

# FUSION D'INFORMATIONS ISSUES DE LA TÉLÉDÉTECTION RADAR POUR L'OBSERVATION DE DÉPLACEMENTS DANS LA RÉGION DE MANAUS (AMAZONIE)

Fernanda Ledo G. Ramos<sup>1,3</sup>, Fernando P. De Miranda<sup>2</sup>, Alexandre G. Evsukoff<sup>1</sup>, Emmanuel Trouvé<sup>3</sup>, Sylvie Galichet<sup>3</sup>

1 : Université Fédérale de Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE, Centre de Technologie, Bloco I-114, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, Brésil, feledo@gmail.com ; alexandre.evsukoff@coc.ufrj.br

2 : PETROBRAS Research and Development Center (CENPES), Avenida 1, Quadra 7, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, CEP 21491-598, Rio de Janeiro, Brésil fmiranda@petrobras.com.br

3 : LISTIC - Polytech Annecy-Chambéry - Université de Savoie - BP 80439 - 74944 Annecy-le-Vieux Cedex – France emmanuel.trouve@univ-savoie.fr ; sylvie.galichet@univ-savoie.fr

## Résumé

En mesurant la différence de phase entre des images acquises dans les mêmes conditions à des dates différentes, l'interférométrie radar différentielle (DInSAR) permet d'observer des déplacements de la surface avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde : quelques centimètres en bande C. Dans cet article, l'interférométrie appliquée à une série de 15 images Radarsat-1 et 24 images Radarsat 2 acquises entre 2006 et 2010 a permis d'étudier les phénomènes géophysiques liés aux déformations de terrain dans la ville de Manaus, la plus grande de l'Amazonie, au Brésil. Nous nous plaçons dans ce cadre pour analyser le contexte tectonique et structural des résultats obtenus par cette étude. Cette approche inclut l'analyse du réseau de drainage extrait du modèle numérique de terrain SRTM (*Shuttle Radar Mission Topography*) ainsi que la comparaison de différentes images satellitaires optiques avec des informations géologiques et géomorphologiques existantes. Les résultats montrent l'existence probable de déplacements dans une région à côté d'une anomalie circulaire de drainage (4 km de diamètre). La combinaison de l'ensemble des données disponibles fournit une interprétation géologique aux différents motifs obtenus par l'étude interférométrique.

**Mots clés** : Interférométrie radar, RADARSAT, SRTM, néotectonique, Manaus.

## Abstract

*The prime objective of this article is to understand and to address, from a tectonic and structural standpoint, the results obtained by an interferometric study recently carried out in the Manaus area, Amazonas State, in which a stack of RADARSAT-1 between 2006 e 2008 data has been processed. The study is based on the analysis of the drainage network data, as well as through the comparison with images from different optical sensors and with geologic/geomorphologic information available in the literature. As a result, it has been noticed a subsidence area located in the vicinities of a circular drainage anomaly with 4 km of diameter, which strongly suggests a geologic origin for the interferometric feature.*

**Keywords** : SAR Interferometry, RADARSAT, SRTM, neotectonic, Manaus.

## Resumo

*A medida de diferença de fase entre imagens SAR adquiridas nas mesmas condições obtida através de interferometria diferencial (DInSAR) permite observar a deformação da superfície com uma precisão centimétrica na banda C. Neste artigo, o estudo interferométrico foi aplicado a uma série de 15 imagens do satélite Radarsat-1 adquiridas entre 2006 e 2008, permitindo estudar os fenômenos geofísicos ligados à deformação de terreno na cidade de Manaus, Amazonas, Brasil. O artigo se baseia na análise do contexto tectônico e estrutural dos resultados obtidos e inclui a análise da rede de drenagem, assim como sua comparação com diferentes imagens orbitais de sensores óticos e informações geológico-geomorfológicas existentes. Os resultados mostram a existência provável de subsidência em uma área adjacente à uma anomalia circular de drenagem (4km de diâmetro), o que sugere uma causa geológica para sua existência.*

**Palavras-chave** : Interferometria radar, RADARSAT, SRTM, neotectônica, Manaus.

## 1. Introduction

Pendant ces dix dernières années, l'interférométrie radar a montré son fort potentiel et son adéquation à l'étude de faibles déformations en zone urbaine (Tesauro et al., 2000) ou dans les zones de failles (Wright et al., 2001), prouvant que la technique permettait de s'intéresser à différentes échelles spatiales de déformation, ainsi qu'à des échelles

temporelles allant de quelques semaines à plus de dix ans. Ces systèmes RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) sont capables de couvrir de vastes régions avec une résolution élevée, ce qui représente un avantage pour le suivi terrain. Manaus est la plus grande ville de l'État d'Amazonas et représente un site important pour l'exploration pétrolière et gazière et pour le transport. Ce site est entouré par des écosystèmes fragiles, qui le rendent très sensible à la présence de

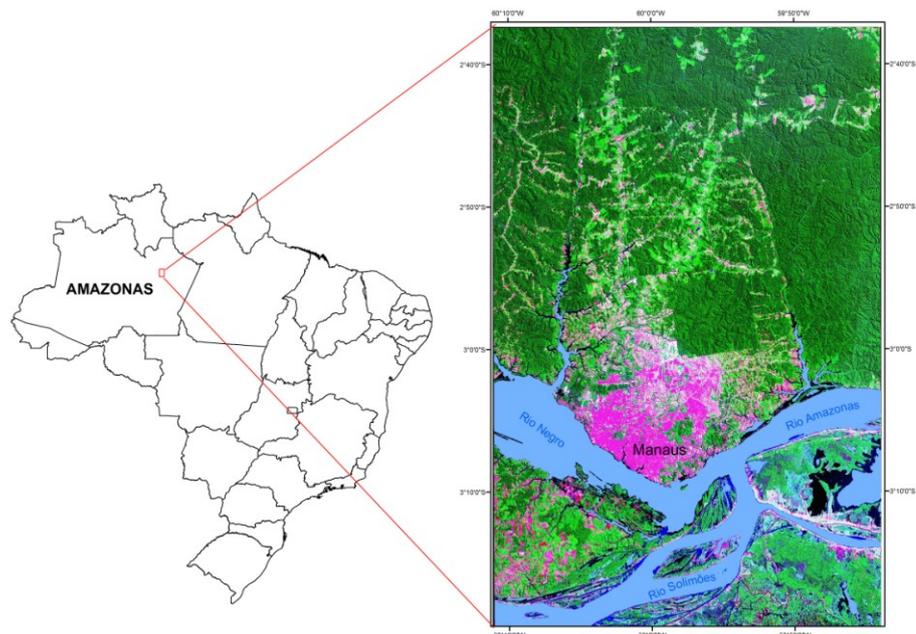
l'industrie pétrolière. Dans ce contexte, une compréhension de la dynamique temporelle et de la distribution spatiale des phénomènes de néotectonique est fondamentale pour la définition de bonnes pratiques de gestion de l'environnement. Le suivi par télédétection aux frontières d'exploration du bassin Amazonien a commencé dans la fin des années 1980. Ces études combinent des données spatiales différentes et de l'information géophysique ainsi que de la géochimie de surface pour détecter les caractéristiques de pétrole *onshore* (Almeida Filho et Miranda, 2007). En complément des connaissances antérieures, la présente étude considère l'hypothèse de mouvements de la croûte récents liés aux activités néotectoniques du bassin de l'Amazonie, en utilisant l'interférométrie radar. Les résultats préliminaires du projet Solimões (Ramos et al., 2011) indiquent une zone de mouvement de la croûte adjacente à une structure de drainage circulaire dans la ville de Manaus. On s'attend à ce que les images Radarsat-1 et

2 acquises sur cette région apportent une meilleure compréhension des activités géologiques et du mouvement de la croûte dans le bassin de l'Amazonie, complétant ainsi l'étude de Bevis et al. (2005) qui décrit un cycle annuel de déplacement vertical avec une amplitude de 50-75 mm, mesurée par une station GPS à proximité du centre du bassin. Ceci est considéré comme une grande oscillation de la croûte et indique que la lithosphère est susceptible de régresser et de rebondir en réponse aux changements dans le poids de l'écoulement de la rivière.

Dans la deuxième section de cet article, nous présentons la zone d'étude et les données utilisées pour l'analyse des bassins versants. La troisième section décrit les images optiques et la quatrième présente les différentes stratégies de traitement InSAR ainsi que les sources d'erreurs. La dernière section montre les résultats.

**Figure 1:**

Zone d'étude : Limite de l'état d'Amazonas. Détail : Image Landsat 5 couvrant la ville de Manaus et les rivières Negro, Solimões et Amazonas.



## 2. Zone d'étude et cadre géomorphologique

Le site d'investigation est situé dans le centre de l'Amazonie brésilienne, à la confluence des rivières Negro et Amazonas (cf. Figure 1). Il comprend la ville de Manaus, la capitale de l'État d'Amazonas qui représente la zone la plus peuplée de la région nord du Brésil. Totalisant environ 4 000 km<sup>2</sup> dans le bassin sédimentaire de l'Amazonie, la zone d'étude se situe à une altitude comprise entre 50 et 150 m environ, avec des bassins versants orientés NW-SE et NE-SW.

Les caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques, comme les vallées, les bassins hydrographiques, les anomalies et captures de drainage, les zones de confluence, l'asymétrie du bassin versant et les linéaments de drainage, ont été cartographiées précédemment à l'aide de cartes topographiques, de données de télédétection et de modèles altimétriques numériques validés sur le terrain dans (Silva, 2005). Ce dernier présente en outre, la

répartition spatiale des éléments constitutifs du réseau hydrographique contrôlé par la tectonique et qui soulignent le plus souvent des alignements atypiques, comme l'anomalie de drainage au centre de la ville de Manaus, à côté de la zone de déplacement suspecté. Ces alignements particuliers forment les linéaments hydrographiques et traduisent une réalité géologique perturbatrice du réseau : passage d'une faille, présence d'un banc dur filonien ou de particularités lithologiques orientées. L'étude de Silva montre la limite d'une anomalie de drainage du type annulaire, qui caractérise les structures en dôme. Cette première délimitation a été retravaillée et l'aspect circulaire du drainage affiné à l'aide des données satellitaires (optiques et SRTM) dans la présente étude.

### 2.1 MNT SRTM, données optiques et analyse des réseaux de drainage

L'analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) produit par la mission SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) dans la région révèle les vestiges

d'un grand système de drainage ancien caché par la forêt tropicale humide. L'interprétation des caractéristiques du terrain dans le contexte régional géologique et géomorphologique en utilisant la télédétection a permis la comparaison des linéaments de drainage avec les informations existantes sur le terrain.

Dans la présente recherche, les drainages linéaires et curvilignes dus à la contrainte tectonique et la déformation du bassin sont définis comme des linéaments. La comparaison des orientations des linéaments extraits de SRTM, Landsat et des données IKONOS permet d'évaluer leur accord avec

l'architecture de drainage. Le tableau 1 présente les caractéristiques des données utilisées.

Dans ce cas, à partir du modèle numérique de terrain SRTM, nous avons obtenu:

- (a) Les limites de bassins versants;
- (b) Une amélioration des linéaments de drainage identifiés par Silva (2005);
- (c) Une quantification de l'inclinaison des bassins versants ;
- (d) Les zones inondables;
- (e) Des cartes de pente.

Capteur	Landsat 5 TM	Ikonos	SRTM	Radarsat 1		Radarsat 2			
Date	20011109	20010809	2001	20060812	20070620	20081024	20090808		
(aaaammjj)	20010801			20060929		20070714		20081117	20090901
	20030418			20061023		20070807		20081211	20090925
	20040227			20061116		20070924		20090104	20091019
	20050412			20061210		20071018		20090128	20091112
				20070409		20071111		20090221	20091206
		20070503	20071205	20090317	20091230				
		20070527		20090410	20100123				
				20090504	20100312				
				20090528	20100405				
				20090621	20100429				
				20090715	20100523				
Track	231-62	4567-109	2905-2622	235-A		154 -A			
Résolution	15 m	1 m	90 m	8 m		8 m			

Tableau 1 : Dates, tracks et résolution des images utilisées.

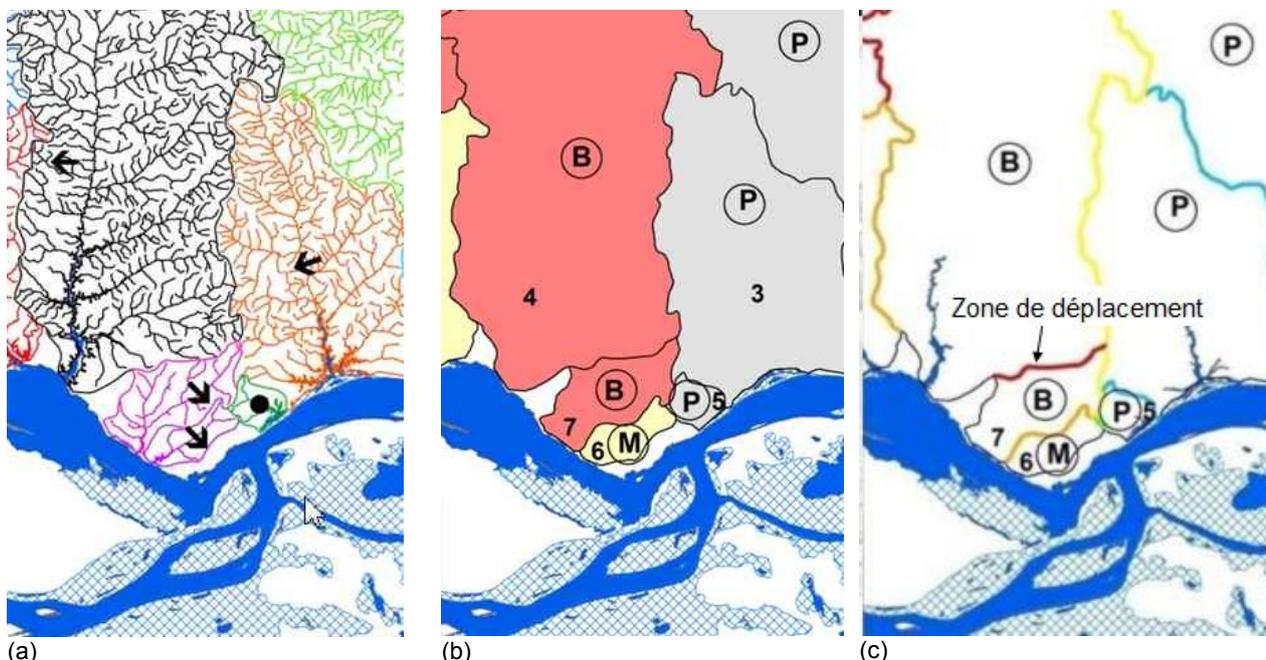


Figure 2 : Géomorphologie des bassins versants ; (a) direction de basculement ; (b) l'ampleur proposée par Salamuni (Salamuni et al., 2004) (cf. Table 2) ; (c) relation topologique entre les bassins versants (cf. Tableau 3) et localisation de la zone de déplacement dans la limite en rouge partagée par les deux bassins, au nord et au sud de la ligne.

Localisation des images : entre 59°43' et 60°11' Ouest, et 02°37' et 03°20' Sud.

## 2.2 Calcul de l'indice de symétrie de bassin de drainage

L'organisation géomorphologique des bassins versants et la géométrie du réseau hydrographique constituent d'excellents traceurs de la déformation récente ou active. Ainsi, l'analyse de la morphométrie des bassins permet de déterminer la stabilité ou l'instabilité de certains secteurs d'un orogène et de quantifier les mouvements tectoniques verticaux récents (Carozza et Delcaillau, 2000).

Une analyse quantitative de la symétrie topographique transversale des bassins de drainage a été réalisée pour identifier les zones de basculement néotectonique dans les domaines de haute ou faible sismicité. L'indice de symétrie (T) est décrit par l'équation suivante (Hare et Gardner, 1985 ; Cox, 1994):

$$T = 100.(Dd/Da) \quad (1)$$

où  $Dd$  est la surface à droite de la rivière et  $Da$  est la superficie totale du bassin.

Dans un environnement stable, T est égal à 50. Il est sensible aux inclinaisons perpendiculaires à la voie principale du bassin. Les valeurs qui s'éloignent plus ou moins de 50 suggèrent une inclinaison.

Ces valeurs sont calculées pour chacun des bassins versants qui délimitent la région de Manaus, en tenant compte également de la direction de basculement (Figure 2a) et de l'ampleur proposée par Salamuni et al. (2004) (Figure 2b et Tableau 2). Une échelle d'effet tectonique a été créée pour analyser la relation topologique entre les bassins hydrographiques (cf. Figure 2c) tels que présentés dans le Tableau 3.

Effet Tectonique	Classification
$0 > a < 35$	Important (B)
$35 \geq a < 41$	Modéré (M)
$41 \geq a \leq 52$	Petit (P)
$52 > a \leq 66$	Modéré (M)
$66 < a \leq 100$	Important (B)

**Tableau 2 :** Valeurs d'indice de symétrie (T) et classification d'effet tectonique (adapté de (Salamuni et al., 2004)).

Relation topologique entre bassins versants	Classification
B/B	Instable
B/M	Instable Modéré
B/P	Légèrement Instable
M/P	Stable Modéré
P/P	Stable

**Tableau 3 :** Relation topologique entre les bassins hydrographiques et classification de stabilité (Ramos, 2009).

## 3. Données optiques Landsat et IKONOS

A fin de gérer le problème de la forte couverture nuageuse en milieu tropical humide, la série de données historiques Landsat se compose d'une

sélection des images sans nuage obtenues à une fréquence saisonnière entre 2001 et 2006 (Tableau 1). Les données utilisées dans la présente étude tiennent compte de l'état de la rivière lors de l'acquisition du MNT SRTM. Elles ont servi à identifier visuellement les linéaments de drainage qui sont plus visibles dans les différentes scènes d'archives utilisées pour la cartographie des cours d'eau car la zone urbaine était moins dense dans les anciennes dates. La haute résolution des données IKONOS (1 m) a fourni une échelle d'analyse détaillée pour la région de déplacement dans la ville de Manaus détectée par l'étude d'interférométrie radar, ce qui a permis d'extraire visuellement les linéaments et anomalies de drainage dans la région d'intérêt avec plus de précision. L'image IKONOS a été acquise en avril 2001 (cf. Tableau 1).

## 4. Données interférométriques Radarsat

L'interférométrie SAR révèle des activités géologiques et du mouvement de la croûte dans le bassin de l'Amazonie. L'objectif premier de la présente recherche est de comprendre et de contextualiser les résultats obtenus par une étude interférométrique récemment effectuée dans la région de Manaus, dans laquelle une série de données Radarsat-1 et Radarsat-2 a été analysée. L'interférométrie est une technique éprouvée qui utilise deux ou plusieurs images satellitaires pour mesurer les mouvements subtils du terrain. La base de la technique est la mesure du changement de phase entre les images consécutives qui sont acquises sur des orbites répétées, mais à des moments différents. Ces changements de phase sont convertis en mesures de mouvement. Avec un cycle de répétition de 24 jours, les missions RADARSAT recueillent une image sur le même emplacement tous les 24 jours. L'InSAR différentielle (après suppression des effets stéréo) a un fort potentiel pour la mesure de l'affaissement du sol et des changements de surface en particulier dans les zones urbaines comme par exemple à Los Angeles, Shanghai, Naples ou la ville de Mexico (Quiroz et al., 2009).

### 4.1. Techniques InSAR : Approches Common Master, Proche en Proche et Inversion de réseau

Les données Radarsat-1 et Radarsat-2 *beam mode* F2 ont été acquises à partir de 2006 jusqu'en avril 2010 et ont été utilisées pour faire une étude préliminaire sur la région de Manaus. Les données ont été traitées en utilisant trois approches InSAR: une seule image maîtresse (*Common Master*), de Proche en Proche et l'inversion de réseau.

Le principe de l'approche *Common Master* est de choisir la même scène comme image maîtresse, pour recalibrer toutes les autres scènes esclaves et générer des interférogrammes. L'image maîtresse est normalement choisie en fonction de la proximité de la position moyenne temporelle et de la base centrale dans le traitement de la pile. Comme l'écart moyen temporel de l'approche *Common Master* est relativement important, elle est avantageuse dans la surveillance des zones où des cibles présentent un signal de mouvement relativement faible. L'approche *Common Master* peut être problématique dans les régions de forte déformation, à cause du risque d'enroulement (*aliasing*) du signal.

Dans l'approche Proche en Proche, les scènes de la pile sont classées dans le temps et les couples sont formés entre images consécutives. Cette configuration est mal adaptée pour la surveillance de signaux de mouvement plus petit parce que le signal n'est pas suffisamment distinct du bruit de phase et d'autres contributions. Les approches Proche en Proche et *Common Master* sont différentes avec des avantages et des inconvénients selon les applications et les bases de données disponibles. Toutefois, les deux configurations ne peuvent pas exploiter pleinement le potentiel de la pile RADARSAT pour les raisons suivantes:

(a) Les interférogrammes avec de grandes lignes de base perpendiculaires présentent une décorrélation spectrale importante qui corrompt le signal et empêche la mesure de différence de phase. Souvent, un tel interférogramme peut être remplacé par deux ou plusieurs interférogrammes qui présentent des lignes de base plus petites et couvrent la même période que l'interférogramme original. Toutefois, les approches *Common Master* et Proche en Proche n'incluent pas ces alternatives;

(b) Certains interférogrammes présentent une excellente cohérence et montrent un signal très clair qui n'est pas si marqué dans un des interférogrammes standard des approches *Common Master* et / ou Proche en Proche. Ces interférogrammes ont beaucoup à apporter à l'histoire de la déformation finale et devraient idéalement être fusionnés dans le processus d'inversion de phase ;

(c) La redondance de la pile est éliminée en formant exactement comme interférogrammes tous ceux qui sont absolument nécessaires pour arriver à l'histoire de phase temporelle. Alors que les observations redondantes peuvent être avantageuses en vue de réduire les erreurs de mesure finale grâce à

l'augmentation de la fiabilité statistique des séries chronologiques de déformation. Une inversion de mesures fiables sur des séries redondantes de déplacement peut être tentée pour chaque point cible.

La troisième approche, l'inversion de réseau, a une souplesse suffisante pour s'appliquer à différents jeux de données, à la signature de mouvements variés, et même à la pratique de l'utilisateur et son expérience, qui sont nécessaires pour développer une méthode d'inversion applicable.

Les résultats présentés dans cet article représentent la préparation des données pour mettre en évidence le phénomène de déplacement avec une approche réseau pour la série Radarsat-1 et une approche *Common Master* pour la série Radarsat-2.

#### 4.2. Cohérence et correction de base

En raison de la prédominance de la couverture forestière tropicale, tous les interférogrammes présentent une cohérence très basse en dehors de la ville de Manaus. Pour cette raison, la zone d'étude initiale a été réduite à une partie de la scène qui ne comprend que la zone urbaine de Manaus. La base perpendiculaire (distance entre satellites perpendiculairement à la visée radar) est un paramètre très important du traitement pour l'interférométrie SAR. Dans le cas des données disponibles sur Manaus, les tentatives de correction orbitale du 1er et 2ème ordre pour les scènes complètes ont échoué dans la plupart des cas à cause de la mauvaise cohérence. Une correction de 1er ordre a été simplement appliquée avec succès sur la zone de Manaus. Les tendances du 2ème ordre (équations du second degré) ne peuvent être corrigées sur une si petite surface. Les corrections de premier ordre ont été appliquées aux interférogrammes illustrés figure 3.

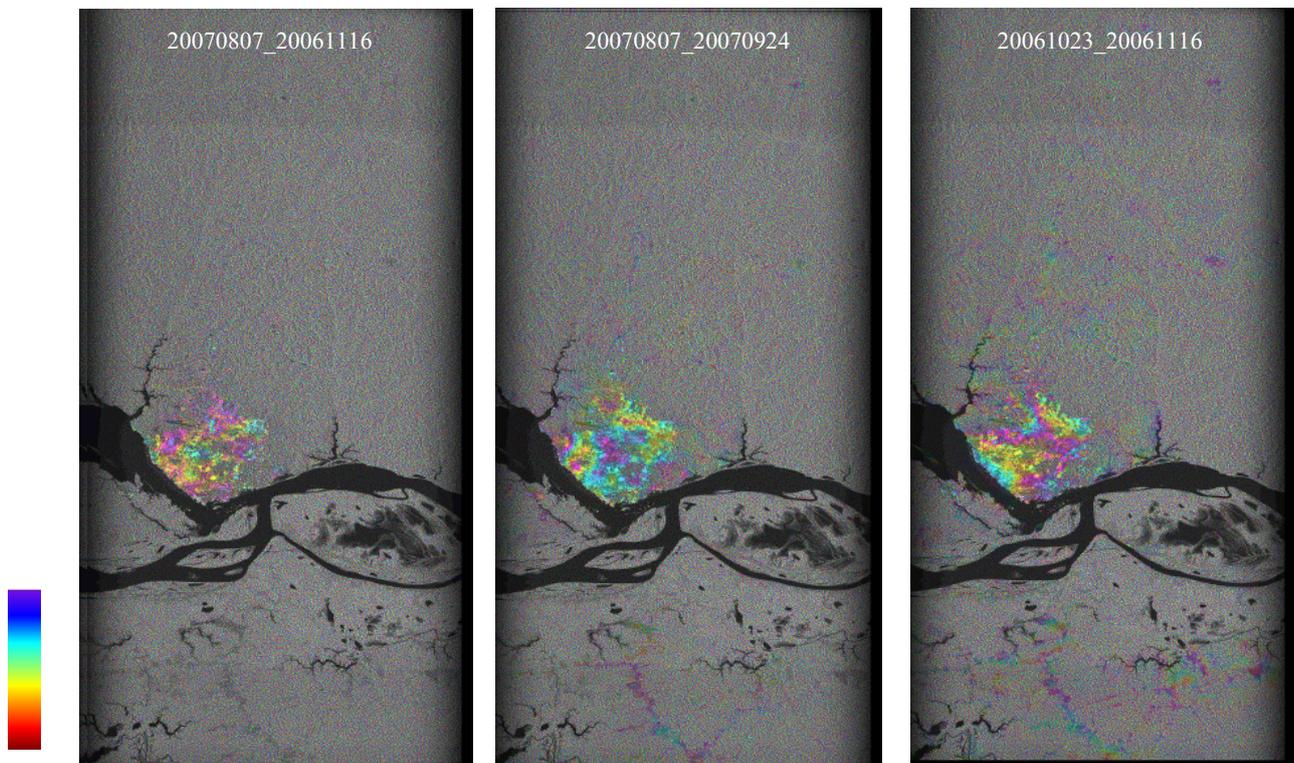


Figure 3 : Exemple d'interferogrammes Radarsat-1 en géométrie radar.

### 4.3. Effets atmosphériques

La base temporelle des données Radarsat-2 s'étend de 24 à 576 jours comme pour Radarsat-1. Pour la base perpendiculaire de la série Radarsat-1 on trouve plus de 50% des interférogrammes entre 800 m à 1500 m, par contre, pour Radarsat-2 seulement 5 des 276 interférogrammes ont une base de plus de 800 mètres. Cela est dû au contrôle supérieur des orbites de Radarsat-2.

Le principal obstacle à une application plus large de la technologie InSAR est la présence de perturbations atmosphériques, traditionnelle dans les régions humides du monde. Les températures élevées des zones tropicales humides combinées à la forte pluviométrie génèrent par conséquent un bruit de phase atmosphérique susceptible de limiter les applications interférométriques (Carnec et Raucoules, 2001). L'humidité dans la colonne d'air modifie la vitesse à laquelle le signal SAR se propage et crée des fausses franges dans l'interférogramme. Dans les régions tempérées, la teneur en humidité varie progressivement (échelle > 10 ou 20 km) et les différences de phase induites peuvent être enlevées avec un filtre passe-bas. Dans les régions tropicales, la profondeur de l'atmosphère et les changements rapides de teneur en eau donnent des résultats très variables. Des efforts importants ont été faits pour développer, affiner et valider des méthodes qui permettraient l'application de l'InSAR même dans les environnements les plus difficiles.

La figure 4 illustre les effets atmosphériques qui affectent la ville tropicale de Manaus. Les changements rapides visibles dans l'interférogramme de Manaus sont à une échelle proche de celle des mouvements observés.

## 5. Résultats et discussions

### 5.1. Analyse InSAR: région de déformation de surface

L'analyse interférométrique des données Radarsat-1 présentée dans (Ramos, 2009) indique une zone de mouvement de la croûte à côté d'une anomalie de drainage circulaire mise en évidence par Simas (Simas et al., 2006) dans la ville de Manaus à l'Est de l'aéroport (Figures 5a-b). Les images Radarsat-1 présentent une discontinuité de phase illustrée par la Figure 5c, qui représente une sorte de réponse aux mouvements de terrain classiques. Cet effet qui apparaît dans plusieurs interférogrammes indépendants est probablement dû à un mouvement de quelques centimètres entre les différentes acquisitions.

Pour la pile de données Radarsat-2 analysées récemment, la phase sans correction atmosphérique (en utilisant une date précise, 23 Janvier 2010, comme maître en raison de l'absence d'artefacts atmosphériques à courte échelle) montre à nouveau un déplacement dans la région d'intérêt (à l'Est de l'aéroport) en 2008 (voir Figure 6). Cependant, le mouvement dans cette région est absent dans les dates ultérieures.

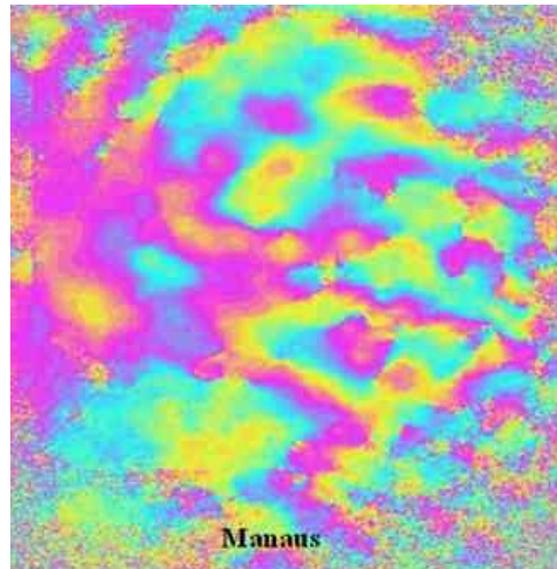
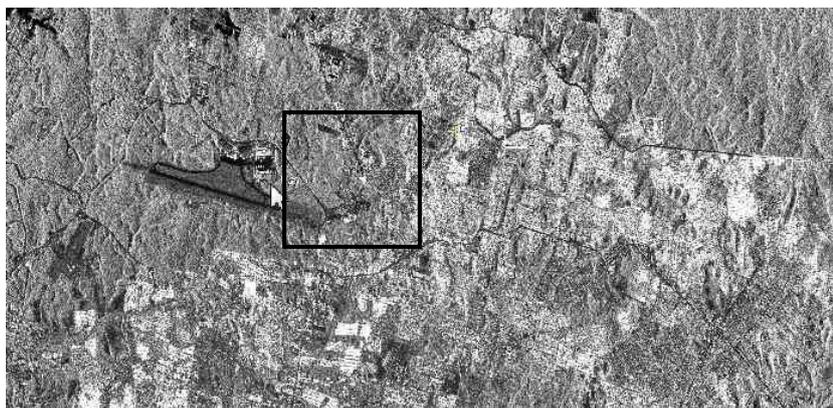


Figure 4 : Effets atmosphériques sur la ville de Manaus, couple 2006/08/12 – 2006/12/10.

Dans l'analyse des données Radarsat-2, pour la région de Manaus, l'approche *Common Master* est utilisée avec les meilleurs couples (plus petites baselines) afin d'identifier les phénomènes néotectoniques qui apparaissent dans la pile Radarsat-1. La région de mouvement a été identifiée dans la série Radarsat-2 pendant le premier trimestre de 2008 avec un déplacement de moins de 1 cm pour plus de 100 jours, un tiers de frange. Dans les motifs des données Radarsat-1 généralement on observe jusqu'à 1 frange (> 3 cm) sur certains interférogrammes (cf. Figure 7). A partir de 2009, aucun mouvement n'a été détecté. Ces premiers résultats mettent en évidence un phénomène de déformation localisé qui se répète dans le temps. Des travaux plus poussés sont nécessaires pour appliquer une méthode d'inversion capable de reconstituer le déplacement au cours du temps en intégrant les interférogrammes issus des deux jeux de données.

### 5.2. Origine géologique du déplacement observé

Les effets tectoniques détectés pour chaque bassin versant et les relations topologiques entre eux, décrits au début de cet article et discuté dans (Ramos, 2009), ont été combinés et les limites des bassins versants ont été classées comme tectoniquement stable ou instable. Ainsi on remarque que la zone de déplacement détectée par l'étude interférométrique est située à l'intersection de bassins versants tectoniques instables qui séparent les fleuves Igarapé São Raimundo et Taruma-Açu. Les deux régions sont caractérisées par la présence d'une inclinaison marquée. En outre, elles sont situées dans les environs d'un drainage circulaire présentant une anomalie de 4 km de diamètre, ce qui suggère fortement une origine géologique des observations interférométriques, telles que présentées dans la Figure 8.

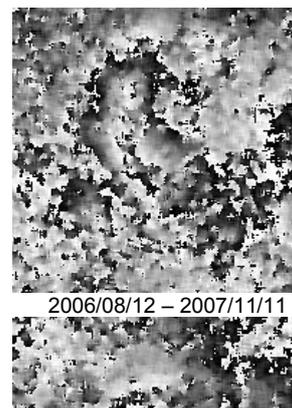


(a)

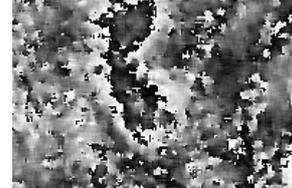


(b)

0 0.5 1 2 3 4 Km



2006/08/12 - 2007/11/11



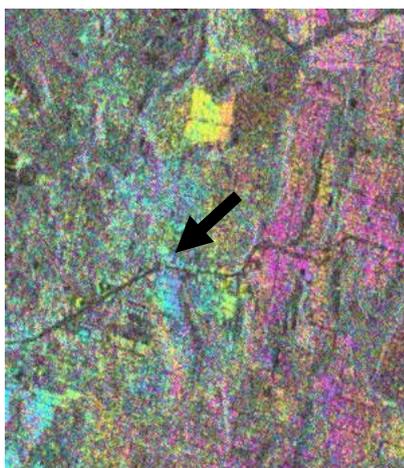
2006/09/29 - 2007/07/14



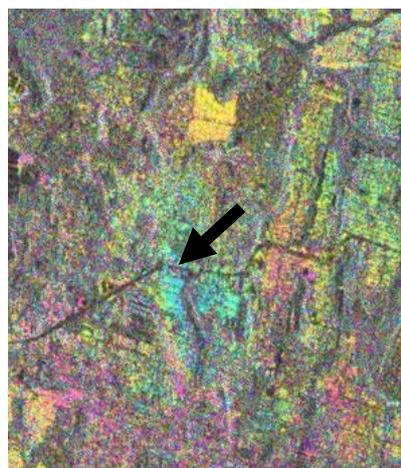
2006/11/16 - 2007/12/05

(c)

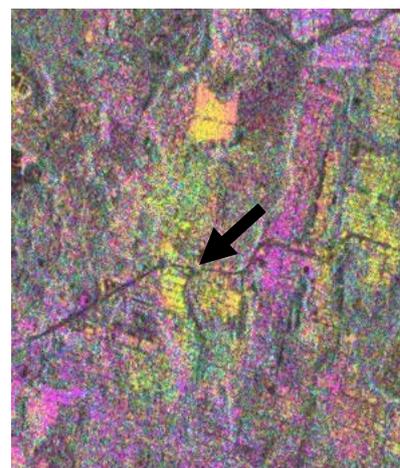
**Figure 5 :** Localisation de la région entre l'aéroport et la zone de drainage circulaire. (a) Amplitude SAR. (b) Image Landsat. (c) Interférogrammes montrant les franges observées à plusieurs reprises entre 2006 et 2008.



(a) 2008/09/06 - 2010/01/23.



(b) 2008/10/24 - 2010/01/23.



(c) 2008/12/11 - 2010/01/23.

**Figure 6 :** Interférogrammes non corrigés de la contribution atmosphérique montrant le mouvement en 2008.

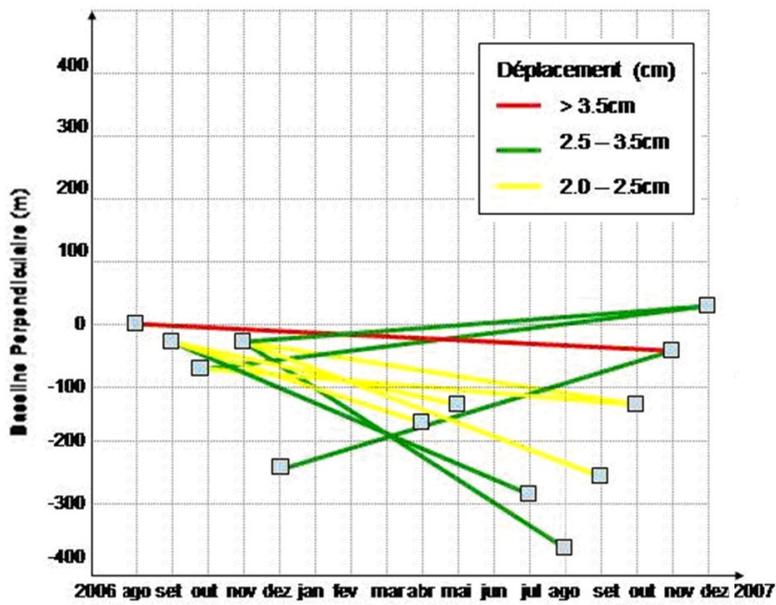


Figure 7 : Sous-graphe de couples traités entre 2006 et 2007 illustrant les dates, baselines perpendiculaires et valeurs de déplacements mesurées.

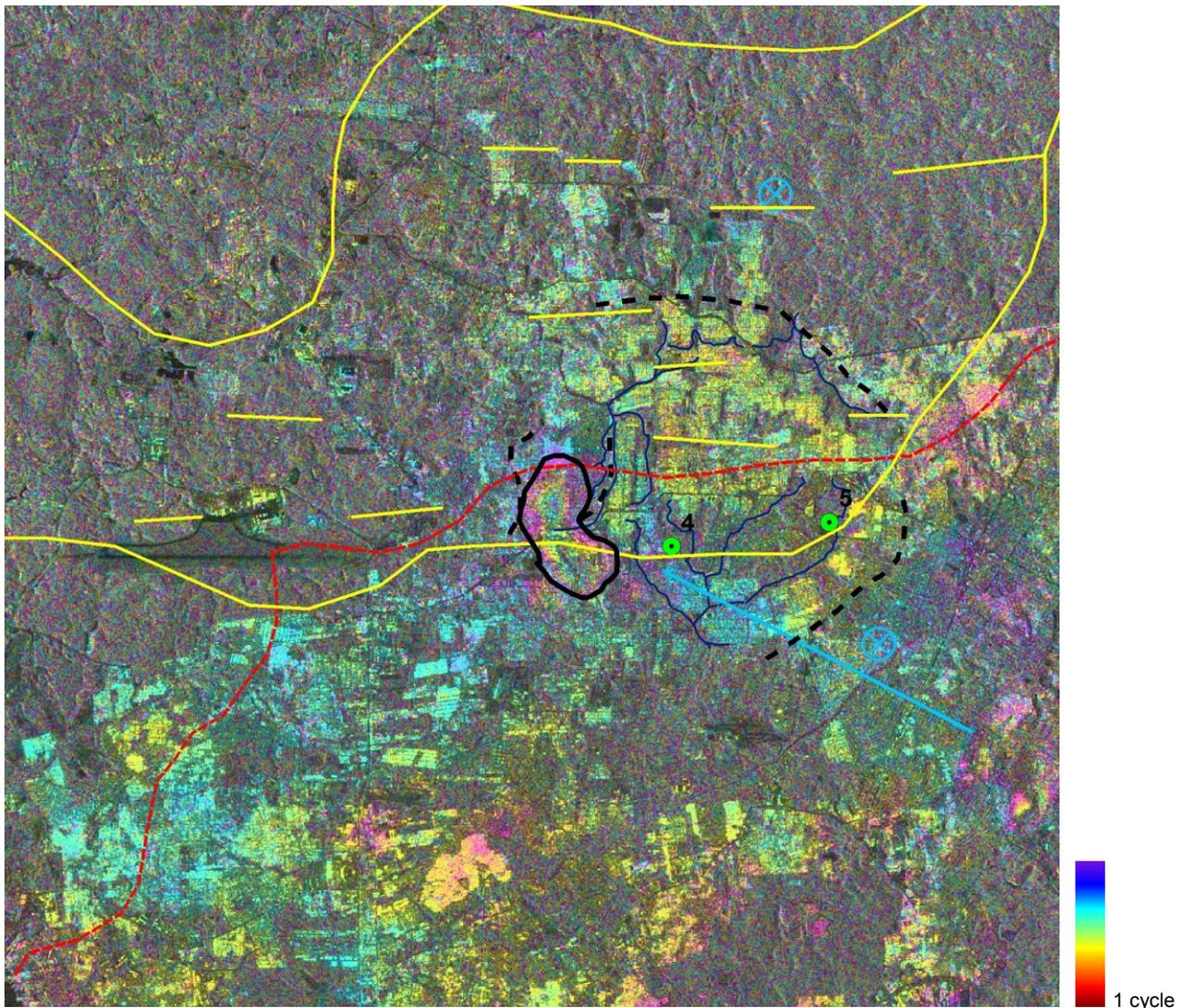


Figure 8 : Interférogramme 20070527-20060809 en géométrie radar. Ligne noire continue : région du mouvement observé. Ligne noire en pointillés : ligne de crête. Points verts : information géologique sur le terrain. Ligne rouge : limite de bassins versants instables. Lignes jaunes : tendance géologique EW sur la zone. Points et lignes bleue : capture de drainage.

## 6. Conclusion

En s'appuyant sur l'analyse du contexte tectonique et structural et sur l'ensemble des données radar (SAR) et optiques, cet article fournit une interprétation géologique aux différents motifs obtenus par interférométrie dans la ville de Manaus, Amazonie. Les résultats montrent l'existence probable de déplacements dans une région située à l'intersection de bassins versants tectoniques instables et à côté d'une anomalie circulaire de drainage (4 km de diamètre). Cependant les effets atmosphériques en zone tropicale humide rendent incertain un résultat définitif à ce stade de l'étude. L'acquisition de nouvelles données et l'amélioration des traitements, spécialement l'inversion de réseau sur la série temporelle complète, devraient permettre d'aboutir à des résultats plus quantitatifs. Avec le développement de nouveaux capteurs SAR haute résolution spatiale dotés de polarisations multiples, et la répétitivité des acquisitions, la surveillance des zones urbaines dans les régions tropicales à l'aide d'images SAR est devenue un outil précieux et indispensable.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé avec le soutien du gouvernement brésilien (CAPES/MEC) dans le cadre du projet de coopération Brésil – France CAPES COFECUB. Les auteurs remercient l'entreprise Petrobras pour son soutien technique, financier et pour les données Radarsat.

## Références

- Almeida Filho, R., Miranda, F.P., 2007. Mega Capture of the Rio Negro and Formation of the Anavilhanas Archipelago, Central Amazonia, Brazil: Evidences in an SRTM Digital Elevation Model. *Remote Sensing of Environment* 110(3), 387-392.
- Bevis, M., Alsdorf, D., Kendrick, E., Fortes, L.P., Forsberg, B., 2005. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon river system and Earth's elastic response. *Geophysical Research Letters* 32(L16308).
- Carneç, C., Raucoules, D., 2001. Specificité du milieu urbain tropical pour la cartographie des déformations de surface par interférométrie radar (ERS) - Application au pompage dans les systèmes aquifères à Djakarta et Hanoi. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection* 161(2001-1), 9-15.
- Carozza, J.M., Delcaillau, B., 2000. Réponse des bassins versants à l'activité tectonique : l'exemple de la terminaison orientale de la chaîne pyrénéenne. *Approche morphotectonique / Drainage basins response to active tectonics: example from Eastern Pyrenees. Morphotectonic approach. Géomorphologie : relief, processus, environnement* 6, 45-60.
- Cox, R.T., 1994. Analysis of drainage and basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. *Bulletin of Geological Society of America* 106, 571-581.
- Hare, P.W., Gardner, T.W., 1985. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica, Dans: 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium, Binghamton, Etats-Unis.
- Quiroz, P.L., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P., Nicolas, J.-M., 2009. Time series analysis of Mexico city subsidence constrained by radar Interferometry. *Journal of Applied Geophysics* 69(1), 1-15.
- Ramos, F.L.G., 2009. Utilização de sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e mosaico SRTM) para mapeamento de atividades neotectônicas na região de Manaus (AM)." vol. MsC Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, p. 140.
- Ramos, F.L.G., Miranda, F.P., Landau, L., Silva, C.L., 2011. Detecção de movimentação crustal recente em Manaus (AM) utilizando informações de sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e modelo digital de elevação da SRTM). Dans : Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), vol. 1, INPE, Curitiba, Brésil.
- Silva, C.L., 2005. Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências. Thèse de doctorat du Rio Claro, SP, Brésil, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 282p.
- Salamuni, E., Ebert, H.D., Hasuy, Y., 2004. Morfotectônica na bacia sedimentar de Curitiba. *Revista Brasileira de Geociências* 34, 469-477. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia.
- Simas, J.L., Silva, C.L., Morales, N., 2006. Anomalia circular na região de Manaus. Dans : Congresso Brasileiro de Geologia, vol. 1, Aracaju, Sergipe, Brésil.
- Tesauro, M., Berardino, P., Lanari, R., Sansosti, E., Fornaro, F., 2000. Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters* 27(13), 1961-1964.
- Wright, T., Parsons, B.E., Fielding, E.J., 2001. Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters* 28(10), 2117-2120.