

**Suivi des mouvements de terrain sur la Ville de Québec
par interférométrie radar**

Rapport de recherche No R-1753 Novembre 2017



© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2017

Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-906-7 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2018



Suivi des mouvements de terrain sur la Ville de Québec par interférométrie radar

Richard Martel, Pascal Castellazzi et Luc Trépanier

Rapport R-1753

Rapport présenté par l'INRS-ETE

À

Ville de Québec

6 novembre, 2017

Acronymes

INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement
ASC	Agence Spatiale Canadienne
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i> – Nom couramment donné aux capteurs orbitaux radar
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i> – Ligne de visée du capteur SAR
SOAR	Recherche sur les applications scientifiques et opérationnelle (<i>Science and Operational Applications Research, SOAR</i>) – Programme de subvention de l'Agence Spatiale Canadienne

Table des matières

Acronymes.....	i
Table des matières	iii
Liste des Figures.....	iv
Liste des Tableaux.....	v
Sommaire exécutif.....	vii
Remerciements	ix
Mandat de l'INRS	1
Introduction à l'Interférométrie Radar (InSAR).....	2
Données utilisées et stratégie de traitement.....	5
Résultats : Cartes globales de mouvements de terrain	7
Résultats : Analyse des zones présentant des mouvements de terrain.....	19
1. Zone 1.....	19
2. Zone 2.....	21
3. Zone 3.....	21
4. Zone 4.....	23
5. Zone 5.....	23
6. Zone 6.....	25
7. Zone 7.....	26
Résultats : Comparaison avec d'autres villes	28
Recommandations	30
Conclusions	31
Format et utilisation des données jointes au rapport	32
Diffusion des résultats de recherche.....	33
1. Rapports produits.....	33
2. Conférences	33
3. Articles scientifiques en préparation	33
Formation de personnel qualifié.....	33
Références	34

Liste des Figures

Figure 1 : Le mouvement du terrain provoque un décalage du signal de la phase.	2
Figure 2: Les modes d'acquisition du capteur orbital RADARSAT-2 (Source : MDA, 2013).	5
Figure 3: Empreinte au sol des cinq cartes avec le traitement InSAR effectué tel que décrit (de A à E) au Tableau 1.	6
Figure 4: Résultats du traitement PSI pour la carte A (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visée du satellite (~35°). 9	
Figure 5: Résultats du traitement PSI pour la carte B (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~38°). 11	
Figure 6: Résultats du traitement PSI pour la carte C (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~38°). 13	
Figure 7: Résultats du traitement PSI pour la carte D (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~43°). 15	
Figure 8: Résultats du traitement PSI pour la carte E (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~44°). 17	
Figure 9: Zone 1, localisée près de la rue de l'Anse au Foulon (coordonnées 46.788N, 71.228W) 20	
Figure 10: Photo de l'enrochement de la zone 1.	20
Figure 11: Zone 2, localisée près de la rue de l'Hêtrière (coordonnées 46.757N, 71.375W).	21
Figure 12: Zone2, photo des bâtiments.	22
Figure 13: Zone 3, localisée au niveau des grottes de Courville, quartier de Beauport (coordonnées 46.888N, 71.154W et 46.887N, 71.152W).	22
Figure 14: Zone 4, localisée au niveau des enrochements de l'autoroute Dufferin-Montmorency, en amont du pont de l'île d'Orléans (coordonnées 46.881N, 71.148W).	23
Figure 15: Photo de la zone 4. Enrochements de l'autoroute Dufferin-Montmorency, en amont du pont de l'île d'Orléans.	24
Figure 16: Zone 5, de mouvement au niveau de la zone portuaire de Québec (coordonnées 46.830N, 71.204W).	24
Figure 17: Zone 6, localisée dans la carrière près de la rue Saint-Henri (coordonnées 46.861N, 71.201W).	25
Figure 18: Photo de la carrière de la zone 6.	26
Figure 19: Zone 7, localisée au niveau de la rue de la Terrasse-Cadieux (coordonnées 46.879N, 71.159W).	27
Figure 20: Photo de la zone 7, montrant le trottoir en bordure de la pente.	27
Figure 21: Comparaison des mouvements de terrain dans trois villes sujettes à des déplacements d'ampleurs et d'étendues différentes : (a) la Ville de Québec est globalement stable; (b) la Ville de Vancouver présente des déplacements verticaux de terrain de l'ordre de 5mm/an dans certains secteurs (cercle rouge); (c) la Ville de Toluca, au Mexique, présente des déplacements verticaux importants et spatialement progressifs allant jusqu'à 80mm/an.	29

Liste des Tableaux

Tableau 1: <i>Description des cinq séries temporelles d'images SAR utilisées pour cartographier les mouvements du terrain dans la Ville de Québec.</i>	6
--	---

Sommaire exécutif

Une étude utilisant une technologie satellitaire a été effectuée sur le territoire de la ville de Québec afin d'évaluer la stabilité des infrastructures urbaines (bâtiments, pentes, routes) à l'aide d'images prises entre 2008 et 2016. Plus de 100 images radar du satellite canadien RADARSAT-2, réparties sur quatre séries temporelles, ont été utilisées. Les images ont été analysées par la méthode *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) utilisant le signal renvoyé par les réflecteurs urbains tels que les toits de bâtiments, les structures en béton ou les surfaces rocheuses afin d'identifier les zones présentant un mouvement lent et continu.

La méthode est très précise et permet de détecter des déplacements aussi lents que 2 à 3 mm/an. Elle ne peut cependant pas détecter des événements subits ou importants (supérieurs à 1.4 cm) entre deux images comme la réalisation d'une excavation. La méthode ne peut également pas être utilisée sur les images prises en hiver en raison du couvert de neige. Le résultat de ce travail se présente sous forme de cartes de la ville, couvertes par des points de couleur indiquant la vitesse moyenne des déplacements.

Les résultats illustrent que la ville de Québec est globalement stable. Les déplacements détectés et visités sont localisés sur des étendues restreintes (quelques dizaines de mètres carrés) et sont les suivants : (1) deux zones de remblai en enrochement en bordure du fleuve Saint-Laurent subissent une érosion côtière naturelle créée probablement par l'effet des courants des marées, de la glace fluviale et du gel/dégel; (2) deux zones de bâtiments dont une en lien avec une zone karstique déjà identifiée et étudiée préalablement; (3) une pente déjà connue de la ville et; (4) la paroi verticale d'une carrière de calcaire en exploitation qui subit vraisemblablement de l'érosion naturelle. Une visite de terrain a été effectuée pour chacun de ces endroits, ce qui a permis d'identifier les réflecteurs en cause et la raison probable des déplacements mesurés. Un secteur de plus grande envergure montrant des vitesses de déplacement près de la limite de détection est identifié. Ce secteur est difficilement interprétable sans d'autres données complémentaires. D'autres secteurs non visités sont localisés le long du fleuve et subissent probablement les mêmes effets d'érosion que les zones de remblai en enrochement visités.

Pour démontrer la validité de la méthodologie employée et pour mettre en perspective les résultats obtenus pour la ville de Québec, la carte d'interférométrie radar produite pour la ville a été comparée à celles de deux autres villes : Vancouver (Canada) et Toluca (Mexique). Ainsi, des déplacements de l'ordre de 6 mm/an ont été détectés sur deux zones situées sur le delta de la

rivière Fraser à Vancouver et d'autres allant jusqu'à 80 mm/an dans la région de Toluca, au Mexique. Ces résultats indiquent que la méthode pour suivre les mouvements de sol en milieu urbain fonctionne.

Remerciements

Nous remercions la Ville de Québec ainsi que l'Agence Spatiale Canadienne (ASC) pour avoir soutenu ce projet. Merci à l'ASC qui dans le cadre du programme de *Recherche sur les applications scientifiques et opérationnelles* (SOAR) a fourni les images RADARSAT-2 pour ce projet. Nous tenons à remercier le Dr Angus I. Calderhead pour avoir initié le projet. Nous remercions également Dr. Sergey Samsonov (Ressources Naturelles Canada, Ottawa) et Dr. Shimon Wdowinski (Florida International University, Miami, USA) pour les échanges d'expertise sur l'interférométrie radar et ses applications. Finalement, nous remercions M. Charles Brouard pour son aide technique à la création d'un script aidant à l'interprétation des résultats issus des traitements InSAR.

Mandat de l'INRS

Le projet avait pour but la détection et la cartographie des mouvements de terrain par l'utilisation de relevés satellitaires dans la région de la Ville de Québec (QC, Canada). Le financement du projet a été obtenu grâce au support de la Ville de Québec et l'Agence Spatiale Canadienne (ASC), dans le cadre du programme de *Recherche sur les applications scientifiques et opérationnelles* (SOAR).

Le mandat original consistait à :

- Obtention des images en archive sur le territoire de la ville de Québec auprès de l'agence spatiale canadienne
- Commandes de nouvelles images du territoire de la ville de Québec pour la période de mai à novembre 2016
- Traitement des images (2008-2016) par interférométrie PS-InSAR
- Production d'un rapport d'étape pour l'agence spatiale canadienne et la ville de Québec
- Poursuite du traitement des images, conception des cartes et figures ainsi que la rédaction d'articles scientifiques
- Diffusion des résultats dans des conférences nationales et internationales
- Production du rapport final pour l'agence spatiale canadienne et la ville de Québec
- Des rencontres avec les intervenants de la ville sont prévues au début, à mi-parcours et à la fin du projet. Des rencontres supplémentaires pouvaient être convoquées au besoin par la ville de Québec.

Ce projet devait ainsi permettre de comprendre comment l'interférométrie radar pouvait aider la prise de décision (urbanisme, aménagement du territoire, risques structuraux des bâtiments) pour la Ville de Québec. Plus globalement, le projet visait à tester l'utilisation opérationnelle de l'InSAR pour les villes Canadiennes et à la formation de personnel qualifié dans le domaine pouvant fournir des cartes de déplacement à partir d'images SAR.

Introduction à l'Interférométrie Radar (InSAR)

Les satellites SAR (*Synthetic Aperture Radar*), orbitent la terre et émettent une onde électromagnétique à haute résolution depuis une distance d'environ 700 km. Cette onde est renvoyée par la surface de la Terre et le signal de retour est récupéré par une antenne positionnée sur le satellite. Ainsi, une image est acquise, où chaque pixel contient de l'information sur l'amplitude (la puissance) et la phase de l'onde électromagnétique renvoyée par l'aire au sol couverte par le pixel. Les éléments au sol renvoient des signaux d'amplitude et de phase différents dépendamment de leur taille, rugosité, composition, teneur en humidité, et distance au satellite. Des informations sur l'état du sol et son évolution peuvent ainsi être récupérées. Parmi les données récupérées, celles concernant les variations du niveau du terrain dans le temps sont particulièrement utiles en génie civil, en sismologie, en volcanologie, et en hydrogéologie.

Il existe plusieurs techniques InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) fonctionnant toutes sur des bases similaires. Elles détectent les mouvements en comparant la phase du retour d'un signal électromagnétique envoyé sur Terre (Massonet et Feigl, 1998). Un déplacement du niveau du terrain se traduit par une variation de la valeur de la phase le long d'une série temporelle d'images (Figure 1).

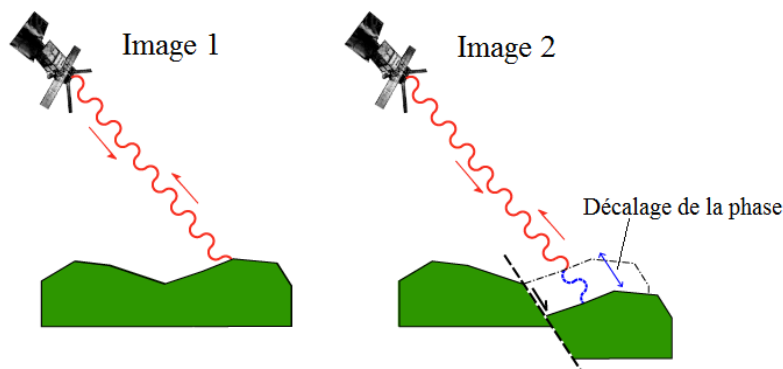


Figure 1 : Le mouvement du terrain provoque un décalage du signal de la phase.

L'analyse des données est faite à partir de paires d'images radar acquises depuis des positions orbitales planifiées pour être identiques. Les deux images sont co-registrées, c'est-à-dire que la première est ré-échantillonnée pour être parfaitement compatible pixel à pixel avec la seconde. Toutes les informations contenues dans la seconde image sont alors comparables à celle de la

deuxième, notamment les valeurs d'amplitude et de phase du signal de retour. Les techniques d'analyses (InSAR, SBAS-InSAR, D-InSAR, PSI...) diffèrent dans la manière dont sont choisies les paires d'images dans un ensemble d'images ainsi que dans les principes utilisés pour discriminer l'information de phase importante de celles qui sont inutiles (bruit). Dans tous les cas, le mouvement est mesuré dans le sens de la visée du satellite, c'est-à-dire selon un angle généralement compris entre 20 et 45 degrés par rapport à la verticale.

L'interférométrie d'images radar (InSAR) permet de produire des données de déformation du terrain à partir d'images radar. La technique fut développée dans les années 1990 (Massonet et Feigl, 1998), après la mise en orbite de satellites radar de premières générations tels que ERS-1 et RADARSAT-1. Au début des années 2000, elle connut un véritable tournant grâce à l'arrivée de techniques permettant l'intégration de plus de deux images et les algorithmes de réduction des perturbations atmosphériques (Ferretti *et al.*, 2001 ; Berardino *et al.* 2002). Aujourd'hui, à part certaines applications spécifiques, ces algorithmes dits 'avancés' ont largement supplanté les techniques de première génération. Une vue d'ensemble des principes et particularité des nouvelles techniques InSAR est fournie par Crosetto *et al.* 2016.

Le SBAS-InSAR (Berardino *et al.* 2002) récupère les principes des premières générations de traitement InSAR. Une analyse préliminaire d'une série temporelle d'images radar permet de déceler les paires d'images pouvant former les meilleures paires interférométriques. Il s'agit généralement de sélectionner les séries d'images ayant des géométries d'acquisition idéales et des erreurs de positionnement orbital faibles. La particularité du SBAS, tout comme les techniques plus anciennes (comme le D-InSAR), est d'être basée sur l'utilisation d'images dont la résolution a été diminuée, réduisant ainsi la variance locale et lissant ainsi le bruit. Le bruit est efficacement réduit au prix d'une résolution diminuée par un facteur allant généralement de 3 à 10. La résolution finale en plan est alors souvent entre 8 et 30 m, selon la résolution des images initiales et le facteur de diminution de la résolution choisie. À partir des images co-registrées de basse résolution, une carte de différence de phases entre les deux images est produite, appelée interférogramme. Après une éventuelle filtration de cette carte (souvent par l'application d'un filtre passe-bas) et l'application de corrections liées à des erreurs de parallaxe, la phase est 'déroulée'. Cette étape permet de transformer un interférogramme dont les valeurs de différence de phase vont de $-\pi$ à $+\pi$, en une carte de déplacement en millimètres du mouvement entre les deux acquisitions formant les deux images d'un interférogramme.

Le PSI (Ferretti *et al.* 2001) permet de suivre les variations des niveaux de sol renvoyant un signal de phase cohérent et stable. Il a l'avantage d'être utilisable à la résolution des 'cibles',

c'est-à-dire des éléments au sol renvoyant le signal, tels les éléments durs (béton, métal) et anguleux (coins de bâtiments par exemple) présents au sol. Dans un premier temps, il est nécessaire d'identifier les points pour lesquels la phase est systématiquement renvoyée de manière puissante et cohérente. Deux critères sont identifiés pour la détection de ces cibles : la stabilité de l'amplitude du signal de retour et la cohérence interférométrique du signal de phase. Une fois les points au sol détectés (appelés '*Persistent Scatterers*'), les valeurs de phase sont récupérées pour chaque acquisition et pour chaque point, créant une série temporelle de variations de la phase en chaque point. Une technique d'inversion est ensuite appliquée, permettant de transformer les variations de la phase dans le temps ($-\pi$ à $+\pi$) en déplacements du niveau du terrain (en mm). À la différence du SBAS-InSAR, aucun lissage n'est appliqué. La résolution finale et la précision verticale est supérieure au SBAS-InSAR si les cibles au sol sont denses, comme c'est le cas en milieu urbain.

Données utilisées et stratégie de traitement

Les données utilisées pour cette étude sont toutes issues du capteur orbital canadien RADARSAT-2, qui ont été fournies par l'Agence Spatiale Canadienne (ASC) dans le cadre du programme de *Recherche sur les applications scientifiques et opérationnelles* (SOAR). Les images utilisées pour ce projet sont du type Ultrafine et Spotlight, et ont une résolution nominale en plan de 1.6 m x 2.8 m et de 1.6 m x 0.8 m, respectivement (Figure 2). Au total, approximativement 100 images de résolution Ultrafine et Spotlight ont été utilisées (Tableau 1).

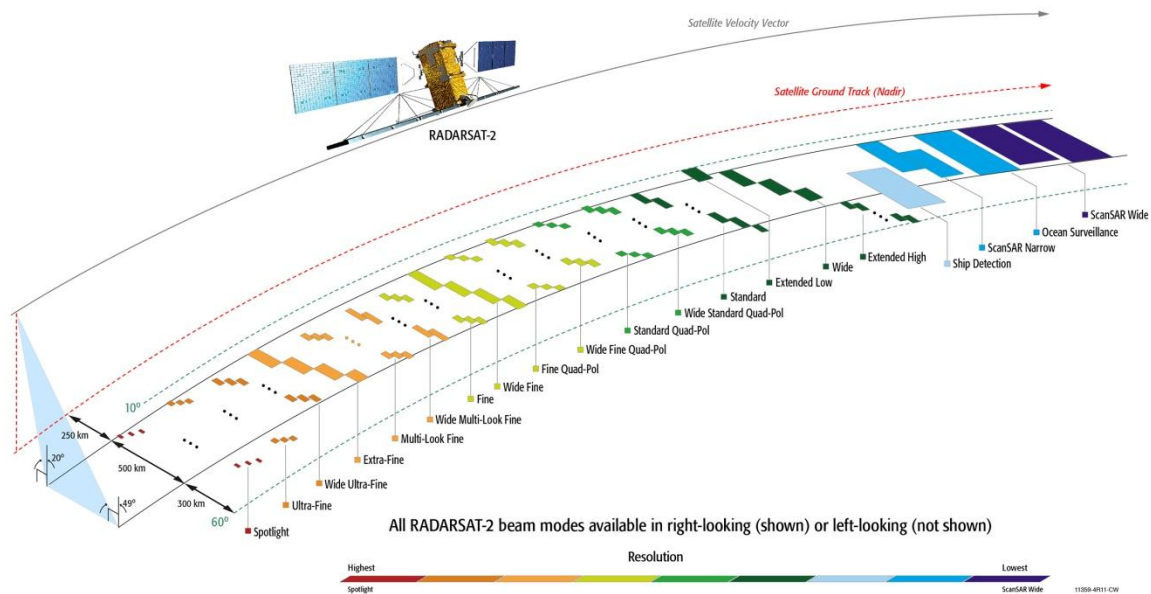


Figure 2: Les modes d'acquisition du capteur orbital RADARSAT-2 (Source : MDA, 2013).

Les séries temporelles d'images radars ont été sélectionnées avec la plateforme APT (Acquisition Planning Tool) parmi les archives disponibles. La sélection s'est effectuée en prenant en compte le nombre d'images disponibles par série temporelle ainsi que la consistance temporelle de la série afin d'éviter le manque d'image sur une longue période.

Le logiciel SARSCAPE (développé par Sarmap, <http://sarmap.ch/>) permettant un traitement efficace et intuitif des images par la méthode PSI a été utilisé afin d'analyser chacune des séries temporelles d'images satellitaires. L'utilisation de SARSCAPE avait pour but d'identifier les zones où il y aurait eu un mouvement lent et continu. La superficie couverte par chacune des séries temporelles d'images SAR est illustrée par la Figure 3.

Tableau 1: Description des cinq séries temporelles d'images SAR utilisées pour cartographier les mouvements du terrain dans la Ville de Québec.

Type de données	Nombre d'images utilisées	Période considérée		Carte (Fig. 3)	Direction du satellite	Angle de visée (degrés)
		Début	Fin			
Radarsat-2 U6	25	01/05/2011	15/06/2016	A	Ascendant	~35
Radarsat-2 U11	25	06/09/2008	29/11/2015	B	Ascendant	~38
Radarsat-2 U11	26	06/09/2008	29/11/2015	C	Ascendant	~38
Radarsat-2 SLA17	24	16/05/2010	22/11/2015	D	Ascendant	~43
Radarsat-2 SLA18	24	05/05/2009	30/11/2015	E	Descendant	~44

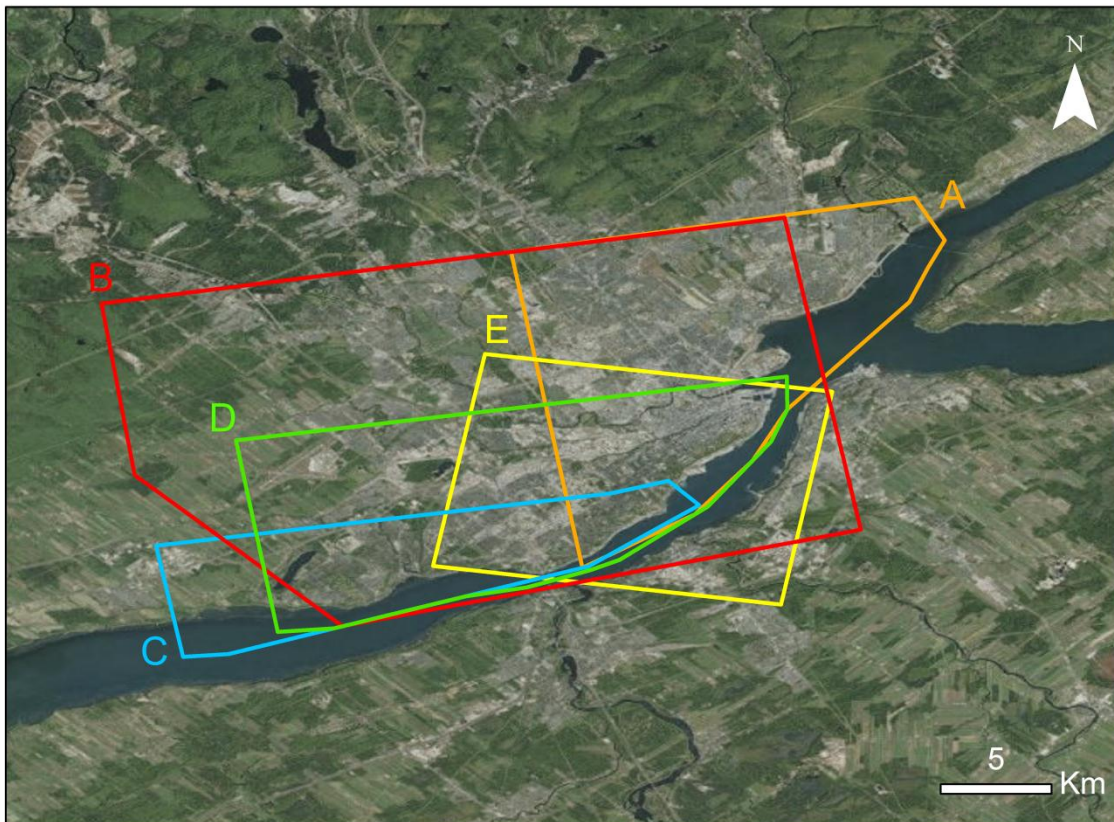


Figure 3: Empreinte au sol des cinq cartes avec le traitement InSAR effectué tel que décrit (de A à E) au Tableau 1.

Résultats : Cartes globales de mouvements de terrain

Cette section présente les cartes globales de mouvements de terrain issus des traitements PSI effectués. Les résultats sont présentés sous la forme de cinq cartes correspondantes aux séries temporelles d'images SAR présentées par les lettres A,B,C,D,E au Tableau 1. Les cartes A et B présentent la partie centrale de la Ville de Québec, la carte C recoupe le rivage du fleuve Saint-Laurent, alors que les cartes D et E présentent la partie Est de la Ville de Québec. Les cinq cartes couvrent l'entièreté de la superficie de la Ville de Québec, ainsi que certaines zones environnantes. Ces cartes proviennent de données différentes (voir Tableau 1) ayant des géométries d'acquisition SAR (LOS) variables, ne permettant pas de les combiner en une seule sans compromettre leur interprétation.

Les flèches rouges sur les cartes indiquent des secteurs (de i) à ix)) où un déplacement a été identifié. Ces mêmes secteurs sont identifiés par des flèches bleues sur les autres cartes n'affichant pas déplacement. Les cercles correspondent aux zones qui ont fait l'objet de visites de terrain afin de vérifier si des indices apparents permettaient de confirmer la détection des mouvements. Les cercles sont rouges sur les cartes avec déplacement et bleus sur les cartes qui ne présentent pas de déplacements. Ces zones sont décrites plus en détail à la section suivante. Les flèches noires sont des repères cartographiques qui permettent de mieux situer les différentes zones dans la région d'étude.

Les secteurs non visités (de i) à ix)) correspondent à des endroits localisés principalement le long du fleuve. Ces secteurs subissent probablement les mêmes effets d'érosion que les zones de remblai en enrochement visitées. Un autre secteur dans la ville de Lévis a été identifié (secteur ix)). Le secteur vi) à l'Ancienne Lorette montre des points jaunes isolés (près du seuil de détection de 2 mm/an) entrecoupés de points verts stables. Ce secteur est difficilement interprétable sans d'autres données complémentaires (cartes de dépôts meubles, stabilité de pente,...). Des essais de corrélation spatiale avec la présence d'une couche d'argile n'ont pas permis d'expliquer la densité des points jaunes (entre 2 et 3 mm/an). Par conséquent, ces détections peuvent être considérées comme un bruit de fond.

Plusieurs endroits présentant un déplacement sont observables sur la carte A (Figure 4). Cinq endroits sont situés en bordure du fleuve Saint-Laurent. Deux ont été visités (zone 1 et zone 4) et les observations ont été extrapolées aux trois autres secteurs (iii) à v)). La carte A présente également quatre autres zones (zones 3, 5, 6 et 7) avec déplacements qui ont été visitées. Les

flèches bleues i) et ii) ne montrent pas de déplacement en raison de l'angle de visé mais correspondent respectivement à des déplacements sur les cartes C et E.

Certains déplacements en zone côtière apparaissent également sur la carte B (Figure 5 –zone 1 et secteurs iii) et iv)), auxquelles s'ajoutent deux autres observations. En effet, des déplacements ont été détectés à l'endroit de deux bâtiments (zone 2), et un bruit de fond est apparent au secteur vi). Deux zones et trois secteurs ayant présenté des déplacements sur d'autres cartes sont identifiés en bleus.

La carte C (Figure 6), effectuée avec les mêmes données que la carte B (voir Tableau 1) montre plus en détail le littoral. C'est la seule carte où le secteur i) présente un déplacement. Les déplacements de la zone 2 sont également apparents.

La carte D (Figure 7) présente des déplacements à trois endroits le long du rivage (zone 1 et secteur iii) et iv)). La zone 2 présente sur les cartes B et C est également observée. Les secteurs i) et ii) ayant présentés des déplacements sur les cartes C et E sont identifiés en bleus.

La carte E (Figure 8) présente des déplacements en bordure du fleuve à 4 endroits sur la rive nord (zone 1 et secteur ii), iii) et iv)) et à deux endroits sur la rive sud (secteur vii) et viii)). Un autre endroit à Levis (secteur ix)) indique des déplacements. Le secteur i) ayant montré des déplacements à la carte C est indiqué en bleu.

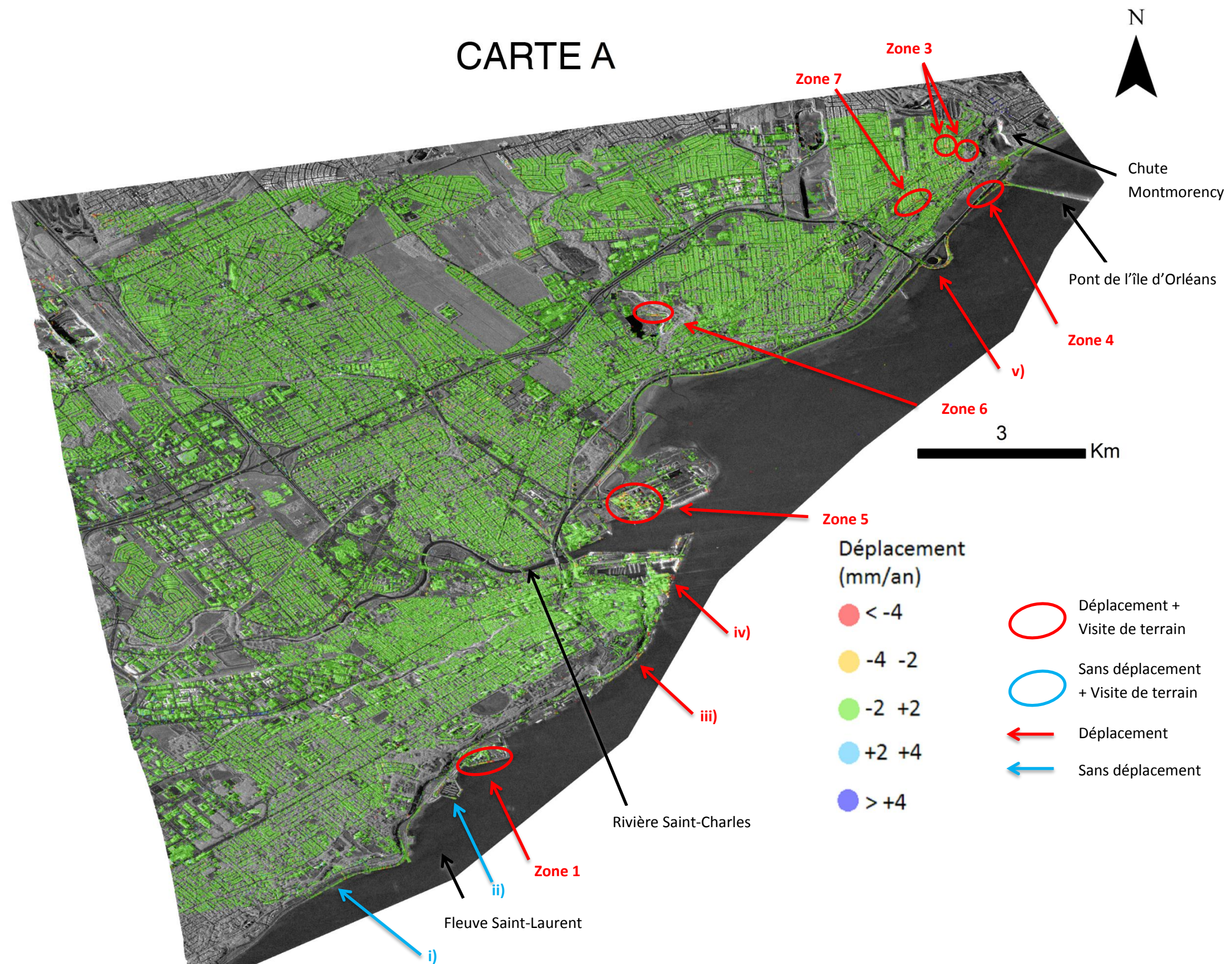


Figure 4: Résultats du traitement PSI pour la carte A (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visée du satellite (~35°).

CARTE B

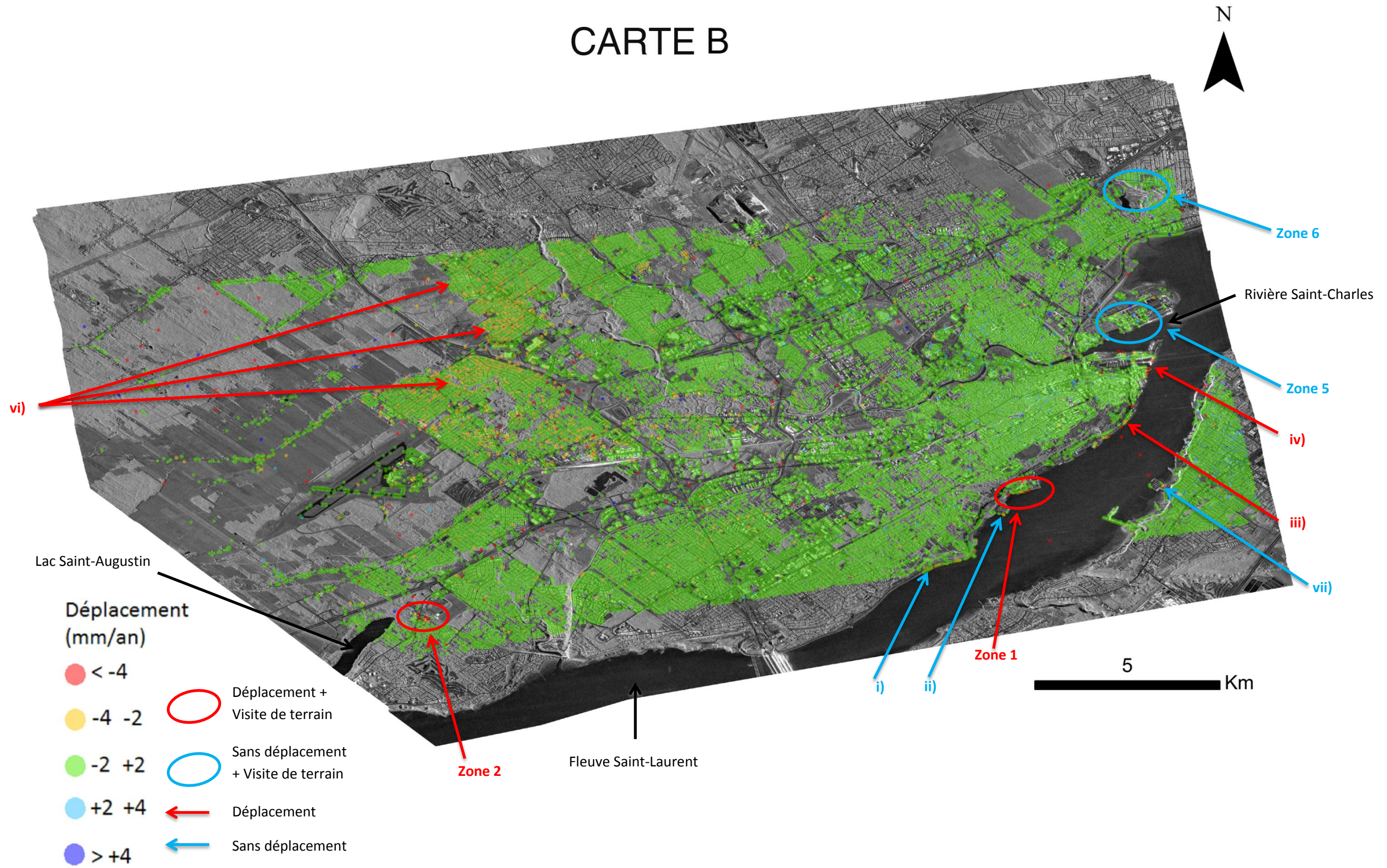


Figure 5: Résultats du traitement PSI pour la carte B (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~38°).

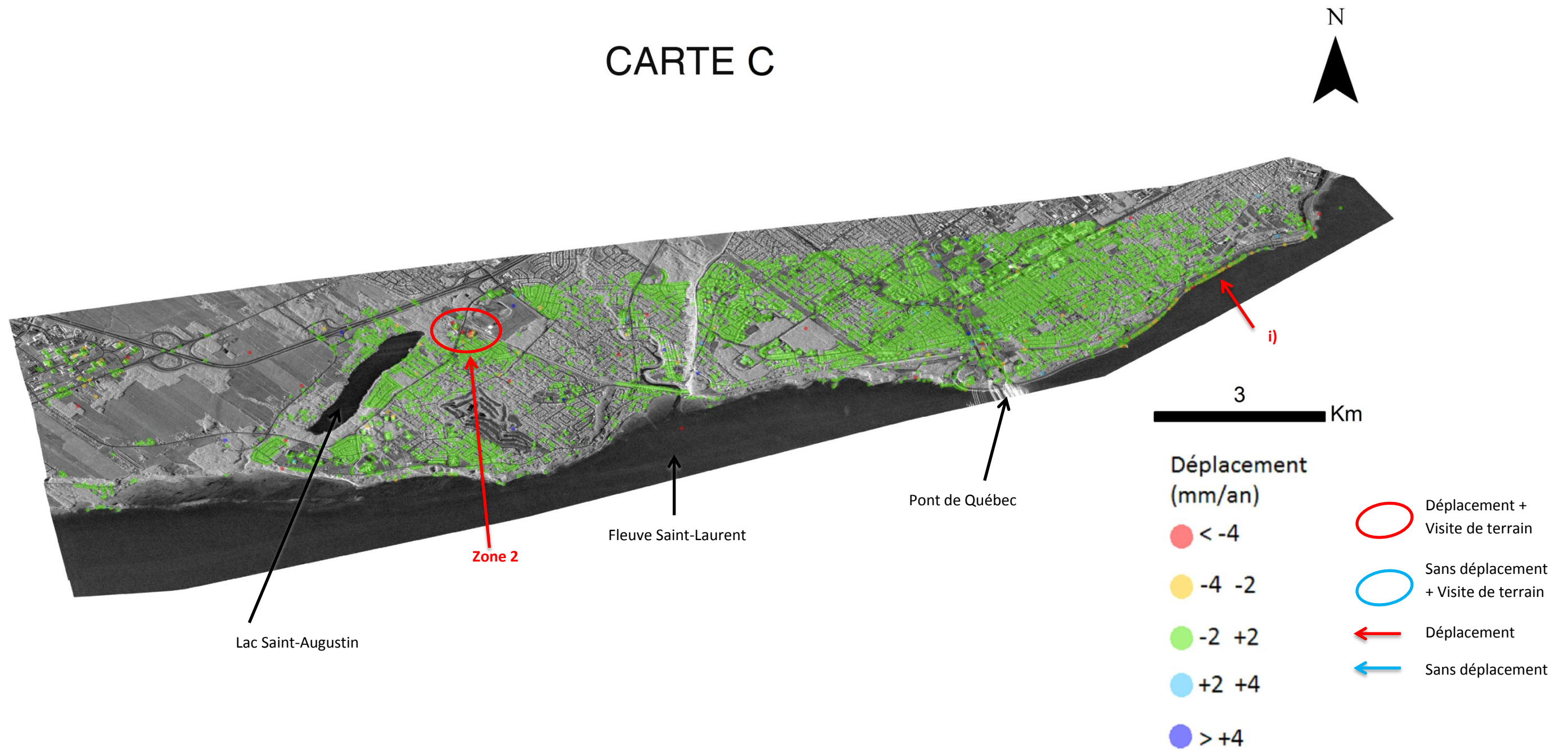


Figure 6: Résultats du traitement PSI pour la carte C (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~38°).

CARTE D

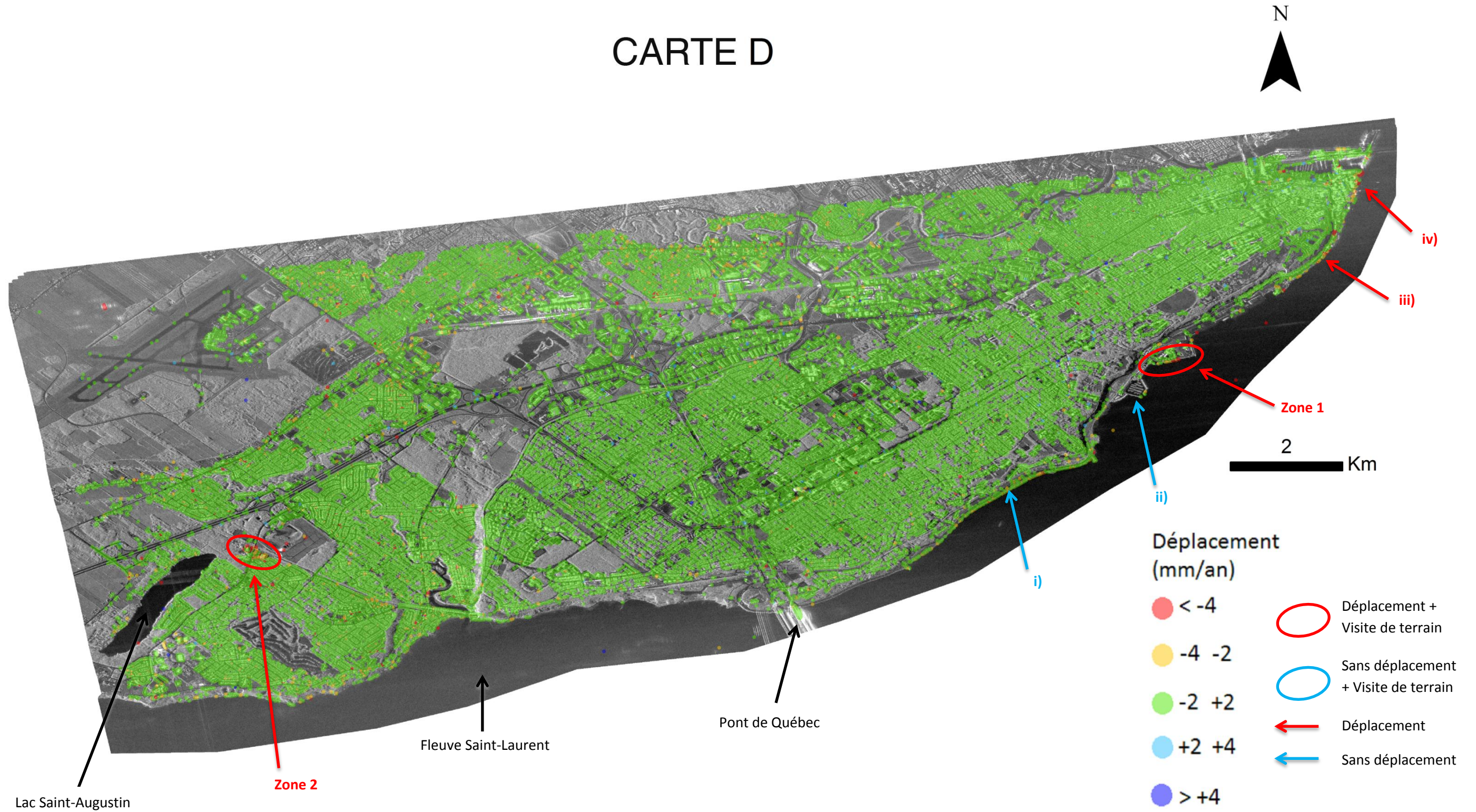


Figure 7: Résultats du traitement PSI pour la carte D (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~43°).

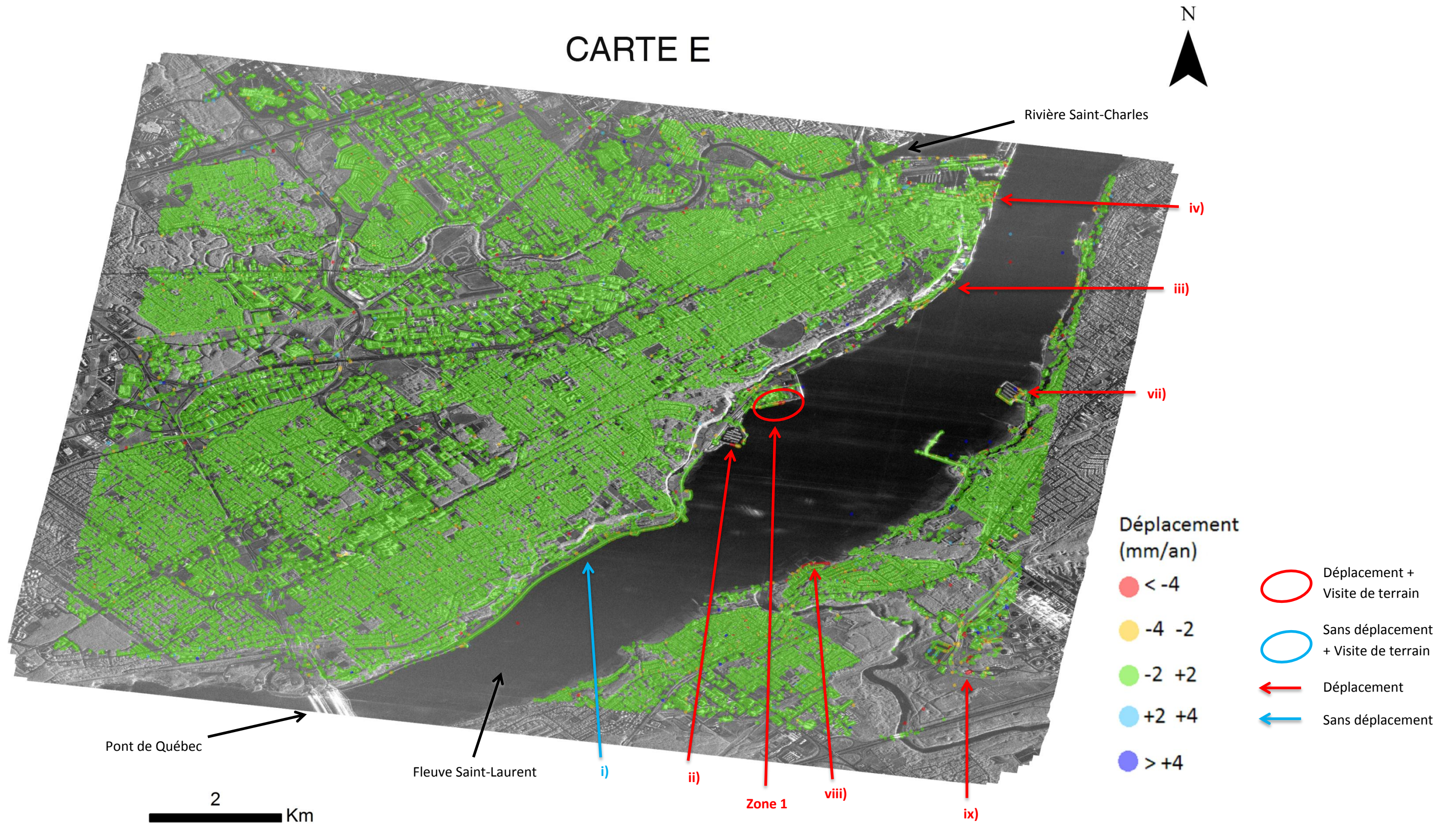


Figure 8: Résultats du traitement PSI pour la carte E (Tableau 1 – Figure 3) : vitesse moyenne annuelle de déplacement sur la période de mesure le long de l'angle de visé du satellite (~44°).

Résultats : Analyse des zones présentant des mouvements de terrain

Cette section présente sept zones issues de l'analyse des résultats présentés aux cartes A à E (Figure 4 à Figure 8). Les observations ont été faites suite à l'analyse par PSI des mouvements de cibles au sol renvoyant un signal fort et cohérent au capteur orbital. Sur chacune de ces cibles (points sur les cartes), le déplacement est analysé et une vitesse moyenne de déplacement annuel est attribuée. Des observations de terrain ont été collectées pour aider à l'interprétation.

Aucun déplacement d'une étendue spatiale importante n'a été observé sur le territoire de la Ville de Québec. Ainsi, les observations présentées dans cette section sont proches du seuil de détection et présentent de faibles amplitudes et des étendues spatiales limitées. Par conséquent, nous recommandons que l'analyse détaillée des données fournies dans le présent rapport soit faite en les recoupant avec d'autres sources d'information (carte de stabilité des sols, épaisseurs des sédiments fins et compressibles, périodes de travaux, stabilités des pentes, etc.).

Les exemples présentés dans cette section montrent des mouvements progressifs liés à l'érosion naturelle des berges du fleuve Saint-Laurent ou des déplacements se produisant sur des étendues spatiales limitées.

1. Zone 1

Cette zone longitudinale d'environ 200 m est située devant les silos au sud de la rue de l'Anse au Foulon. Les mouvements détectés sont alignés le long de l'enrochement bordant la rive du fleuve Saint-Laurent (Figure 9). Étant donné la localisation, il ne s'agit probablement pas d'un affaissement du terrain, mais plutôt de l'érosion de l'enrochement (par-dessus), ou de l'érosion des sédiments sous-jacents à l'enrochement (par-dessous). Ce phénomène semble naturel et engendré par le courant d'eau du fleuve, les effets de marées, et par la glace hivernale du fleuve (Figure 10).



Figure 9: Zone 1, localisée près de la rue de l'Anse au Foulon (coordonnées 46.788N, 71.228W)

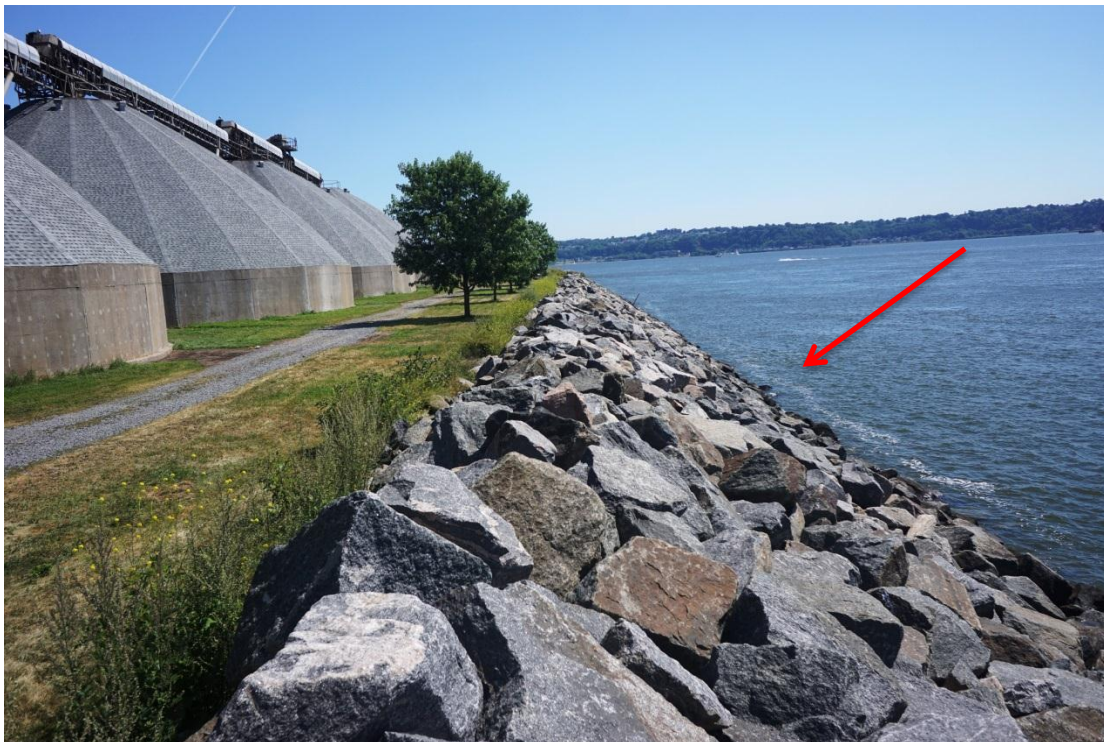


Figure 10: Photo de l'engrochement de la zone 1.

2. Zone 2

Cette zone est située près du croisement entre la rue de l'Hêtrière et la voie de chemin de fer dans le secteur de Cap-Rouge (Figure 11). Elle concerne principalement deux bâtiments commerciaux de part et d'autre de la rue de l'Hêtrière (Figure 12). Aucun signe de mouvement passé n'a été observé lors de la visite de terrain. S'il y a un mouvement, il est relativement homogène dans l'espace et n'a probablement pas ou peu d'impact sur les deux bâtiments.

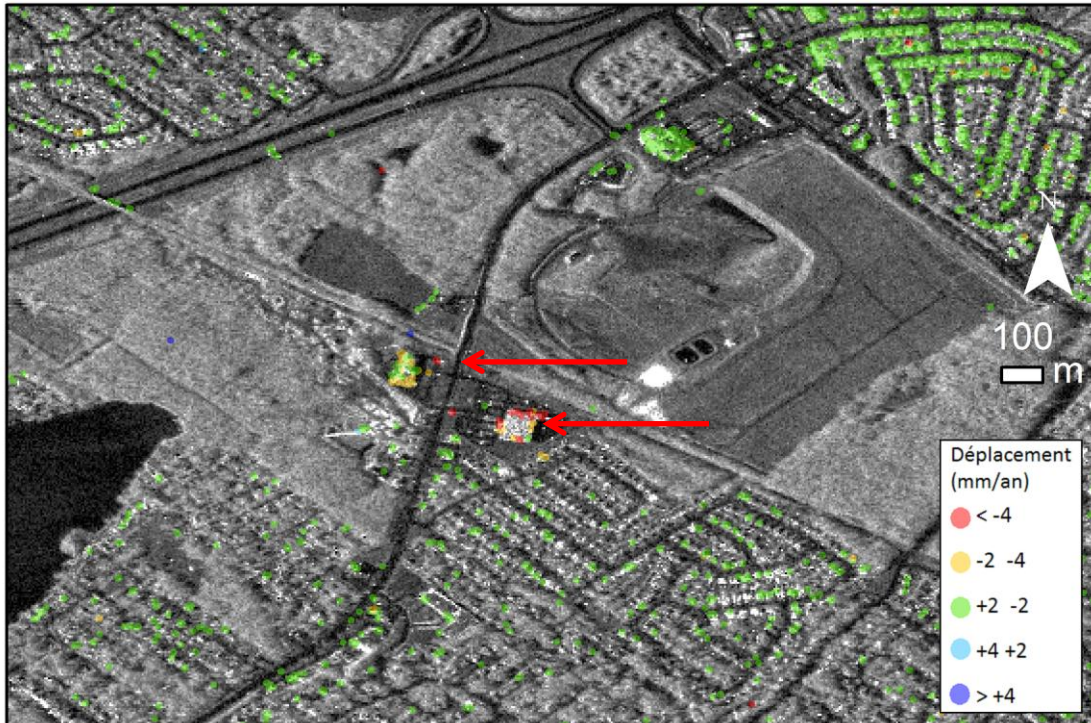


Figure 11: Zone 2, localisée près de la rue de l'Hêtrière (coordonnées 46.757N, 71.375W).

3. Zone 3

Cette zone de mouvement correspond aux tassements observés dans la zone des grottes de Courville à l'Ouest de la rivière Montmorency (Figure 13). Cette zone a été identifiée par les travaux précédents (Martel *et al.* 2016). Il est important de noter que les vitesses observées sur la Figure 13 sont des valeurs moyennes de la période 2011-2016. Ainsi, les travaux de stabilisation effectués sur les bâtiments ne sont pas apparents sur la Figure 13 puisque la moyenne est calculée avec des valeurs antérieures à la stabilisation. Les points jaunes dans le secteur à l'est de la carte correspondent à une pente ayant un faible mouvement en bordure des résurgences des grottes.



Figure 12: Zone 2, photo des bâtiments.

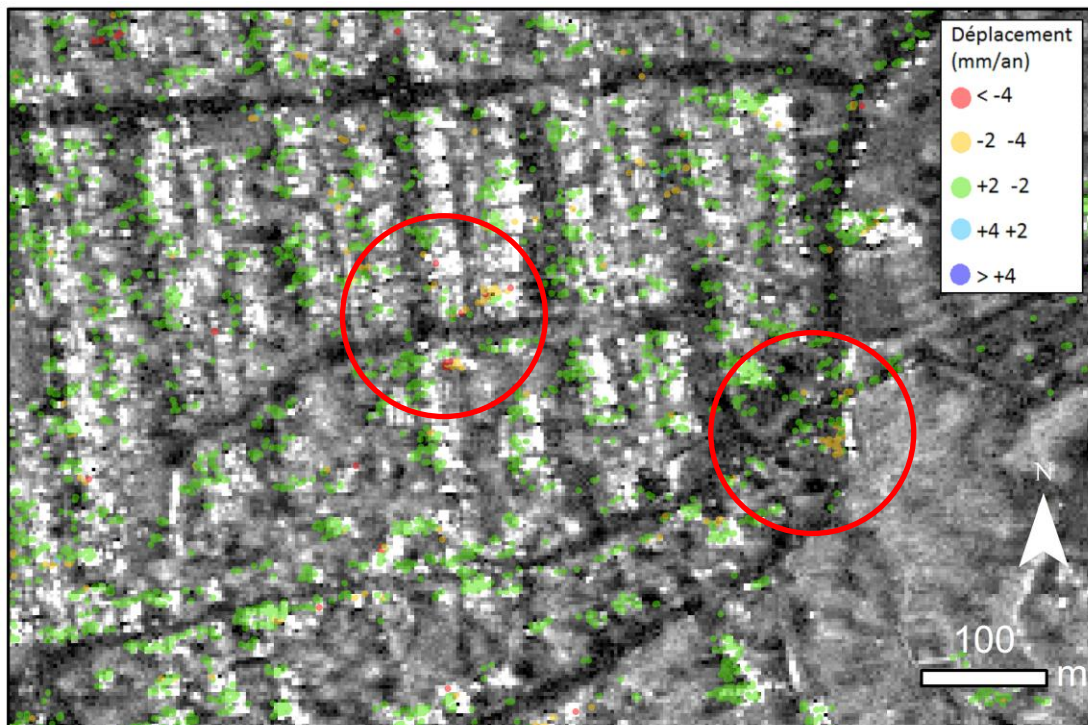


Figure 13: Zone 3, localisée au niveau des grottes de Courville, quartier de Beauport (coordonnées 46.888N, 71.154W et 46.887N, 71.152W).

4. Zone 4

Cette zone correspond à l'enrochement protégeant la rive Est de l'autoroute Dufferin-Montmorency, donnant sur le fleuve Saint-Laurent près du pont de l'île d'Orléans (Figure 14 et Figure 15). De la même manière que la zone 1, il s'agit probablement de l'érosion naturelle engendrée par l'eau et le mouvement des glaces du fleuve qui crée le mouvement du terrain.

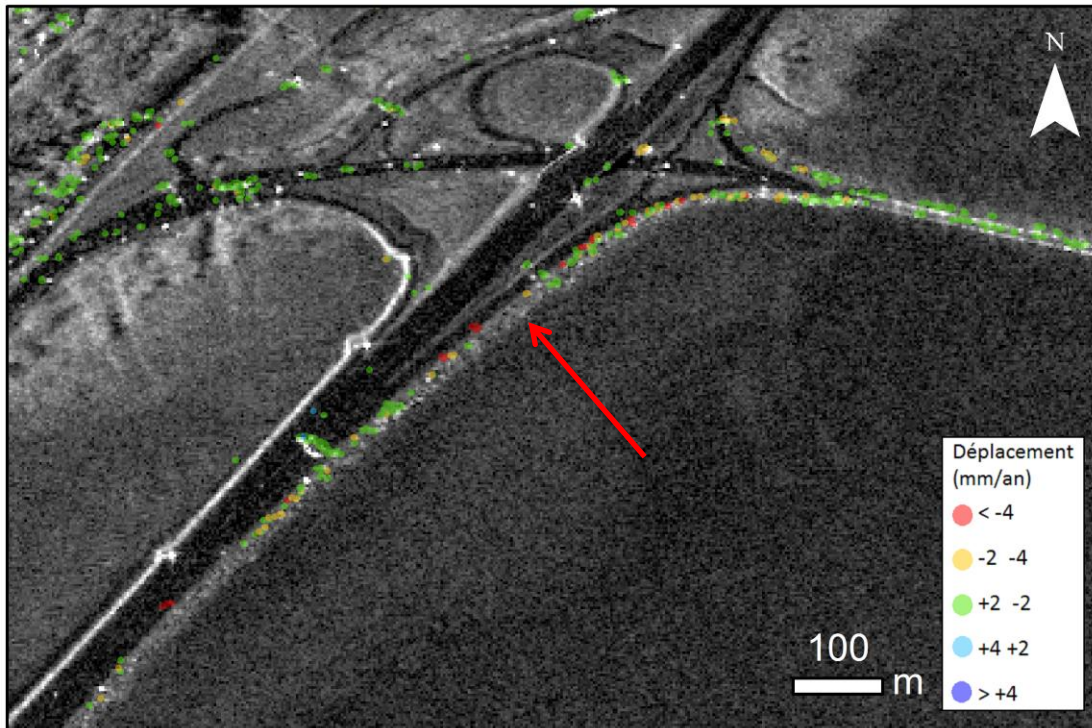


Figure 14: Zone 4, localisée au niveau des enrochements de l'autoroute Dufferin-Montmorency, en amont du pont de l'île d'Orléans (coordonnées 46.881N, 71.148W).

5. Zone 5

La zone 5 présentée à la Figure 16 est située dans le port de Québec et ne correspond probablement pas à un mouvement de terrain, mais plutôt à un entreposage de matières dont les niveaux varient dans le temps et l'espace. Les points présentant du mouvement sont dispersés et entourés de points n'en présentant pas, ce qui renforce l'interprétation qu'il ne s'agit pas d'un mouvement du terrain.



Figure 15: Photo de la zone 4. Enrochements de l'autoroute Dufferin-Montmorency, en amont du pont de l'île d'Orléans.



Figure 16: Zone 5, de mouvement au niveau de la zone portuaire de Québec (coordonnées 46.830N, 71.204W).

6. Zone 6

La zone 6 correspond à une paroi verticale de la carrière située près de la rue Saint-Henri dans le quartier Beauport (Figure 17). Il semble que les parois sont sujettes à une légère érosion naturelle, probablement accentuée lors de fortes précipitations ou d'alternance de périodes de gel/dégel (Figure 18).

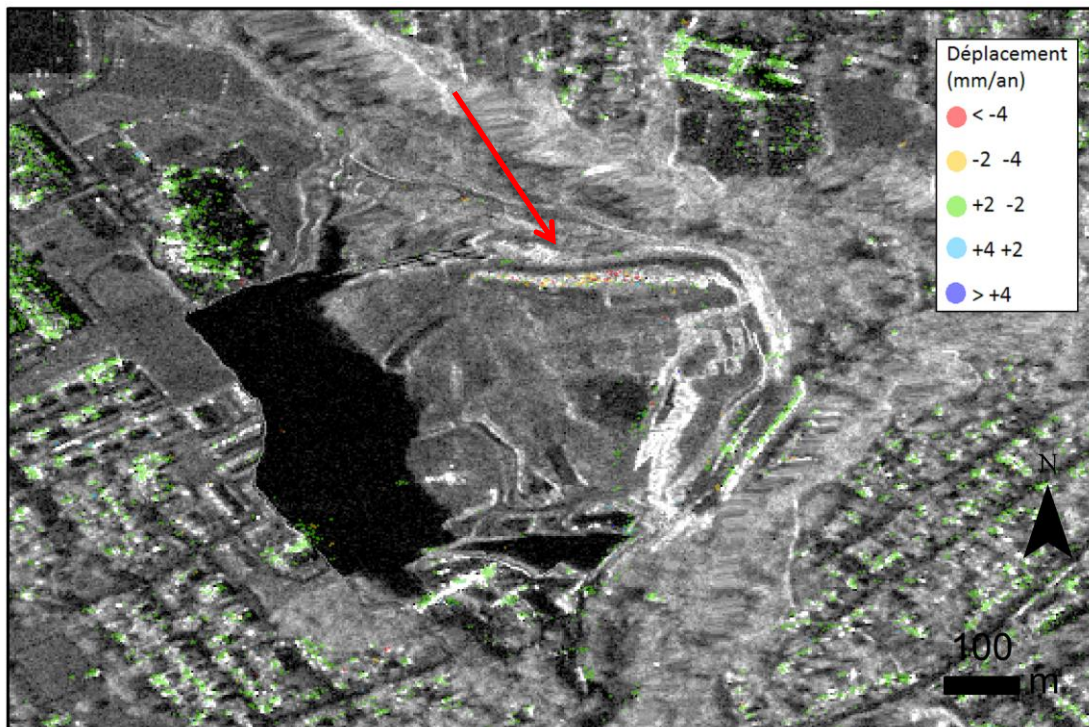


Figure 17: Zone 6, localisée dans la carrière près de la rue Saint-Henri (coordonnées 46.861N, 71.201W).



Figure 18: *Photo de la carrière de la zone 6.*

7. Zone 7

La zone 7 correspond à la bordure Sud de la rue de la Terrasse-Cadieux et est connue de la Ville de Québec (Figure 19). La pente pourrait subir un léger mouvement (Figure 20). Par contre, les points observés sont éparés et peu nombreux, indiquant que le mouvement est variable le long de la rue, et qu'il n'est pas présent en tout point de la bordure de la rue où se situe le trottoir.

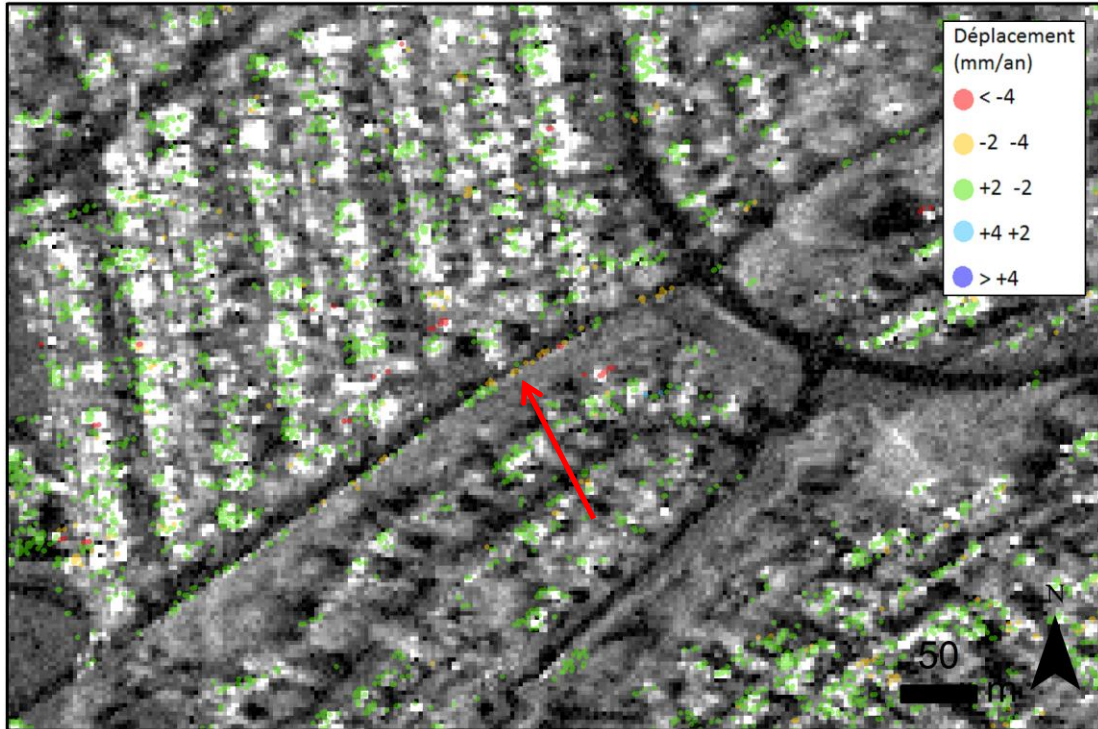


Figure 19: Zone 7, localisée au niveau de la rue de la Terrasse-Cadieux (coordonnées 46.879N, 71.159W).



Figure 20: Photo de la zone 7, montrant le trottoir en bordure de la pente.

Résultats : Comparaison avec d'autres villes

Afin de valider la méthodologie employée et de mettre en perspective les résultats obtenus, les mouvements de terrain observés dans la ville de Québec ont été comparés à ceux de deux autres villes d'Amérique du Nord. Ces deux villes (Vancouver, Canada et Toluca, Mexique) montrent des mouvements d'ampleurs et d'étendues différentes. Les cartes de déplacements des régions de Vancouver et de Toluca ont été produites à partir de données SAR d'accès libre provenant du capteur Sentinel-1A de l'Agence Spatiale Européenne (ASE). Les résultats pour la Ville de Québec proviennent des données RADARSAT-2 utilisées pour ce projet.

La ville de Québec est notablement stable (Figure 4 à Figure 8 et Figure 21a), et seulement de faibles mouvements se produisant sur des cibles isolées ont été détectés. Ces cibles sont systématiquement entourées d'autres cibles sans mouvement apparent, rendant plus difficile l'identification d'éventuels mouvements de petite étendue spatiale. Il est important d'être prudent quant à l'interprétation de ces mouvements n'affectant que peu de cibles sur une zone aussi restreinte. En effet, lorsque peu de cibles sont affectées, il est difficile d'identifier la cause du mouvement, notamment de discriminer s'il s'agit d'une cible instable placée sur un terrain stable, ou d'une cible stable placée sur un terrain instable.

La ville de Vancouver est globalement stable (Figure 21b) mais présente des zones avec un déplacement vertical du terrain de l'ordre de 5 mm/an près de l'aéroport (Ile de Richmond, à l'Ouest) et de l'île de Mitchell, à l'Est. Ces deux zones sont identifiables par des points jaunes sur la carte (Figure 21b; voir aussi Samsonov *et al.*, 2014).

La ville de Toluca présente des mouvements de terrain typiques des villes du Mexique central (Figure 21c). Les taux de subsidence y sont élevés, allant jusqu'à 80 mm/an et sont répartis de manière progressive (Castellazzi *et al.*, 2016). Ces mouvements sont typiques de la subsidence induite par la surexploitation des eaux souterraines dans cette région.

La Figure 21 montre donc qu'il est possible de détecter des mouvements de terrain par la méthodologie appliquée à la ville de Québec. En effet, cette même technique a pu détecter avec succès des mouvements de terrain connus ayant eu lieu en milieu urbain.

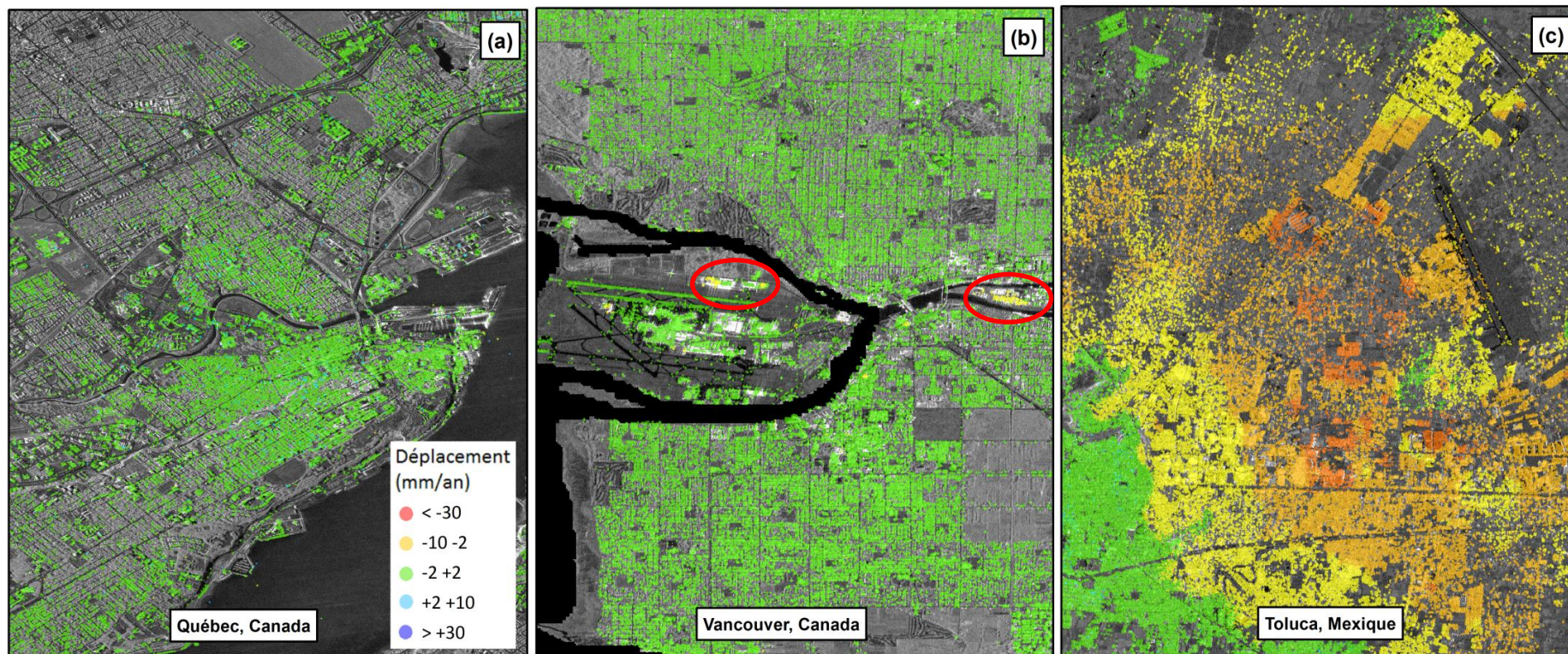


Figure 21: *Comparaison des mouvements de terrain dans trois villes sujettes à des déplacements d'ampleurs et d'étendues différentes : (a) la Ville de Québec est globalement stable; (b) la Ville de Vancouver présente des déplacements verticaux de terrain de l'ordre de 5mm/an dans certains secteurs (cercle rouge); (c) la Ville de Toluca, au Mexique, présente des déplacements verticaux importants et spatialement progressifs allant jusqu'à 80mm/an.*

Recommandations

Une des difficultés majeures dans l'interprétation des résultats issus de l'InSAR réside dans l'utilisation de séries temporelles s'étalant sur une longue période. Par exemple, un mouvement ayant affecté une cible il y a 3 ans pourra être détecté par l'InSAR, mais il sera difficile d'identifier ce mouvement lors d'une visite de terrain si les traces de ce mouvement ne sont plus apparentes. Cette limitation est liée à la nécessité d'utiliser une série temporelle d'au moins 20 images pour l'obtention de résultats robustes. Étant donné que les données du capteur RADARSAT-2 sont disponibles avec une fréquence temporelle maximum de 24 jours et que les images acquises en présence de neige au sol ne sont pas utilisables, les séries temporelles doivent alors s'étaler sur plusieurs années.

Ce problème peut être réglé en utilisant des données issues de capteurs récents ayant des fréquences temporelles d'acquisition d'images supérieures. Les systèmes de satellites SAR Sentinel-1A et 1B permettent une fréquence d'acquisition aux 6 jours, mais les données pour la région de Québec ne sont disponibles pour le moment qu'aux 12 jours. Dans la région de Québec, les cibles au sol ne sont pas couvertes de neige de la mi-avril à la fin novembre, ce qui laisse annuellement une fenêtre d'environ 7.5 mois (225 jours) pour l'acquisition d'images radar. Puisqu'il faut environ 20 images afin de pouvoir effectuer un traitement PSI, le système doit avoir une fréquence temporelle d'acquisition d'au maximum 11 jours. Pour le moment, seuls les tandems Sentinel-1A/B et TerraSAR-X permettent une telle fréquence temporelle. Le système Radarsat-3 ou RCM (Radarsat Constellation Mission) qui sera disponible prochainement aura une fréquence temporelle de 8 jours, ce qui est également suffisant pour de telles applications. Nous recommandons l'utilisation de cette technologie afin que le suivi des mouvements de terrain se fasse davantage en 'temps réel' et que les visites de terrain permettent de voir aisément et rapidement les mouvements détectés.

Mentionnons que des visites de terrain qui prennent en compte l'angle de visée utilisée lors des acquisitions SAR sont indispensables à la bonne interprétation des cartes de déplacements produites. En effet, il existe des mouvements de terrain non détectable par images radar en raison de l'angle de visée (LOS) des satellites. Finalement la technique InSAR est si précise qu'il est possible de détecter des mouvements de très faible amplitude n'étant pas forcément reliés à une situation préoccupante.

Conclusions

L'analyse des données satellitaires RADARSAT-2 par la méthode InSAR a permis de créer cinq cartes de déplacement vertical dans la ville de Québec ayant un seuil de détection d'environ 2 mm/an. Ces cartes ont pu être comparées et interprétées à l'aide d'observations de terrain. Il a été constaté que la ville de Québec est globalement stable. Elle a peu de zones avec des mouvements de terrain, c'est-à-dire avec des valeurs de déplacement supérieures au seuil de détection de la technique. Les mouvements détectés sont localisés sur des étendues restreintes de quelques dizaines de mètres carrés. Les zones visitées montrant des déplacements sont les suivantes: (1) deux zones de remblai en enrochement en bordure du fleuve Saint-Laurent subissent une érosion côtière naturelle créée probablement par l'écoulement de l'eau, les marées, la glace fluviale et les cycles de gel/dégel; (2) deux zones de bâtiments dont une en lien avec une zone karstique déjà identifiée et étudiée préalablement; (3) une pente déjà connue de la ville; (4) la paroi verticale d'une carrière de calcaire en exploitation qui subit vraisemblablement de l'érosion naturelle et; (5) une zone située dans le port de Québec correspondant probablement à des mouvements liés à l'entreposage de matières dont les niveaux varient dans le temps et dans l'espace.

Il est recommandé de réaliser un suivi des déplacements sur une période plus courte afin d'améliorer la précision de la méthode. Pour ce faire, les satellites tandems Sentinel-1A/B, TerraSAR-X et Radarsat-3 qui ont une fréquence d'acquisition d'images radar plus élevée pourraient être utilisés.

Format et utilisation des données jointes au rapport

Les données jointes au rapport sont le résultat des traitements InSAR. Elles peuvent être utilisées pour d'autres études ultérieures dont le recoupement avec d'autres sources d'information. Les points ayant des valeurs négatives correspondent à un affaissement du terrain, alors que ceux ayant une valeur positive correspondent à un soulèvement.

Les données sont fournies en format shapefile. Le résultat de chaque traitement est présenté dans des fichiers '.zip' séparés contenant un ou plusieurs shapefile. Les shapefiles contiennent l'ensemble des points PS observés et la vitesse verticale de chaque point en mm/an. La référence spatiale utilisée est WGS84.

Diffusion des résultats de recherche

Les résultats de ces travaux de recherche sont diffusés par l'intermédiaire de ce rapport, fourni à l'Agence Spatiale Canadienne et à la Ville de Québec. Une présentation lors de du 43^{ième} congrès de l'Association Internationale des Hydrogéologues (AIH) a été donnée en septembre 2016.

1. Rapports produits

Martel R., et P. Castellazzi (2017), Monitoring of ground movement in greater Quebec city using radar interferometry. (Suivi des mouvements de terrain sur la Ville de Québec par interférométrie radar). Rapport de Recherche INRS-ETE, pour l'Agence Spatiale Canadienne. 11 pages.

2. Conférences

Castellazzi P., Martel R., Calderhead A.I. (2016). InSAR to understand groundwater flow systems and support groundwater management. *43th International Association of Hydrogeologist Congress*. Montpellier, France. 30 September 2016.

3. Articles scientifiques en préparation

Martel R., Castellazzi P., Gloagen E. et L. Trepanier (2017), ERT, GPR, InSAR and Tracer tests to characterise karst aquifer systems under urban areas: the case of Quebec City. *Geomorphology* (soumis).

Formation de personnel qualifié

Deux étudiants au doctorat à l'INRS-ETE ont été formés aux traitements d'images radar, et notamment à l'interférométrie radar. Il s'agit de Pascal Castellazzi et de Sophie Dufour-Beauséjour. Bien que ces travaux ne constituent pas le cœur de leurs travaux de recherche de doctorat, ils auront fortement contribué à améliorer leur formation. Ils vont utiliser l'expertise acquise lors de ce projet pour l'appliquer à leurs cas d'études respectifs.

Références

- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, et E. Sansosti (2002), A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
- Castellazzi, P., N. Arroyo-Domínguez, R. Martel, A. I. Calderhead, J. C. L. Normand, J. Gárfias, et A. Rivera (2016), Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 102-111.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., et B. Crippa (2016), Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 78-89. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>.
- Ferretti, A., C. Prati, et F. Rocca (2001), Permanent scatterers in SAR interferometry, *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Martel, R., Trépanier, L., Castellazzi, P., Calderhead, A., Deschênes-Rancourt, C et R. Lévesque (2016), Étude des grottes de Courville à partir de méthodes quantitatives en sciences de la terre: phase II. Québec, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, 258 pages. Research report 1642.
- Massonnet, D. et K. L. Feigl (1998), Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.
- MDA (2013), Radarsat-2 Product Description. RN-RP-51–2713.
- Samsonov, S. V., N. d'Oreye, P. J. Gonzalez, K. F. Tiampo, L. Ertolahti, et J. J. Clague (2014), Rapidly accelerating subsidence in the Greater Vancouver region from two decades of ERS-ENVISAT-RADARSAT-2 DInSAR measurements, *Remote Sensing of Environment*, 143, 180-191.