

# Estimation des effets atmosphériques en interférométrie différentielle : Validation des modèles à partir d'une base de données multitemporelle d'interférogrammes

Ferdaous CHAABANE<sup>1</sup>, Antonio AVALLONE<sup>2</sup>, Florence TUPIN<sup>1</sup>, Pierre BRIOLE<sup>2</sup>, Henri MAITRE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GET-Télécom-Paris - CNRS URA 820  
46 rue Barrault - 75013 Paris - France

<sup>2</sup>Institut de Physique du Globe, Dpt Sismologie - UMR CNRS 7580  
4 Place Jussieu - 75005 Paris - France

chaabane@tsi.enst.fr, antav@ipgp.jussieu.fr  
tupin@tsi.enst.fr, briole@ipgp.jussieu.fr, maitre@tsi.enst.fr

**Résumé** – L'aspect différentiel des données interférométriques est à l'origine du caractère multitemporel des images manipulées. Dans cet article, nous proposons une méthode de correction des effets atmosphériques en interférométrie différentielle fondée sur cette propriété. L'approche développée commence par sélectionner les pixels les plus cohérents et les plus stables dans le temps en s'appuyant sur la corrélation des effets atmosphériques avec la topographie. L'exploitation de ces pixels nous permet de retrouver un modèle atmosphérique pour chaque interférogramme. Ensuite, les relations existant entre les différents couples interférométriques sont utilisées pour valider les modèles d'atmosphère obtenus. La diversité des données interférométriques et leur répartition dans le temps fixent la robustesse de cette méthode.

**Abstract** – The Differential interferometric data are multi temporal since they are calculated from different time acquisition. We present here, a methodological approach for the correction of tropospheric effects disturbing differential interferograms based on this property. First a subset of very coherent pixels is identified using correlation between phase and topography. These pixels allow the computation of a global tropospheric model for each interferogram. Secondly, a cross validation of the models is applied using the entire multi temporal database. Since multiple interferograms are available, a robust method can be conceived for the validation of tropospheric models using triplet of interferometric pairs containing one common acquisition.

## 1 Introduction

L'apparition de l'interférométrie différentielle depuis 1992, a été déterminante dans la compréhension des phénomènes géophysiques notamment l'étude des déformations et des mouvements de la croûte terrestre. Néanmoins, la précision de cette technique se trouve limitée par les effets atmosphériques. Une modification des conditions atmosphériques notamment dans la couche basse de l'atmosphère (troposphère) entre les instants d'acquisition des images induit une variation du trajet de l'onde radar. Cela se traduit par une rotation de phase sur l'interférogramme perturbant la mesure des déformations. Les perturbations atmosphériques sont alors une source d'erreur systématique pour l'estimation des déplacements de terrain car elles rajoutent un déphasage non relié au mouvement.

Dans cet article, nous présentons une nouvelle méthodologie pour la correction des effets troposphériques à partir d'une base de données de plusieurs interférogrammes différentiels. L'approche développée reprend les travaux de [1] qui montrent une corrélation phase/altitude. Notre apport se situe d'une part, au niveau de l'identification des pixels stables (réflecteurs permanents, notés RP) et d'autre part dans la validation des modèles troposphériques obtenus en exploitant une base de données multitemporelles d'interférogrammes différentiels. L'organigramme global de notre approche est représenté dans la figure 1. Il illustre le plan des sections présentées dans cet article.

## 2 Sélection des réflecteurs permanents

La corrélation entre l'altitude et la phase d'un interférogramme différentiel a été observée et exploitée dans de précédents travaux [1]. En effet, les variations de l'indice de réfraction de la troposphère sont principalement dues aux variations de la température, de la pression et de la vapeur d'eau. Ces trois paramètres sont uniquement fonction de l'altitude si l'on suppose que la troposphère est homogène horizontalement. D'où l'éventuelle corrélation entre la phase et l'altitude. Nous nous proposons alors d'estimer et de corriger les effets atmosphériques en modélisant les corrélations entre la phase repliée et l'altitude par un modèle linéaire [1]. Cependant, cette modélisation nécessite la sélection de pixels cohérents pour ne considérer que les valeurs de phases valides dans le calcul du modèle. Cette première partie résume les différentes étapes suivies pour l'identification des réflecteurs permanents.

Dans un premier temps, une carte collective de cohérence est calculée à partir de tous les interférogrammes différentiels (couvrant différentes périodes) pour extraire un premier ensemble de pixels stables dans le temps. Cette carte représente la persistance de la cohérence sur le long terme et permet de réduire de quelques millions à quelques milliers le nombre de pixels utilisés pour les modèles.

Dans un second lieu, nous filtrons le bruit de décorrélation qui affecte la phase repliée des interférogrammes. La technique

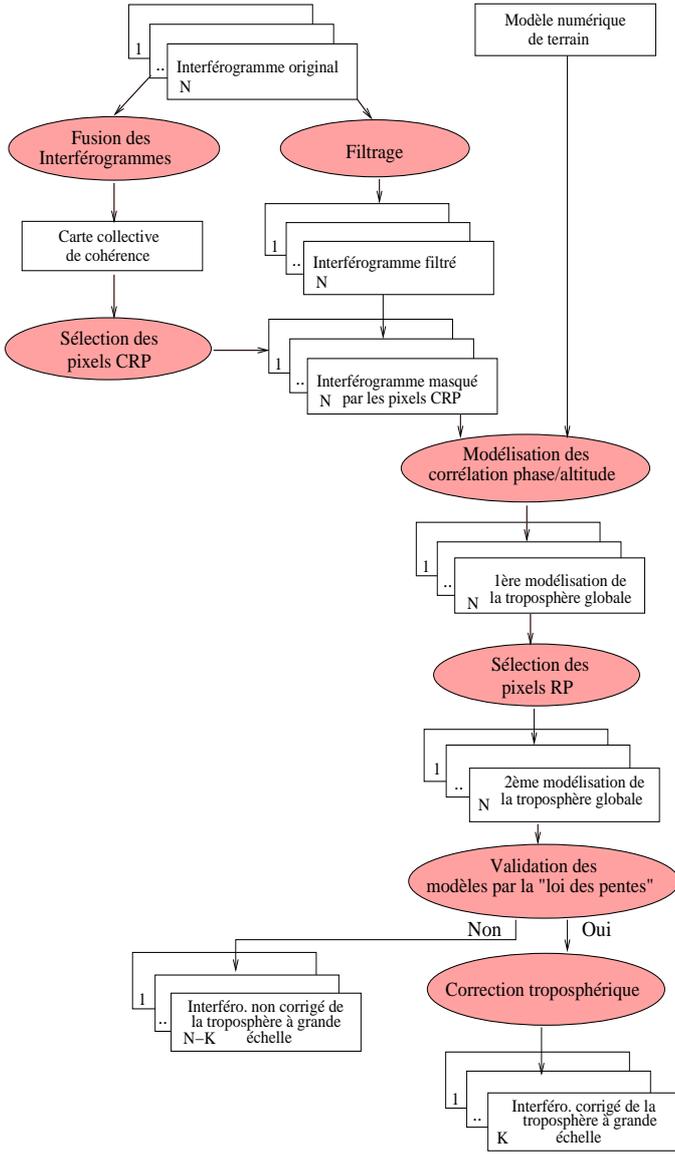


FIG. 1: Enchaînement des différentes étapes de correction des effets troposphériques pour une base de données de  $N$  interférogrammes différentiels.

de filtrage utilisée exploite la modélisation locale de la phase complexe par une sinusoïde bidimensionnelle décrite par deux fréquences [7]. En réduisant le bruit dans les interférogrammes, la phase filtrée permet une modélisation plus fiable des corrélations phase/altitude. L'amélioration de la modélisation des effets troposphériques en utilisant cette technique de filtrage a été mise en évidence dans de précédents travaux [4].

Les pixels sélectionnés par la carte collective de cohérence représentent des candidats à la sélection des réflecteurs permanents (notés CRP). Comme indiqué précédemment, ils permettent de faire une première modélisation linéaire des regressions phase/altitude. Cependant, malgré leur grande cohérence, les pixels CRP ne sont pas tous robustes par rapport au modèle de troposphère calculé. Ceci est dû essentiellement aux perturbations atmosphériques locales. Une sélection plus stricte s'avère alors nécessaire.

Pour cela, les meilleurs modèles de variation phase/altitude et les interférogrammes correspondants sont sélectionnés en utilisant l'erreur quadratique moyenne. Ceci délimite une sous-

famille de  $K$  interférogrammes caractérisée par une forte corrélation entre la phase et l'altitude. Cette famille sera notée par la suite :  $\mathcal{F}_{RP}$ .

Pour chaque interférogramme  $k$  concerné et en chaque pixel  $CRP_i$ , l'erreur  $\epsilon_i^k$  entre la phase filtrée  $\phi_i^k$  et la phase estimée par le modèle troposphérique  $\hat{\phi}_i^{k, global}$  est calculée.

$$\epsilon_i^k = \phi_i^k - \hat{\phi}_i^{k, global} \quad (2\pi). \quad (1)$$

Un réflecteur permanent est celui qui réalise une petite erreur pour l'ensemble des  $K$  interférogrammes. Ceci exprime la robustesse multitemporelle du pixel par rapport aux effets atmosphériques globaux et constitue une seconde et dernière phase de filtrage avant d'être qualifié de RP. Nous avons alors besoin d'une mesure globale de la fidélité du pixel par rapport à tous les modèles. Nous avons adopté pour cela la somme symétrique associative [2] pour fusionner les erreurs absolues  $\epsilon_i^k$  relatives à chaque pixel  $CRP_i$  et obtenir ainsi l'erreur globale  $\epsilon_i$  :

$$\epsilon_i = \sigma_0(\sigma_0(\dots, \sigma_0(\sigma_0(\epsilon_i^1, \epsilon_i^2), \epsilon_i^3), \dots, \epsilon_i^N), \epsilon_i^N) \quad (2)$$

où  $\sigma_0$  représente la somme symétrique associative. Si les erreurs absolues d'un pixel  $CRP_i$  sont faibles pour la majorité des modèles alors l'erreur globale  $\epsilon_i$  sera très faible par rapport aux autres, et donc facilement détectable par seuillage (voir figure 2). Cet opérateur présente l'avantage d'être sélectif et seuls les pixels avec des erreurs faibles pour tous les modèles sont finalement sélectionnés en tant que réflecteurs permanents :

$$CRP_i \in \mathcal{S}_{CRP}, \text{ Si } \epsilon_i < s_{RP} \text{ alors } CRP_i \in \mathcal{S}_{RP}. \quad (3)$$

où  $\mathcal{S}_{CRP}$  et  $\mathcal{S}_{RP}$  représentent respectivement l'ensemble des pixels  $CRP_i$  et  $RP_i$  et  $s_{RP}$  le seuil choisi empiriquement pour la somme symétrique associative.

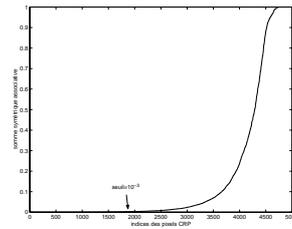


FIG. 2: Distribution des résultats de fusion des erreurs absolues par la somme symétrique associative et choix du seuil  $s_{RP}$ . Exemple d'une famille de 4753 pixels CRP sélectionnés pour le région du Golfe de Corinthe.

Ainsi, nous avons identifié un sous-ensemble  $\mathcal{S}_{RP}$  de réflecteurs permanents partant d'une série multitemporelle d'interférogrammes différentiels. La sélection des pixels RP nous permet de réduire le bruit des artefacts locaux qui perturbe les corrélations phase/altitude et empêche de bien modéliser l'effet global. En outre, nous réduisons le nombre de pixels CRP de quelques milliers à un seul millier de pixels en augmentant la confiance en leur stabilité. Après identification des RP, nous procédons à leur exploitation dans l'estimation des perturbations troposphériques globales. Le but de leur sélection étant de corriger ou améliorer les modèles de troposphère pour les interférogrammes n'appartenant pas à la famille  $\mathcal{F}_{RP}$ .

De nouveaux modèles sont alors recalculés pour tous les interférogrammes de la base. Les améliorations sont évaluées en terme d'erreur quadratique moyenne [4].

### 3 Validation des modèles de perturbation atmosphérique

La deuxième partie de cet article est consacrée à la validation des paramètres de modèles de troposphère calculés en exploitant le principe même de construction d'un interférogramme différentiel. Nous commençons par exposer le principe de la technique de validation ensuite nous décrirons l'algorithme que nous avons mis au point.

Considérons pour cela la formulation suivante de la phase d'un interférogramme différentiel :

$$\begin{aligned}\Phi &= \Phi_{atm_g} + \Phi_{atm_l} + \Phi_{dep} + \Phi_{bruit} \\ &= (\alpha h + \beta) + \Phi_{atm_l} + \Phi_{dep} + \Phi_{bruit}\end{aligned}\quad (4)$$

où  $\Phi_{atm_g}$  représente la contribution de l'atmosphère globale modélisée par  $(\alpha h + \beta)$  d'après l'analyse faite précédemment,  $\Phi_{atm_l}$  est la contribution des artéfacts locaux,  $\Phi_{dep}$  est le délai de phase dû aux déplacements de terrains et le terme  $\Phi_{bruit}$  comprend l'ensemble des erreurs de corrections topographiques et orbitales et les erreurs de décorrélation temporelle et spatiale non corrigées par le filtrage. En supposant que le premier terme soit indépendant des trois autres termes c'est à dire que les perturbations locales, le mouvement de terrain et le bruit ne varient pas linéairement en fonction de l'altitude  $h$ , nous avons pour un triplet d'interférogrammes différentiels  $AB$ ,  $BC$  et  $AC$  générés à partir de trois images SAR  $A$ ,  $B$  et  $C$  la relation vectorielle suivante :

$$\alpha_{AC} = \alpha_{AB} + \alpha_{BC}. \quad (5)$$

Cette relation vectorielle induit par analogie à la deuxième loi de Kirchoff ("la loi des mailles" dans un circuit électrique), une loi qu'on notera "la loi des pentes". Celle-ci stipule que la somme algébrique des paramètres  $\alpha$  le long d'un circuit (boucle fermée composée de plusieurs arcs et chaque arc est pondéré par un paramètre  $\alpha$ ) est constamment nulle. C'est en nous fondant sur cette loi que nous pouvons déterminer les paramètres valides et les paramètres mal estimés. Il suffit pour cela de vérifier que la somme algébrique dans tous les circuits formés par une famille d'interférogrammes différentiels est nulle. Si tel n'est pas le cas, cela signifie qu'il existe des paramètres mal estimés qu'il faut détecter. En se fondant sur cette loi, nous pouvons donc déterminer les arcs valides et les arcs défectueux qui correspondent respectivement à une bonne modélisation et à une modélisation mal estimée. Les arcs n'appartenant à aucun circuit fermé seront notés arcs non attribués.

L'algorithme de validation proposé repose sur l'utilisation de l'algorithme de Bellman-Ford de recherche du plus court chemin. Outre la détermination du plus court chemin, cet algorithme peut détecter les circuits de coûts strictement négatifs donc non nuls. Nous partons initialement d'un graphe constitué d'arcs correspondant aux paramètres des modèles sélectionnés pour l'identification des pixels RP (cf. section 2). Le principe

général de l'algorithme de validation est de vérifier que la somme des paramètres dans tous les circuits est nulle à chaque fois que nous rajoutons un arc au graphe initial. Ceci est réalisé en appliquant deux fois l'algorithme de Bellman-Ford. Le principe général de l'algorithme proposé est le suivant :

Algorithme :

Données :

Les données sont les arcs auxquels sont associés paramètres  $\alpha$  estimés par modélisation linéaire des corrélations phase/altitude.

Résultat :

Etat final de tous les arcs (valides, défectueux ou non attribués).

Déroulement :

Début:

I. Initialisation

1. Appliquer deux fois l'algorithme de Bellman-Ford comme expliqué précédemment sur le graphe formé par la famille  $\mathcal{F}_{RP}$  pour vérifier que tous les circuits sont de coût nul : l'ensemble des arcs validés constitue le graphe initial  $\mathcal{G}_0$  sur lequel nous allons travailler.

II. Traitement global:

1. Pour un arc donné, le rajouter au graphe courant (initialement  $\mathcal{G}_0$ );
  - 1.1. S'il n'existe aucun circuit le contenant, le placer dans la liste des arcs non attribués et passer à l'arc suivant;
  - 1.2. Sinon, appliquer deux fois l'algorithme de Bellman-Ford sur le graphe courant pour détecter les circuits de coût non nul;
    - 1.2.1. Si aucun circuit de coût non nul n'a été détecté, valider l'arc et passer à l'arc suivant;
    - 1.2.2. Sinon, l'arc est répertorié défectueux et passer à l'arc suivant;

Fin.

Cet algorithme nous permet alors de valider la modélisation des corrélations linéaires entre la phase et l'altitude mises en évidence dans la première section. La somme algébrique dans un circuit est dite nulle à  $\epsilon$  près (marge d'erreur relative à la largeur des nuages de points altitude/phase). Comme sortie de cet algorithme global nous obtenons l'ensemble des arcs validés, l'ensemble des arcs défectueux et l'ensemble des arcs isolés que l'on n'a pas pu valider. Par ailleurs, cet algorithme met en évidence l'intérêt des pixels RP sur les pixels CRP, en montrant l'augmentation du nombre de modèles validés.

## 4 Résultats

L'algorithme de validation des paramètres  $\alpha$  a été appliqué sur les résultats de la deuxième modélisation c'est à dire la modélisation basée sur les pixels RP et ce pour une base de données de 81 interférogrammes imageant le Golfe de Corinthe (Grèce) qui a été touché par un tremblement de terre Ms=6.2.

Mis à part l'EQM une autre méthode possible pour évaluer l'amélioration de la modélisation après extraction des réflecteurs permanents est de compter le nombre de branches valides et

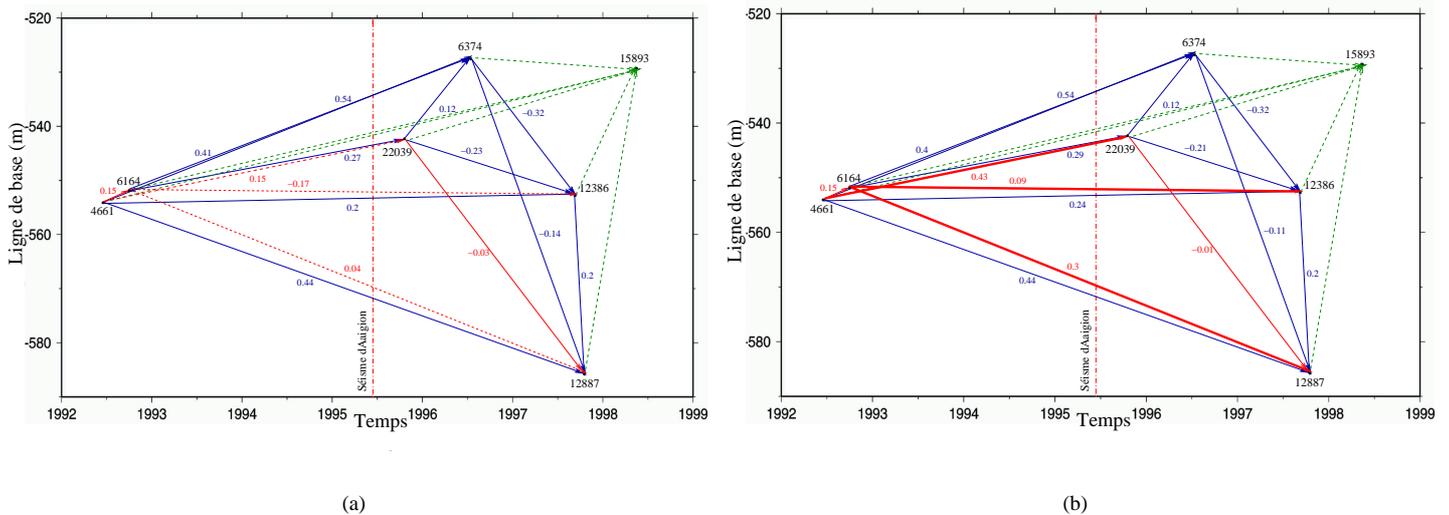


FIG. 3: Algorithme de validation des modèles atmosphériques sans et avec sélection des pixels RP. (a) Sans sélection des pixels RP, l'algorithme détecte : 12 arcs validés (ligne continue), 3 arcs défectueux et 6 arcs non attribués (ligne discontinue). (b) L'identification des pixels RP nous permet de récupérer 3 modèles de franges atmosphériques qui vérifient la "loi des pentes" (en gras).

défectueuses avant et après exploitation des pixels RP. A titre d'exemple nous indiquons dans la figure 3, les résultats obtenus pour une famille de 21 interférogrammes sans et avec sélection des pixels RP. Notons que notre approche d'identification et d'exploitation des pixels RP nous permet de corriger la modélisation de 3 interférogrammes en transformant les branches défectueuses en branches valides assurant des sommes algébriques nulles dans tous les circuits. Ceci montre que la plupart des pixels CRP affectés par les perturbations locales ou entachés de bruit résiduel de décorrélation ont été filtrés et ne faussent plus la modélisation atmosphérique.

Ainsi, nous obtenons des modélisations robustes des effets troposphériques globaux perturbant les interférogrammes différentiels par suite une mesure plus fiable de la déformation de terrain. Afin de corriger les interférogrammes correspondant nous effectuons une simple différence entre la phase originale et le modèle estimé selon l'équation suivante :

$$\Phi_{corrige}^{atm_g} = \Phi - \Phi_{atm_g} = \Phi_{atm_l} + \Phi_{dep} + \Phi_{bruit}. \quad (6)$$

Cette dernière montre que les franges de déformation restent entachées de bruit résiduel de décorrélation temporelle et spatiale et de bruit des perturbations atmosphériques locales.

## 5 Conclusion

Cet article a présenté une nouvelle approche pour la correction des effets atmosphériques exploitant les relations existant entre les différents interférogrammes de toute la base multitemporelle d'interférogrammes. Les performances de cette méthode ont été justifiées sur une base de données d'interférogrammes imageant le golfe de Corinthe qui est caractérisé par un fort relief. Une variation minimale de l'altitude est nécessaire pour pouvoir mettre en évidence les corrélations phase/altitude ce qui représente une limitation de cette méthode. En outre, après correction des effets atmosphériques globaux, il persiste encore

certaines effets locaux haute fréquence dus à des phénomènes atmosphériques ponctuels et localisés. D'autres techniques exploitant l'aspect mutitemporel de la base de données interférométrique sont proposés pour remédier à ce genre de problèmes [5] [6].

## Références

- [1] F. Beauducel, P. Briole and J-L. Froger, *Volcano wide fringes in ERS SAR interferograms of Etna (1992-1998): Deformation or tropospheric effect ?*, Journal Of Geophys. Res., 105, pp. 16,391-16,402, 1999.
- [2] I. Bloch, *Information Combination Operators for Data Fusion: A Comparative Review with Classification*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 26(1), pp. 52-67, 1996.
- [3] R. Bellman, *On a routing problem*, Quarterly of Applied Mathematics, 16, pp. 87-90, 1958.
- [4] F. Chaabane, A. Avallone, F. Tupin, P. Briole and H. Maître, *Improvement of tropospheric correction by adapted phase filtering*. EUSAR2002, Cologne, pp.361-364, June 2002.
- [5] F. Chaabane, A. Avallone, F. Tupin, P. Briole and H. Maître, *Correction of local and global tropospheric effects on differential SAR interferograms for the study of earthquake phenomena*. IGARSS 2003, Toulouse, July 2003.
- [6] F. Sarti, H. Vadon and D. Massonnet, *A method for automatic characterization of InSAR atmospheric artefacts by correlation of multiple interferograms over the same site*, Proc. IGARSS'99, Hambourg, pp. 1937-1939, June 1999.
- [7] E. Trouvé, J.-M. Nicolas, and H. Maître, *Fringe detection in noisy complex interferograms*, Applied Optics - Information Processing, 35, pp. 3799-3806, 1996.