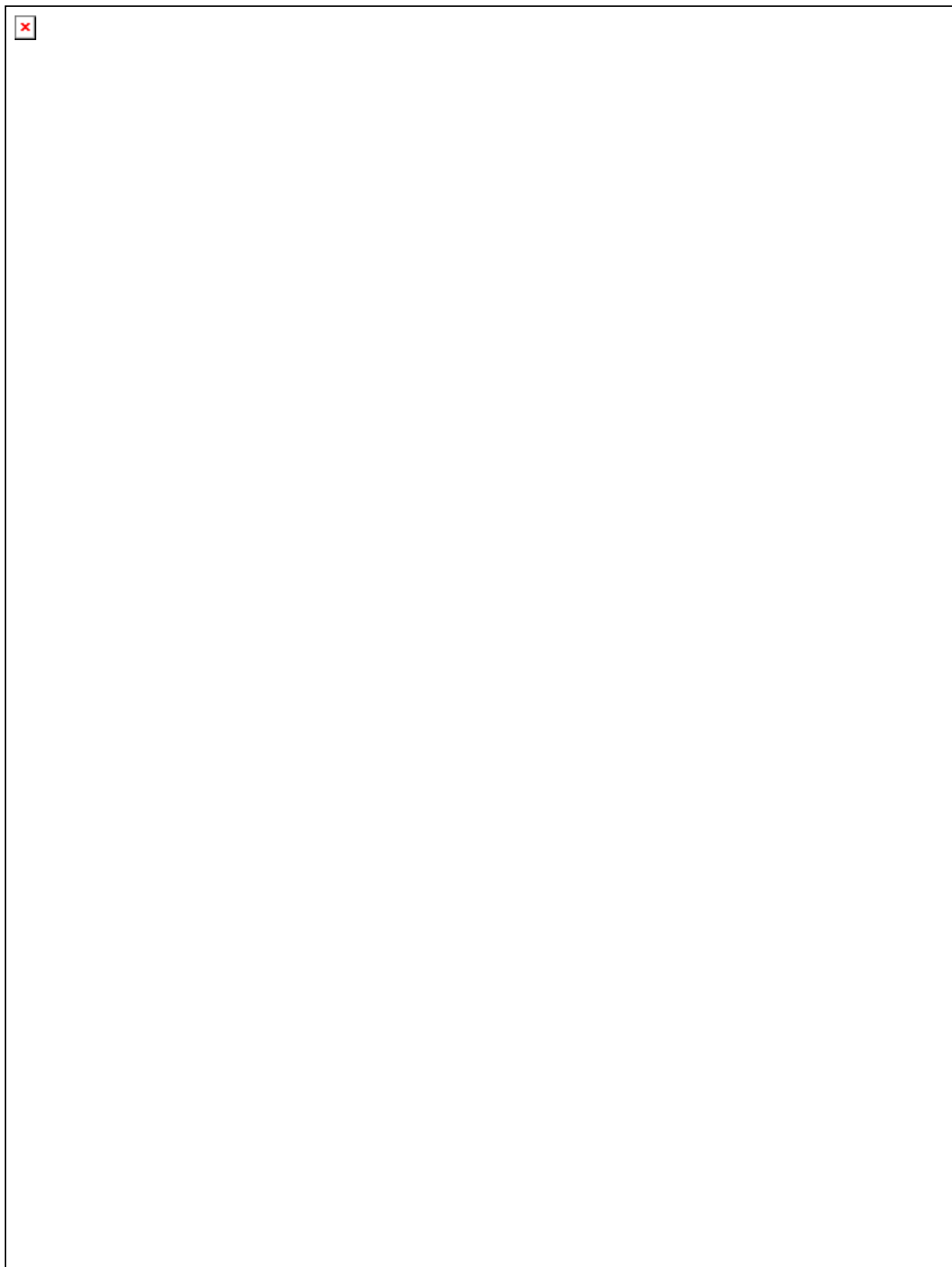
- MASSONNET, D. AND FEIGL, K.L. (1995). Satellite Radar Interferometric map of the coseismic deformation field of the M=6.1 Eureka Valley, California Earthquake of May 17, 1993, *Geophysical research Letters*, 22 (12): pp.1541-1544.
- MASSONNET, D., ROSSI, M., CARMONA, C., ADRAGNA, F., PELTZER, G., FEIGL, K., RABAUTE, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, pp.138-142.
- MERRIEN-SOUKATCHOFF V. (2007). Géotechnique, polycopié de synthèse, école des Mines de Nancy, non édité. 192pages. Source : http://www.mines.inpl-nancy.fr/~merriel7/Web/Cours/Poly_geotechnique.pdf
- MILLOT, G. (1964). La géologie des argiles. Masson, Paris, 499p.
- MIRANDA, N., ROSICH, B., SANTILLA, C., GRION, M. (2004). Review of the impact of ERS-2 piloting modes on the SAR doppler stability. Proc. of FRINGE 2003 Workshop, Frascati, Italy, 1–5 December 2003 (ESA SP-550, June 2004).
- MITCHELL J.K. (1993). Fundamentals of soil behaviour. 2ème ed., John wiley and Sons, New York, 437p.
- MORA (2004), Phd thesis. Advanced differential SAR techniques for detection of terrain and building displacements. Ph.D. Thesis, Polytechnic University of Catalonia
- MOREL R. (1996) - Les sols cultivés. Lavoisier, Paris.
- P. BRIOLES, A. AVALONE, F. BEAUDUCEL, A. BONFORT, V. CAYO L7, C. DEPLUS6, 2, C. DELACOURT8, J.-L. FROGER7, B. MALENGREAU7, G. PUGLISI5. INTERFÉROMÉTRIE RADAR APPLIQUÉE AUX VOLCANS : CAS DE L'ETNA ET DES CHAMPS PHLÉGRÉENS (ITALIE) VOLCANOLOGICAL APPLICATIONS OF RADAR INTERFEROMETRY: ETNA AND PHLEGREAN FIELDS (ITALY) .
- PATHIER E. (2003). Apports de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan. Université Marne-la-Vallée, école doctorale ICMS, France, 272p.
- PATHIER E., FRUNEAU B., DEFFONTAINES B., ANGELIER J., CHANG C-P., YUE S-B, LEE C.T. (2003). Coseismic displacements of the footwall of the Chelungpu fault caused by the 1999, Taiwan, Chi-Chi earthquake from InSAR and GPS data. *Earth and Planetary Science Letters* 212, p. 73-88.
- PELTZER AND ROSEN (1995). Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley earthquake observed by SAR interferometry, *Science*, 268, pp.1333-1336
- PERISSIN, D., AND ROCCA F. (2006). High-accuracy urban DEM using permanent scatterers, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (11), 3338-3347pp.
- PERISSIN, D.; PRATI, C.; ROCCA, F.; FERRETTI, A. (2004). ERS-ENVISAT Permanent Scatterers. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International Volume 2, 2004 Page(s):985 - 988 vol.2
- PLAT E., DONSIMONI M. ET VINCENT M. (2007). Actualisation de la carte d'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Seine-Saint-Denis. Rapport BRGM/RP-55527-FR, 78 p., 17 ill., 2 ann., 3 cartes h.-t.
- PLAT E., DONSIMONI M. ET VINCENT M. (2007a). Actualisation de la carte d'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Seine-Saint-Denis. Rapport BRGM/RP-55527-FR, 78 p., 17 ill., 2 ann., 3 cartes h.-t.
- PLAT E., DONSIMONI M. ET VINCENT M., (2007b). Actualisation de la carte d'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne. Rapport BRGM/RP-55525- FR, 46 p., 13 ill., 2 ann., 3 cartes h.-t.
- PRIAN J.-P DONSIMONI M., Vincent M. avec la collaboration de Denis L., Gallas J.-C., Marty F., Motteau M. (2000). Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Essonne. BRGM/RP-50376-FR, 269p., 32 fig., 11 tabl., 6ann., 3 cartes h.-t.

- PROST R. (1990). Relation eau argile: structure et gonflement des matériaux argileux. Dans A. Decarreau (dir.), *Matériaux argileux : Structure, propriétés et applications*, Soc. Fr. Min. Cristall., Paris, pp. 343-386.
- QI YUN (1996). Comportement hydromécanique des argiles : Couplage des propriétés microscopiques de la laponite et de l'hectorite. Thèse de doctorat. Université d'Orléan.
- RABUS B., WERNER C., WEGMUELLER U., MCCARDLE A. (2004). Interferometric point target analysis of RADARSAT-1 data for deformation monitoring at the Belridge/Lost Hills oil fields. *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE, Volume 4, pp. 2611-2613
- ROSICH, B., ESTEBAN, D., EMILANI, G., MEADOWS, SCHATTLER, P., B., VIGGIANO, R. (2000) ERS-2 Mono-Gyro Piloting, impact on ERS-2 SAR Data quality and ERS-2 SAR application performance. Document interne technique ESRIN, reference ES-TN-ADQ-BR02, 36p.
- SANDWELL D.T., SICHIOX L., AGNEW D., BOCK Y. AND MINSTER J.B. (2000). Near real-time radar interferometry of the Mw 7.1 Hector Mine Earthquake. *Geophysical Research Letters*, VOL. 0, No. 0, PAGES 0-0, M 0, 2000.
- Schmidt, D. and Burgmann, R. (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, *J. Geophys. Res.*, vol. 108, no. B9, 2416, doi:10.1029/2002JB002267.
- SELIGE T., BÖHNER J. AND SCHMIDHALTER U. (2006). High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. *Geoderma*, In Press, Corrected Proof .
- Soyer R. (1955a) – Les Marnes à *Pholadomya ludensis* à Arcueil et L'Hay-les-Roses,
 Soyer R. (1955b) – Carte géologique Paris à 1/50 000 (183) et notice explicative.
 Soyer R. (1958a) – Carte géologique Lagny à 1/50 000 (184) et notice explicative.
 Soyer R. (1958b) – Carte géologique Dammartin-en-Goële à 1/50 000 (154) et notice
 Soyer R. (1959) – Carte géologique l'Isle-Adam à 1/50 000 (153) et notice explicative.
 Soyer R. (1966) – Carte géologique Paris à 1/50 000 (183) et notice explicative.
- SOYER R., GOGUEL J. (1963) – Carte géol. France (1/50 000), feuille BRIE-COMTE-ROBERT (type1922), 1^e édition – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières. Emprise (613000,120000) (640000,100000).
- SOYER R., LEMOINE M., GOGUEL J. (1958) – Carte géol. France (1/50 000), feuille LAGNY (type1922), 1^e édition – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières. Emprise (613000,140000) (640000,120000).
- STERN O., ELEKTROCHEM Z. (1924). Zur theorie der elektrolytischen doppelschicht. 30, 508.
- TESSIER D., (1978), Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation, *Annales Agronomiques*, Vol. 29, N° 4, pp. 319-355.
- TESSIER D., (1984), Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation, Thèse de l'université de Paris VII.
- TESSIER D., (1984). Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux : Hydratations, gonflements et structuration au cours de la dessiccation et la réhumidification. Thèse de l'université Paris VII, 362p.
- TESSIER D., BLAISE F., COQUET Y., COURBET C., PRIEM J., LEMAIRE Y., TRILLAUD S., (2006). Analyse comparative de politiques de prévention du risque de « sécheresse géotechnique »- Modélisation et visualisation du phénomène. Rapport INRA. 273 p.
- TOMÁS R., MÁRQUEZ Y., LOPEZ-SANCHEZ J.M., DELGADO J., BLANCO P., MALLORQUÍ J., MARTÍNEZ M., HERRERA G. AND MULAS J. (2005). Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment*, Volume 98, Issues 2-3, pp. 269 - 283.

- TOULEMONT, M., COJEAN, R., FACCENDINI J.-P. (1994). Cartographie prévisionnelle des sols sensibles à la sécheresse en France: un outil d'information préventive. Mappemonde, Vol 4/1994, 5p.
- ULABY, F. T. (1998). SAR biophysical retrievals: lessons learned and challenges to overcome. Second International workshop on retrieval of biogeophysical parameters from SAR data for land applications, ESTEC.
- ULABY, F. T., FUNG, A. K., MOORE, R. K. (1981). Microwave and remote sensing: active and passive: Microwave remote sensing. Fundamentals and radiometry. Addison Wesley editions.
- USAI, S. (2003). A least squares database approach for SAR interferometric data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- VAN DAMME H. (2002). L'eau et sa représentation, dans O.Coussy et J.M. Fleureau (dir), Mécanique des sols non saturés, Lavoisier, Paris, pp.23-68.
- VAN DER MEER, F. (1999). CAN WE MAP SWELLING CLAYS WITH REMOTE SENSING? IN: VAN DER MEER, F., NIEUWENHUIS, G.J.A., MOLENAAR, M. & WOLDAL, T. (eds.), Operational remote sensing for sustainable development. *Journal of Applied Geoinformation Management* (special section), 1(1): pp. 27 - 35.
- VELDE, (1995). Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment. Springer.
- VERDEL T., (1993). Géotechnique et Monuments historiques : Méthodes de modélisation appliquées à des cas égyptiens, Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole des Mines de Nancy.
- VINCENT M. (2006). Prévention du risque sécheresse : cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles et établissement de plans de prévention des risques. *Revue géologue* n°146, pp.43-47. ISBN 0016.7916.
- VINCENT M., BOUCHUT J., FLEUREAU J.-M. (LMSSMAT), MASROURI F. (LAEGO), OPPENHEIM E. (CEBTP-SOLEN), HECK J.-V. (CSTB), RUAUX N. (CSTB), LE ROY S., DUBUS I., SURDYK N. (2006) - Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport final. *Rapport BRGM/RP-54862-FR*, 378 p., 308 ill.
- VINCENT M., COJEAN R., FLEUREAU J.-M., CUI Y. J., JACQUARD C., KAZMIERCZAK J.-B., MASROURI F., TESSIER D., ALIMI-ICHOLA I., MAGNAN J.-P., BLANCHARD M., FABRE D., PANTET A., AUDIGUIER M., PLAT E., SOULI H., TAIBI S., TANG A.-M., MORLOCK C., MAISON T., MRAD M., BREDI N., DJERAN-MAIGRE I., DUC M., SOUBEYROUX J.-M., DENIS A., PROUST D., GEREMEW Z., LE ROY S., DUMONT M., HEMMATI S., NOWAMOOZ H., COQUET Y., POTHIER C., MAKKI L., CHRETIEN M., FONTAINE C. (2009) – Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait-gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) – Projet ANR-05-PRGCU-005. Rapport BRGM/RP-57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers, 92 p., 29 ill., 6 tabl., 39 ann. (sur CD Rom)
- VINCENT M., PLAT E., LE ROY S., SURDYK N., DUBUS I. avec la collaboration de Martin M. (2007) Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 2. Rapport BRGM/RP-55845-FR, 164 p., 112 ill.
- WARREN MASON P. (1981), Piezoelectricity, its history and applications, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, no 6, p. 1561.
- WERNER, C., WEGMÜLLER, U., STROZZI, T., WIESMANN, A. (2003). Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03, 21-25 July 2003, Toulouse, France, vol. 1, 221-223pp.
- YIGZAW Z.G. (2009). Analyse du retrait gonflement des sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques. Rôle de la microstructure. Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris, 296p.
- YONG R.N. ET WARKENTIN B.P., (1975). Soil properties and behaviour. Elsevier.

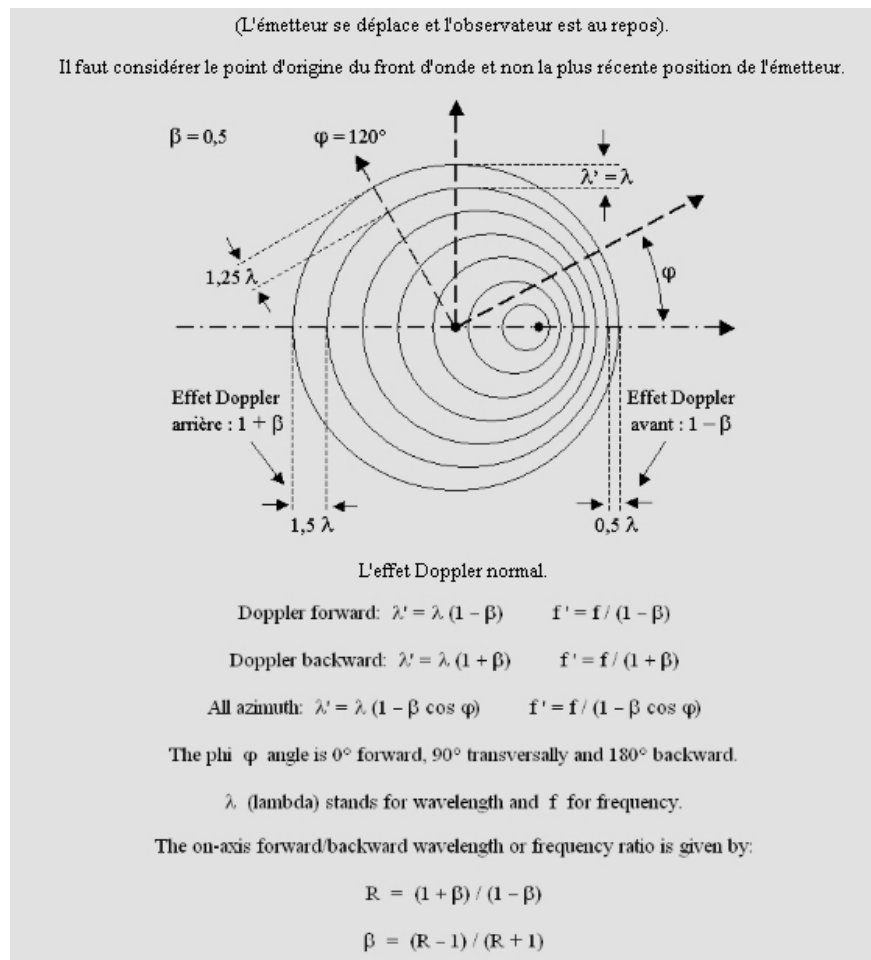
- YONG, R. N. AND WARKENTIN, BENNO P, (1975) *SOIL PROPERTIES AND BEHAVIOUR* / BY RAYMOND N. YONG AND BENNO P. WARKENTIN ELSEVIER SCIENTIFIC PUB. CO., AMSTERDAM ; NEW YORK : 1975
- ZEBKER, H. A., AND GOLDSTEIN, R. M. (1986). Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations, *Journal of Geophysical Research*, 91 (B5): pp. 4993-4999.
- ZEBKER, H. A., ROSEN, P. A., GOLDSTEIN, R. M., GABRIEL, A., AND WERNER, C. L., (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometer: The Landers earthquake; in *Jour. Of Geophys. Res.*, Vol. 99, No. B10, pp. 19617-19634.

ANNEXE 1: Mode d'Occupation du Sol IAURIF 2003 11 postes



Avec l'aimable autorisation de l'IAURIF et la participation de la Région IDF.

ANNEXE 2 : Effet doppler normal

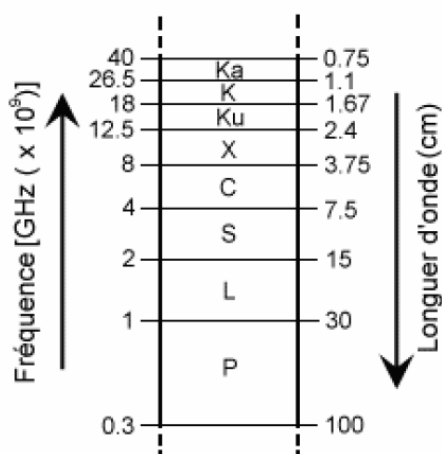


L'émetteur se déplace et l'observateur est au repos, il faut considérer le point d'origine du front d'onde et non la plus récente position de l'émetteur.

Sur cette figure, l'effet doppler avant λ' est de $\lambda (1 - \beta)$ soit $0,5 \lambda$ (pour $\beta = 0,5$) de l'effet doppler arrière λ' est de $\lambda (1 + \beta)$ soit $1,5 \lambda$;

<http://www.glafreniere.com/doppler.htm>

Annexe 3 : Bandes de fréquences utilisées en télédétection radar



Désignation des bandes hyperfréquence par lettre.

Les bandes hyperfréquences sont désignées par des lettres attribuées lors de la deuxième guerre mondiale. En effet, pour garder secret le développement de ce système, les militaires ont décidé de donner des noms de codes qui restent en usage aujourd'hui. Ils ont été adoptés aux États-Unis par the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) et internationalement par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), qui ont ensuite défini un plan d'occupation des bandes pour la répartition entre les applications civiles et militaires.

Bande de fréquence	Application en télédétection
Ka, K, Ku	Utilisées dans les premiers radars aéroportés, on les retrouve maintenant dans des diffusiomètres et altimètres spatiaux (QUICKSCAT, ENVISAT...).
X	Très utilisée dans les systèmes radar aéroportés pour la reconnaissance militaire et la cartographie (STAR1 et 2, TerraSARX) On la trouve aussi souvent utilisée pour les communications avec les stations sol.
C	C'est la bande de fréquence la plus couramment mise en œuvre dans les systèmes SAR spatiaux pour des applications civiles de télédétection de la surface de la terre. Elle est à la fois sensible à la présence de végétation et au sol (ERS-1 et 2, RADARSAT, ENVISAT).
S	La bande S est très peu utilisée en Europe et seul le satellite ALMAZ fut équipé d'un SAR fonctionnant dans cette bande de fréquence. Depuis, aucun SAR spatial n'utilise cette bande de fréquence
L	La bande L a été utilisée pour les satellites comme JERS, SeaSat ou PALSAR. Elle procure une capacité de pénétration de la végétation supérieure à la bande C.
P	Seules, des mesures aéroportées ont été effectuées en bande P. Néanmoins, le projet BIOMASS de l'ESA, étudie la possibilité de mettre en orbite un SAR en bande P (dont le pouvoir de pénétration de la végétation est très élevée) pour l'estimation de la biomasse des forêts à l'échelle mondiale. (http://www.esa.int/esaEO/SEMHQH9ATME_index_0.html).

Tableau : Utilisations des différentes bandes hyperfréquence en télédétection.

ANNEXE 4 : Historique du radar

Les origines théorique et scientifique du Radar

De la compréhension de l'écholocation de la chauve-souris qui utilise des ondes ultra sonore pour se déplacer tel un sonar¹ jusqu'aux satellites radar d'observation spatiale, il a fallu près de deux siècles de découvertes tant fondamentales que techniques pour aboutir aux multiples applications des échos radar². L'un des pionniers dans le domaine scientifique est certainement Christian Johann Doppler qui publia en 1842 la formule permettant de calculer la position ou le déplacement relatif d'une source le long d'une ligne fictive les réunissant (ANNEXE 2).

Le calcul ne fut étendu au déplacement simultané des deux éléments, source et observateur, que quatre ans plus tard et l'explication de cet effet fut menée en 1849 dans le domaine de l'optique, par le parisien Armand Hippolyte Louis Fizeau (Houdas, 1991). L'effet Doppler-Fizeau porte le nom de ses auteurs mais reste communément connu sous l'effet Doppler, puisque C.-J. Doppler précisa que ses formules pouvaient dériver vers des applications tant acoustiques qu'optiques.

Puis en 1888, Heinrich Rudolf Hertz ouvre la voie à l'invention du radar, en démontrant que les ondes électromagnétiques sont réfléchies par les surfaces métalliques. L'effet optique fut suivi par des applications acoustiques dans le monde sous-marin par Paul Langevin. Afin de retrouver l'épave du Titanic qui sombra le 14 avril 1912, Langevin établit la première solution pour convertir l'énergie électrique en énergie ultrasonore (Warren Mason, 1981), possibilité de cette conversion résultait de la découverte, 35 ans plus tôt, en 1880, de la propriété de certains matériaux à subir une déformation mécanique par l'application d'un voltage électrique, appelé effet piézoélectrique direct de Pierre Curie (Curie P. et Curie J., 1881). Ce sonar était composé de lames de quartz collées entre deux plaques d'acier et d'un hydrophone et permettait, par la mesure du temps écoulé entre l'émission d'une onde acoustique et la réception de son écho, de calculer la distance à l'objet.

Ces applications tombèrent dans le domaine militaire et il fallut attendre 1935, pour qu'un brevet soit déposé par l'anglais Robert Watson-Watt, qui est donc considéré comme l'inventeur officiel³ du radar. Les Britanniques mettent alors en place le premier réseau de détection radars sous le nom de "Chain home" qui eut une importance stratégique au début de la seconde guerre mondiale pour détecter les raids aériens allemands.

La naissance de la télédétection radar spatiale

Le radar est un dispositif d'émission et d'acquisition qui utilise les ondes radio pour détecter et déterminer la distance et ou la vitesse d'objets qui réfléchissent les ondes envoyées. La position est estimée grâce au temps de retour du signal et la vitesse est mesurée à partir du

¹ Acronyme de SOund Navigation And Ranging

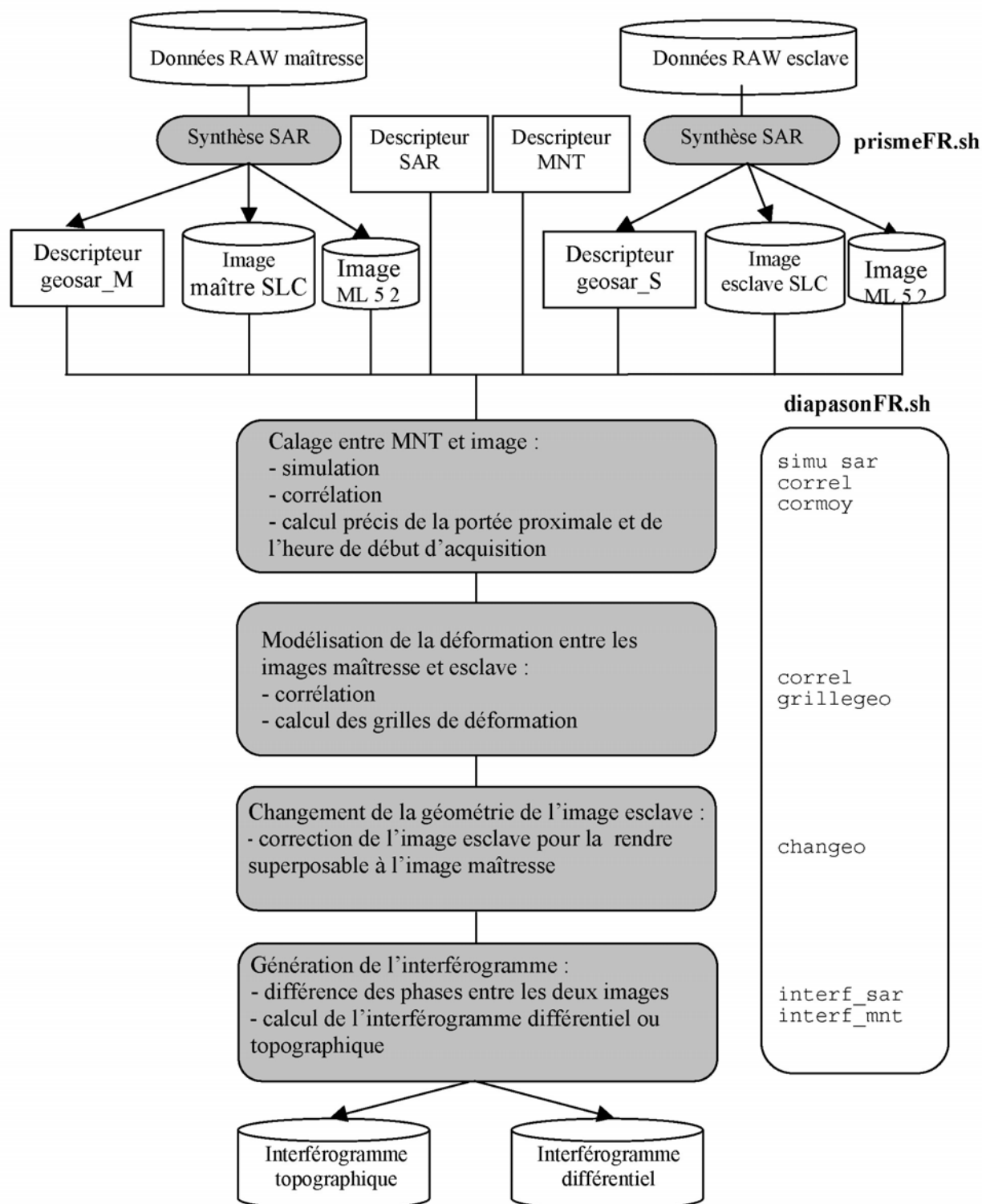
² Acronyme de Range And Detection and Ranging

³ Un dispositif de détection électromagnétique français est authentifié par un brevet au nom de la Compagnie générale de Télégraphie sans fil datant de juillet 1934.

changement de fréquence du signal par effet Doppler. Ce système en télédétection est dit actif, puisque le capteur embarqué émet lui-même la source du signal et l'analyse en retour (détaillé en II.1.2). Il est donc possible d'acquérir des images indépendamment de l'ensoleillement, de jour comme de nuit. Autre avantage, la fréquence micro onde des ondes radar permet de s'affranchir des éléments météorologiques, avec une transmission proche de 100% entre 1 et 20 GHz en l'absence de cellule de pluies (Ulaby *et al.*, 1981) contrairement à l'imagerie optique qui est fortement occulté par les couvertures nuageuses. Ainsi aucune correction atmosphérique n'est donc à apporter en imagerie radar contrairement à l'imagerie optique. Cependant l'atténuation de l'onde radar étant égale à un coefficient de $0,005 \text{ dB km}^{-1} \cdot \text{g.m}^3$ pour une fréquence égale à 5GHz (Haroules et Brown, 1969), l'atmosphère contribue à un déphasage des ondes ce qui a des implications en interférométrie (détaillé en II.2.1).

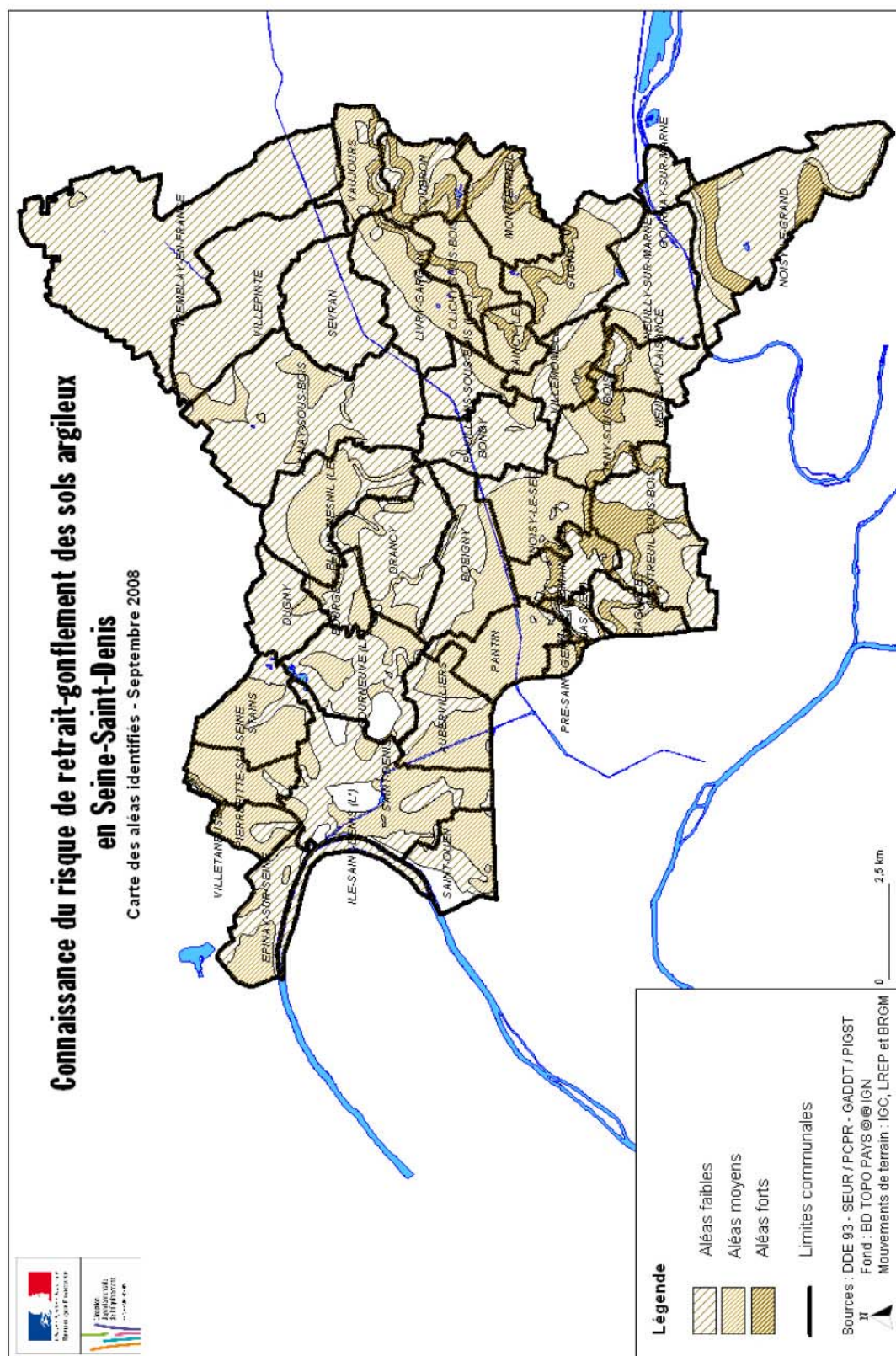
Le concept théorique du radar à synthèse d'ouverture (RSO) ou Synthetic Aperture Radar (SAR) date des années 1950 avec les travaux du mathématicien Carl A. Wiley (Gart, 2006), travaillant pour l'industriel Goodyear Aircraft Corporation, et sa première réalisation technologique date de 1958 (Ulaby, 1998). Le succès de l'imagerie SAR tient dans le fait que le radar à synthèse d'ouverture permet d'améliorer la résolution "naturelle" du radar, lors d'une importante étape de traitement du signal, à partir des données brutes qui améliore la résolution azimutale réalisée (détaillée si après en II.1.2). Les premiers dispositifs radar furent aéroportés en avion, il a fallu attendre 1978 pour voir le premier capteur SAR spatial embarqué à bord du satellite Seasat (Jet Propulsion Laboratory, NASA) fonctionnant en bande L (23cm) et polarisation HH, puis les missions de navette spatiale SIR-A en 1981 et SIR-B en 1985.

ANNEXE 5 : Description des étapes de calcul du logiciel DIAPASON



Description de la chaîne logicielle DIAPASON utilisée pour former les interférogrammes [Centre National d'Etudes Spatiales (C.N.E.S) 1997]

ANNEXE 6 : PPRN mouvement de terrain consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols argileux en Seine-Saint-Denis.



ANNEXE 7 : Documents météorologiques relatifs à la canicule de 2003 en France et en Europe

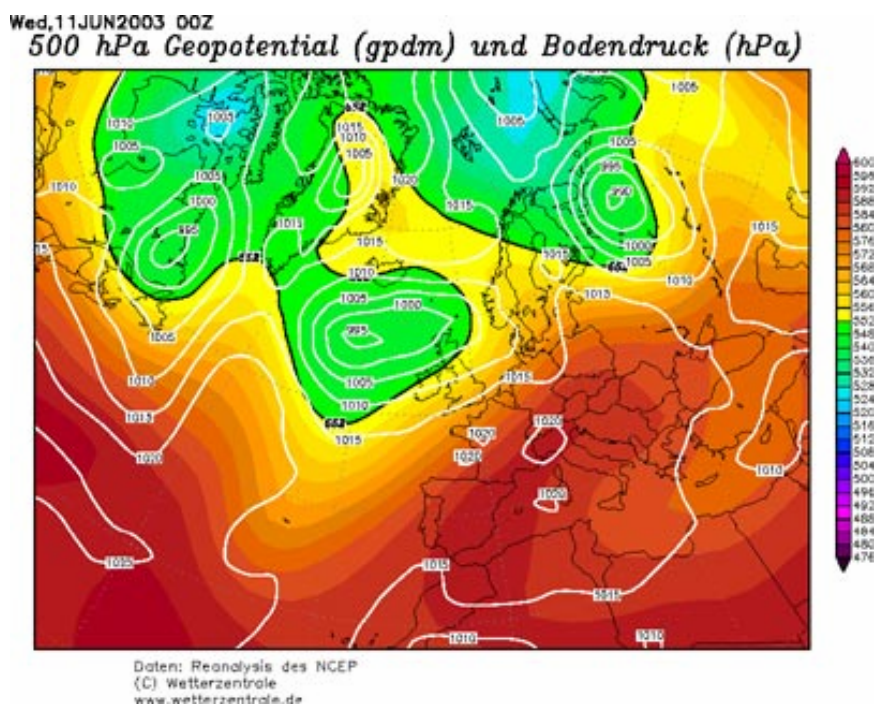


Figure 146: Canicule au 11/06/2003, un anticyclone s'installe sur l'Europe pour une durée de 10 jours.

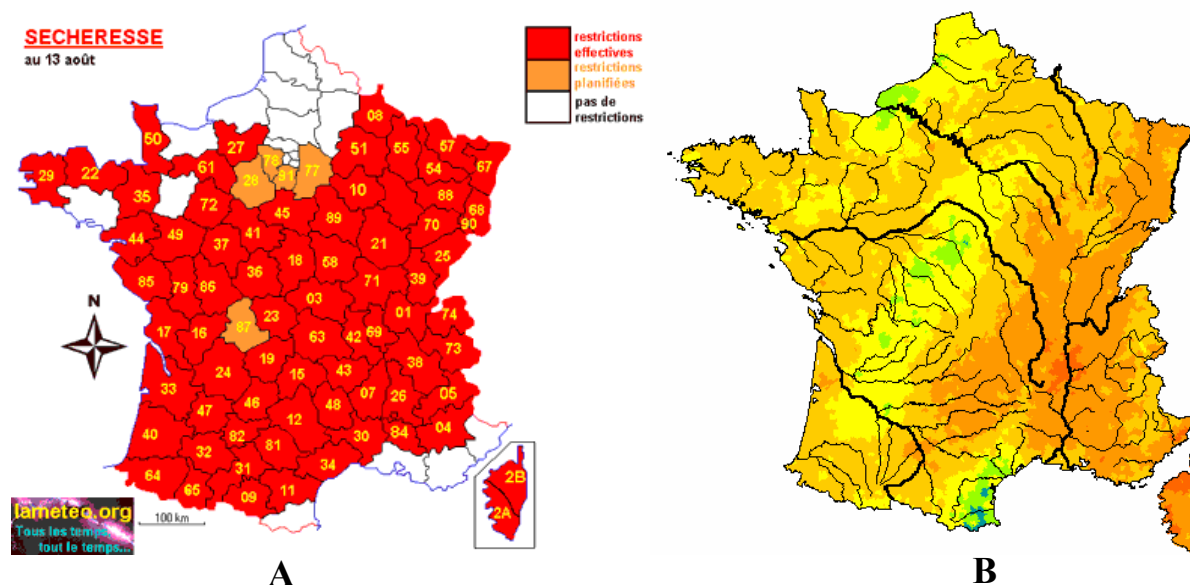


Figure 147 : A- Mesures de restriction de l'usage de l'eau par les particuliers dans 76 départements. B-Précipitations entre le 01/02/2003 au 30/06/2003 comparé en % avec la période de référence 1946/2002.

<http://la.climatologie.free.fr/secheresse/secheresse1.htm>

ANNEXE 8 : Évolution des critères de reconnaissance de la sécheresse géotechnique en France.

1999

Le traitement des dossiers doit être appuyé par une estimation du caractère exceptionnel des déficits pluviométriques observés.

2000

Prise en compte des interactions sol/atmosphère/végétation, avec le calcul du bilan hydrique du sol grâce à la combinaison d'observations et de données modélisées. Cette approche prend en compte non seulement les précipitations observées, mais également l'évapotranspiration des végétaux et la saturation éventuelle des sols, pour produire une estimation du paramètre observable qui est a priori le plus directement lié au gonflement des argiles : le contenu en eau des sols.

2002

L'instruction se fait sur la base non seulement d'un rapport technique mettant en évidence la présence d'argile sur le territoire de la commune mais également d'un rapport météorologique faisant ressortir les éléments suivants :

- Une période de 4 trimestres consécutifs durant laquelle la réserve en eau des sols est inférieure à la normale,
- Une décade pendant la période de recharge des nappes (de janvier à mars) inférieure à 50% de la normale.

2004

Nouveaux critères ont été élaborés pour s'adapter à la sécheresse estivale de 2003 : sécheresse intense, et plus de 8000 dossiers de communes à traiter. Pour être reconnu en CATNAT, la commune doit répondre aux critères suivant:

- La présence d'argile dans le sol doit être avérée,
- Le rapport de la moyenne de la réserve hydrique du 3^{ème} trimestre sur la moyenne hydrique normale doit être inférieur à 20%,
- Le nombre de décades pendant lesquelles le réservoir hydrique était égal à zéro doit se situer au premier ou second rang sur la période 1989-2003.

Janvier 2005

Un premier assouplissement est intervenu en janvier 2005. C'est ainsi que :

- Le rapport de la moyenne de la réserve hydrique du 3^{ème} trimestre 2003 sur la moyenne de la réserve hydrique normale doit être inférieure à 21 % (et non à 20%),
- Le nombre de décades pendant lesquelles le réservoir hydrique était égal à zéro doit être compris entre le 1^{er} et le 3^{ème} rang (et non pas 1^{er} et 2nd rang) sur la période 1989-2003.

Juin 2005

Procédure spéciale pour les communes non reconnue en CATNAT suite à la sécheresse 2003
Les conclusions rendues par la mission inter-inspections déjà mentionnée ont conduit le Gouvernement à adopter un second assouplissement en juin 2005 hors critères, en s'appuyant sur l'occurrence statistique du phénomène de la sécheresse dite "durée de retour" égale ou supérieure à 25 ans.

ANNEXE 9 : Indices de sécheresse (selon Cojean et al., 2009)

AI : Anomaly Index, ou écart à la normale calculée à partir des valeurs mensuelles interannuelles.

$$AI = P - \mu(P)$$

Avec P : total des précipitations mensuelles.

$\mu(P)$: moyenne interannuelle pour ce mois dans une longue série.

rP : Quantité de précipitations relative ou pourcentage à la normale.

$$rP = P / \mu(P) \text{ (x100 pour un résultat en \%)}$$

Avec P : total des précipitations mensuelles.

$\mu(P)$: la moyenne interannuelle pour ce mois dans une longue série.

On note que lorsque rP est inférieur à 100 les précipitations sont inférieures aux normales saisonnières.

rAI : indice d'anomalie relative.

$$rAI = [P - \mu(P)] / \mu(P) \text{ (x100 pour un résultat en \%)}$$

Si rAI est négatif, les précipitations sont inférieures à la moyenne du mois considéré.

SAI : indice d'anomalie standard.

$$SAI = P - \mu(P) / \sigma(P)$$

avec $\sigma(P)$ l'écart-type de la série des précipitations mensuelles du mois fixé.

Lorsque SAI est inférieure à 0 le mois est sec.

LI : Indice de précipitation de Lang.

$$LI = P/T \text{ en mm/}^{\circ}\text{C}$$

dMI : Indice d'aridité de Martonne.

$$dMI = 12 P / (T + 10) \text{ en mm/}^{\circ}\text{C}$$

SHC : Coefficient hydrothermique de Selyanov adapté pour des valeurs mensuelles par Bagrov valable seulement pour $T > 10^{\circ}\text{C}$.

$$SHC = P / (3 \times T) \text{ en mm/}^{\circ}\text{C}$$

Thorthwl : Indice de Thorthwaite

$$TI = 1.65 [P / (T + 12.2)]^{(10/9)}$$

$PDII$: 1^{er} Indice de sécheresse de Ped. Plus le $PDII$ est grand plus la période est sèche.

$$PDII = \Delta T / \sigma(T) - \Delta P / \sigma(P) \text{ sans unité.}$$

avec $\Delta P = P - \mu(P)$ (en mm)

$\Delta T = T - \mu(T)$ ($^{\circ}\text{C}$)

Déficit en eau potentiel

$$ETP - P$$

Cet indice peut être cumulé sur l'année et donne alors une bonne vision de la sécheresse des sols.

Ratio de l'évapotranspiration potentielle.

$$ETP/P$$

Cet indice, en comparant l'évapotranspiration aux précipitations, permet de déterminer si un mois est humide (cas où l'indice est inférieur à 1) ou sec.

MAI : Indice d'humidité disponible.

$$MAI = P/ETP$$

BMDI : Indice de sécheresse et d'inondation de Bhalme Mooley.

$$i_0 = 0$$

$$i_k = c_1 \times i_{k-1} + (SAI)_k / c_2$$

$$BMDI = \frac{\sum_{i=1}^k i_k}{k}$$

Les valeurs de c_1 et c_2 voisines de 0.5 peuvent varier en fonction des zones géographiques considérées. Dans nos calculs, $c_1 = 0.5$ et $c_2 = 0.4855$. La période de k mois considérée peut correspondre à une saison ou à une année. Cet indice, relativement simple à calculer, correspond à une simplification de l'indice de Palmer PDSI et évolue sur la même échelle de valeur. Comme il ne prend en compte que les précipitations, nous pouvons le calculer depuis 1947.

PDSI : Indice de sécheresse de Palmer.

W.C. Palmer en 1965 a proposé l'indice de sévérité de la sécheresse : Palmer Drought Severity Index (PDSI). Cet indice compare le bilan hydrique du mois courant au bilan hydrique de ce mois moyenné sur 30 ans. Si ce bilan est déficitaire l'indice du mois précédent est diminué du déficit ainsi calculé et cette différence représente l'indice du mois courant. Nous ne donnerons que quelques indications sur la méthode qui est très détaillée dans la revue citée en référence. Cet indice prend des valeurs sur une échelle allant de +7 à -7 et permet de classer une période climatique par rapport à une autre selon la classification suivante :

4,00	< PDSI	extrêmement humide
3	< PDSI < 4	humidité sévère
1,5	< PDSI < 3	humidité moyenne à modérée
-1,5	< PDSI < 1,5	humidité normale
-3	< PDSI < -1,5	sécheresse moyenne à modérée
-4	< PDSI < -3	sécheresse sévère
	PDSI < -4	sécheresse extrême

Annexe 10: Taux d'urbanisation et sinistralité par formation en Seine-Saint-Denis (d'après Plat et al., 2007a)

N° Ordre	Notation	Nom de la formation argilo-marneuse	Sinistres		Affleurement		Urbanisation	
			Nombre	% Sinistres	Surfaces d'affleurement (km ²)	% d'affleurement	Surface bâtie (km ²)	% surface bâtie
1	X	Remblais	5	0,20%	2,64	1,12%	0,09	0,31%
2	CE	Colluvions polygéniques	649	26,48%	29,72	12,59%	4,71	15,93%
3	LP	Limons des plateaux	134	5,47%	31,75	13,45%	1,71	5,79%
4	Rfv/g1CB	Argiles à meulière de Brie	141	5,75%	8,99	3,81%	1,06	3,60%
5	Fz	Alluvions récentes	225	9,18%	31,71	13,44%	3,76	12,70%
6	Fx-y	Alluvions anciennes : niveaux Fx et Fy indifférenciés	412	16,81%	37,94	16,08%	6,67	22,56%
7	g1MH	Marnes à huîtres	1	0,04%	0,31	0,13%	0,07	0,25%
8	g1CB	Calcaire de Brie, Calcaire de Sannois et Argiles à meulière	102	4,16%	7,46	3,16%	1,26	4,25%
9	g1AR	Argiles vertes de Romainville et Glaises à Cyrènes	318	12,97%	9,40	3,98%	1,27	4,31%
10	e7MS	Marnes supragypseuses : Marnes blanches de Pantin et Marnes bleues d'Argenteuil	190	7,75%	4,83	2,05%	0,45	1,53%
11	e7G	Masses et marnes du Gypse	147	6,00%	13,21	5,60%	1,64	5,54%
12	e7CCh-MP	Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies	21	0,86%	0,69	0,29%	0,12	0,39%
13	e7MP	Marnes à Pholadomies	19	0,78%	3,76	1,59%	0,37	1,25%
14	e6-7MGC	Marnes à Pholadomies et Formation du Gypse, Quatrième Masse	35	1,43%	27,41	11,62%	3,58	12,12%
15	e6SM	Sables de Monceau	40	1,63%	9,14	3,87%	1,05	3,56%
16	e6CSO	Calcaire de Saint-Ouen, Horizon de Mortefontaine et Calcaire de Ducy	11	0,45%	13,03	5,52%	1,05	3,56%
17	e6SB-A	Sables de Beauchamp et Sables d'Auvers	0	0,00%	0,02	0,01%	0,00	0,00%

Total Formations retenues	2450	99,96%	232,00	98,31%	28,88	97,65%
Formations <i>a priori</i> non argileuses	1	0,04%	3,99	1,69%	0,70	2,35%
Total	2451	100,00%	235,99	100,00%	29,57	100,00%

ANNEXE 11: Taux d'urbanisation et sinistralité par formation dans le département du Val de Marne (94), (d'après Plat et al., 2007b).

N° Ordre	Notation	Nom de la formation argilo-marneuse	Sinistres		Affleurement		Urbanisation	
			Nombre	% Sinistres	Surfaces d'affleurement (km ²)	% d'affleurement	Surface bâtie (km ²)	% surface bâtie
1	X	Remblais	6	0,22%	6,42	2,63%	0,83	2,97%
2	C/g1SF	Colluvions polygéniques sur Sables de Fontainebleau	22	0,82%	2,67	1,10%	0,21	0,76%
3	CE	Colluvions polygéniques	189	7,05%	6,72	2,76%	1,34	4,80%
4	CF	Colluvions de versants et de fonds de vallons	0	0,00%	0,08	0,03%	0,00	0,00%
5	LP	Limons des plateaux	8	0,30%	34,57	14,17%	1,68	6,05%
6	Rfv/g1C B	Argiles à meulière de Brie	452	16,85%	31,49	12,90%	2,18	7,83%
7	FzB	Alluvions récentes de la Bièvre	11	0,41%	0,96	0,39%	0,13	0,46%
8	Fy-z	Alluvions anciennes de basse terrasse et alluvions récentes indifférenciées	359	13,39%	91,91	37,66%	12,47	44,78%
9	Fv	Alluvions anciennes de hautes et moyennes terrasses	31	1,16%	3,09	1,27%	0,22	0,78%
10	g1MH	Marnes à huîtres et argiles à Corbules	6	0,22%	0,58	0,24%	0,10	0,35%
11	g1CB	Calcaire de Brie et de Sannois, Caillasse d'Orgemont et Argiles à meulière	214	7,98%	24,34	9,97%	2,44	8,78%
12	g1AR	Argile verte, glaises à Cyrènes et/ou Marnes vertes et blanches (Argile verte de Romainville)	447	16,67%	12,03	4,93%	1,54	5,51%
13	e7MS	Marnes supragypseuses : Marnes blanches de Pantin, Marnes bleues d'Argenteuil	650	24,24%	11,12	4,56%	1,27	4,58%
14	e7G	Masses et marnes du gypse	12	0,45%	0,38	0,15%	0,07	0,27%
15	e7ML	Marnes Ludiennes (Faciès de transition).	70	2,61%	2,19	0,90%	0,29	1,06%
16	e7CCh-MP	Calcaire de Champigny, marnes à Pholadomies	88	3,28%	3,00	1,23%	0,36	1,28%
17	e6-7MGC	Marnes à Pholadomies et Formation du Gypse, Quatrième masse	54	2,01%	0,83	0,34%	0,19	0,69%
18	e6-7CH-SO	Marnes infragypseuses, Masses et marnes du gypse et Calcaire de Champigny	2	0,07%	0,11	0,04%	0,01	0,02%
19	e6SM	Sables de Monceau	8	0,30%	0,42	0,17%	0,06	0,22%
20	e6CSO	Calcaire de Saint-Ouen	41	1,53%	3,48	1,42%	0,71	2,54%
21	e6SB	Sables de Beauchamp	1	0,04%	2,16	0,88%	0,56	2,02%
22	e5MC	Marnes et caillasses	4	0,15%	1,92	0,79%	0,45	1,61%
23	e4AP	Argile plastique, sables et grès	7	0,26%	0,21	0,09%	0,04	0,13%
Total Formations retenues			2682	100,00%	240,67	98,62%	27,14	97,48%
Formations a priori non argileuses			0	0,00%	3,38	1,38%	0,70	2,52%
Total			2682	100,00%	244,04	100,00%	27,84	100,00%

Annexe 12 : Description Litho-stratigraphique des Formations argilo-marneuse des départements de Seine-saint Denis (93), et Val-de-Marne (94), d'après (Donsimoni et al., 2001, Donsimoni et al., 2003, Plat et al., 2007a, Plat et al., 2007b) et sinistralité associée.

Les Remblais : X

Description litho-stratigraphique :

Ils sont représentés par les accumulations de matériaux naturels (limons, marnes, sables) ou artificiels (produits de démolition). Certains dépôts sont accumulés dans les anciennes carrières utilisées comme décharge ou dans les anciennes ballastières. Certains remblais, parfois importants (épaisseur variable de 5m à 20mètres), constituent le sous-sol des agglomérations et des zones industrielles. Ils peuvent contenir localement une certaine proportion de fraction argileuse selon l'origine et la nature des matériaux utilisés. Seuls les plus importants ont été cartographiés sur les cartes géologiques à 1/50 000.

Analyse de la sinistralité :

Cette formation reste anecdotique, au regard de la faible sinistralité (11 sinistres) due à une faible superficie de l'affleurement, ce qui rend la valeur de densité de sinistres au km² peu significative statistiquement parlant. Le comportement des remblais et son rôle dans les désordres urbain doit être fait l'objet d'une étude à part entière car ils peuvent être à l'origine de désordres indépendamment de la problématique de la sécheresse géotechnique.

Colluvions polygéniques sur sables de Fontainebleau : C/g1SF

Description litho-stratigraphique :

Cette formation concerne le département du Val-de-Marne uniquement, anciennement appelée g1SF. Si les Sables de Fontainebleau ont été considérés parmi les formations non argileuses (Donsimoni *et al.*, 2003, Prian *et al.*, 2000), elle peut présenter des niveaux argileux à la base (Donsimoni et al., 2001) ou être parfois surmontée de colluvions argilo-marneuses issues par exemple des Argiles à meulière de Brie. Il a été supposé que la totalité des zones d'affleurement des Sables de Fontainebleau était susceptible d'être recouverte par des formations colluvionnées à dominante argileuse, décrites sous le nom de Colluvions polygéniques sur Sables de Fontainebleau.

Analyse de la sinistralité :

La sinistralité liée à cette formation est faible avec seulement 22 cas recensés entre 1989 et 2005. Cependant, malgré un faible taux d'urbanisation de 0,4%, la densité de sinistralité s'établit à 104 sinistres au km², ce qui est en accord avec les descriptions lithologiques réalisées par le BRGM. Cette donnée est toutefois faiblement représentative car la formation ne s'étend que sur 2,67km² dans le Val-de-Marne.

Colluvions polygéniques, éboulis (colluvions à dominante marnogypseuse) : CE

Description litho-stratigraphique :

Les niveaux argileux et sableux de l'Oligocène et de l'Eocène supérieur, très « fluants » mais peu solubles, se retrouvent en éboulis sur les pentes des buttes témoins et au pourtour des plateaux. Ces colluvions sont également alimentées par les produits d'altération du gypse et forment un complexe très hétérogène où alternent les lentilles argileuses, marneuses et sableuses. Les principales zones, où ces formations ont plus de trois mètres d'épaisseur, sont situées sur les communes de Villemonble, Noisy-le-Sec, Pantin et Montreuil. Localement, l'épaisseur de ce complexe peut dépasser 10m.

Analyse de la sinistralité :

Cette formation étant présente dans les deux départements, il est intéressant de regarder les chiffres de sinistralité de part et d'autre : le nombre de sinistres est de 649 dans le département du 93, contre 189 dans le département du 94. Cependant cette différence est expliquée par un taux d'urbanisation inégal, qui est cinq fois plus élevé dans le 93 (15,93% de surface bâtie dans le 93, contre 4,80% dans le 94). En conséquence, les valeurs de densité de sinistralité sont relativement proches dans les deux départements de 137,8 sinistres par km² pour le 93 et 141 sinistres par km² pour le 94. D'un point de vu sinistralité, cette formation est donc « homogène » et son taux de sinistralité révélatrice de sa susceptibilité dans l'Est Parisien.

Colluvions de versant et de fonds de vallons CF

Description litho-stratigraphique :

Il s'agit d'éboulis ou de colluvions d'origine variée, argilo-sableuses, parfois caillouteuses, qui recouvrent certains bas de versants. D'une manière générale, leur épaisseur est mal connue.

Analyse de la sinistralité :

Cette formation affleure très peu (0,08 km²) et aucun sinistre lui est associé de par l'absence d'un tissu urbain construit (taux d'urbanisation nulle).

Les Limons des Plateaux : LP

Description litho-stratigraphique :

Les Limons des Plateaux sont constitués d'une série de dépôts remaniés et hétérogènes d'origines différentes, constituée (1) des Limons des Plateaux proprement dits, de texture sablo-argileuse d'aspect jaunâtre, ocre ou rubéfiés le plus souvent argileux et dont la fraction argileuse est constituée en général par une association de kaolinite et de montmorillonite en quantités sensiblement équivalentes (Donsimoni *et al.*, 2005) et (2) d'une formation de sédiments pulvérulents au toucher, d'origine éolienne, les loess.

Cette formation superficielle recouvre de vastes étendues à la surface des plateaux avec des épaisseurs variables, de l'ordre de un à deux mètres au Sud, qui croît vers le Nord où ils dépassent parfois trois mètres, pour atteindre localement cinq mètres d'épaisseur. Ils

peuvent passer progressivement – latéralement ou verticalement – à l'Argile à meulière qui présente un aspect comparable. **De ce fait, il est souvent difficile de distinguer ces deux formations l'une de l'autre, aussi bien à l'affleurement qu'en sondages.**

À l'ouest du département du Val-de-Marne, cette formation couvre largement le plateau de Thiais. Dans le département de Seine-Saint-Denis, les Limons des Plateaux surmontent le Calcaire de Saint-Ouen, au Nord-Est, et le Calcaire de Brie, à l'Est et au Sud-Est. Ces dépôts hétérogènes comprennent des formations résiduelles, des cailloutis, des limons proprement dits. Sur le Calcaire de Saint-Ouen, ils sont formés de matériaux très fins, et leur épaisseur est de 2 à 3 mètres. Ceux du plateau briard sont plus hétérogènes (argile, sables quartzeux à concrétions calcaires ou ferrugineuses). Ils contiennent, en outre, des poches de sables correspondant à des dépôts résiduels des Sables de Fontainebleau (Clichy-sous-Bois) ainsi que des fragments de meulière, des silex ou des plaquettes calcaires.

Analyse de la sinistralité :

Cette hétérogénéité est illustrée par une sinistralité disparate sur les Limons des Plateaux entre les deux départements étudiés : dans le 93, là où l'épaisseur des Limons des Plateaux est importante, le BRGM recense 134 sinistres contre 8 seulement dans le département du 94 plus au Sud. Ni la superficie, de la formation ni son taux d'urbanisation – de valeurs similaires dans les deux départements- ne permettent d'expliquer cette différence de sinistralité. La densité de sinistralité s'élève à 78,4 sinistres par km² pour le 93, contre 4,8 sinistres par km² dans le 94.

Cette différence tient au fait que la couverture superficielle des Limons des Plateaux a été retirée dans le décompte effectué par le BRGM lorsque celle-ci a une épaisseur inférieure à deux mètres. Une formation « Limons des Plateaux en recouvrement sur Argile à meulière de Brie » notée LP/g1CB-AM a été distinguée dans le 94 (Donsimoni *et al.* 2001, Plat *et al.*, 2007b), permettant ainsi de caractériser la nature et l'extension des Argiles à meulière sous recouvrement, ce qui diminue la part de sinistralité des Limons des Plateaux dans le 94. Toutefois, la cartographie exacte de l'épaisseur des Limons des Plateaux reste imprécise ainsi que les propriétés de la couche sous-jacente : **cette formation pose un problème de cartographie et de caractérisation lithologique.**

Colluvions de versants et de fonds de vallons : CF

Description litho-stratigraphique :

Il s'agit d'éboulis ou de colluvions d'origine variée, argilo-sableuses, parfois caillouteuses, qui recouvrent certains bas de versants. D'une manière générale, leur épaisseur est mal connue. Ces colluvions présentent une surface d'affleurement très faible mais sont présents à la frontière entre les départements du Val-de-Marne (94) et de la Seine-et-Marne (77). Cette formation affleure que très peu avec moins d'un dixième de kilomètre carré.

Analyse de la sinistralité :

Aucun sinistre n'est recensé pour cette formation pourtant argileuse. Cela est liée à l'absence d'urbanisation.

Alluvions récentes : Fz

Description litho-stratigraphique

Les alluvions récentes sont liées à des dépôts détritiques d'origine fluviale et alimentées par l'érosion des sols environnants. Ce sont des matériaux fins souvent granulométriquement classés avec une teneur en argile conséquente : la nature des alluvions dépend de la géologie des bassins traversés et des profils hydrauliques (les vitesses d'écoulement contrôlant la granulométrie des particules qui se déposent). Dans l'Est Parisien, on distingue les alluvions de la Seine et de la Marne. On note également ceux de la Bièvre, dans le sud ouest du Val-de-Marne : les Alluvions récentes de la Bièvre sont très présentes sur la carte des formations argilomarneuses des Hauts-de-Seine et dans une moindre mesure par continuité dans le département du Val-de-Marne, ce qui présente peu d'intérêt pour notre étude, car trop excentré par rapport à notre zone d'intérêt. Toutefois nous les mentionnons car l'ensemble des alluvions modernes de la Seine, de la Marne et les alluvions de la Bièvre (94) ont été regroupé dans une formation notée F_z.

Analyse de la sinistralité :

Les chiffres de sinistralité sont disparates avec 225 sinistres pour les alluvions de Seine et de la Marne et seulement 11 pour les alluvions de la Bièvre. Cependant en considérant le taux d'urbanisation, la densité des sinistres sur les alluvions de la Bièvre est plus forte, 84,6 sinistres par km² contre 59,8 sinistres par km². Une mesure géotechnique d'indice de plasticité effectuée par le LRP (Plat *et al.*, 2007b) montre une plus forte susceptibilité des alluvions de la Bièvre, ce qui est en accord avec le profil hydraulique très plat qui contribue à favoriser une sédimentation des particules fines à un transport de courte durée (loi de Stock).

Ces mesures géotechniques ont conduit le BRGM à retenir une susceptibilité forte pour les alluvions de la Bièvre et une susceptibilité faible à moyenne pour les alluvions de la Seine et de la Marne. Nous avons retenu une seule unité F_z compte tenu du faible affleurement et du faible taux d'urbanisation des alluvions de la Bièvre avec pour densité de sinistralité de 60,7 sinistres/km². Les alluvions de la Bièvre est un cas anecdotique dans notre étude mais il souligne la diversité des matériaux composant cette formation, potentiellement sensible au RGA selon la géologie environnante et son érosion.

Alluvions anciennes de basse terrasse et alluvions récentes indifférenciées Fy-z

Description litho-stratigraphique :

Cette formation est définie dans le département du 94, avec des alluvions anciennes et récentes indifférenciées.

Analyse de la sinistralité :

Cette formation est remarquable dans les statistiques par sa grande surface d'affleurement de 91km², son fort taux d'urbanisation de 44,8% et par conséquent par son nombre de sinistre recensé. Cependant la densité de sinistre qui s'établit à 28,8 sinistres/km² n'en fait pas une formation sensible au RGA plus qu'une autre formation d'alluvions.

Alluvions anciennes indifférenciés F_x-F_y

Description litho-stratigraphique :

Les dépôts de niveaux F_x-F_y (5-30 m au dessus de l'étiage), se situent au Nord-Ouest de Villemonble ainsi qu'au Sud et à l'Ouest de Bondy.

– Alluvions anciennes : F_x

Ces alluvions de niveau de 20-30 mètres au-dessus de l'étiage sont constituées de matériaux sablo-graveleux, de couleur jaunâtre à beige, parmi lesquels les éléments calcaires, empruntés aux formations lutétiennes, sont abondants, tandis que les éléments siliceux, tels que silex et meulières, sont accessoires. À la base, on distingue souvent un conglomérat silico-calcaire à ciment calcaire appelé « calcin ». Il peut également se présenter sous forme de lentilles discontinues.

– Alluvions anciennes : F_y

Ces alluvions sont de niveau de 0-15mètres au-dessus de l'étiage. La base de la formation débute généralement par un conglomérat renfermant parfois des blocs volumineux : des calcaires, empruntés au Lutétien, des roches granitiques et des chaumes jurassiques sont fréquents dans les graviers de la Seine, tandis que les meulières sont fréquentes dans les matériaux de la Marne. Au-dessus, viennent des bancs de galets, puis des lits de cailloutis et de sable fin. Leur sommet est constitué de sables argileux et, localement, de limons. Au Nord-Est de Paris, dans la zone déprimée de Bobigny - La Courneuve on retrouve un complexe argilo-sableux avec cailloux et blocs de grandes dimensions.

Analyse de la sinistralité :

La densité de sinistralité associée est double de celle de la formation précédente F_{y-z}, avec 61,8 sinistres/km².

Alluvions anciennes de moyennes et hautes terrasses : F_v

Description litho-stratigraphique :

La formation F_v regroupe les alluvions anciennes de moyenne terrasses (F_x), les Alluvions anciennes de hautes terrasses noté F_v et les alluvions anciennes de très haute terrasse noté F_w. Cette formation n'avait pas été considérée comme argilo-marneuse dans l'étude de Donsimoni *et al.* (2003). Elle a pourtant été retenue comme telle dans la quasi-totalité des départements d'Île-de-France (à l'exception du Val d'Oise, des Hauts-de-Seine et de certains secteurs de Seine-Saint-Denis) car ces alluvions peuvent renfermer une certaine proportion d'argile et sont le siège de sinistres (Prian *et al.*, 2000). Compte tenu de leur faible extension et du faible nombre de données géotechniques disponibles pour les caractériser, les

alluvions anciennes ont été regroupées à l'exception de Fy qui, dans la majorité des cas, n'a pas été différencié des alluvions récentes sur les cartes géologiques actuelles.

Analyse de la sinistralité :

Il est difficile de diagnostiquer la susceptibilité de cette formation à la seule lecture de données de sinistralité : la surface d'affleurement est faible, de l'ordre de 3km^2 et très faiblement urbanisé avec un taux de 0,78%. Malgré tout, 31 sinistres ont été recensés pour cette formation, ce qui établit la densité des sinistres à 140,9 sinistres par km^2 , valeur relativement élevée mais discutable de par sa faible représentativité (faible surface d'affleurement).

Argiles à meulière de Brie sous recouvrement des Limons des Plateaux: Rfv/g1CB

Description litho-stratigraphique :

Anciennement nommée Limons des Plateaux en recouvrement sur Argile à meulière de Brie (LP/g1CB_AM), lesquels ont donc été réinterprétés en « retirant » cette couverture superficielle de Limons des Plateaux lorsque son épaisseur est inférieure à 2 m, ce qui permet de caractériser la nature et l'extension des Argiles à meulière sous recouvrement. Cependant, en s'approchant de la frontière de la Seine-et-Marne, les sondages de la Banque du Sous-Sol (BDSS) indiquent que le faciès des Argiles à meulière est moins représenté au profit du Calcaire de Brie. Dans ce secteur, la carte des formations argileuses n'affiche donc plus les Argiles à meulière de Brie sous mince recouvrement de limons mais directement les Limons des Plateaux qui masquent le calcaire de Brie sous-jacent dont la limite d'extension présumée du Calcaire de Brie, n'a été fait en s'aidant des seules données accessibles, à savoir celles de la BSS. Partout où le faciès d'altération n'est pas prédominant, ce sont donc les Limons des Plateaux qui sont affichés car, bien que moins argileux que les Argiles à meulière, ils le sont souvent davantage que les faciès du Calcaire de Brie qu'ils recouvrent. Cette distinction nécessite cependant de déterminer. Les données fournies par le LREP ont également permis de vérifier cette limite.

Analyse de la sinistralité :

La densité des sinistres s'élevant à 183 sinistres par km^2 pour cette formation, les argiles à meulière révèlent ainsi leur susceptibilité au RGA. Cependant, en examinant les chiffres de part et d'autre des deux départements, on constate que dans le 94, la sinistralité y est plus forte, avec 207 sinistres par km^2 , contre 133 sinistres par km^2 pour le 93. Ceci est expliqué par un plus fort taux d'urbanisation dans le Val-de-Marne (94). Cette disparité peut être aussi en partie expliquée par la difficultés à cartographier la formation des Limons des Plateaux dont la prise en compte tient à son épaisseur, mais aussi à la difficulté de la caractérisation des argiles à meulière qui est un faciès d'altération (voir ci-après g1CB).

Marnes à huîtres (Oligocène, Rupélien, Stampien s.s.) : g1MH

Description litho-stratigraphique :

Cette formation du Stampien s.s. est intercalée entre le Calcaire de Brie, à la base, et les Sables et Grès de Fontainebleau, au sommet. Elle constitue un intercalaire laguno-marin peu épais et discontinu. Au niveau du plateau occidental, elles sont essentiellement marneuses, grisées, jaunâtres ou verdâtres. Au plan minéralogique, on rencontre essentiellement une association à smectite dominante, illite et kaolinite. Les interstratifiés illite-smectite sont fréquents. Leur épaisseur peut être variable mais n'excède pas les 4,50 m.

Analyse de la sinistralité :

La sinistralité indique que cette formation n'a pas enregistré beaucoup de sinistres, 7 en tout sur les deux départements du 93 et 94, mais que cela est dû à son faible affleurement et très faible taux d'urbanisation. La densité de sinistralité n'est donc pas révélatrice de sa susceptibilité.

Calcaire de Brie et de Sannois, Caillasse d'Orgemont et Argiles à meulière : g1CB

Description litho-stratigraphique :

Calcaire de Brie et de Sannois. La surface structurale des plateaux (buttes de Romainville, plateau d'Avron et de Raincy – Montfermeil) correspond au Calcaire de Brie et/ou à son faciès d'altération, l'Argile à meulière, développée sur les plateaux de la bordure orientale. La base du Calcaire de Brie montre une succession de lits marno-calcaires blanchâtres entrecoupés de niveaux argileux bruns ou de passées sablo-gréseuses. Vers le haut, la série passe graduellement à des bancs disloqués de calcaire siliceux compact ou de calcaire marneux rognonneux et latéralement à la meulière compacte. L'action destructive des agents d'érosion ne laisse en surface que des blocs siliceux usés, enrobés dans une argile grise, résiduelle, dont la teneur en carbonates croît avec la profondeur. Des poches de décalcification se sont développées au toit de la formation calcaire, lui donnant un profil festonné. À Belleville, la formation calcaire contient des niveaux siliceux. Elle développe 4 à 8 mètres de puissance. L'ensemble Calcaire de Brie et Argiles à meulière peut atteindre dix mètres. Le Calcaire de Brie contient en général 95% de CaCO_3 . Cette proportion peut s'abaisser jusqu'à 50% dans les niveaux marneux. La fraction argileuse est constituée de smectite, d'illite et souvent d'attapulгите. La présence de kaolinite paraît fréquente au sommet.

Argiles à meulière. Les Argiles à meulière est un horizon d'altération récent, d'âge Pliocène supérieur et le Quaternaire ancien avec une répartition est aléatoire, d'où la difficulté de distinguer cartographiquement le Calcaire de Brie de son faciès d'altération que sont les Argiles à meulière. Concernant l'origine des Argiles à meulière, il s'agit d'une formation superficielle d'altération née à partir du matériel de remplissage et de couverture d'un karst sur formation calcaire d'accueil (Calcaire de Brie), d'après (Ménillet, 1993). Le matériel soumis à l'altération est constitué, en particulier, d'accidents siliceux extraits par décalcification des calcaires d'accueil avec les produits argileux de décalcification. Dans l'ensemble inférieur des Argiles à meulière, les argiles d'illuviation sont assez riches en smectites et en minéraux interstratifiés illite-smectites (Ménillet, 1993).

Analyse de la sinistralité :

La densité de sinistralité pour les deux départements est équivalente, avec une densité de sinistralité moyenne de 85,4 sinistres/km².

Argile verte de Romainville et Glaises à Cyrènes (Oligocène, Rupélien, Sannoisien inférieur) : g1AR

Description litho-stratigraphique :

Cette formation de la base du Sannoisien regroupe sous l'appellation « Argile verte de Romainville », deux horizons :

Glaises à Cyrènes. Cet horizon de base est constitué d'argiles feuilletées vertes et brunâtres à intercalations de sable très fin. Elles doivent leur nom à l'abondance de coquilles de *Cyrena convexa* (lamellibranche d'eaux douces ou saumâtres). Épaisses de 1 à 2 m, on les trouve au sommet de toutes les collines.

Argile de Romainville. C'est l'argile verte proprement dite, à illite et kaolinite ; elle doit sa couleur à des sels de strontium. Elle contient des nodules calcareux, parfois drusiques, tapissés de cristaux de calcite et de strontianite (carbonate de strontium). Très plastiques, elles ont tendance à fluer vers le bas des coteaux où elles peuvent s'accumuler sur plus de 10 m. L'existence de nappes suspendues ajoute à l'instabilité des formations argileuses (argile verte) et peut entraîner le fluage des couches sus-jacentes aboutissant à de véritables glissements de terrains.

Analyse de la sinistralité :

La sinistralité liée à cette formation est élevée, avec 328 sinistres déclarés dans le département du 93, et 447 sinistres dans le département du 94, ce qui montre la sensibilité des Argiles Verte de Romainville au phénomène de RGA. La densité de sinistralité est équivalente sur les deux départements étudiés avec 250,4 sinistres par km² pour le 93 et 290,3 sinistres par km² pour le 94, soit 272 sinistres par km².

Marnes Supragypseuses (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien supérieur), les Marnes bleues d'Argenteuil et les Marnes blanches de Pantin : e7MS

Description litho-stratigraphique :

Bien représentée dans la zone des collines, cette formation comprend deux termes, (1) les Marnes bleues d'Argenteuil à la base, et (2) les Marnes blanches de Pantin au sommet. Elles marquent la fin de la sédimentation éocène.

Marnes bleues d'Argenteuil. Elles reposent directement sur les Masses et Marnes du gypse ou, au sud de la Marne, sur le Calcaire de Champigny, leur équivalent latéral. Ce sont des marnes beaucoup plus argileuses que les Marnes blanches de Pantin. Ce sont des dépôts lagunaires peu fossilifères à illite et montmorillonite. L'épaisseur varie de 8 à 11 mètres.

Marnes blanches de Pantin. Il s'agit d'une formation marno-calcaire, épaisse de 5 à 7m, gris verdâtre à la base, blanchâtre au sommet, plus ou moins indurée. Sous l'effet de la dessiccation, elle se débite en blocs prismatiques.

Analyse de la sinistralité :

Cette formation argilo-marneuse est l'une des plus sensibles au phénomène de RGA car elle concentre la sinistralité la plus importante parmi toutes les formations géologiques présente dans les deux départements considérés. Si le nombre de sinistres dans le département du 94 est trois fois plus important avec 650 sinistres officiellement déclarés contre 190 dans le département du 93, c'est en parti expliqué par un plus fort taux d'urbanisation dans le Val-de-Marne (2,3 % pour le 94 contre 0,8% pour le 93) et donc une surface bâtie plus vaste de 1,27km² contre 0,45km² pour la Seine-Saint-Denis. La sinistralité au Val-de-Marne est plus représentative car la formation affleure sur 11,12km². La densité moyenne de sinistralité pour cette formation s'établi à 448 sinistres par km².

Masses et Marnes du gypse (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien moyen) : e7G

Description litho-stratigraphique :

Le Ludien correspond à l'installation d'un régime lagunaire qui se traduit, au Nord de la Marne, par un faciès sursalé où se déposent alternativement des masses de gypse saccharoïde et des bancs de marnes à intercalations gypseuses. L'ensemble atteint 30 à 35 m d'épaisseur. Parmi les épaisseurs indiquées ci-dessous pour chaque masse, les plus faibles correspondent vraisemblablement à une dissolution « interne » accompagnée d'un tassement des couches supérieures.

Les différentes couches ont été dénommées par les carriers en commençant par le haut :

- « 1^{re} Masse du gypse » ou « Haute Masse » ; C'est la masse la plus exploitée. Elle est constituée de bancs massifs bien stratifiés de gypse saccharoïde pouvant présenter des diaclases gris foncé à la base, gris rougeâtre ou jaune et blanc, avec des niveaux peu épais de marnes feuilletées.
- « Marnes d'entre deux masses » ou « Marnes à fers de lance » ; Très litées, ces marnes offrent une succession de bancs de marnes calcaires, dolomitiques ou gypseuses, au milieu desquels se sont développés irrégulièrement des cristaux de gypse saccharoïde ou « fers de lance ». Elles prennent souvent un aspect marbré (marnes cérébelleuses) et montrent des propriétés détersives, d'où leur appellation de « savon du soldat ». À leur base, on rencontre un niveau de petits silex de type ménilite. Leur épaisseur est de l'ordre de 4 à 7 m.
- « 2^e Masse du gypse » ou « Masse moyenne » ; Cette masse est composée de bancs de gypse saccharoïde séparés par plusieurs lits de gypse « pieds d'alouette » réguliers et par quelques lits marneux. Vers le milieu de la formation ou à son toit, le gypse se délite en montrant des surfaces ondulées de type « ripple mark ». Son épaisseur varie de 7 à 10 m.
- « Marnes à Lucines » ; Ce sont des marnes blanches, grises, jaunâtres ou gris bleuté, entrecoupées de bancs de gypse lenticulaire « pieds d'alouette ». Leur épaisseur est comprise entre 3 et 4 m. La fraction argileuse est constituée d'attapulгите dominante et de smectites.

- « 3e Masse du gypse ». Épaisse de 2 à 3 m, avec de fortes variations d'épaisseur, c'est la masse de gypse la plus marneuse. De nombreux cristaux de gypse « pieds d'alouette » se développent dans la masse du gypse saccharoïde.

A cette formation gypseuse, il existe un faciès de substitution ou gypse pseudomorphosé et phénomènes de dissolution du gypse. Dans certains secteurs, là où les 1re et 2e Masses du gypse ont été dissoutes, les masses inférieures (3e et 4e) se présentent souvent sous forme de bancs calcaro-siliceux d'épaisseur inférieure aux bancs de gypse originels, avec tous les termes de passage entre l'état amorphe et la pseudomorphose, et conservation des formes cristallines du gypse. Ces lits sont difficiles à observer car ils sont souvent marqués par les dépôts soliflués de versants ; en sondages, on les différencie difficilement des éboulis et colluvions qui les recouvrent ou qu'ils alimentent (CE). L'ensemble peut atteindre 10 m de puissance. Du carbonate de calcium se serait substitué au sulfate de calcium. Ces bancs cristallisés, où la calcite rougeâtre ou jaunâtre prédomine, ressemblent au « sucre Candi » des Marnes et Caillasses du Lutétien. La silice y est souvent abondante.

Analyse de la sinistralité :

La sinistralité liée à cette formation dans le département de Seine-Saint Denis est plus prononcée qu'en Val-de-Marne, 147 sinistres officiels contre 12, mais cela est expliqué par un plus fort taux d'urbanisation et une plus grande superficie d'affleurement dans ce département de Seine-Saint-Denis. La densité de sinistralité s'élève à 93 sinistres par km², ce qui est non négligeable à la moyenne des deux départements, 119 sinistres par km², pour l'ensemble des formations géologiques.

Marnes ludiennes (faciès de transition) (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien moyen) : e7ML

Description litho-stratigraphique :

La transition entre la Formation des Masses et Marnes du gypse et la Formation du Calcaire de Champigny (équivalent latéral) s'effectue par l'intermédiaire de faciès marneux. Au sein de ces faciès marneux qui dominent l'ensemble lithologique, s'intercalent des passées pluridécimétriques, soit gypseuses, soit calcaro-siliceuses (secteur de Villeneuve-Saint-Georges).

Analyse de la sinistralité :

De par un faible taux d'urbanisation de 0,5% et une faible surface d'affleurement de 2,19km², les données de sinistralité relative à cette formation ne sont pas très significatives pour caractériser la susceptibilité au RGA avec les seules données de sinistralité. On note toutefois que 70 sinistres ont été reportés sur cette formation, ce qui place cette formation à une très forte valeur de densité de sinistralité avec 241,38 sinistres par km², chiffre à relativiser toutefois de par le faible échantillonnage.

Calcaire de Champigny et Marnes à Pholadomies indifférenciées (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien inf. à Ludien moy.) : e7CCh-MP

Description litho-stratigraphique :

Calcaire de Champigny. Cette formation représente l'équivalent latéral des trois premières masses de gypse de la Formation des Masses et Marnes du gypse. La zone de transition entre les deux faciès coïncide avec la vallée de la Marne qui a érodé les terrains postérieurs à l'Éocène moyen. Dans le secteur de Créteil, sous 3,45 m de marnes blanches, on trouve 15 m de calcaire blanc fissuré de faciès typiquement Champigny, puis 0,20 m de gypse « fers de lance » reposant sur 10 m de marnes alternant avec du gypse saccharoïde. Au sud de la Marne, dans la région comprise entre la Marne et la zone anticlinale de Saint-Maur, le Calcaire de Champigny se présente sous un faciès marneux, marnes cérébelleuses avec quelques intercalations calcaires. Son épaisseur est variable : de 15 à 40 m ; mais dans le secteur qui intéresse le département du Val-de-Marne, elle se situe aux environs de 20 m.

Marnes à *Pholadomya ludensis*. Lorsque leur épaisseur est faible (1 à 2 m), les Marnes à *Pholadomya ludensis* ont été associées au Calcaire de Champigny. La description est identique à celle faite précédemment.

Analyse de la sinistralité :

Cette formation présente un affleurement relativement faible dans les deux départements considérés (3,69 km²) et un taux d'urbanisation également très faible de l'ordre de 1%. Les valeurs de densité de sinistralité s'établissent à 175 sinistres par km² pour le 93 et 244,4 sinistres par km² pour le 94. Cette différence est expliquée par un taux d'urbanisation plus élevé dans le 94 (0,64% contre 0,21%) ou que cette formation n'est pas homogène d'un point de vue lithologique ce qu'exprime la sinistralité disparate : des variations de faciès et d'épaisseurs notées dans la description litho-stratigraphique.

Marnes à Pholadomies (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien inférieur) : e7MP

Description litho-stratigraphique :

Elles ne sont individualisées cartographiquement qu'en limite nord du département. La description est identique à celle faite précédemment.

Analyse de la sinistralité :

La densité de sinistralité est faible, établie à 51,35 sinistres par km² par rapport à la moyenne des deux départements de 119,7 sinistres par km².

Marnes à Pholadomies, 4 Masse du gypse, Calcaire de Noisy-le-Sec (Éocène moyen à supérieur, Priabonien à Bartonien supérieur, Marinésien sup. à Ludien inf.) : e6-7MGC

Description litho-stratigraphique :

Du fait de leur faible épaisseur, ces dépôts, allant du Marinésien terminal au Ludien inférieur, sont indifférenciés dans l'Ouest du département, sur le territoire de la feuille Paris.

- Calcaire de Noisy-le-Sec et Marnes à Paludines. Au-dessus des Sables de Monceau, on trouve parfois, sur quelques décimètres d'épaisseur, des calcaires et marnes lacustres à Paludines. Le calcaire beige, dur, en rognons ou en bancs, peut alterner avec des bancs de marne blanchâtre et des bancs et lits d'argile brune, feuilletée.

- 4^{me} Masse du gypse. La série du Marinésien se termine par un dépôt de gypse saccharoïde de 1,50 m d'épaisseur maximale, localisé au milieu de la ride du synclinal de Saint-Denis. On la rencontre à Saint-Denis, Belleville et Aulnay. Elle contient des niveaux marneux. Souvent entièrement pseudomorphosée en minéraux calcarosiliceux, elle est alors difficile à identifier. À Saint-Denis, elle est représentée par 1 m de gypse blanchâtre, pulvérulent ou saccharoïde, souvent fissuré.

- Marnes à Pholadomies. Elles sont individualisées cartographiquement sur le flanc nord de la butte de Villejuif (nord-ouest du département). Elles représentent le dernier épisode marin ou laguno-marin avant l'installation du régime laguno-lacustre qui va conduire au dépôt du gypse et du Calcaire de Champigny. Elles sont largement transgressives, mais leur épaisseur reste faible. Ce sont des marnes blanchâtres ou jaunâtres, entrecoupées de feuillets argileux, avec parfois un cordon de nodules gypseux sphériques de 10 à 15 cm de diamètre. Elles renferment des moulages de trémies de sel gemme qui peuvent atteindre 5 cm de longueur. Quelques passées sont fossilifères. Les minéraux argileux présents sont l'attapulgitite et les sépiolites. L'ensemble se développe au maximum sur 4 m à 4,50 m d'épaisseur.

Analyse de la sinistralité :

Les chiffres de densité de sinistralité sont très différents entre le département de Seine-Saint-Denis (9,8 sinistres/km²) et celui du Val-de-Marne (284,2 sinistres/km²). On retiendra la valeur du département du 93, car la formation y affleure beaucoup plus et que le taux d'urbanisation y est plus élevé, assurant ainsi un meilleur échantillonnage du phénomène. Cette formation illustre l'importance d'une grande surface d'affleurement pour bien appréhender les chiffres de sinistralité. Cette formation reste donc peu sensible au RGA, car nettement en dessous de la valeur moyenne de la zone.

Autres formations présentes dans les départements, mais n'intéressant pas la zone d'étude (toujours par ordre lithologique):

Marnes infragypseuses, Masses et marnes du gypse et Calcaire de Champigny : e6-7CHSO.

Cette formation n'affleure pas dans la zone d'étude et présente très peu de sinistres (2).

Sables de Monceau : e6SM

Cette formation, de très faible extension, est décrite par Donsimoni et al. (2003) comme pouvant contenir des bancs d'argiles et a donc été ajoutée conformément aux

départements limitrophes. De teinte dominante verdâtre (présence de glauconie), les Sables de Monceau ou Sables verts infragypseux, sont des sables localement indurés (grès), renfermant des niveaux d'argiles, de calcaires et de gypse saccharoïde. Ils débutent généralement par un lit irrégulier de silex noirs. Les fossiles de milieu marin ou saumâtre sont assez rares.

Calcaire de Saint-Ouen, Sables de Mortefontaine, Calcaire de Ducy (Éocène moyen, Bartonien supérieur, Marinésien inf., moy., sup.) : e6CSO

Calcaire de Ducy. Cet ensemble de calcaires, marnes et agiles brunes feuilletées, de 1,20 m d'épaisseur maximum – quand il n'est pas enflé par du gypse ou de la silice cristalline de pseudomorphose – est un dépôt laguno-lacustre.

Sables de Mortefontaine. En sondage, ce niveau marin ne se distingue du Calcaire de Saint-Ouen que lorsqu'il est sableux ou lorsque les coquilles d'*Aviluca defrancei* sont reconnaissables. Mais il n'est souvent représenté que par 30 cm environ de calcaire dur, gris, rose ou crème, que l'on confond alors avec le Calcaire de Saint-Ouen.

Calcaire de Saint-Ouen. Cette formation laguno-lacustre est constituée d'une alternance de bancs calcaires, parfois siliceux, et de marnes avec passées d'argiles sombres à dominante d'attapulгите et présence de sépiolite (argiles fibreuses magnésiennes).

Les calcaires sont blancs, crème ou rosés. Ils renferment des bancs de gypse ; celui-ci est généralement saccharoïde, rarement en « fers de lance ». Des restes de vertébrés ont été trouvés dans les niveaux gypseux. La partie supérieure montre des bancs calcaires plus durs, sublithographiques, à cassure conchoïdale, parfois silicifiés, avec des lits constitués de gros silex. D'une épaisseur de 10 à 12 m, dont 50 %, en moyenne, de calcaire durs, cette formation est la couche la plus résistante des diverses strates tertiaires. Dans la masse des marnes et des calcaires siliceux, on trouve quelques minéraux intéressants :

- attapulгите et sépiolites, argiles tendres, feuilletées souvent brun foncé, riches en magnésie ;
- calcédoine en nodules bleuâtres dans les lits de sépiolites ;
- ménilite, variété d'opale en nodules ;
- silex nectiques, autre forme de silice hydratée, rognons spongieux de couleur blanc jaunâtre, tendres, friables, qui flottent quelques instants sur l'eau.

Sables de Beauchamp : e6SB-A

Les Sables de Beauchamp (8 à 18 m d'épaisseur) sont des sables quartzeux fins à très fins, blancs à gris, vert-bleu ou jaunes, bien classés, à stratification plane. Ces sables deviennent humifères vers le sommet ; ils prennent une teinte mauve à noire et exposent de grandes dalles discontinues de grès présentant souvent des traces de racines (paléosols post-auversiens). Ils contiennent des niveaux argileux ou gréseux et des bancs de gypse. L'épaisseur et la disposition des bancs de grès et des niveaux argileux peuvent être très irrégulières. Les niveaux argileux peuvent représenter jusqu'à 30 % de la formation. Le gypse des Sables de Beauchamp se présente sous le faciès albâtre ou saccharoïde. Les niveaux gypseux sont situés aussi bien dans la partie supérieure que dans la partie inférieure. La faune, peu importante, est concentrée dans les passées lenticulaires. Les espèces rencontrées

témoignent d'une tendance à la dessalure. Dans ces faciès sableux, les smectites sont largement dominantes sur l'illite et sur la kaolinite accessoire. Dans les faciès évaporitiques, l'attapulgite est fréquente, associée aux smectites et à l'illite accessoire.

Marnes et Caillasses (Éocène moyen, Lutétien supérieur) : e5MC

Les Marnes et Caillasses constituent une série laguno-lacustre, puissante de 15 à 30 m environ, qui affleure dans le nord et le nord-ouest du département. D'une façon générale, cette formation comporte une alternance de calcaires très durs, grisâtres, d'aspect parfois bréchique, tantôt siliceux, tantôt dolomitiques, alternant avec des marnes riches en attapulgite. Au sommet, prédominent les marnes blanches, plus ou moins argileuses et magnésiennes, alors qu'à la base, les bancs de calcaires siliceux (caillasses) deviennent plus nombreux.

Argile plastique, Sables d'Auteuil, Fausses glaises, Sables du Soissonais (Éocène inférieur, Yprésien, Sparnacien) : e4AP

Sur les cartes géologiques Paris et Corbeil-Essonnes, ces quatre formations sont regroupées sous la notation géologique e3 indifférencié (Éocène inférieur, étage Yprésien). Elles affleurent très localement, en fond de vallée, à l'ouest du département, sur les communes d'Arcueil et de Gentilly. Le Sparnacien comprend quatre termes qui sont de haut en bas : les *Sables du Soissonais*, les *Fausses glaises*, les *Sables d'Auteuil*, l'*Argile plastique*. Les *Sables du Soissonais* sont constitués par des sables quartzeux blancs et gris, parfois grossiers, avec passées argileuses et couches gréseuses. Les *Fausses glaises* sont de nature argileuse et renferment des passées ligniteuses. Les *Sables d'Auteuil* sont des sables quartzeux, grossiers, d'origine fluviale.

L'**Argile plastique**, qui constitue le terme basal du Sparnacien, représente une masse compacte d'argiles grises, noires, jaunes, lie de vin, et bariolées à la base. Son épaisseur peut dépasser 12 m. Elle est constituée à 75 % par des interstratifiés à kaolinite et smectite.