

Interférométrie radar sur la Guadeloupe 2003-2010 (champ géothermique de Bouillante)

Rapport final

BRGM/RP-59247-FR
décembre 2010

de Michele M.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Étude réalisée dans le cadre des opérations de projets de Recherche du BRGM

Ce document a été vérifié par : Raucoules Daniel date : 12/12/2010

Approbateur :

Nom : R. Vernier

Date : 05/01/2010

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : InSAR, Interférométrie radar, Bouillante, Géothermie.

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

de Michele M. (2010) – Interférométrie radar sur la Guadeloupe 2003-2010 (champ géothermique de Bouillante). Rapport BRGM/RP-59247-FR, 23 p., 15 fig.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'interférométrie radar (InSAR) est désormais un moyen de détection de déformations de la surface du sol couramment utilisé dans différents domaines géologiques et géophysiques. Suite au premier traitement InSAR (réalisé dans le cadre du projet GHEDOM-ADEME) qui a mis en évidence d'éventuels mouvements de la surface du sol en Guadeloupe, à Bouillante, sur la période 2003/2006 (de Michele et Raucoules, 2007), et dans lequel nous discutons les éventuels liens avec l'activité géothermique, nous avons mis à jour l'archive des données radar bande-C acquises sur cette même zone. Nous utilisons les données acquises par le capteur ASAR embarqué sur le satellite ENVISAT.

En s'appuyant sur le projet CAT-1 soumis à l'Agence Spatiale Européenne (ESA), nous avons ajouté 10 données acquises entre 2006 et début 2010 aux scènes radar déjà en notre possession. Nous avons utilisé une approche mixte entre interférométrie PSI (Persistent Scatterers Interferometry) et Multi-Baseline, ainsi qu'un modèle de phase pour le déroulement, afin de diminuer le bruit sur le signal radar interférométrique. Cette approche nous permet d'améliorer et de compléter les résultats précédents ainsi que de produire une carte de déplacement spatialement plus étendue. Une carte de vitesse moyenne du déplacement du sol a été produite ainsi que des séries temporelles qui décrivent l'évolution du déplacement de la surface dans le temps. Les nouveaux résultats mettent en évidence une série de subsidences (possiblement liées à des mouvements gravitaires) ainsi qu'une tendance subsidante de la surface du sol dans la baie de Bouillante à hauteur de 3-6 mm par an entre 2003 et 2010. Des études supplémentaires croisées entre différentes disciplines sont nécessaires pour l'interprétation géophysique de ce phénomène; au moment de l'écriture de ce rapport, nous n'avons pas encore établi avec certitude l'origine d'un tel mouvement à l'échelle régionale.

Sommaire

1. Interférométrie Radar différentielle	7
1.1. CARACTÉRISTIQUES DU RADAR INTERFÉROMÉTRIQUE SAR ET DES PRISES DE VUES.....	7
1.2. DONNÉES ET TRAITEMENTS UTILISÉS	9
1.3. LA MÉTHODE MULTI-BASELINE	12
2. Résultats.....	13
2.1. LA CARTE DE VITESSES LINÉAIRES	13
2.2. LES SÉRIES TEMPORELLES	15
3. Conclusion et perspectives	21
4. Bibliographie	22

Liste des illustrations

Figure 1 :	Schéma de la configuration de prises de vues du SAR interférométrique ; $\Delta\phi$, phase interférométrique ; λ , longueur d'onde ; Dist ₁₋₂ , distances cible-satellite (r_1 et r_2 dans la figure).....	8
Figure 2 :	Zone d'étude et empreinte de la scène radar.	10
Figure 3 :	Carte de vitesses lineaires (2003-2010). Le rectangle correspond à la zone couverte par la figure 4.	13
Figure 4 :	Évolution spatiale de la vitesse linéaire entre A et B -baie de Bouillante (taille du pixel = 90 mètres)	14
Figure 5 :	Série p284409 (mètres vs date).	15
Figure 6 :	Série 252005 (mètres vs date).	15
Figure 7 :	Série 243480 (mètres vs date).	16
Figure 8 :	Série 230552 (mètres vs date).	16
Figure 9 :	Série 203987 (mètres vs date).	17
Figure 10 :	Série 195364 (mètres vs date).	17
Figure 11 :	Série 177407 (mètres vs date).	18
Figure 12 :	Série 155870 (mètres vs date).	18
Figure 13 :	Série 93473 La Soufrière (mètre vs date).	19
Figure 14 :	Série 81974 La Soufrière (mètres vs date).....	19
Figure 15 :	Série 267450 "Petit Cul-de-Sac" (mètres vs date).	20
Tableau 1 :	Données ENVISAT ASAR utilisées.....	11

1. Interférométrie Radar différentielle

1.1. CARACTÉRISTIQUES DU RADAR INTERFÉROMÉTRIQUE SAR ET DES PRISES DE VUES

L'interférométrie radar est un moyen de mesure et de détection de la déformation de la surface du sol de plus en plus utilisé dans différents domaines des Sciences de la Terre. Ses principes ont fait l'objet de nombreux travaux depuis les années 1990 (Gabriel *et al.*, 1989 ; Massonnet *et al.*, 1993; Carnec *et al.*, 1996 ; Avallone, 2003). Dans cette étude nous appliquons la technique interférométrique en Guadeloupe, sur le champ géothermique de Bouillante dans le cadre du projet de recherche GEO3BOU financée par le BRGM. On rappellera ici que les caractéristiques principales de l'InSAR utiles à la compréhension de notre analyse des données SAR.

Le radar SAR (Synthetic Aperture Radar) est un système « actif », c'est-à-dire qu'il est sa propre source d'illumination. Il émet des ondes dans le domaine des micro-ondes (ondes hyperfréquences). Une première antenne émet un signal (faisceau d'ondes) qui est ensuite enregistré par une autre antenne (qui est généralement la même dans le cas des radars spatiaux) après sa rétrodiffusion sur la surface terrestre. L'atmosphère et les nuages sont quasi-transparents dans cette gamme de longueurs d'ondes. Les instruments SAR permettent ainsi d'acquérir des images à la fois de jour comme de nuit, indépendamment des conditions météorologiques présentes sur la région observée. La possibilité d'une illumination continue du radar et les caractéristiques orbitales des satellites permettent de distinguer deux points de vues pour les acquisitions: des orbites dites « descendantes », pendant lesquelles le satellite se dirige approximativement du nord-est vers le sud-ouest, et les orbites « montantes », pendant lesquelles le satellite se déplace du sud-est vers le nord-ouest – la zone imagée sera observée suivant une direction plus ou moins opposée suivant le type.

Les instruments satellitaires actuels (satellites ERS, ASAR, RADARSAT...) pointent leurs faisceaux dans une direction approximativement perpendiculaire à sa direction de déplacement. Il est possible qu'une cible puisse être illuminée par plusieurs orbites descendantes et/ou montantes, avec des géométries de prises de vue différentes. Pour les distinguer, on identifie chaque géométrie d'acquisition par deux caractéristiques. La première, la « track », définit la trace du satellite au cours du déplacement sur son orbite. Il existe un nombre fini de ces traces et celles-ci sont répétées régulièrement par le satellite. Le deuxième paramètre, la « frame », est défini par la latitude de la zone ciblée et la taille de l'image. C'est la zone couverte par une image pour une track et une latitude donnée. Un jeu de données compatibles pour les traitements interférométriques devra ainsi être acquis sur des tracks/frames identiques.

Les images issues d'un radar satellitaire consistent en fait en une série temporelle de signaux rétrodiffusés vers le satellite par des réflecteurs élémentaires situés à des endroits différents mais dont les échos arrivent au même instant. L'image est donc échantillonnée en temps d'arrivée, équivalents à des distances cibles-capteur (p. e. Massonnet et Feigl, 1998). Après acquisition du signal, pour pouvoir discriminer les contributions élémentaires de chaque réflecteur, il est nécessaire que le satellite radar illumine sa cible selon une direction oblique (23° pour Envisat).

À partir de la plate-forme, le radar envoie, perpendiculairement (dans le cas des capteurs couramment utilisés) à sa trajectoire, un train d'onde hyperfréquences. Chaque impulsion se propage à la vitesse de la lumière et le temps de propagation est proportionnel à la distance entre l'antenne et la cible. La figure 1 illustre la géométrie de la prise de vue d'un satellite.

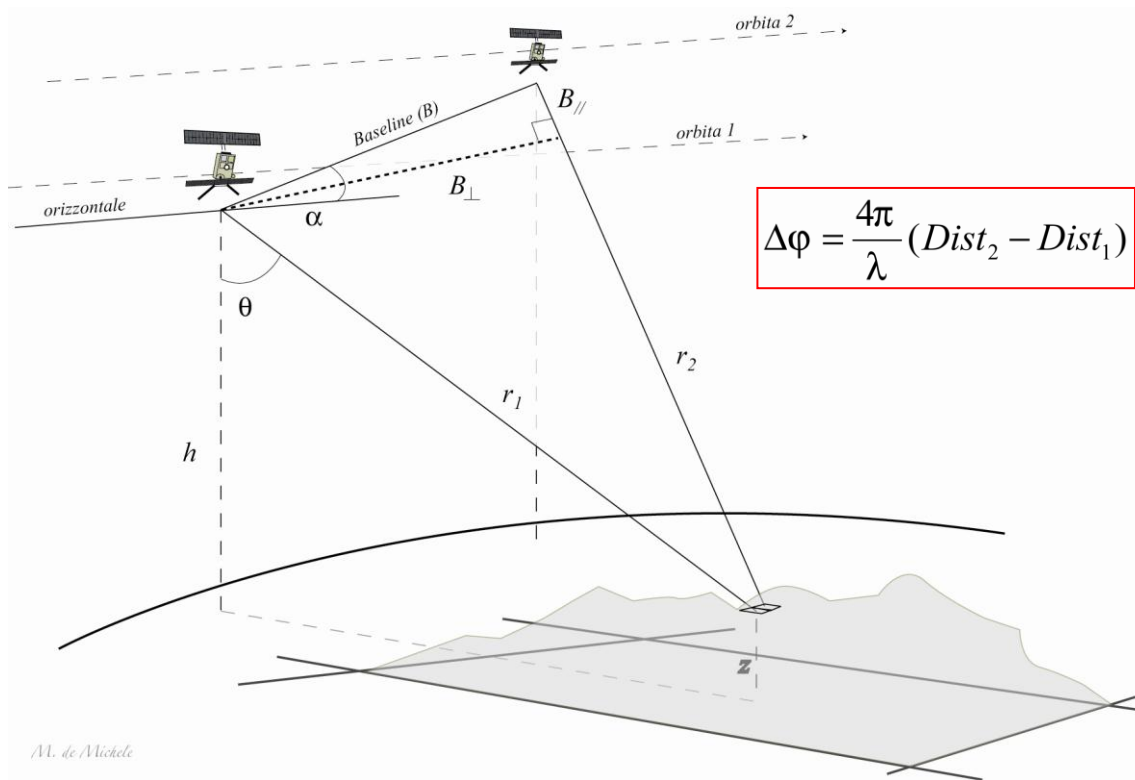


Figure 1 : Schéma de la configuration de prises de vues du SAR interférométrique ; $\Delta\varphi$, phase interférométrique ; λ , longueur d'onde ; $Dist_{1,2}$, distances cible-satellite (r_1 et r_2 dans la figure).

La géométrie conventionnellement utilisée a comme origine la position du satellite. L'axe des ordonnées d'un tel système est nommé « axe des azimuts » et il est parallèle à la direction de déplacement du satellite. L'axe des abscisses dit « axe des distances », correspond à la direction normale à la trajectoire du satellite, celle de la direction de propagation des ondes qui constituent le faisceau. L'image SAR est toutefois échantillonnée en azimut / distance du pixel capteur en ligne de visée. Le signal radar mesuré est un signal complexe à deux composantes: l'amplitude (ou module, parfois fourni sous forme de son carré, l'intensité) et la phase. L'amplitude représente l'énergie du signal qui une fois rétrodiffusée, rejoint l'antenne. Sa valeur dépend de différents facteurs liés à l'instrument (fréquence, polarisation, angle d'incidence, etc.) et à l'interaction entre l'onde radar et le sol (rugosité à l'échelle de la longueur d'onde du radar, propriétés diélectriques du sol). La phase, d'autre part, possède l'information de la distance existante entre le satellite et le pixel illuminé. La phase mesurée à son arrivée au satellite après rétrodiffusion sur le sol est la somme de deux contributions différentes: la contribution liée au trajet aller/retour entre le satellite et la cible (appelée 'phase de trajet'), et la contribution liée au déphasage lors de la réflexion sur la cible (appelée 'phase du pixel'), qui dépend à la fois des propriétés radioélectriques de la cible (réflexion surfacique ou volumique, teneur en humidité) et de la répartition spatiale des réflecteurs élémentaires à l'intérieur du pixel.

L'intérêt de la phase a longtemps été ignoré car cette information, pour une seule prise de vue, a une structure de bruit blanc (du fait de la contribution « phase de pixel »). Cependant, si la phase peut être comparée à un bruit blanc du fait de sa non-continuité spatiale, cela n'est plus vrai dans le temps. Ainsi, deux passages successifs du satellite, en conditions géométriques identiques, produisent la même image de phase avec des différences très faibles. C'est le principe de l'interférométrie.

L'interférométrie radar représente un outil unique pour obtenir une topographie très détaillée d'une zone déterminée et pour détecter les déplacements de terrain relatifs à un phénomène naturel quelconque (glissements de terrain, tremblements de terre, éruptions volcaniques ou à des phénomènes anthropiques comme, par exemple, la subsidence minière). C'est une technique de traitement d'images basée sur la différence de phase, pixel par pixel, de deux images radar acquises dans des conditions de prise de vue similaires afin de s'affranchir de la contribution interne du pixel ('phase du pixel'). Plus précisément, elle utilise leur composante de phase comme une mesure de la distance du sol au satellite, afin de produire une matrice de différence de phase. L'image résultante est couramment appelée « interférogramme ». On obtient, donc, directement les deux produits interférométriques: l'image de différences de phases (ou interférogramme) et l'image du produit des amplitudes des deux images de départ, qui représente son module.

À partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de l'orbite de l'image de référence, encore appelée « maîtresse », une image d'amplitude de topographie est simulée en géométrie radar afin de permettre le recalage entre l'image maîtresse et l'image simulée. Ceci permet, d'une part, le calcul d'une table de conversion permettant l'orthorectification de l'ensemble des produits ; ils sont ainsi adaptés à la géométrie du MNT. D'autre part (en prenant en compte les informations orbitales des deux images), le MNT est utilisé pour produire une simulation d'interférogramme correspondant à la contribution de la topographie à la phase. Dans cette simulation d'interférogramme, les franges (dues au fait que les phases sont mesurées à 2π radians près) définissent les courbes de niveaux du relief de la région étudiée et sont espacées entre elles d'une valeur qui correspond à ce que l'on appelle altitude d'ambiguïté du couple interférométrique. Plus l'altitude d'ambiguïté sera importante, plus ces franges seront espacées. La deuxième image (« esclave ») est ensuite recalée sur l'image maîtresse afin d'obtenir un interférogramme contenant à la fois les contributions de la topographie et de la déformation. La différence entre les deux interférogrammes ainsi produits permet d'isoler la déformation. L'interférogramme différentiel résultant est enfin ortho-rectifié. En pratique, ces étapes ayant été franchies, d'autres artefacts, tels que des effets atmosphériques, peuvent apparaître dans les interférogrammes produits.

1.2. DONNÉES ET TRAITEMENTS UTILISÉS

Nous avons utilisé 34 images du capteur ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) du satellite européen Envisat acquises entre le 19/01/2003 et le 10/01/2010. Les images appartiennent aux track/frame 75/315 d'une orbite ascendante (figure 2, tableau 1). La zone d'étude sera ainsi observée depuis l'Ouest.

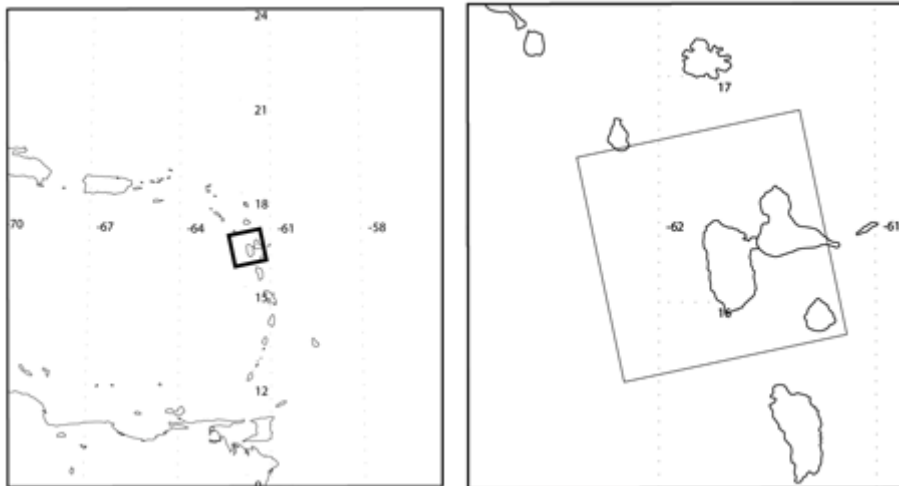


Figure 2 : Zone d'étude et empreinte de la scène radar.

Une des premières étapes du traitement InSAR est la focalisation des images, processus qui consiste à augmenter la résolution spatiale de la donnée à travers la compression du signal modulé en distance et en direction d'azimut. Une fois les images focalisés, on procède à une opération de co-registrement - qui consiste à chercher les coefficients de polynômes de recalage entre une image de référence (la première en temps, par exemple) et les autres et ajuster ainsi les images à une même géométrie. Ce processus permet la superposition pixel par pixel de toutes les images du jeu de données. C'est après cette étape que l'on s'intéresse à la phase des images radar pour produire les interférogrammes.

Dans une étude précédente, nous avons calculé toutes les combinaisons interférométriques possibles, c'est-à-dire 123 interférogrammes couvrant l'ensemble de l'île, permettant - suite à l'analyse par visualisation - de mettre en évidence d'éventuels biais sur le signal (notamment les biais dus à la présence de la vapeur d'eau troposphérique). Dans cette étude, nous reproduisons la démarche de calcul en ajoutant les nouvelles données. Ainsi, on calcule tous les couples interférométriques possibles à partir de 34 données SAR. Cette méthodologie permet d'estimer l'évolution temporelle de la zone d'étude vis-à-vis du signal radar. Nous aurons également une estimation à grande échelle des mouvements éventuels sur la surface de l'île, ce qui permettra de planifier l'étude interférométrique par la suite. Nous modélisons la composante topographique à la phase interférométrique de chaque interférogramme à partir d'un modèle Numérique de Terrain issu de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM – Farr *et al.*, 2004) à environ 90m de résolution. La composante topographique est ensuite soustraite de tous les interférogrammes. Par la suite, nous ne décidons de garder que les interférogrammes différentiels caractérisés par une courte baseline perpendiculaire (facteur qui détermine la sensibilité du signal à la topographie). Ainsi, nous allons intrinsèquement utiliser les interférogrammes qui ne sont pas (ou peu) affectés par la topographie. Nous fixons le seuil de baselines perpendiculaires à 150 mètres. Ainsi, on calcule 65 interférogrammes différentiels à courte baseline.

L'information contenue dans ces interférogrammes est connue « modulo 2π » ainsi nous devons procéder à une opération dite de « déroulement de phase ». Cette opération est importante pour obtenir une information correcte sur le déplacement de la surface mais aussi car des erreurs de déroulement peuvent se propager à l'ensemble de l'interférogramme. Nous utilisons un filtrage de Goldstein afin de réduire le bruit sur

la phase et une méthode de déroulement basée sur un algorithme dit « minimum cost flow » (Costantini and Rosen, 1999 ; Werner *et al.*, 2002) en utilisant l'interferogramme sous-échantillonné comme modèle d'entrée. Pour chaque groupe de pixels, l'algorithme cherchera à être toujours entre $+\pi$ et $-\pi$ du modèle. Ce traitement limite les erreurs de déroulement et nous permet d'exploiter l'information InSAR sur des zones où la perte de cohérence affectait l'information de phase dans l'étude précédente (on rappellera que la cohérence est un indicateur sur la qualité de l'information du pixel calculé lors de la production de l'interférogramme).

ID	DATE	TRACK/FRAME	PASS	SWATH
1	19/01/2003	75/312	A	I2
2	23/02/2003	75/312	A	I2
3	13/07/2003	75/312	A	I2
4	17/08/2003	75/312	A	I2
5	21/09/2003	75/312	A	I2
6	18/04/2004	75/312	A	I2
7	27/06/2004	75/312	A	I2
8	01/08/2004	75/312	A	I2
9	14/11/2004	75/312	A	I2
10	19/12/2004	75/312	A	I2
11	23/01/2005	75/312	A	I2
12	27/02/2005	75/312	A	I2
13	08/05/2005	75/312	A	I2
14	12/06/2005	75/312	A	I2
15	17/07/2005	75/312	A	I2
16	21/08/2005	75/312	A	I2
17	25/09/2005	75/312	A	I2
18	30/10/2005	75/312	A	I2
19	04/12/2005	75/312	A	I2
20	08/01/2006	75/312	A	I2
21	12/02/2006	75/312	A	I2
22	19/03/2006	75/312	A	I2
23	23/04/2006	75/312	A	I2
24	28/05/2006	75/312	A	I2
25	02/07/2006	75/312	A	I2
26	19/11/2006	75/312	A	I2
27	24/12/2006	75/312	A	I2
28	28/01/2007	75/312	A	I2
29	04/11/2007	75/312	A	I2
30	09/12/2007	75/312	A	I2
31	27/04/2008	75/312	A	I2
32	10/08/2008	75/312	A	I2
33	23/11/2008	75/312	A	I2
34	17/05/2009	75/312	A	I2

Tableau 1. Données ENVISAT ASAR utilisées.

Comme un signal résiduel dû à la topographie peut encore affecter les interferogrammes, nous calculons les coefficients d'une régression linéaire de la phase résiduelle par rapport à l'altitude dans les interferogrammes déroulés. Ainsi nous générons un modèle de phase interférométrique dépendant de la topographie que, par la suite, nous soustrairons à chaque interferogramme correspondant. Cette méthode permet d'améliorer le signal InSAR (vis-à-vis de la recherche du déplacement du sol)

et aussi de corriger d'éventuels résidus de phase « troposphérique » corrélés à la topographie.

1.3. LA MÉTHODE MULTI-BASELINE

Pour exploiter toute la base de données InSAR ainsi créée, nous décidons d'utiliser une méthode de traitement connu sous le nom de Small Baseline Subset ou SBAS (Berardino *et al.*, 2003). Cette méthode, conçue par Usai *et al.* (1999) et développée dans un certain nombre d'études (Lundgren *et al.*, 2001 ; Usai, 2003 ; Le Mouelic *et al.*, 2005 ; Lundgren *et al.*, 2009) est implémentée dans la chaîne d'outils GAMMA (de Gamma Remote Sensing AG) sous le nom de multi-Baseline (MB –Wegmuller *et al.*, 2009).

La méthode multi-Baseline (MB) utilise une méthode basée sur les moindres carrés pondérés pour générer une série temporelle de phases de déplacement déroulées à partir d'une séquence de données d'entrée InSAR déroulées et « multi référence » principalement dues à la déformation du sol. Autrement dit, il s'agit à partir des interférogrammes existants, de reconstituer une série de pseudo-interférogrammes ayant tous comme image maitresse celle correspondant à la première date de la série et comme images esclaves, celles correspondant à chacune des dates d'acquisition. L'idée implicite à la méthode est que l'interférogramme entre les dates T_j et T_k est la différence des interférogrammes entre T_0 et T_k et T_0 et T_j : si l'on dispose de suffisamment d'interférogrammes au départ on peut ainsi reconstituer la série même si l'interférogramme entre T_0 et T_k n'a pas été produit en raison (par exemple) d'une cohérence trop faible (Usai, 2003). Les pixels pour lesquels la cohérence du signal est égale à zéro (zones à couverture végétale importante, par exemple), ne seront toutefois pas retenus par l'algorithme (on notera que l'on a sélectionné les interférogrammes ayant une cohérence globale acceptable).

Par la suite, nous utilisons les séries temporelles de phases déroulées obtenues pour produire une carte de vitesse linéaire que l'on calcule à partir d'une régression linéaire sur chaque pixel de la donnée produite et sur la durée de la série. En faisant l'hypothèse que d'éventuelles contributions atmosphériques à la phase interférométrique évoluent d'une façon non-linéaire avec le temps, la carte de vitesse linéaire obtenue est peu affectée par les composantes (biais) atmosphériques affectant chacune des acquisitions radar.

La dernière étape du traitement consiste à projeter la donnée radar dans un système cartographique connu et à supprimer les distorsions induites par le relief topographique sur la donnée radar. Cette étape est conduite à l'aide du Modèle Numérique de Terrain SRTM (pas de 90 mètres, WGS84).

2. Résultats

2.1. LA CARTE DE VITESSES LINÉAIRES

Nous avons produit deux types de résultats. Une carte de vitesses linéaires mesurées le long de la ligne de visée du satellite (23° sur la verticale) qui, on le rappelle, pointe le sol depuis une orbite montante, inclinée à $\sim 98^\circ$ par rapport à l'équateur et donc quasiment Nord-Sud (figure 3).

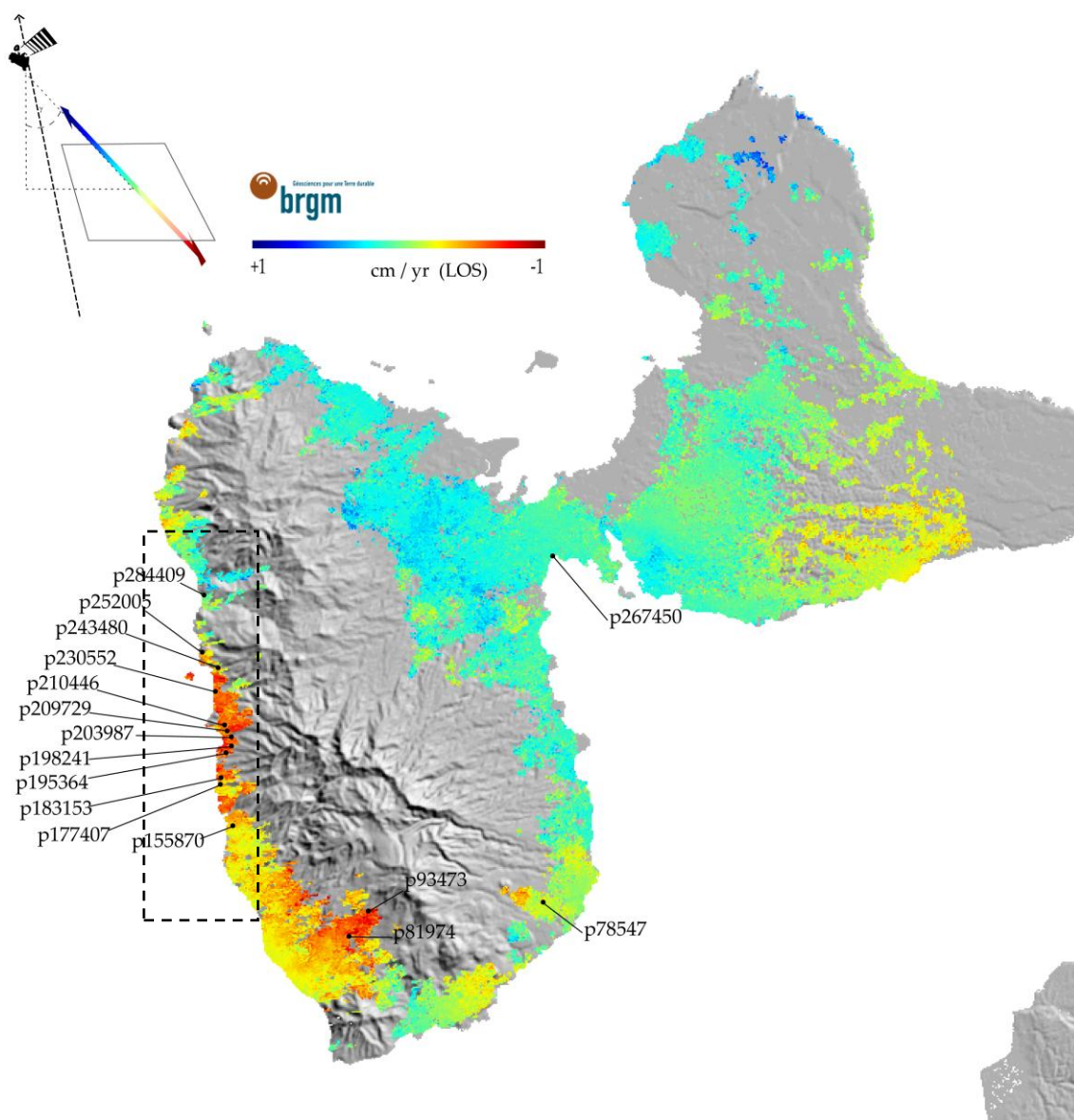


Figure 3. Carte de vitesses linéaires (2003-2010).
Le rectangle correspond à la zone couverte par la figure 4.

En bref, nous mesurons les éloignements et rapprochements du ou vers le satellite. Ces mouvements sont visualisés sous forme de code-couleur dans lequel le rouge

représenterait un éloignement de la cible radar du satellite et le bleu représenterait un rapprochement de la cible radar vers le satellite. Vu la configuration du satellite et la géométrie d'acquisition de la donnée, nous pouvons dire que le mouvement du sol mis en évidence dans la carte de vitesses linéaires (figure 3) peut être dû à des mouvements verticaux du sol de type subsidence (rouge) ou gonflement (bleu) ou bien la projection de mouvement horizontaux sur la ligne de visée.

Ainsi, il faut rappeler que des mouvements horizontaux importants vers l'est pourraient être confondus à des mouvements de subsidence faibles. Mais également, des mouvements horizontaux importants vers l'ouest pourraient être confondus à des mouvements de gonflement faible. Pour donner une idée du ratio, on distingue deux cas, en considérant un radar du type ASAR (utilisé dans cette étude) : 1) un mouvement de 3 mm/an (par exemple) en ligne de visée (LOS) pourrait être produit par un mouvement purement vertical de 3,26 mm/an ; 2) un mouvement de 3 mm/an (par exemple) en LOS pourrait être produit par un mouvement purement horizontal est-ouest de 7,69 mm/an. Toutes autres combinaisons parmi les différentes composantes du déplacement du sol sont possibles et elles donneraient des mesures LOS intermédiaires.

À partir de la carte de vitesses linéaires de la figure 3, on observe qu'un ensemble de réflecteurs radar localisés sur 20 km autour de la baie de Bouillante montre une tendance à s'éloigner du capteur ASAR, à environ 3-6 mm/an (voir figure 4). Son interprétation en terme géophysique n'est pas encore établie.

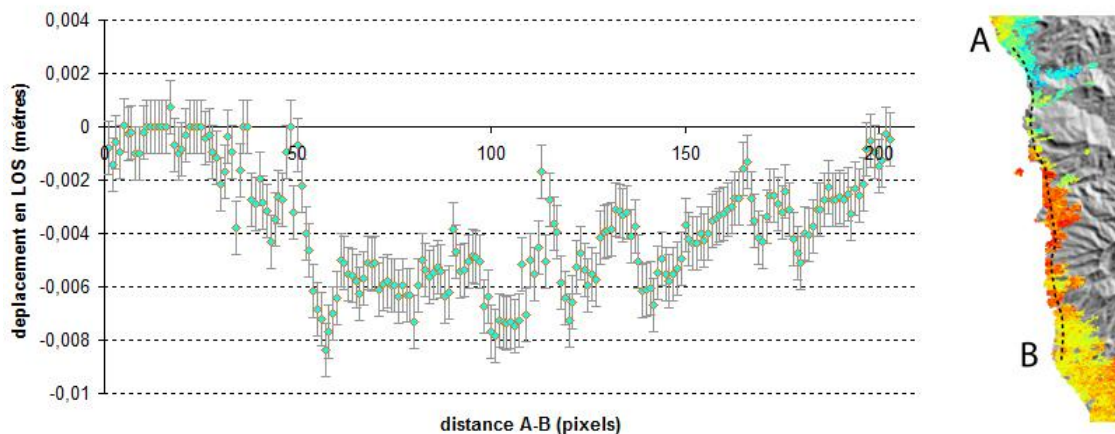


Figure 4 : Évolution spatiale de la vitesse linéaire entre A et B -baie de Bouillante (taille du pixel = 90 mètres)

On note aussi d'autres phénomènes d'éloignement du satellite, notamment sur les pentes de La Soufrière ainsi que d'une façon moins étendue en d'autres sites de l'île qui, en première approximation, pourraient être liés à des glissements gravitaires lents.

Par ailleurs, des biais à grande longueur d'onde (35-45 km) peuvent se superposer à la carte de vitesse.

2.2. LES SÉRIES TEMPORELLES

Le deuxième produit que nous obtenons est un ensemble de séries temporelles. Celles-ci visent à décrire l'évolution du déplacement d'un groupe de pixels dans le temps. Nous avons sélectionné 12 séries temporelles couvrant la côte ouest de la Guadeloupe, 3 séries temporelles couvrant le versant du volcan La Soufrière, une série temporelle sur la côte ouest (figure 3). Le lecteur peut se référer à la figure 3 pour localiser les séries temporelles.

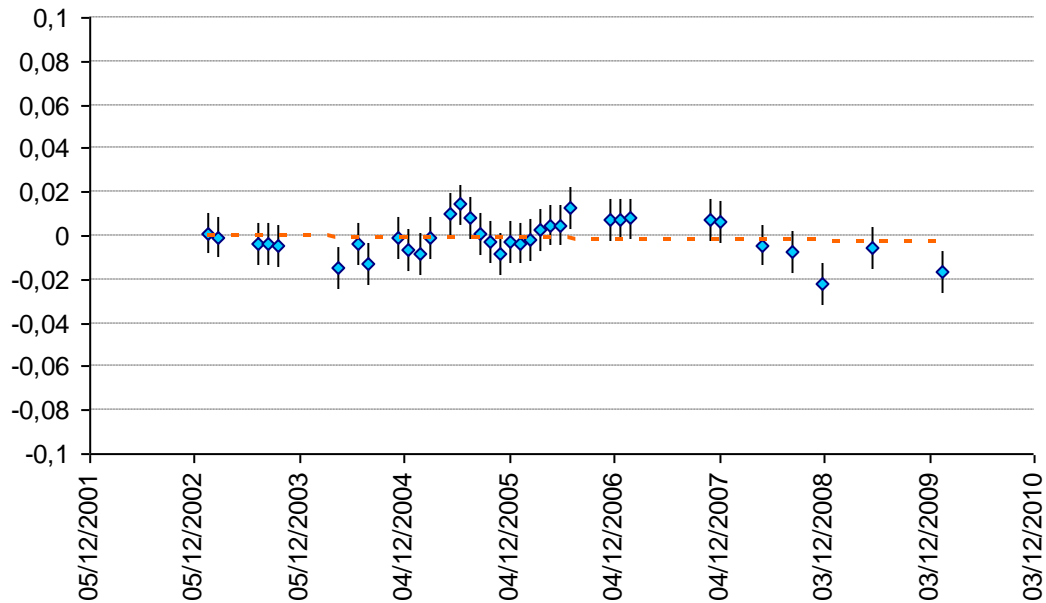


Figure 5 : Série p284409 (mètres vs date).

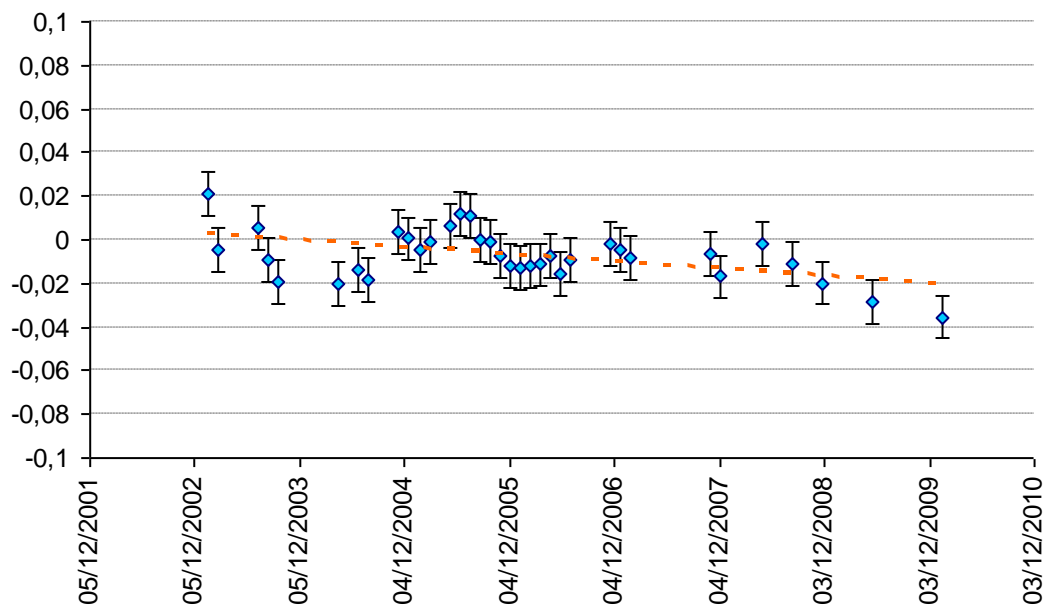


Figure 6 : Série 252005 (mètres vs date).

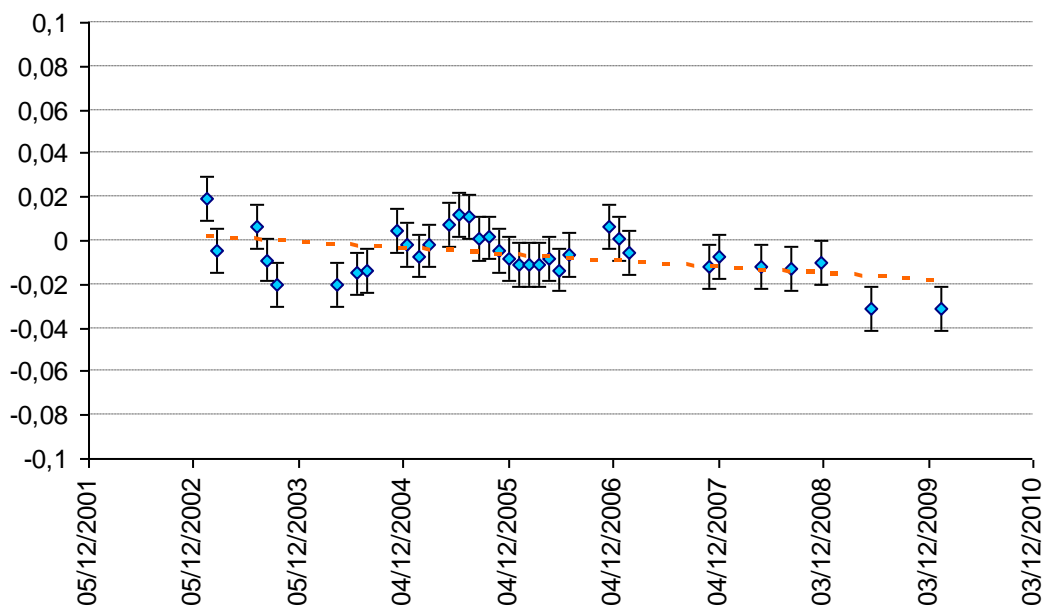


Figure 7 : Série 243480 (mètres vs date).

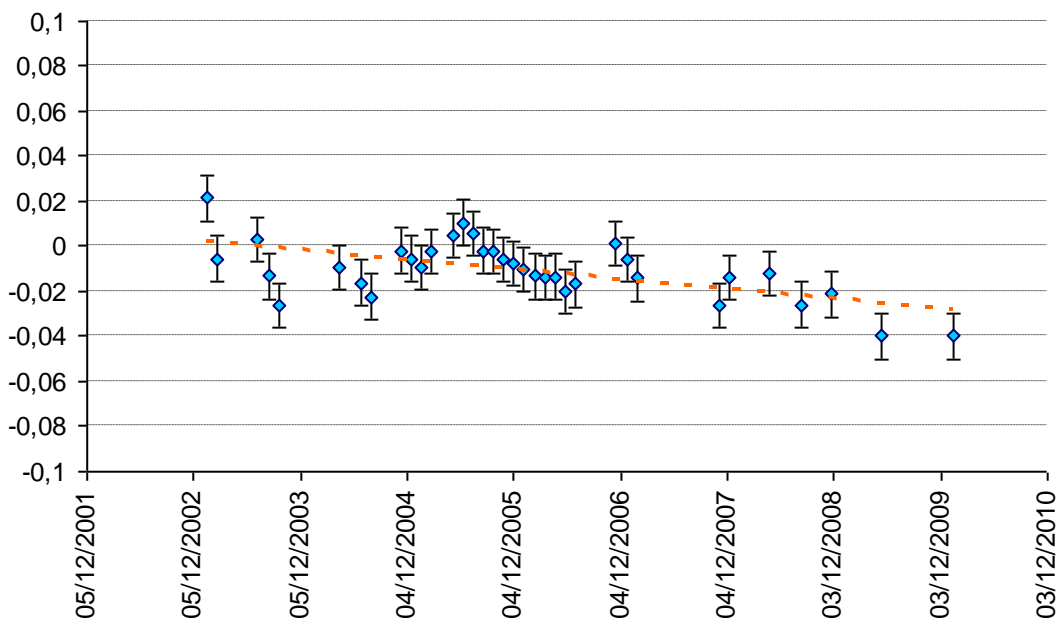


Figure 8 : Série 230552 (mètres vs date).

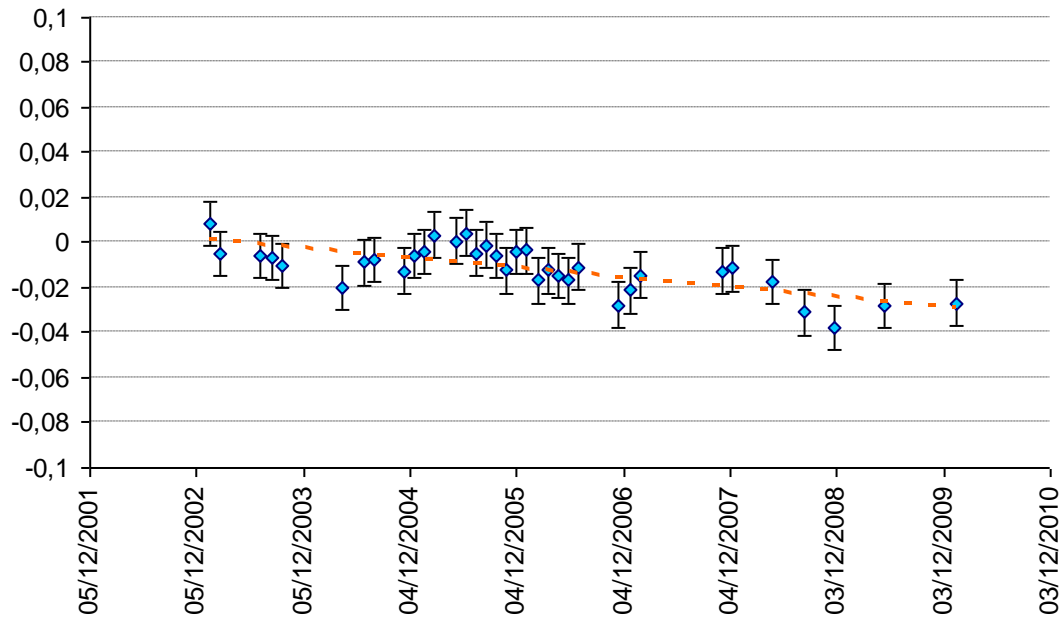


Figure 9 : Série 203987 (mètres vs date).

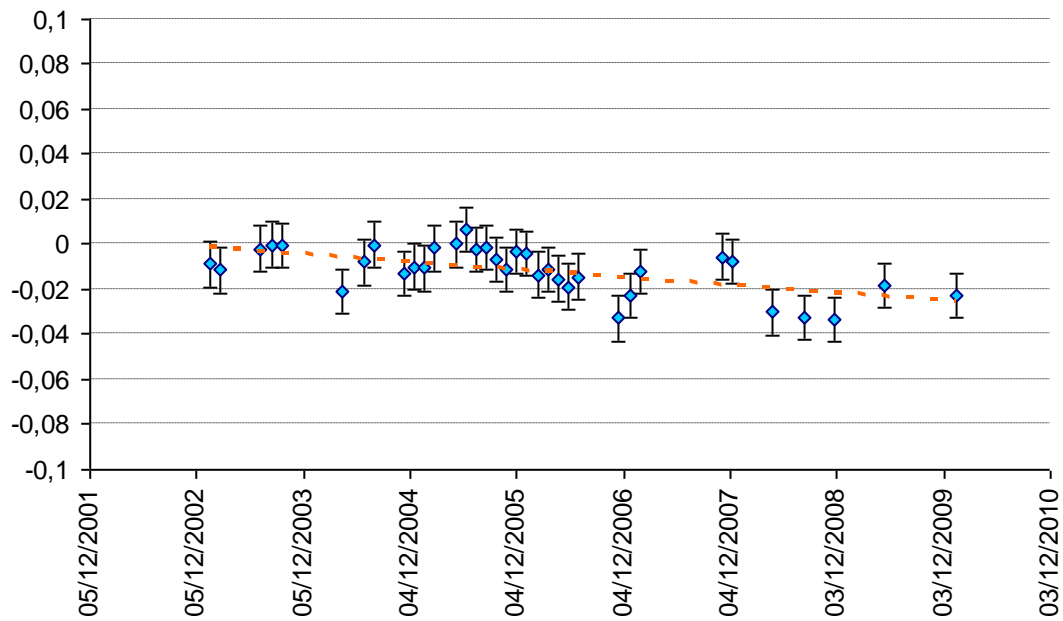


Figure 10 : Série 195364 (mètres vs date).

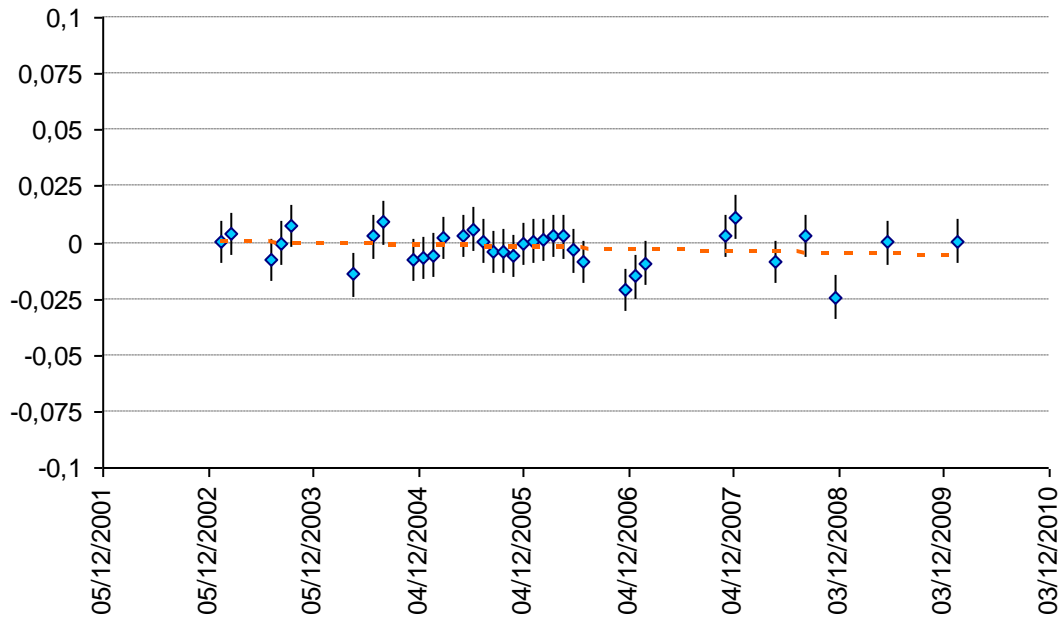


Figure 11 : Série 177407 (mètres vs date).

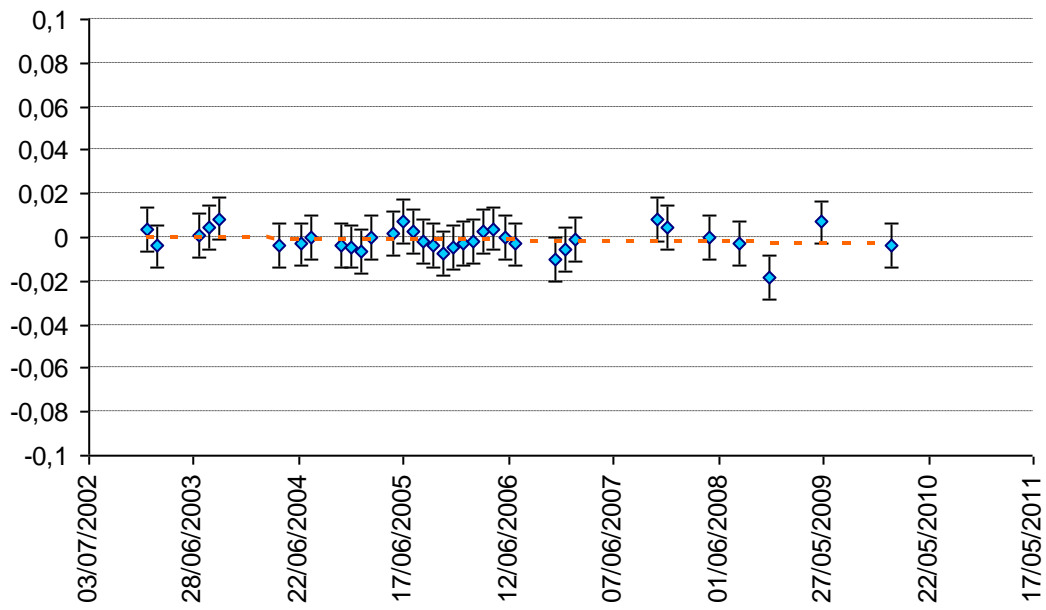


Figure 12 : Série 155870 (mètres vs date).

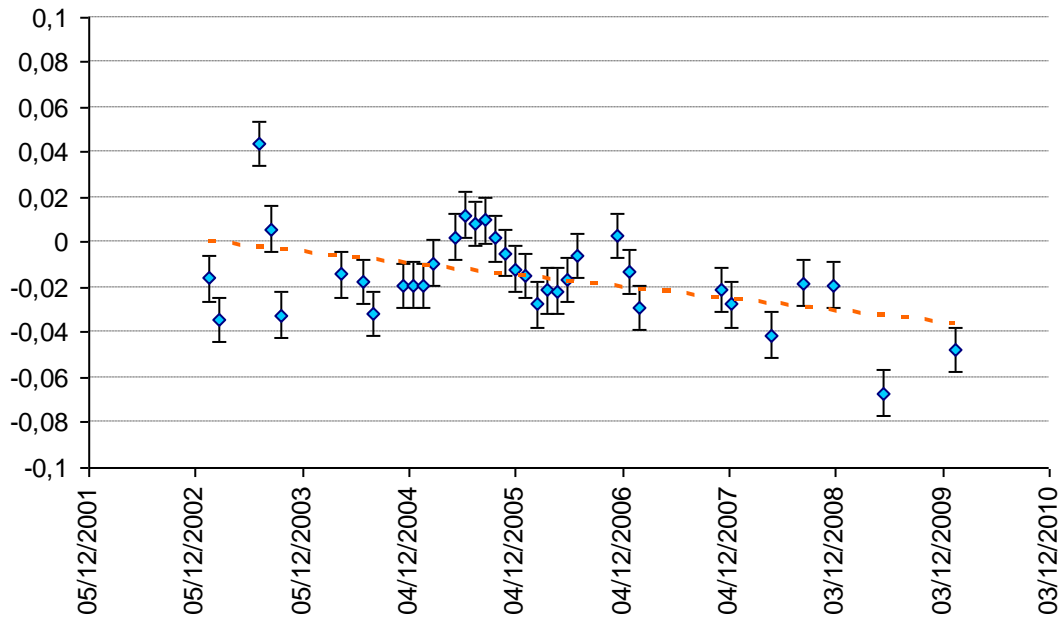


Figure 13 : Série 93473 La Soufrière (mètre vs date).

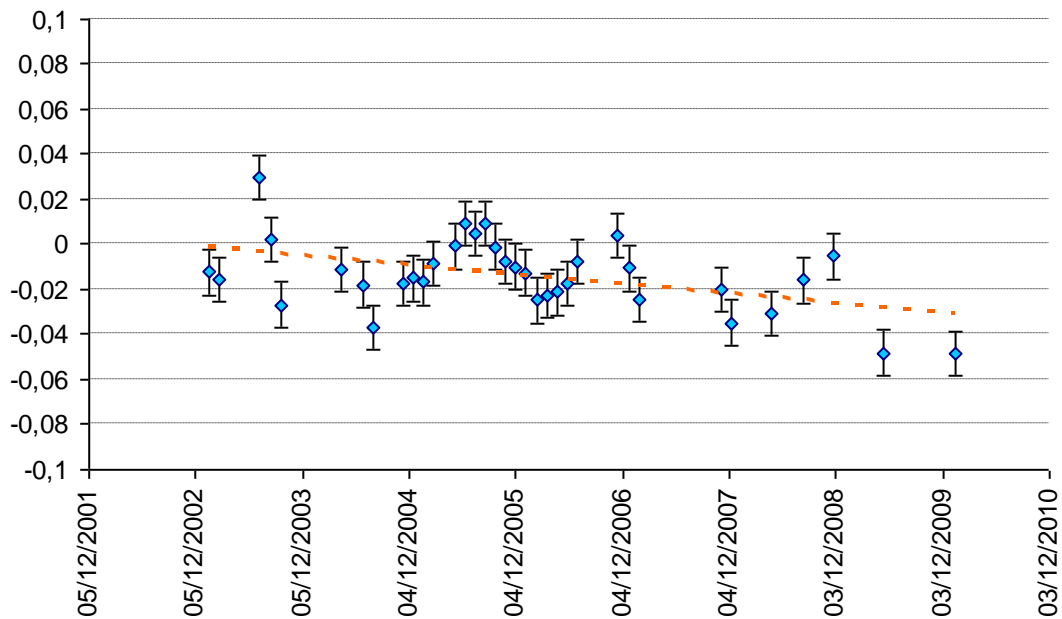


Figure 14 : Série 81974 La Soufrière (mètres vs date).

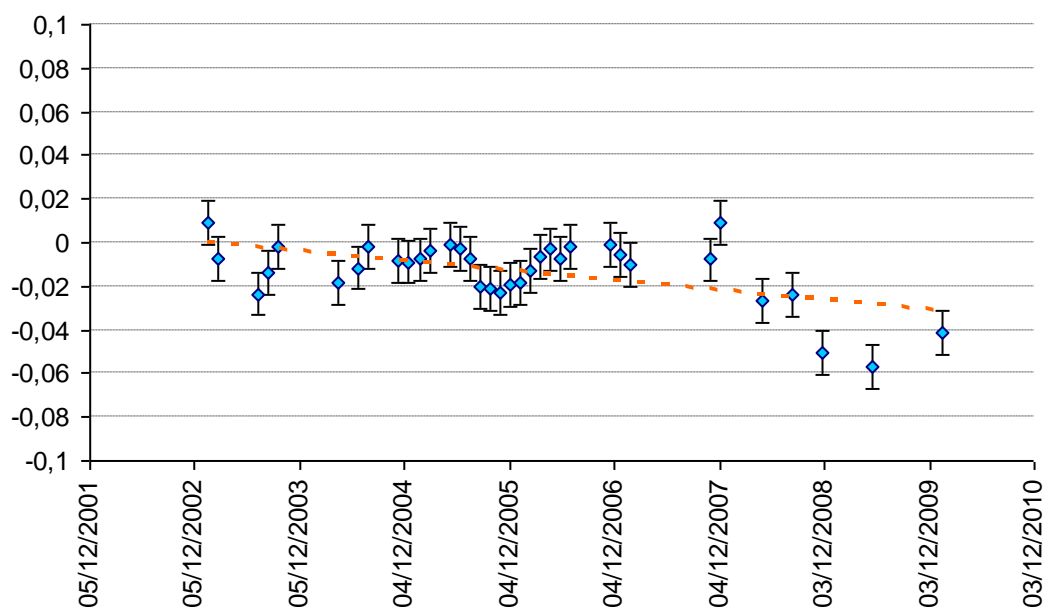


Figure 15 : Série 267450 "Petit Cul-de-Sac" (mètres vs date).

3. Conclusion et perspectives

Au cours de cette étude, nous avons analysé 35 scènes radar acquises entre 2003 et 2010 par le capteur ASAR monté sur la plateforme ENVISAT de l'Agence Spatiale Européenne. Ces données ont été traitées dans le cadre du projet DR « Geo3BOU » et sont une contribution (sous forme de données) de la part de l'ESA dans le cadre d'un projet « Category-1 » dont l'auteur est co-PI (Principal Investigator) avec Raucoules Daniel et Hubert Fabriol.

Le traitement multi-temporel de la donnée, effectué à l'aide de l'outil GAMMA, nous a permis d'extraire deux produits qui mettent en évidence les déplacements du sol sur l'île de Guadeloupe et son évolution au cours de la période d'observation (2003-2010). La carte de vitesse linéaire (figure 3) met en évidence un mouvement du sol autour de la baie de Bouillante de l'ordre de 3-6 mm/an sur la période d'observation. En analysant les séries temporelles sur cette même zone, nous constatons qu'il s'agit d'un mouvement non linéaire dans le temps et qui probablement est le reflet de la juxtaposition de plusieurs phénomènes dont la nature et l'origine géophysique sont, au moment de l'écriture de ce rapport, encore en phase d'investigation. Nous ne pouvons pas exclure *a priori* des origines du type tectonique liées au système de failles actives dans la région et au contexte géodynamique de l'île. Cette hypothèse, ainsi que l'hypothèse d'un éventuel lien entre le déplacement en surface et l'activité géothermale en profondeur, restent à vérifier. Cette vérification fera l'objet d'une étude future qui doit être multidisciplinaire dans son approche à la compréhension des phénomènes derrière les présentes observations.

Dans la zone de pentes de La Soufrière, nous signalons que le traitement InSAR nous permet de mettre en évidence des mouvements de surface (2-5 mm/an) probablement dus à des phénomènes de glissements gravitaires lents. Ces observations ainsi que l'aléa potentiel qui en découle doivent être vérifiés sur le terrain. Les données objets de cette étude, ainsi que les résultats produits, sont mis à disposition du Service Géologique Régional de la Guadeloupe avec qui on réalisera la suite des interprétations.

4. Bibliographie

Avallone A. (2003) - Analyse de dix ans de déformation du rift de Corinthe (Grèce) par géodésie spatiale, thèse de l'Institut de Physique du Globe de Paris, soutenue le 27/07/2003.

Berardino P., Fornaro G., Lanari R. and Sansosti E. (2002) - A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, p. 2375-2383.

Carnec. C., Massonnet, D. and King C. (1996) - Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent, *Geophy. Res.*, Vol. 23, No. 24, p. 3579-3582.

Costantini M., Rosen P.A. (1999) - A generalized phase unwrapping approach for sparse data, *Proceedings of IGARSS'99, Hamburg*, 28 June-2 July, p. 267-269.

de Michele M., Raucoules D. (2007) - Traitements InSAR sur le champ géothermique du Bouillante, Guadeloupe, sur la période 2003/2006. BRGM RP 55941 FR, 40 pages.

Farr T. G., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Rosen P., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. (2004) - The Shuttle Radar Topography Mission, v. 45, *Reviews of Geophysics* 45, doi: 1029/2005RG000183.

Gabriel A.K., Goldstain R.M., Zebker H.A. (1989) - Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *J. Geophysical Res.*, 94 (B7).

Le Mouélic, S., Raucoules, D., Carnec, C., King, C., (2005). A least squares adjustment of multi-temporal InSAR data : Application to the ground deformation of Paris. *Photogram. Eng. Rem. S.* 71, p. 197-204.

Lundgren P., Usai S., Sansosti E., Lanari R., Tesauro M., Fornaro G., Berardino P. (2001) - Modeling surface deformation observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera, *J. Geophys. Res.*, 106, 19,355-19,366.

Lundgren, P., E. A. Hetland, Z. Liu, Fielding, E. J., (2009), Southern San Andreas-San Jacinto fault system slip rates estimated from earthquake cycle models constrained by GPS and interferometric synthetic aperture radar observations, *J. Geophys. Res.*, 114, B02403, doi:10.1029/2008JB005996.

Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peitzer G., Feigl K. and Rabaute T. (1993) - The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, Vol. 364, No. 8, p. 138-142.

Massonnet D., Feigl K. (1998) - Radar Interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Review of Geophysics*, Vol 36, No 4, p. 441-500.

Usai S. (2003) - A least squares database approach for SAR interferometric data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, p. 753-760.

Werner C., Wegmüller U. and Strozzi T. (2002) - Processing strategies for phase unwrapping for InSAR applications, Proceedings of EUSAR Conference, 04–06 June, Cologne, Germany, unpaginated CDROM.

Wegmüller U., Werner C.L., Santoro M. (2009) - Motion monitoring for Etna using ALOS PALSAR time series, Proceedings of the ALOS PI Symposium 2009, 9-13 Nov 2009, Hawaii.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

Service Risques Naturels et Sécurité du Stockage de CO2

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34