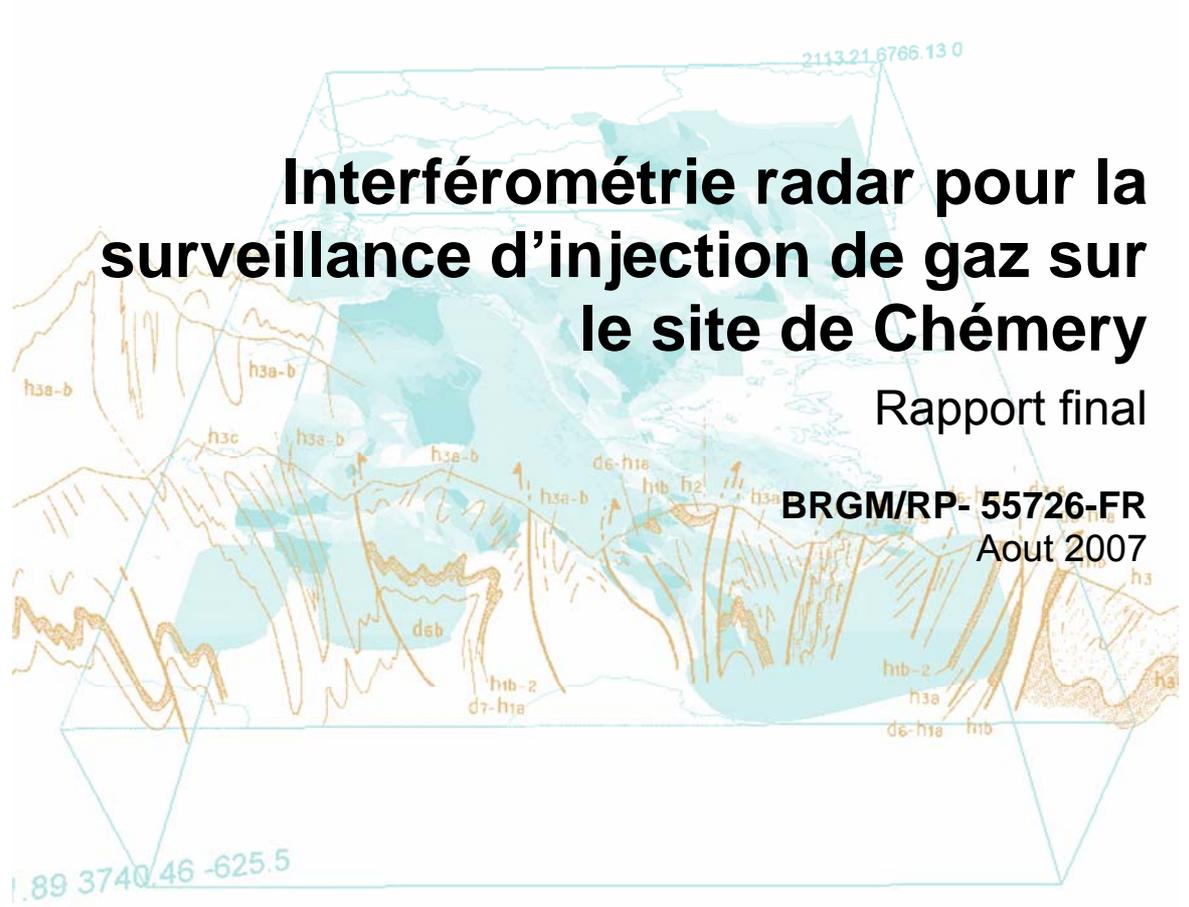


Document public



**Document public**

# **Interférométrie radar pour la surveillance d'injection de gaz sur le site de Chémery**

**Rapport final**

**BRGM/RP- 55726-FR**  
Aout 2007

**G. Le Cozannet ,D. Raucoules**

<p><b>Vérificateur :</b></p> <p>Nom :</p> <p>Date :</p> <p>Signature :</p> <p>(ou original signé par :)</p>
---

<p><b>Approbateur :</b></p> <p>Nom :</p> <p>Date :</p> <p>Signature :</p> <p>(ou original signé par :)</p>
--

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

1

Mots clés : Stockage de Gaz, interférométrie radar

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

Le Cozannet G., Raucoules D. (2007), Interférométrie radar pour la surveillance d'injection de gaz sur le site de Chémery, rapport BRGM/RP- 55726-FR

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Les deux sites de Chéméry et de Soings en Sologne sont utilisés par Gaz de France pour stocker du gaz dans des nappes aquifères. Ces sites seront utilisés comme analogues d'un stockage de CO<sub>2</sub>.

Effectuée dans le cadre du projet GeoCarbone MONITORING soutenu par l'ANR, cette étude a pour but d'évaluer le potentiel de l'interférométrie radar (conventionnelle et PSI) pour le suivi des déformations du sol induites par l'injection de gaz sur ces sites.

L'étude montre que compte tenu de l'environnement du site et de la faible amplitude de la déformation produite, les techniques interférométriques semblent actuellement peu adaptées à ce type de suivi.



# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>9</b>
1.1. OBJECTIFS.....	9
1.2. CARACTERISATION DU SITE .....	9
1.3. CONTEXTE DEFORMANT .....	11
1.4. AUTRES SITES DE STOCKAGE DE GAZ .....	12
<b>2. La technique d'Interférométrie Radar .....</b>	<b>15</b>
2.1. PRINCIPE DE LA METHODE D'INTERFEROMETRIE RADAR.....	15
2.1.1. Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO, ou SAR).....	15
2.1.2. L'interférométrie radar .....	15
2.1.3. La technique des réflecteurs persistants (PSI – Persistent Scaterrers Interferometry) .....	17
2.2. LES DONNEES .....	18
2.3. TRAITEMENT INTERFEROMETRIQUE RADAR .....	19
<b>3. Résultats et interprétation .....</b>	<b>21</b>
3.1. TRAITEMENT INTERFEROMETRIQUE PAR RAPPORT A UNE IMAGE MASTER .....	21
3.2. APPLICABILITE DE LA TECHNIQUE PSI .....	25
<b>4. Test d'interférométrie radar sur réflecteurs persistants .....</b>	<b>27</b>
4.1. TECHNIQUE PSI .....	27
4.2. RESULTATS .....	28

4.2.1. Sélection des points.....	28
<b>5. Conclusions et perspectives .....</b>	<b>43</b>
<b>6. Bibliographie.....</b>	<b>45</b>

## Liste des illustrations

Figure 1: localisation de la zone d'étude .....	10
Figure 2 : zones d'étude. ....	11
Figure 3: Autres sites de stockages de gaz dans des aquifères .....	13
Figure 4: principe simplifié de l'interférométrie radar .....	17
Figure 5: phases, intensité, cohérence,.....	20
Figure 6: Interférogrammes pour les scènes acquises du 22 juillet 1995 au 6 juillet 1996, .....	22
Figure 7: Interférogrammes pour les scènes acquises du 22 juillet 1995 au 6 juillet 1996, .....	23
Figure 8: Interférogrammes obtenus pour deux couples d'images acquises à 35 jours d'intervalle..	24
Figure 9: Recherche de candidats PS.....	25
Figure 10: PS retenus.....	29
Figure 11: position des PS sur la zone de Soings.....	32
Figure 12: point A .....	33
Figure 13 : point B .....	34
Figure 14: point C .....	35
Figure 15: position des PS sur la zone de Chéméry. ....	37
Figure 16: point A .....	38
Figure 17: point B .....	39
Figure 18: Point A.....	41



# 1. Introduction

## 1.1. OBJECTIFS

L'interférométrie radar est un outil permettant de quantifier et cartographier des déformations de la surface du sol. A partir des capteurs embarqués sur les satellites existants (par exemple les capteurs en bande C des satellites ERS ou RADARSAT), elle est particulièrement adaptée au suivi de déformations d'étendues hectométriques et d'amplitude allant du centimètre au décimètre entre deux acquisitions. Des méthodes de traitement plus performantes (réflecteurs persistants ou PSI), mais intégrant un grand nombre de données, atteignent des précisions proche du mm/an.

Dans le cadre du projet GéoCarbone MONITORING (soutenu par l'ANR) dont le but est d'apporter des réponses aux besoins du contrôle de la sécurité des installations ainsi que des éléments quantitatifs sur le bilan de matière, cette étude vise à tester la faisabilité de la mesure par interférométrie radar de la déformation du sol liée à l'injection de CO<sub>2</sub>.

Du fait de l'absence de site pilote d'injection de CO<sub>2</sub> en France, un site de stockage saisonnier de gaz naturel a été choisi, celui de Chéméry.

Ce site présente l'avantage d'être bien connu du point de vue géologique et d'être affecté par des cycles d'injection/extraction réguliers. Le suivi d'éventuelles déformations de surface induites par le stockage souterrain peut apporter des informations sur l'évolution géomécanique du réservoir et des couches environnantes, ainsi que sur l'emprise effective de la zone de stockage

## 1.2. CARACTERISATION DU SITE

Le secteur d'étude est situé en Sologne dans le département du Loir et Cher (41), à une vingtaine de kilomètres au Sud-Est de Blois. Il couvre notamment les communes de Soings en Sologne et Chéméry.

Dans les sites de Chéméry et de Soings en Sologne, le gaz y est stocké dans des nappes aquifères. Le processus de stockage revient donc à reconstituer l'équivalent géologique d'un gisement naturel. Il consiste à injecter le gaz dans une couche souterraine de roche poreuse et perméable contenant à l'origine de l'eau, recouverte d'une couche imperméable formant une couverture étanche, le tout ayant une forme de dôme. Pour des raisons de perméabilité des terrains et de conditions d'exploitation, une quantité de l'ordre de la moitié du gaz stocké reste à demeure dans le stockage. Les contraintes géologiques ne permettant qu'un soutirage en continu assez peu flexible, ces stocks sont utilisés tout au long de l'hiver.

Le site de Chéméry a été mis en service en 1968. Le gaz est stocké à une profondeur de 1085m. Le site de Soings en Sologne a été mis en service en 1981. Le gaz est stocké à une profondeur de 1140m.

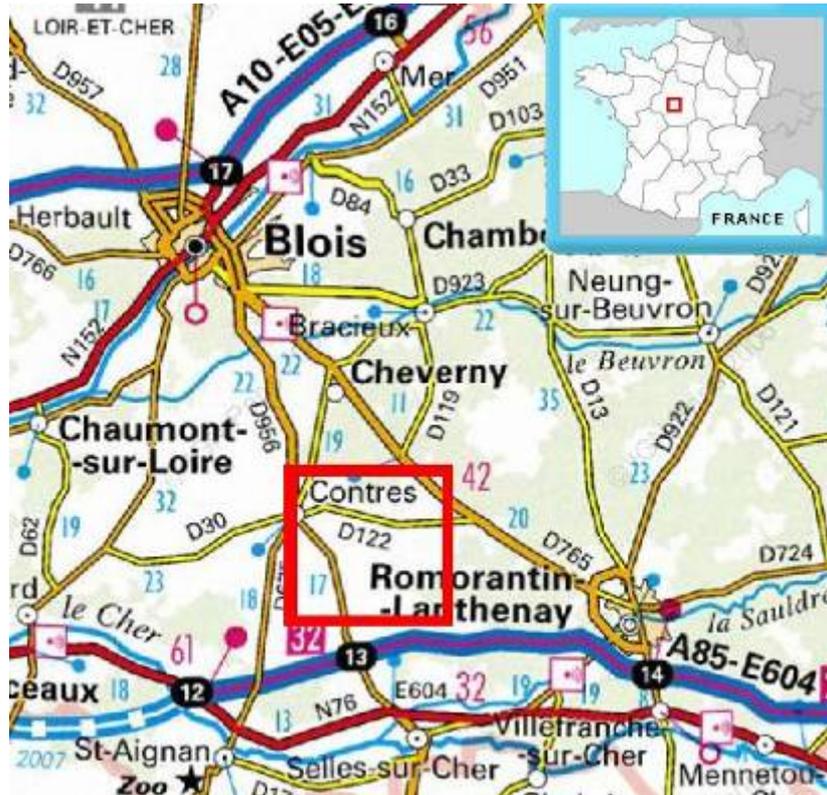


Figure 1: localisation de la zone d'étude - Source: [www.geoportail.fr](http://www.geoportail.fr)

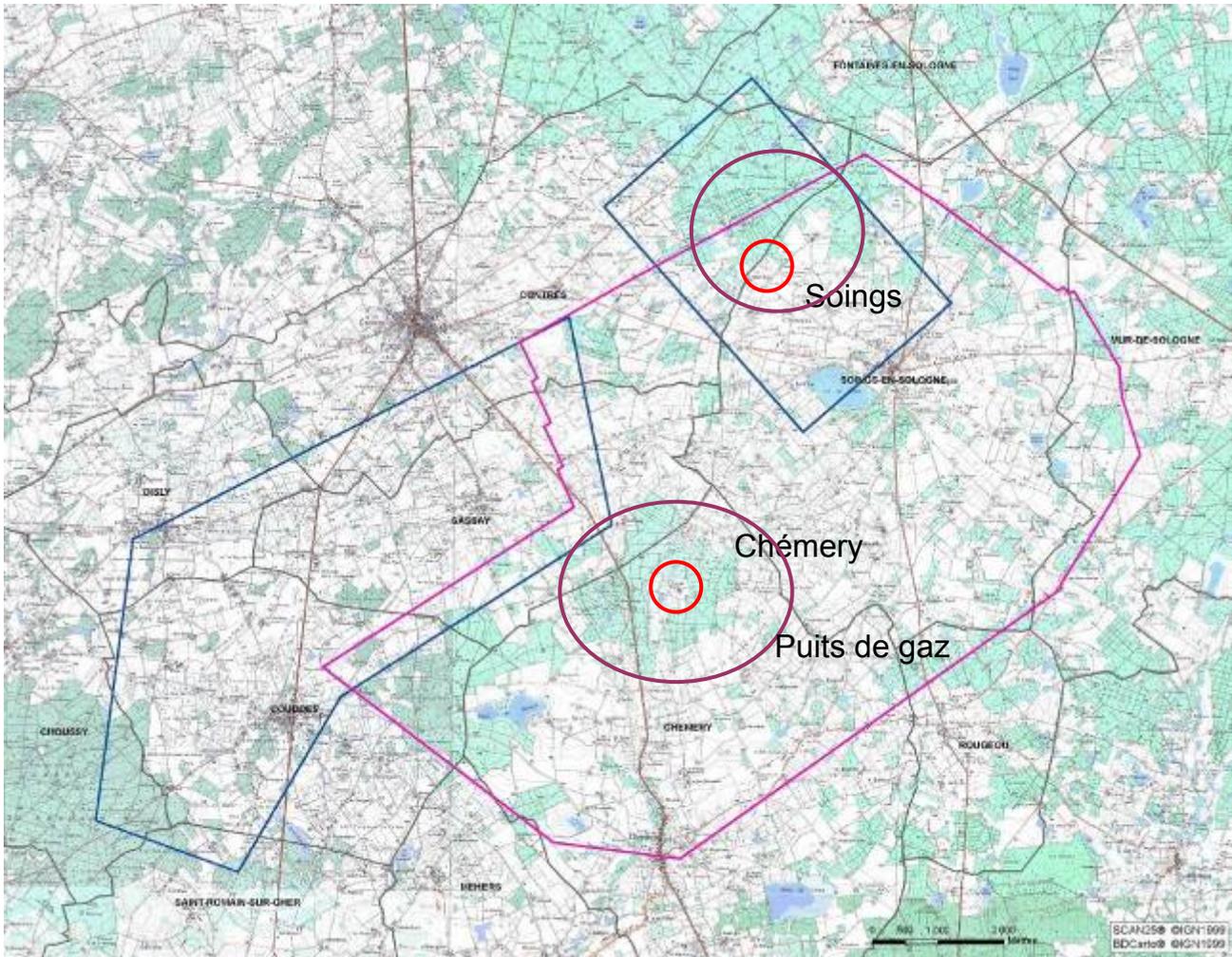


Figure 2 : zones d'étude. En rouge les sites d'injection ; en violet les zones susceptibles de se déformer

:

### 1.3. CONTEXTE DEFORMANT

Nous n'avons eu connaissance d'aucun signe de déformation sur le site, ni aucun ordre de grandeur de ce que pourraient être ces déformations.

Des modélisations de la déformation du sol due à l'injection de CO<sub>2</sub> dans des aquifères situés à 1000 m de profondeur ont été réalisées dans le cadre du projet PICOREF. Elles prévoient des déformations de 3 mm dans la zone centrale d'injection et de 1 mm dans les zones périphériques.

Si l'ordre de grandeur des déformations pour les sites de stockage de gaz est le même, la méthode InSAR classique ne permettra pas d'observer ces mouvements de terrain (précision centimétrique).

La méthode des réflecteurs persistants (PSI), qui sera présentée brièvement plus loin, permet d'observer des mouvements avec une précision millimétrique dans des zones présentant une densité suffisante de ces réflecteurs. Toutefois le traitement sera délicat, car nous serons à la limite de la précision de la technique tandis que les mouvements que nous cherchons à obtenir seraient non linéaires dans le temps. Par ailleurs, outre les difficultés de traitement, une densité de points trop faible ne permet pas de séparer les déplacements propres des réflecteurs de ceux dus au phénomène étudié. En effet, les cibles individuelles peuvent présenter des mouvements propres (affaissement, dilatation de structures métalliques, ...) ou de leur environnement immédiat (subsidence locale, ...), qui peuvent être distingués de la déformation à plus grande échelle par comparaison aux PS voisins.

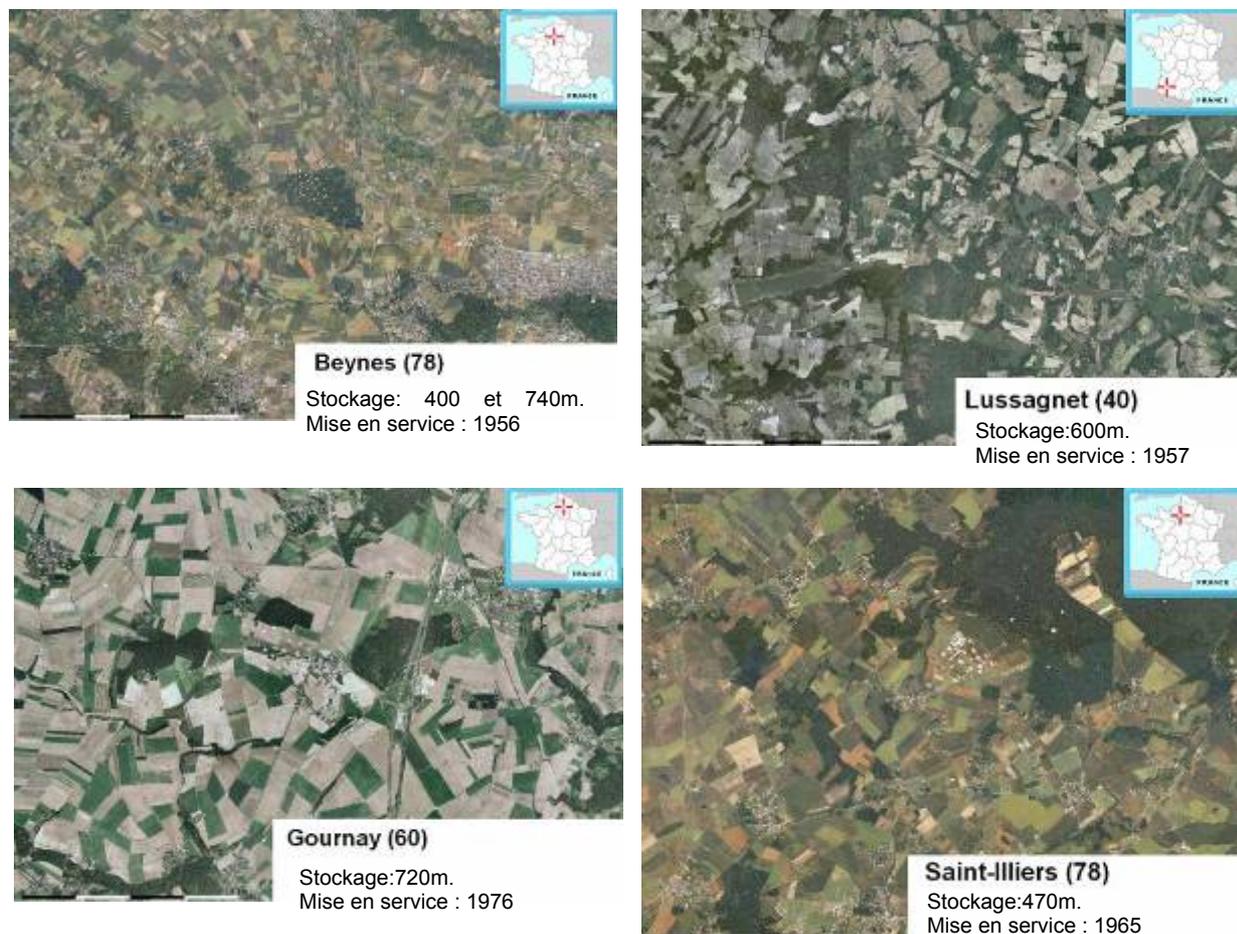
#### **1.4. AUTRES SITES DE STOCKAGE DE GAZ**

Nous avons recherché des images aériennes d'autres sites de stockage de gaz dans des aquifères. En effet, la présence de végétation limite les possibilités d'effectuer un traitement InSAR. Il est ainsi facile d'identifier de bons candidats pour une étude InSAR ou PS.

Nous avons constaté, comme l'on pouvait s'y attendre, que les sites de stockage dans des acquières que nous avons pu identifier présentent tous sensiblement la même typologie : une usine de stockage de gaz est isolée, à proximité d'un petit bois dans lequel sont disposés des puits d'observation et/ou d'injection, est entourée de champs, et, souvent, à quelques kilomètres se trouve un village.

Ainsi, les images radar acquises au-dessus de ces sites présenteront toutes la même contrainte : la présence d'un couvert végétal sur la zone d'injection empêche de réaliser tout interférogramme cohérent sur la zone centrale, et la nature rurale des zones avoisinantes limite la possibilité d'obtenir des interférogrammes cohérents avec des scènes acquises à de petits intervalles de temps (35 à 105 jours). Ainsi, comparativement aux autres sites que nous avons pu identifier, le site de Chéméry n'est pas un candidat particulièrement mauvais pour une étude d'interférométrie radar classique ou de réflecteurs persistants.

Nous avons cependant noté que le site de Gournay (60) est situé à moins de 500m de l'autoroute A1 et de la ligne TGV Paris-Lille. Ainsi, des relevés de nivellements doivent exister. Ces données seraient très utiles dans le cadre d'une étude de réflecteurs permanents, ou bien, si la zone d'influence du site recoupe la ligne de chemin de fer, pour avoir une donnée de déformation fiable sur un exemple précis. Par ailleurs, le site ayant également un couvert agricole défavorable (figure 3), il ne semble pas être le plus adapté pour une étude PS.



*Figure 3: Autres sites de stockages de gaz dans des aquifères ; Les sites présentent généralement les mêmes caractéristiques : l'usine de stockage est située à proximité d'un bois dans lequel des puits d'injection et/ou d'observation sont disposés. Des études InSAR sur ce type de site présenteront ainsi toutes les mêmes limitations, dus à la faible cohérence des interférogrammes sur des zones comportant beaucoup de végétation.*



## 2. La technique d'Interférométrie Radar

### 2.1. PRINCIPE DE LA METHODE D'INTERFEROMETRIE RADAR

Nous présentons brièvement dans ce paragraphe le principe de la méthode d'interférométrie radar, sans entrer dans les détails du traitement.

#### 2.1.1. Le Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO, ou SAR)

Le radar à synthèse d'ouverture, (RSO, ou SAR pour Synthetic Aperture Radar) est un instrument de télédétection active, ce qui signifie que le radar éclaire lui-même les cibles qu'il observe, à la différence de systèmes optiques par exemple, qui sont dit passifs puisqu'ils captent la lumière émise par l'objet observé.

Ainsi, lorsqu'une cible est illuminée par le radar, une partie du signal est rétrodiffusée. L'étude du signal rétrodiffusé permet de déduire des informations sur la cible. Le signal radar est une onde électromagnétique du domaine des hyperfréquences, qui possède une phase et une amplitude. L'amplitude du signal rétrodiffusé dépend des propriétés géométriques et diélectriques de la cible, tandis que sa phase dépend principalement du chemin optique du signal. La technique d'interférométrie radar repose sur la mesure de phase, connue modulo  $2\pi$  radians,

Nous utilisons dans cette étude les données du satellite ERS 2 de l'Agence Spatiale Européenne, qui émet une onde en bande C (longueur d'onde 5,6 cm) et dont la résolution au sol est meilleure que 20m.

#### 2.1.2. L'interférométrie radar

Trois produits sont issus du traitement InSAR :

- image d'intensité moyenne
- image de cohérence ou amplitude du l'interférogramme complexe normalisé
- image de phase, constitué des phases de l'interférogramme complexe

Le canal de phase contient l'information altimétrique que l'on cherche à extraire. Rappelons que c'est une grandeur exprimée en radians (définie modulo  $2\pi$ ). Dans le cas de l'interférométrie différentielle, la variation d'altitude exprimée par une rotation complète de phase ou *frange* (variation de phase de  $2\pi$ ) correspond à un mouvement vertical de 3 cm. Cette image est appelée interférogramme.

Le canal de cohérence est un indicateur de fiabilité (valeurs comprises entre 0 et 1) des mesures de phases. Les valeurs les plus proches de 1 correspondent à des zones où les propriétés intrinsèques des *pixels* (où élément de résolution) ont été conservées entre les acquisitions. Il est indispensable que les propriétés de surface soient conservées pour établir la relation entre la variation de phase et l'incrément altimétrique auquel elle correspond.

Le canal d'intensité a pour seul intérêt (dans le cadre de cette étude) de faciliter la localisation des phénomènes mis en évidence par les mesures de phases.

La région imagée montre des niveaux de cohérence moyenne particulièrement faibles (référence à une image de cohérence avec comme légende par exemple les niveaux de gris correspondent à des valeurs de cohérence allant de 0 (noir) à 1 (blanc)). La présence de forêts, l'activité agricole, combinée aux variations naturelles des états de surface en relation avec les cycles saisonniers ou les variations d'humidité de surface, semblent être à l'origine de cette perte de cohérence. Cette dernière constitue un facteur rhédibitoire pour la détection d'éventuels mouvements de surface. Les zones situées en périphérie urbaine présentent toutefois des valeurs de cohérence moyenne plus élevées (>0.3).

On notera de plus que le niveau de cohérence moyen d'un interférogramme est fonction de l'écart orbital – d'où une sélection prioritaire de combinaisons présentant des écarts orbitaux inférieurs à 100 m. Dans le même souci de réduire la perte de cohérence, le choix devrait se porter sur des prises de vue effectuées à des dates proches (35 ou 70 jours) ou correspondant aux saisons les plus favorables compte tenu de l'humidité de surface et du couvert végétal (mai à septembre). Cependant, l'amplitude maximale des mouvements recherchés devrait se produire entre les périodes de réinjection (été) et au plus fort des pompages (fin d'hiver)

L'interférogramme radar est donc une image de la différence des phases de deux acquisitions prises lors de cycles orbitaux successifs (le cycle orbital des plate-formes que nous utilisons, où période de répétitivité du satellite au-dessus d'un même point du globe, est de 35j). La composante propre à la cible est ainsi annulée. Ainsi, la différence de phase est la somme de quatre termes :

- Un terme qui ne dépend que de la distance entre les deux orbites d'acquisition et qui forme un système de franges orbitales sur l'interférogramme. Ce terme est éliminé lors du traitement de l'interférogramme.
- Un terme qui dépend de la topographie et qui peut être éliminé en utilisant un modèle numérique de terrain.
- Un terme qui dépend de la déformation entre les deux acquisitions dans la ligne de visée du radar. Ce terme forme un système de franges qui permet de cartographier la déformation.
- Un terme de bruit qui dépend du système radar et surtout de retards atmosphériques (qui se traduisent par un bruit de phase qui suit une loi d'échelle) induits lors des prises de vues à des jours différents et de la perte de cohérence (qui se traduit par un bruit de phase de haute fréquence spatiale). On peut souvent distinguer les effets atmosphériques importants

(généralement supérieur à une frange et s'étendant sur plusieurs km) des signatures de déformation en comparant des interférogrammes produits à partir d'images acquises à différentes dates. En effet, l'effet atmosphérique n'est pas corrélé dans le temps, il ne peut donc pas apparaître sur deux interférogrammes construits à partir d'images différentes. Néanmoins des effets atmosphériques de petite échelle sont eux impossibles à détecter par comparaison visuelle – leur fluctuation correspond à une erreur d'environ 1 cm : c'est la principale limite de l'interférométrie classique.

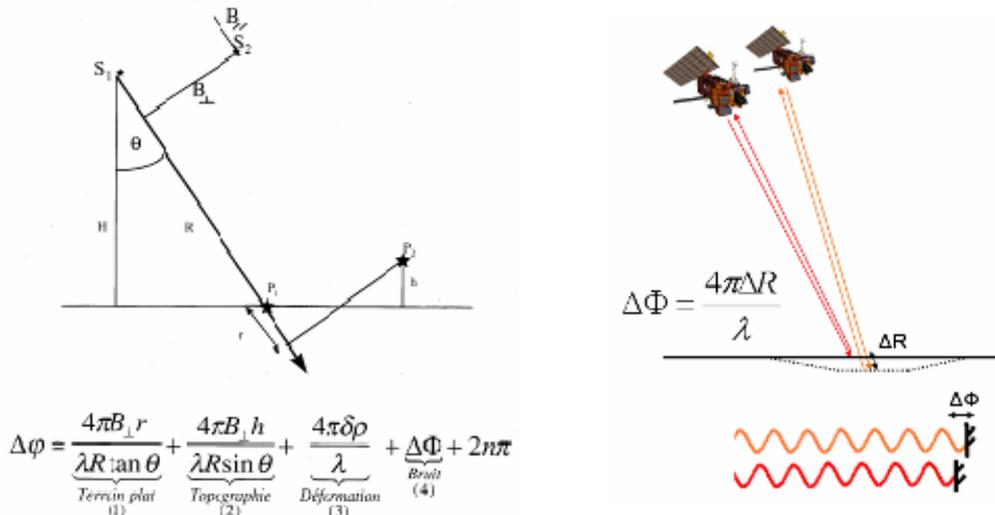


Figure 4 : principe simplifié de l'interférométrie radar : si l'on peut soustraire les termes de terrain plat et de topographie et que le terme de bruit n'est pas trop important, on obtient la différence de phase liée à la déformation du sol modulo  $2\pi$ , dans la ligne de visée du radar. Un paramètre important est  $B_{\perp}$ , la baseline orthogonale.

Comme la différence des phases est connue modulo  $2\pi$ , nous devons procéder à un déroulement de phase qui consiste à reconstruire une variation continue de la phase. Ce traitement de phase peut être une source d'erreurs lorsque la zone est mal corrélée, par exemple à cause de la présence de forêts.

Finalement, la méthode InSAR permet de cartographier des déformations dans les zones cohérentes, c'est-à-dire par exemple en milieu urbain ou sur des zones non recouvertes de forêts. Dans de bonnes conditions, les déformations mesurées sont typiquement de quelques dixièmes de longueur d'onde dans la ligne de visée du radar et la résolution au sol est de 20 m en utilisant les capteurs ERS ou ASAR sur Envisat.

### 2.1.3. La technique des réflecteurs persistants (PSI – Persistent Scatterers Interferometry)

La technique des réflecteurs persistants (PS – Persistent Scatterers) sont issues du traitement des données SAR et est décrite en particulier (méthode PSInSAR – ou Permanent Scatterers) dans Ferretti *et al.*, 2000; Ferretti *et al.*, 2001 et Colesanti *et al.*, 2005. Elle permet d'obtenir des

précisions plus importantes que celles des techniques classiques d'interférométrie radar différentielle sur un certain nombre de points PS présents naturellement sur l'image radar.

Les PS sont des "cibles radars" privilégiées qui ont des caractéristiques telles qu'elles permettent des mesures précises de leur distance au capteur. Plus précisément, lorsqu'un PS est présent sur un pixel, le mécanisme de rétrodiffusion du signal radar est dominé par un élément unique, bien plus petit que le pixel de l'image radar. La contribution de cet élément va dominer la somme de toutes les autres contributions des éléments présents à l'intérieur du même pixel. La phase interférométrique de ces points particuliers est ainsi peu affectée par la décorrélation géométrique. De plus, tant que ces éléments ne changent pas dans le temps, la décorrélation temporelle est également négligeable. Typiquement les PS correspondent à des infrastructures telles que des bâtiments ou des structures métalliques, ou bien à des éléments géologiques naturels tels que des roches exposées.

Finalement, dans un cas idéal, la précision est de l'ordre de quelques millimètres dans la ligne de visée du radar. La technique PS permet l'observation de déformations superficielles du terrain avec une précision millimétrique, mais aussi la reconstruction de séries temporelles de mouvements par rapport au satellite.

## 2.2. LES DONNEES

Nous avons sélectionné 14 scènes radar acquises entre 1995 et 2007 (frame 2650). Une scène radar couvre une surface de 100x100 km mais, hors mis pour une phase de test, le traitement interférométrique n'a été fait que sur la zone d'étude.

Date	Orbite	Baseline perpendiculaire	Delta(acquisitions)
19950722	1322	-462	-455
19950826	1823	-369	-420
19950930	2324	-135	-385
19951104	2825	-48	-350
19960323	4829	-1204	-210
19960427	5330	-200	-175
19960706	6332	-88	-105
19960810	6833	-182	-70
19960914	7334	-656	-35
19961019	7835	0	0
19961123	8336	373	35
19961228	8837	-594	70
19970201	9338	-23	105
19970308	9839	-522	140

*Tabl. I caractéristiques des données acquises*

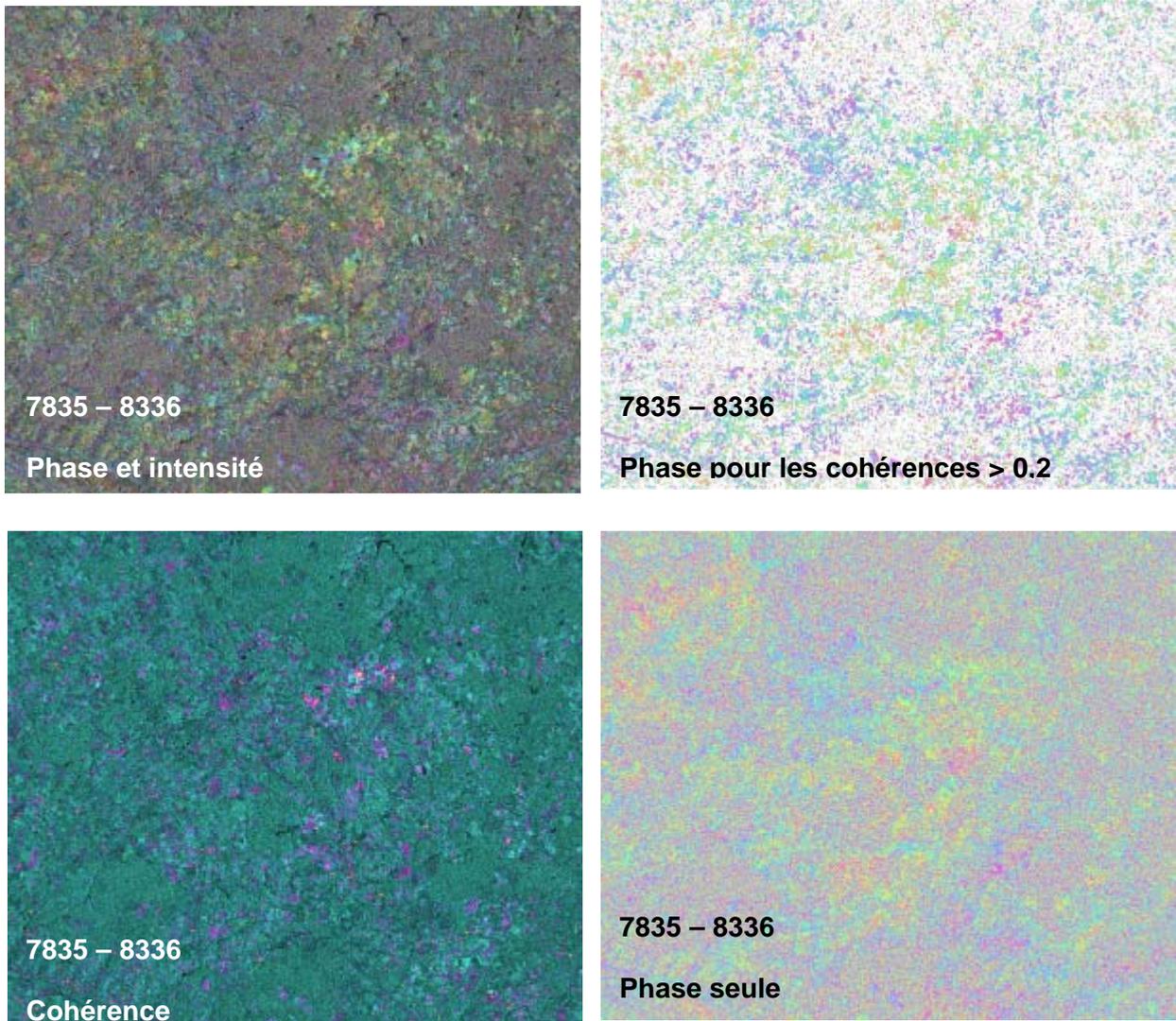
Le modèle numérique du terrain (MNT) que nous avons utilisé est un MNT issu de la mission SRTM dont la taille de la grille est de 90 m. La mission SRTM a consisté à acquérir à l'aide d' un

radar en bande X embarqué sur la navette spatiale américaine un Modèle Numérique d'Élévation avec une maille de 30 m. Les données SRTM ont été téléchargées sur le site du Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA. Le MNT a été coupé sur la zone d'étude.

### **2.3. TRAITEMENT INTERFEROMETRIQUE RADAR**

Le traitement interférométrique a été effectué en utilisant le logiciel Gamma de GAMMA REMOTE SENSING, Suisse. Gamma est un logiciel modulaire qui permet une grande souplesse lors du traitement interférométrique des images radars. Ainsi, lors de la phase consistant à recalibrer le MNT par rapport à l'image radar de référence, nous avons rencontré quelques difficultés probablement en raison des faibles dénivellations sur la zone de l'étude.

Des tests de filtrage par filtre de Goldstein et Werner ont été effectués mais ne se sont pas avérés concluants : la cohérence étant trop faible sur les zones d'intérêt. Compte tenu des résultats, nous n'avons pas géocodé les produits ni calculé de vitesses, et nous nous sommes attachés à essayer d'améliorer le traitement interférométrique et plus particulièrement la cohérence, par exemple en utilisant les orbites de l'université de Delft qui sont plus précises que celles délivrées par l'ESA, puis à rechercher des couples pouvant donner de meilleurs résultats.



*Figure 5: Pour chacun des couples interférométriques que nous avons calculés, nous avons produit une image des phases et de l'intensité, une image de la cohérence, une image des phases pour les cohérences supérieures à 0,2, et une image des phases seules.*

## 3. Résultats et interprétation

### 3.1. TRAITEMENT INTERFEROMETRIQUE PAR RAPPORT A UNE IMAGE MASTER

Les couples interférométriques obtenus en soustrayant les phases de chacune des images à l'image master (19 octobre 1995) n'ont pas donné de résultats permettant de conclure: en effet, les images sont soit trop incohérentes, soit acquises à des dates trop proches pour que les déplacements soient significatifs.

Le site du ministère de l'industrie précise que le tirage de gaz se fait de manière continue en hiver. Ainsi, les couples acquis à un intervalle de 6 mois sont ceux pour lesquels on attend une déformation maximale. Cependant, les couples à 35 et 70 jours sont les seuls qui présentent une cohérence qui permettraient à la rigueur de distinguer un système de franges, mais les mouvements attendus sont alors beaucoup plus faibles.

Aussi, nous avons produit une deuxième série d'interférogrammes pour tous les couples à 35 jours, en utilisant les images déjà co-registrées par rapport à l'image master (Le Mouelic *et al.*, 2005). Comme attendu, la corrélation est bien meilleure que pour la série d'interférogrammes précédente. Les résultats indiquent l'absence de mouvements dans la limite de la sensibilité de la technique (*i.e* environ le cm). En particulier, les interférogrammes 2825/2324 et 9839/9338 montrent très clairement l'absence de mouvements centimétriques sur la zone sur des périodes de 35 jours, ce qui correspond en fait à ce qui était attendu.

Finalement, pour la période juillet 1995- mars 1997 nous n'avons pas observé de variation de phase pouvant être une signature de mouvements sur les villes de Contres et Soings en Sologne - ce qui aurait correspondu à des mouvements différentiels centimétriques.

Nous n'avons pas détecté de signature de déformation pour les couples que nous avons calculés à 35 jours. Ainsi, il n'y a pas de mouvements centimétriques évidents sur la zone périphérique en 6 mois, ni sur la zone centrale en 35 jours.



Figure 6: Interférogrammes pour les scènes acquises du 22 juillet 1995 au 6 juillet 1996, par rapport à l'image master (19 octobre 1995)

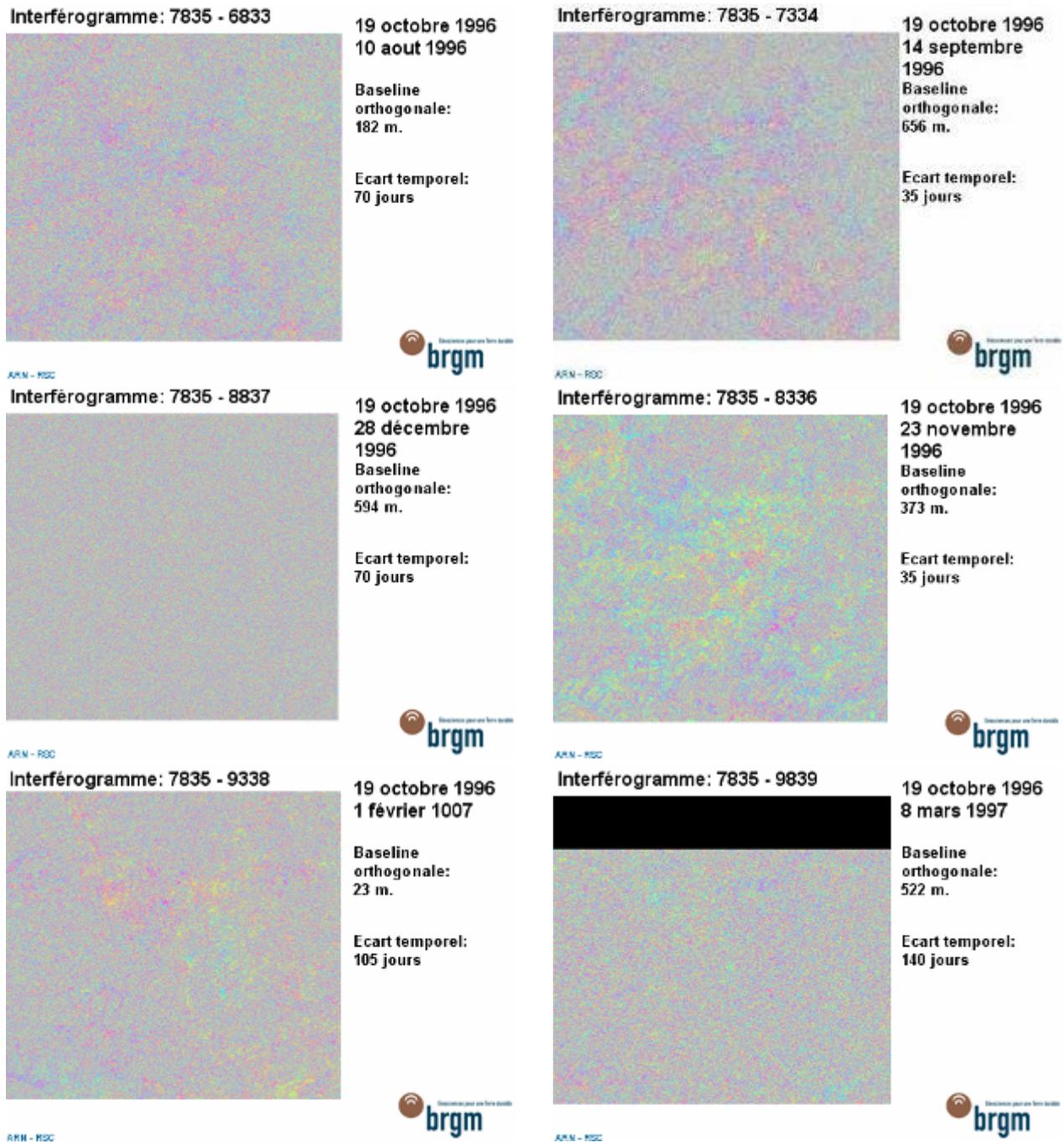


Figure 7: Interférogrammes pour les scènes acquises du 22 juillet 1995 au 6 juillet 1996, par rapport à l'image master (19 octobre 1995)

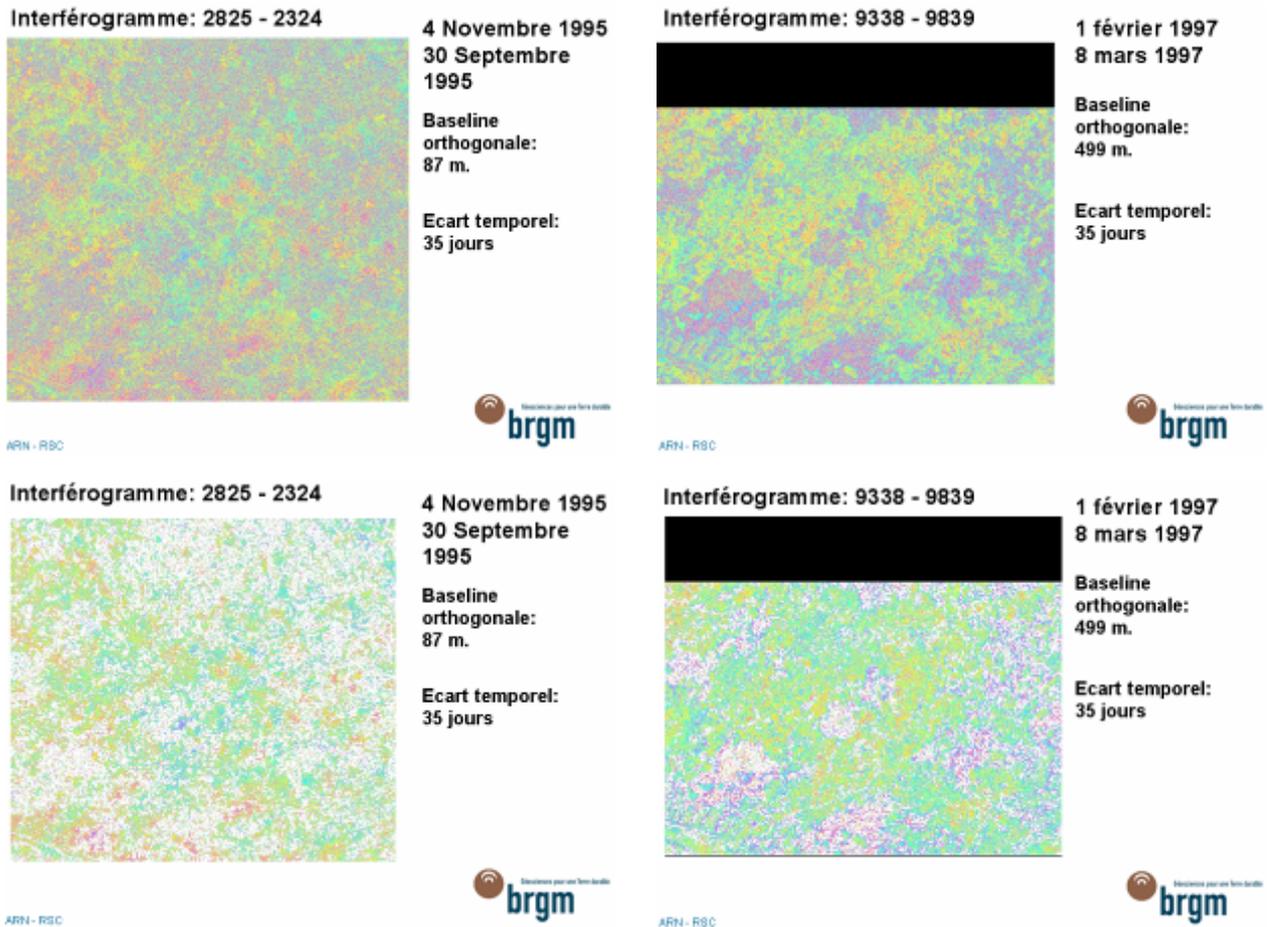


Figure 8: Interférogrammes obtenus pour deux couples d'images acquises à 35 jours d'intervalle. Les deux images du haut sont les phases, tandis que celles du bas ne montrent que les phases pour des cohérences supérieures à 0,2. Ces deux couples sont les plus cohérents que nous ayons pu obtenir. Nous n'observons pas de signature de déformation évidente. On notera que le couple 2825-2324 semble affecté par des artefacts atmosphériques qu'on ne confondra toutefois pas avec de la déformation du fait de leur structure spatiale (structures traversant l'image en diagonale alors que la déformation serait une structure centrée sur le site) et du fait qu'elles n'apparaissent pas sur d'autres interférogrammes.

### 3.2. APPLICABILITE DE LA TECHNIQUE PSI

Ainsi, compte tenu de la faible cohérence des interférogrammes obtenus et de la très petite ampleur des déplacements attendus, la méthode PS est plus appropriée que l'InSAR classique. Nous avons tenté d'évaluer plus précisément les possibilités de succès de la méthode PS sur ce site.

Un moyen simple d'évaluer la présence de « candidats PS » est de regarder les images de la cohérence et de retenir les zones qui montrent une bonne cohérence pour tous les couples interférométriques.

Nous avons identifié quelques candidats PS dans un rayon de 500m de l'usine d'injection : tout d'abord, l'usine elle-même pourrait comporter des PS de qualité moyenne, ainsi que le hameau de Marchigny. Les hameaux de La Chamoise et Aigrain, situés à 500m au nord pourraient comporter des PS de bonne qualité. Cependant, pour déterminer les erreurs atmosphériques, il faudrait 5 PS/km<sup>2</sup>, alors que la densité de PS probable est plus faible, en particulier en raison de la présence de la zone boisée à proximité de l'usine.

Une difficulté pour effectuer un traitement PS sur cette zone vient de la relativement faible densité des candidats PS, mais aussi de la nature non linéaire des mouvements. Par ailleurs, compte tenu de la petite ampleur des mouvements attendus, on serait à la limite de détection de la technique.

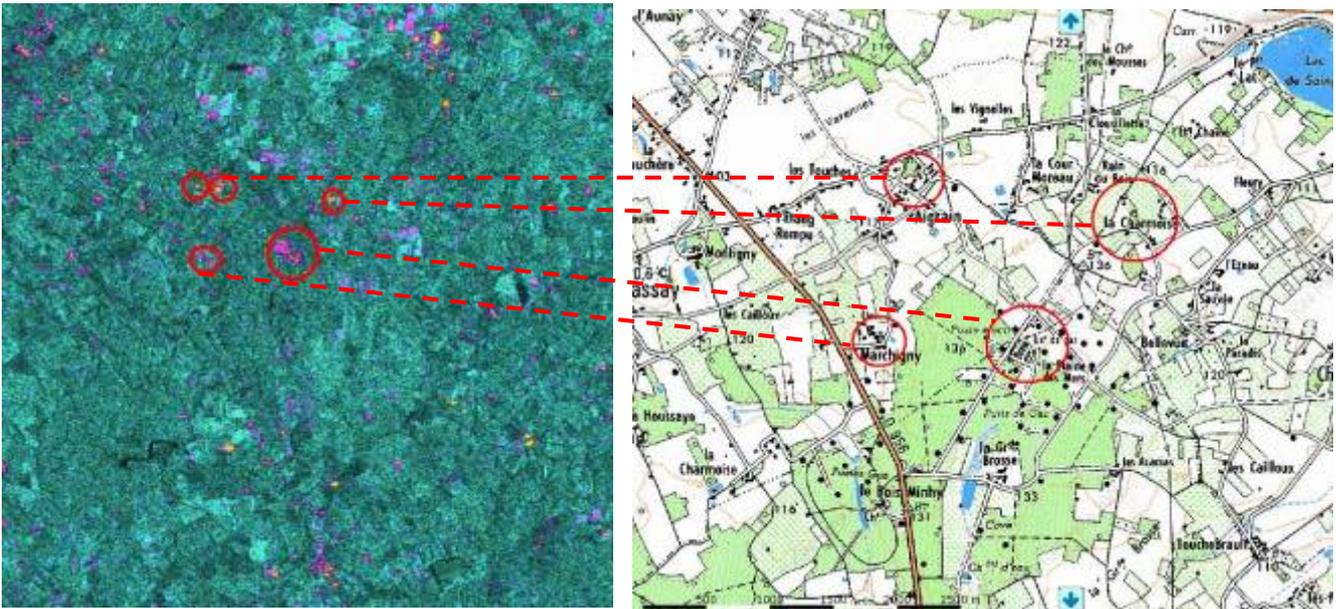


Figure 9: Recherche de candidats PS: nous avons entouré en rouge les points qui ont une bonne cohérence pour tous les couples interférométriques. Ces points sont des candidats PS. Reportés sur la carte, nous voyons que l'usine d'injection pourrait comporter des PS de qualité moyenne, ainsi que le hameau de Marchigny. Les hameaux de La Chamoise et Aigrain, situés à 500m au nord pourraient comporter des PS de bonne qualité.



## 4. Test d'interférométrie radar sur réflecteurs persistants

### 4.1. TECHNIQUE PSI

Suite aux résultats précédents, nous avons proposé de tester la technique PSI sur notre jeu de données.

Les techniques de type interférométrie sur réflecteurs persistants (ou PSI) utilisent un réseau de points spécifiques des images radar dont les caractéristiques radiométriques restent stables dans le temps. Typiquement, on cherche des points « brillants » dont l'intensité varie peu dans le temps ; ils sont déterminés à partir de la comparaison de la moyenne et de l'écart-type temporels de l'amplitude pour chaque pixel de l'image.

Une fois sélectionnés ces points, un traitement statistique permet de séparer les 3 principales composantes de la phase interférométrique: la déformation (initialement supposée linéaire), la hauteur du point et la composante atmosphérique.

Concrètement, la procédure consiste à produire une série d'interférogrammes différentiels par rapport à une même image master mais on s'intéresse uniquement à leurs valeurs sur les PS. Un point doit être choisi comme référence du mouvement *i.e.* il est supposé immobile pendant la période suivie. Le choix d'un mauvais point de référence peut conduire à de mauvaises interprétations en terme de déformation. La séparation des composantes est obtenue par une série de régressions linéaires :

- la composante topographique de la phase étant proportionnelle à la baseline perpendiculaire et à la hauteur du PS au dessus du MNT, la pente de la régression linéaire de la phase par rapport à la baseline donne l'altitude du PS.
- La composante de déformation linéaire (proportionnelle à la vitesse moyenne du PS) est donnée par la pente de la régression de la phase en fonction du temps.
- Une fois estimées ces composantes, la résiduelle contient de l'atmosphère et une éventuelle composante non-linéaire de la déformation. Le fait que l'atmosphère soit totalement décorrélée dans le temps (au delà de quelques heures) mais corrélée spatialement permet de séparer les deux composantes par filtrages temporel et éventuellement spatial (dans cette étude nous utiliserons une taille de filtre de 100 jours pour le filtre temporel et 50 pixels pour le spatial).

Le processus est alors itéré.

L'intérêt de la démarche est d'estimer et de corriger une partie des effets atmosphériques et de pouvoir utiliser toutes les images quelques soient les écarts orbitaux (les PS de sont pas affectés par la perte de cohérence) et donc de tirer meilleur parti de la série de données.

Les traitements sont faits à partir de la chaîne IPTA (Interferometric Point Target Analysis) de Gamma-RS.

Comme signalé précédemment, les limitations auxquelles nous ferons face seront :

- la faible densité de points : des points trop dispersés ne permettent pas de bien corriger les effets atmosphériques et posent des problèmes lorsqu'un déroulement de franges est nécessaire .
- la déformation non linéaire: la technique est plus performante sur des déformations lentes et régulières sur plusieurs années. Dans un cas de mouvement cyclique sur une année et compte tenu des caractéristiques des satellites ERS (on n'a généralement au mieux qu'une dizaine d'images par an) il est difficile de reconstituer le mouvement.
- le nombre d'images faible : le nombre d'images dans notre série est assez limité (14) ce qui réduit les performances des traitements statistiques. Des séries de plus de 40 images sont souvent requises (Ferretti et *al.*, 2000)

## **4.2. RESULTATS**

### **4.2.1. Sélection des points**

Les traitements ont été effectués sur les mêmes extraits d'images ERS que pour l'interférométrie conventionnelle. Au cours de la sélection initiale (basée sur une analyse statistique des informations d'intensité) , 6667 points ont été retenus sur cette zone: la Figure 10 situe les points produits.

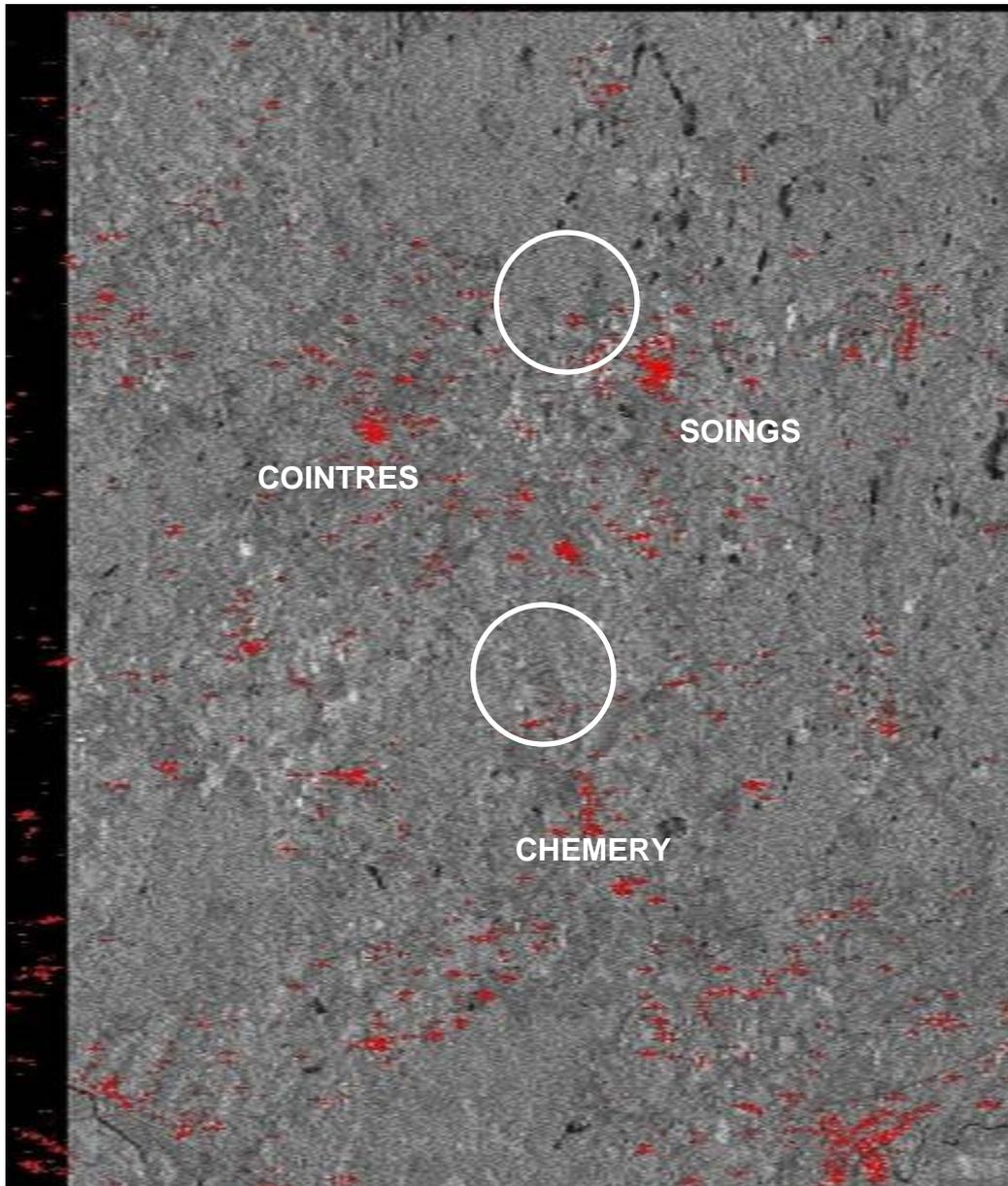


Figure 10 : PS retenus (en rouge) localisés sur l'image d'amplitude moyenne (géométrie radar – non géocodée mais corrigée est-ouest). Les 2 zones d'injections sont indiquées

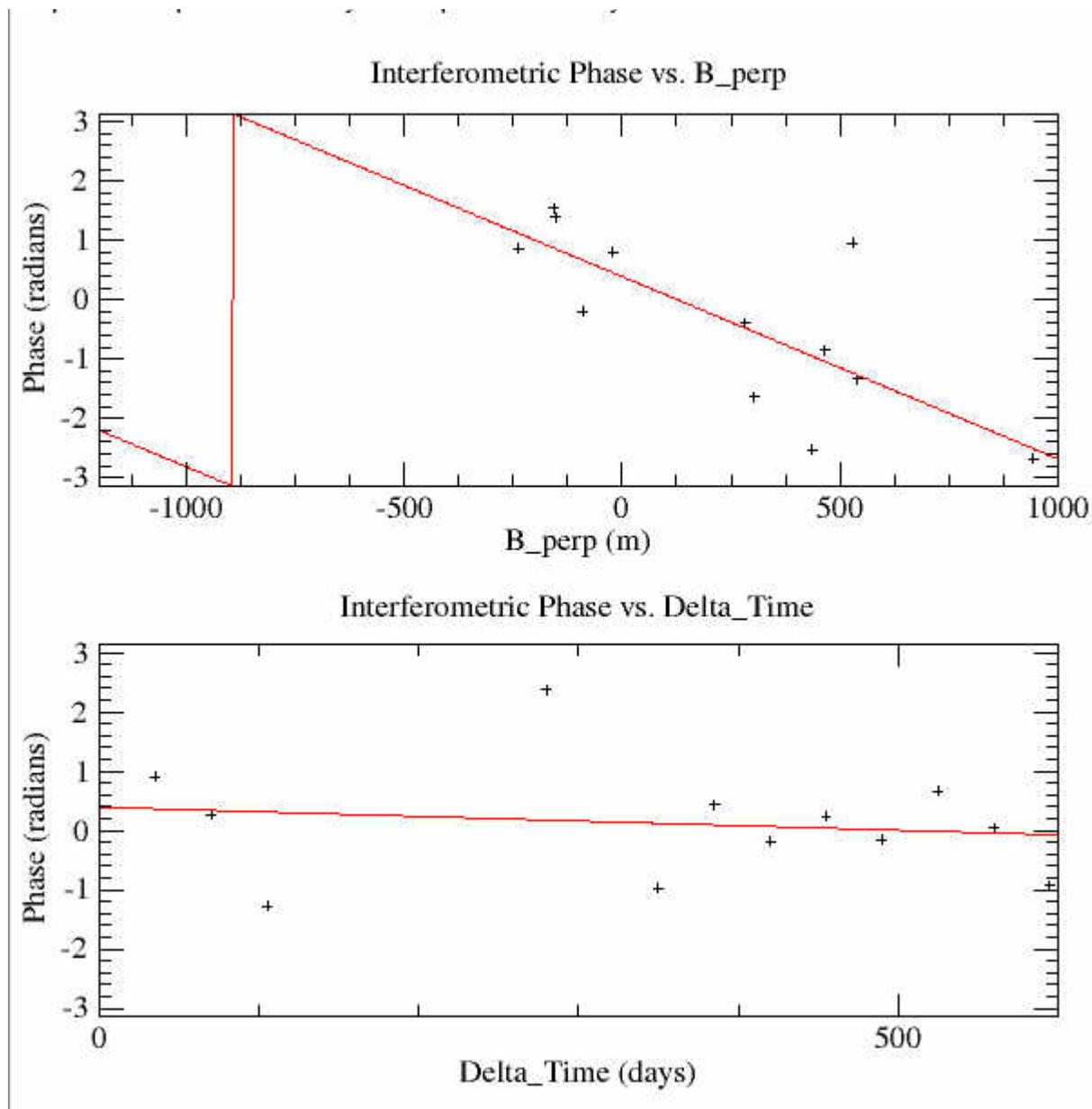
Nous remarquerons que les zones susceptibles de se déformer sont pratiquement dépourvues de PS : les possibilités de cartographier la déformation attendue sont donc très limitées.

Une deuxième sélection est effectuée à partir des caractéristiques de phases des points. En effet, une fois corrigés du Modèle Numérique de Terrain, deux points proches doivent présenter des évolutions de phase très similaires : *a priori*, leur mouvements sont semblables – dans le cas contraire un des PS est soit bruité soit possède un mouvement propre qui le rend inintéressant quant à la mesure du phénomène que nous étudions. La procédure consiste à prendre le point à

tester comme référence et à estimer les hauteurs et déformations des points situés dans un rayon de 20 pixels. Dans le cas idéal, les hauteurs varient mais les déformations relatives doivent être proches de zéro (au seuil choisi pour l'écart-type près), dans le cas contraire le point est rejeté. 3528 points ont ainsi été retenus pour la suite du traitement.

#### **4.2.2. Observations**

Après une estimation de la composante atmosphérique (cf 4.1) les interférogrammes différentiels ont été corrigés. Les figures suivantes montrent l'évolution de la phase au cours du temps pour quelques points situés sur les secteurs de Soings et Chéméry les plus proches des sites d'injection.



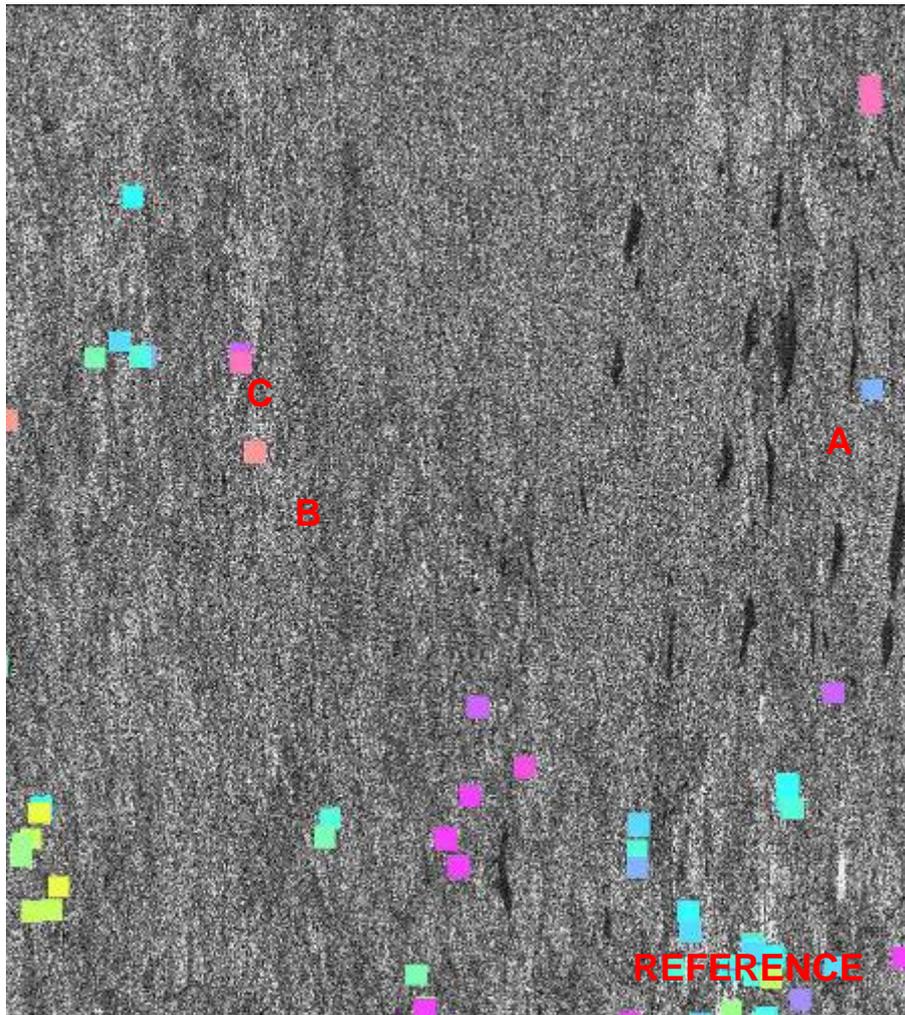


Figure 11 : position des PS sur la zone de Soings. Les positions du point de référence local et de 3 points autour de la zone d'injection sont indiquées

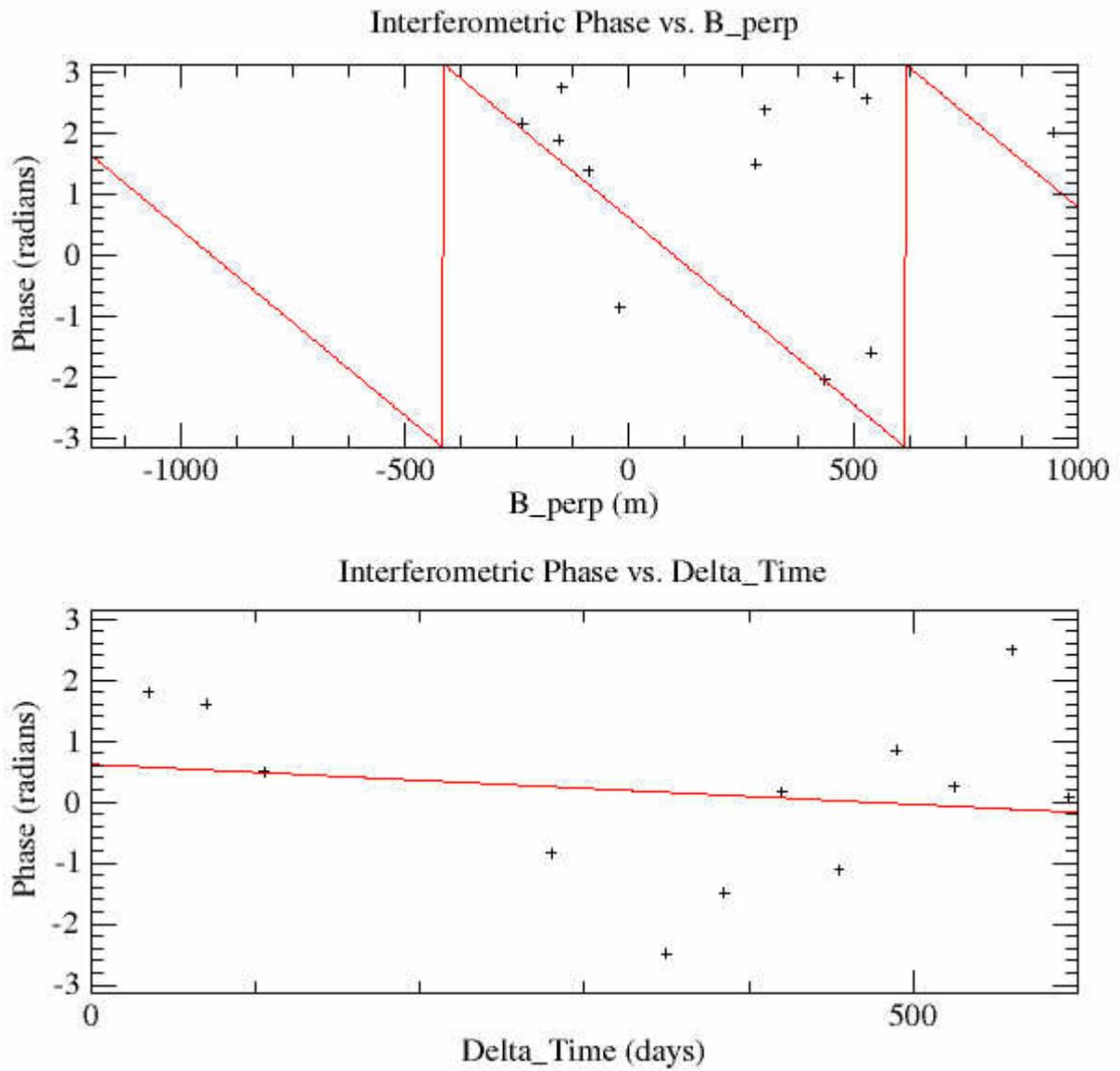


Figure 12 : phase corrigée de l'estimation de l'atmosphère en fonction de la baseline perpendiculaire (haut) et du temps (bas) pour le point A

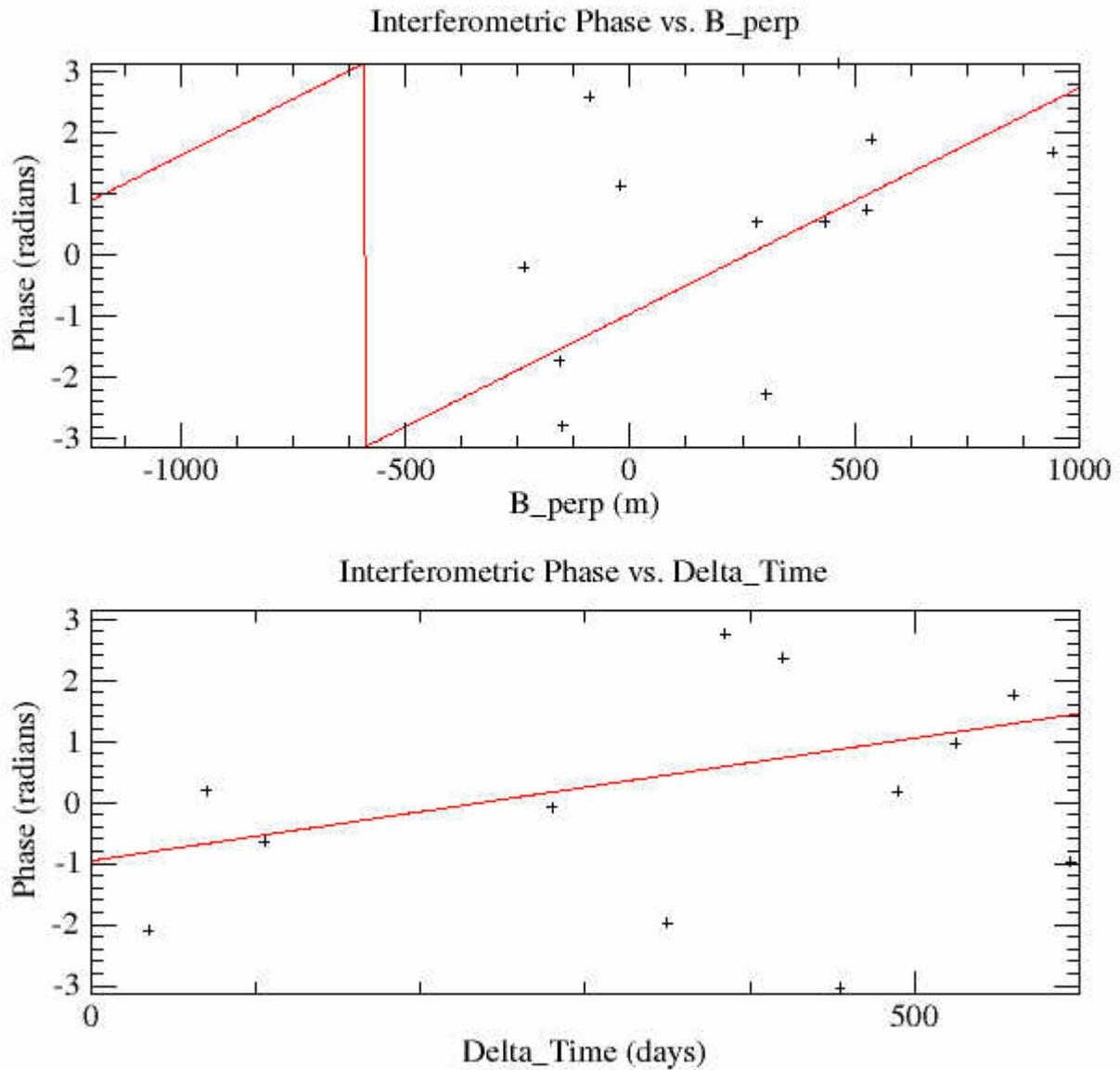


Figure 13 phase corrigée de l'estimation de l'atmosphère en fonction de la baseline perpendiculaire (haut) et du temps (bas) pour le point B

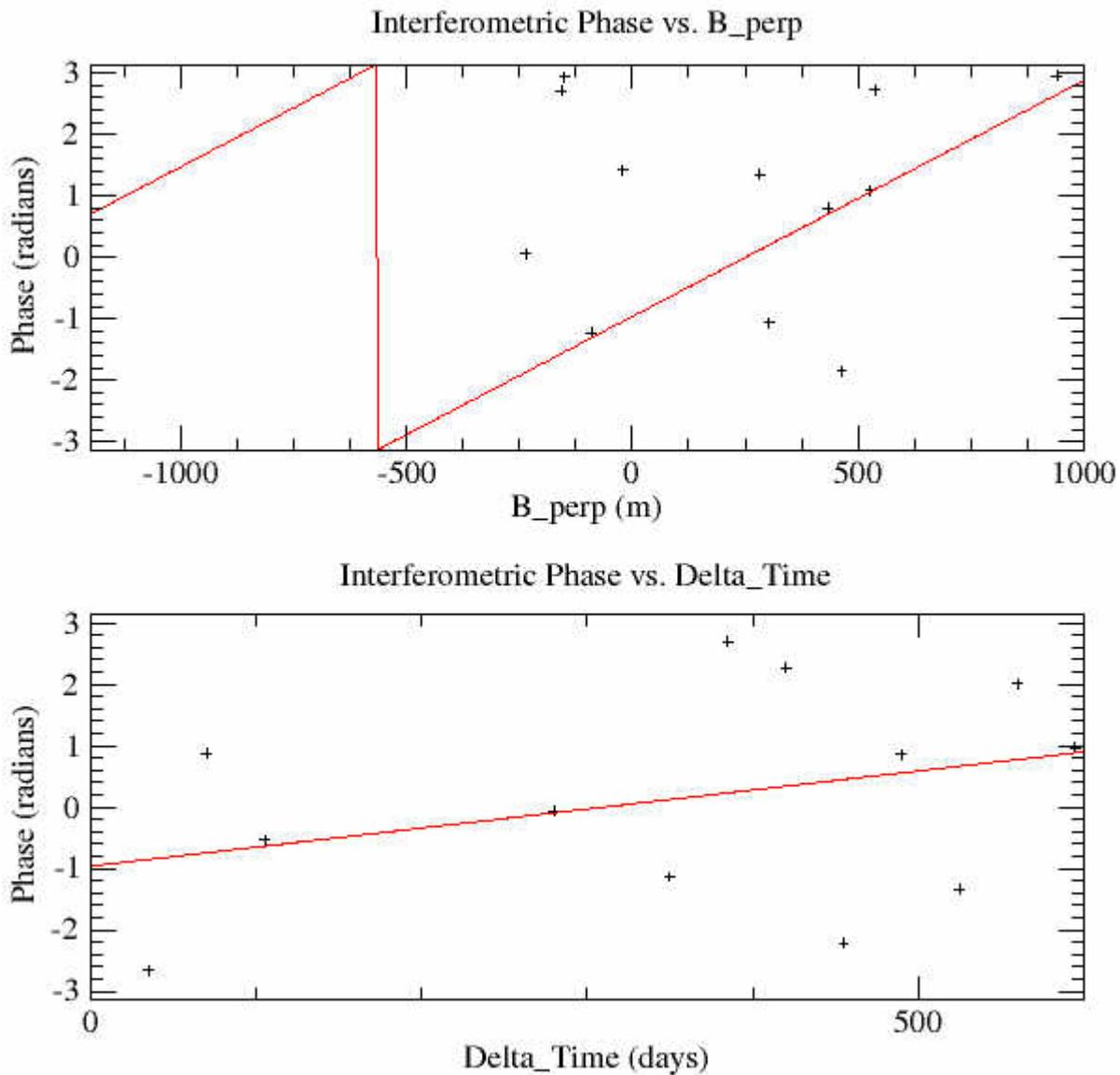


Figure 14 : phase corrigée de l'estimation de l'atmosphère en fonction de la baseline perpendiculaire (haut) et du temps (bas) pour le point C

Les valeurs de vitesses moyennes de déformation estimées pour le site de Soings sont :

Point	Vitesse en ligne de visée
A	2.1 mm/an
B	-6.6 mm/an
C	-5.1 mm/an

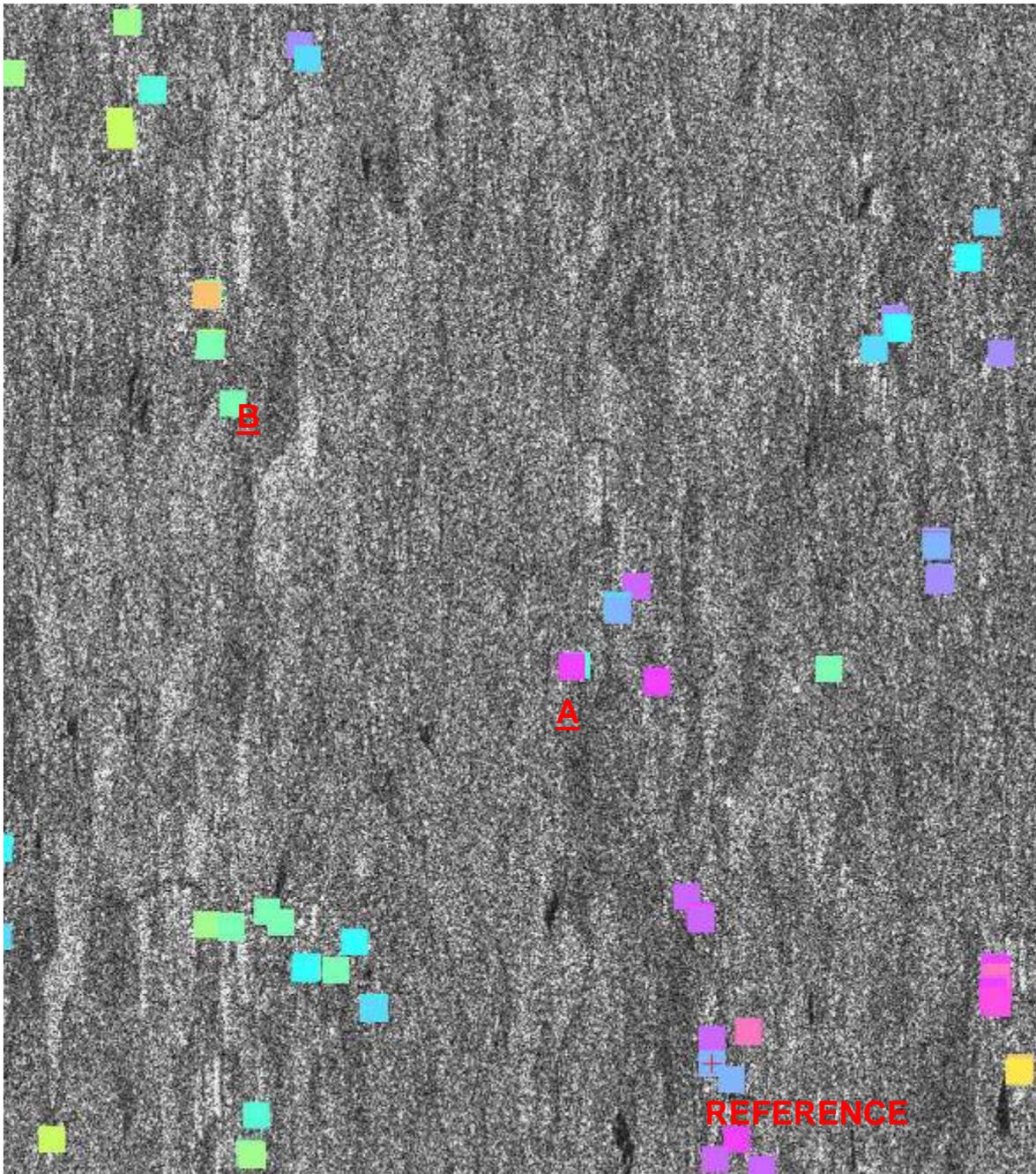


Figure 15 : position des PS sur la zone de Chéméry. Les positions du point de référence local et de 2 points autour de la zone d'injection sont indiquées.

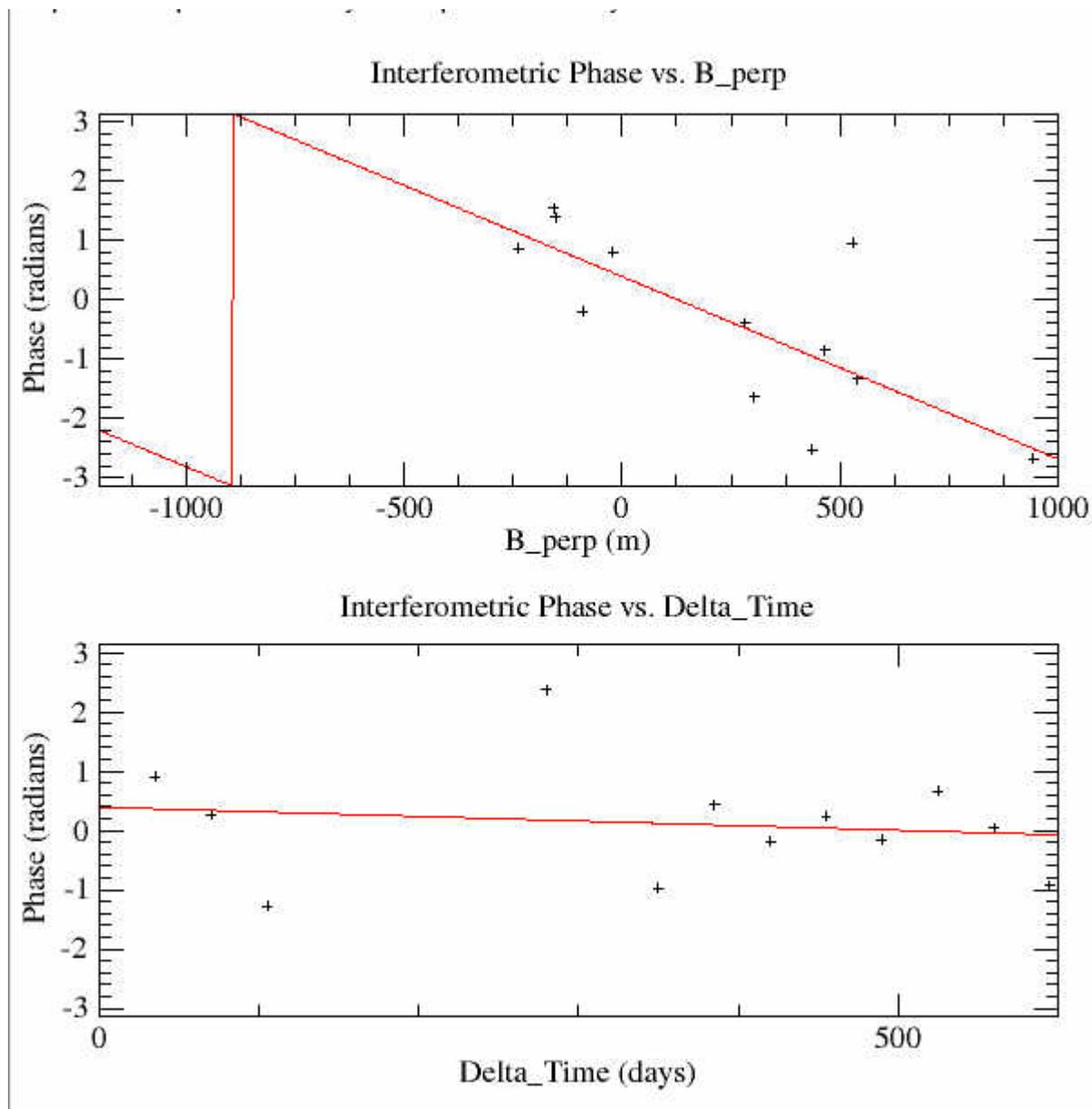


Figure 16 : phase corrigée de l'estimation de l'atmosphère en fonction de la baseline perpendiculaire (haut) et du temps (bas) pour le point A

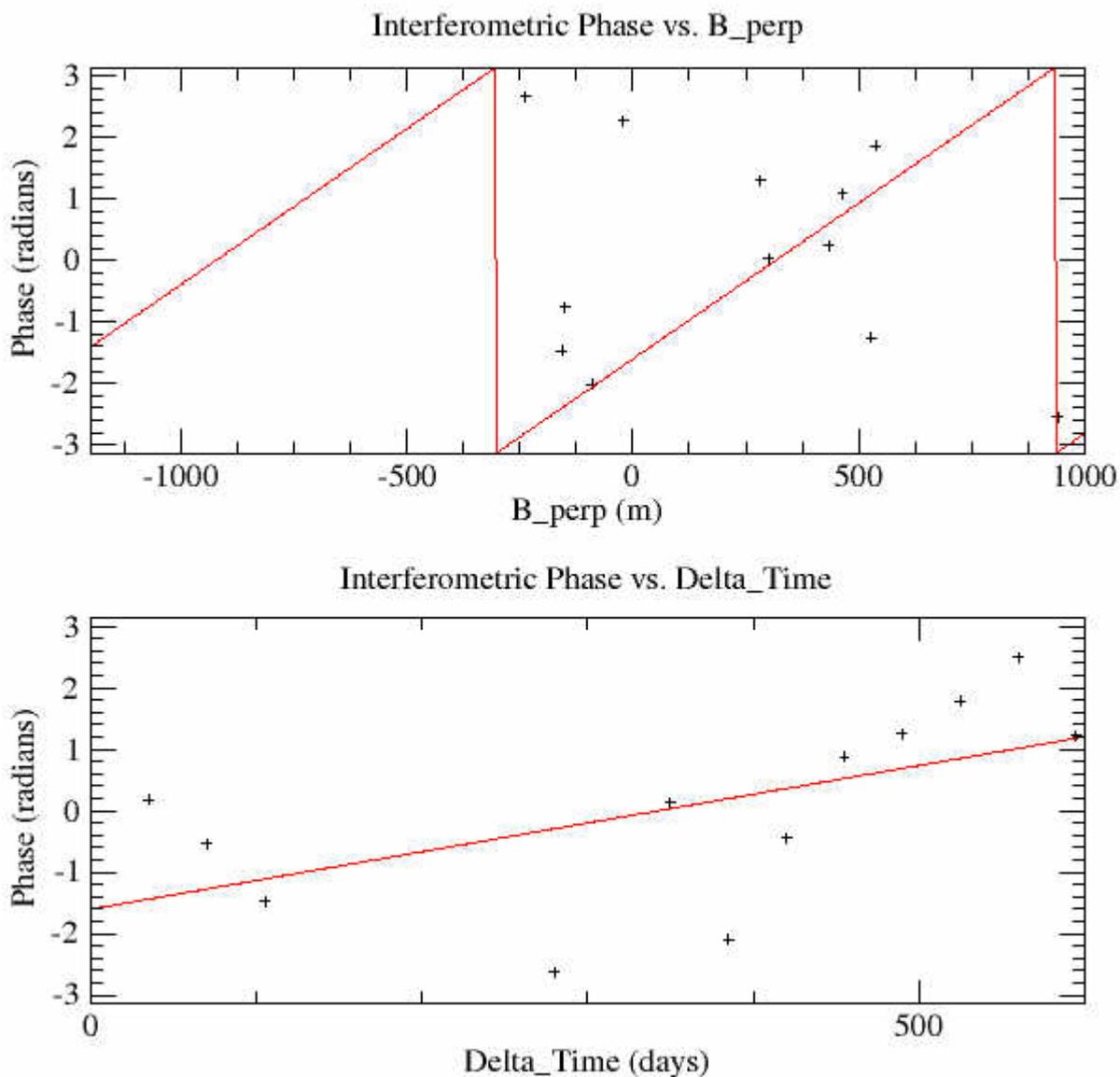


Figure 17 : phase corrigée de l'estimation de l'atmosphère en fonction de la baseline perpendiculaire (haut) et du temps (bas) pour le point B

Les valeurs de vitesses moyennes de déformation estimées pour le site de Chemery sont :

Point	Vitesse en ligne de visée
A	1.8 mm/an
B	-7.7 mm/an

### 4.2.3. Discussion

Nous pouvons observer sur le nombre réduit de points réellement accessibles, que les résultats apparaissent bruités. Ainsi, les vitesses estimées ne semblent pas indiquer une éventuelle déformation d'ensemble. Ce bruit est probablement dû au nombre insuffisant de données utilisées (14 images) pour contraindre les régressions et calculer les effets atmosphériques. La faible densité de points pouvant également être la cause de problème de calcul (notamment lors de déroulement de phase)

Le point A de Chéméry semble être celui dont la phase est la moins bruitée. En effet, les valeurs de phases suivent le mieux les modèles linéaires aussi bien en baseline perpendiculaire (composante topographique) qu'en temps (déformation). On notera toutefois que les valeurs fluctuent de presque un radian autour des modèles, ce qui équivaut à une fluctuation d'environ 5 mm en terme de déformation.

Par ailleurs, la Figure 18 montre qu'un simple changement de point de référence peut légèrement dégrader les écarts aux modèles (nous avons, en fait, choisi comme référence un point voisin du point de référence initial) mais suffisamment pour inverser le sens de la déformation estimée (vitesse moyenne en ligne de visée de -1,0 mm/an au lieu de 1,8 mm/an). Ceci confirme que même un point « peu » bruité ne fournit pas la précision suffisante pour la déformation extrêmement faible attendue.

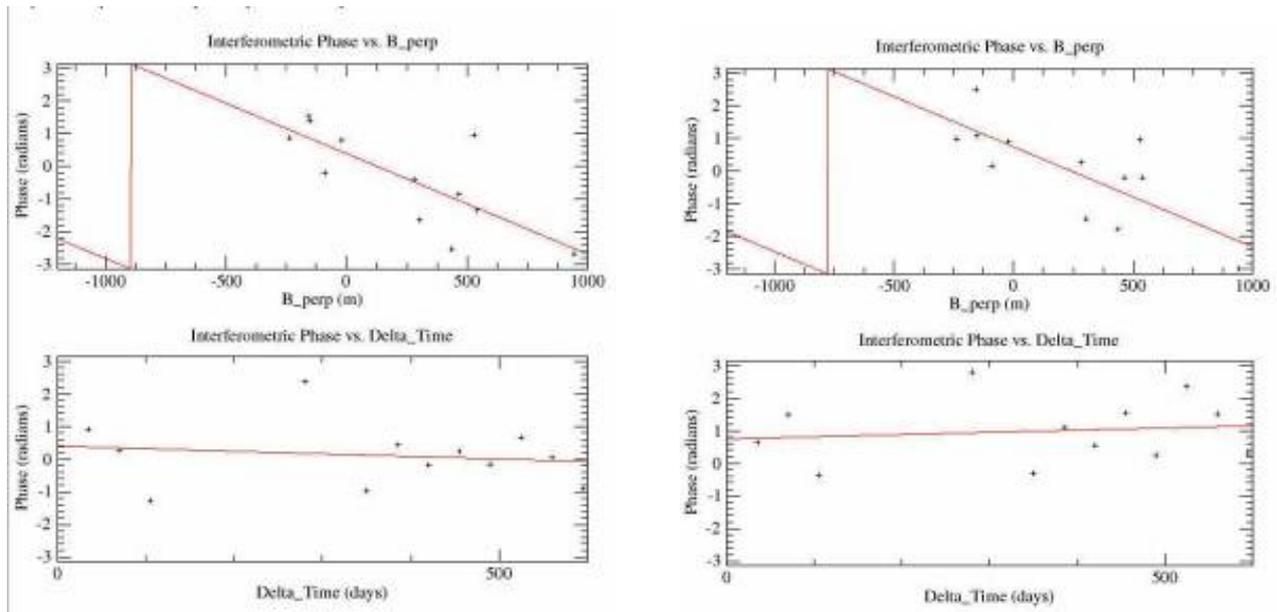


Figure 18 : phase du Point A par rapport à la référence précédente (gauche) et par rapport à une référence voisine (droite)

La technique des réflecteurs persistants n'a donc pas permis de détecter de mouvement conséquents à de l'injection de gaz sur le secteur de Soings/Chéméry. D'une part le nombre de données acquises pour l'expérience était faible (14), d'autre part la déformation attendue semble en dessous de la sensibilité des outils actuels.



## 5. Conclusions et perspectives

Cette étude nous permet de tirer les conclusions suivantes :

### a) Interférométrie classique :

- Comme attendu, aucun mouvement centimétrique évident n'a été détecté sur les couples acquis à 35 jours d'intervalle. Par ailleurs, aucun mouvement centimétrique évident n'a été détecté sur les zones cohérentes (Soings-en-Sologne et Contres) sur les images à 6 mois. Finalement, les couples à 6 mois pour lesquels on attend les mouvements maximaux n'ont pas une cohérence suffisante pour nous permettre de conclure quant à la présence de mouvements dans la zone centrale du site d'injection.

- L'occupation des sols sur le site de Chéméry est très caractéristique de celle des autres sites d'injection de gaz naturel en France : il est situé en zone rurale, d'où la présence de champs et petites forêts qui est très défavorable au traitement InSAR. Ainsi il est peu probable qu'une étude sur un autre site du bassin parisien donne de meilleurs résultats.

- même dans un cas favorable, la précision de l'interférométrie conventionnelle est d'environ 1cm ce qui est insuffisant pour suivre le phénomène étudié.

### b) PSI

- La méthode PS se présentait comme une alternative. Cependant, le traitement est délicat, tout d'abord en raison de la faible densité de candidats PS que nous avons pu identifier. Par ailleurs avec un nombre réduit d'images nous n'étions pas dans des conditions optimales pour le traitement PSI. Finalement, la faiblesse des mouvements attendus (entre 1 et 3 mm) font qu'une telle étude est réalisée à la limite (voire en dessous) de la sensibilité de la technique PS.

Le contexte du site (qui est par ailleurs représentatif des sites de stockage français) se prêtent en fait assez mal à l'utilisation de l'interférométrie radar.

### Perspectives :

- nouveaux capteurs : deux nouvelles possibilités s'offrent à nous, mais avec des caractéristiques opposées nécessitant donc des stratégies de traitement différentes:

a) ALOS (capteur en bande L, données à partir de début 2007): les ondes en bande L (environ 20 cm de longueur d'onde) pénètrent plus le couvert végétal que les ondes en bande C plus courtes (environ 5 cm). Etant moins sensible au couvert végétal, le produit interférométrique sera moins affecté par la perte de cohérence. En revanche la faible répétitivité du capteur (46 jours entre deux acquisitions) ne permettra pas d'avoir plus de 8 images sur un cycle injection-extraction.

b) COSMO-SKYMED: cette constellation de satellites fonctionnant en bande X (3 cm de longueur d'onde) sera disponible progressivement à partir de 2008. Du fait de la faible longueur de l'onde, les interférogrammes qui seraient produits avec des écarts de dates équivalents à ceux présentés dans ce rapport seraient très peu cohérents. Néanmoins, du fait d'une répétitivité qui atteindra 24 heures, cet outil offre la possibilité de produire des interférogrammes à courts écarts temporels et donc peu bruités. Par ailleurs, l'archive considérable ainsi produite sera très adaptée aux méthodes PSI à condition d'avoir des moyens de calculs appropriés. Toutefois, dans la perspective d'un suivi déformation de la surface du sol liée à une injection de CO<sub>2</sub> et donc ayant une forte composante non-cyclique à l'échéance de plus de la dizaine d'années, la forte densité temporelle n'est peut-être pas fondamentale. Finalement, la très haute résolution du capteur (1 m pour des images de 10 km de couverture) devrait permettre d'obtenir un plus grand nombre de PS pour une zone donnée.

- instrumentation au sol :

L'installation de cornets-réfecteurs ou de transpondeurs permet de créer des réflecteurs très forts et matérialisés au sol. L'intérêt étant d'avoir une certaine connaissance du point : contrairement au PS « naturels » on peut les disposer et contrôler de façon à ce qu'ils n'aient pas de mouvement propre (dilatation thermique, affaissement de la structure contenant le PS, ...). Toutefois, on perd un peu un des intérêts de l'interférométrie radar qui est de ne pas nécessiter d'instrumentation au sol ainsi que la possibilité d'utiliser l'archive antérieure à la mise en place des instruments. L'intérêt pratique d'un tel dispositif dépendra de sa précision par rapport aux autres techniques de géodésie classique (nivellement, GPS) sur une zone d'une dizaine de km d'étendue ainsi de leurs coût relatifs. Ces questions n'étant pas encore tranchées.

Ces options sont évidemment contraintes par la valeur de la déformation ayant effectivement lieu. Une déformation totale de 3 mm sur une distance d'une dizaine de km et sur plusieurs années telle qu'envisagée est difficilement mesurable par les techniques géodésiques usuelles.

## 6. Bibliographie

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/gaz/stockages.htm>

Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F., 2003, SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, n. 7, 201-207

Scharroo R. , Visser, P. N. A. M. ,1998, Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites, J. Geophys. Res., 103, C4, 8113-8127

Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2000, Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, n. 5, 2202 2000

Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001, Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, n. 1, 8-20

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., Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 71, n° 2, 197-204

Werner C., Wegmüller U., Strozzi T., Wiesmann A., 2003, Interferometric point target analysis for deformation mapping, Proceedings of IGARSS 2003, Toulouse, France, 21-25 Jul. 2003



**Centre scientifique et technique  
Service ARN**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34