

Marché 04/CNES/1811/00 – DCT094

Déroulement de franges interférométriques à partir d'un MNT de référence – Lot 1

Rapport final

BRGM/RP-53819-FR
avril 2005

BRGM/RP-53819-FR
avril 2005

Marché 04/CNES/1811/00 – DCT094 Déroulement de franges interférométriques à partir d'un MNT de référence – Lot 1

Rapport final

BRGM/RP-53819-FR
avril 2005

E. Simonetto, D. Raucoules

Vérificateur :

Nom : Claudie CARNEC

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Christine KING

Date :

Signature :

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Interférométrie, Imagerie radar, MNT, Déroulement de franges.

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

Simonetto E., Raucoules D. (2005) – Déroulement de franges interférométriques à partir d'un MNT de référence – Lot 1 – rapport final. BRGM/RP-53819-FR, 73 p., 23 fig., 16 tabl., 2 ann.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport fait état des travaux réalisés dans le cadre du lot 1 du contrat CNES concernant l'amélioration du déroulement de franges en interférométrie radar par utilisation d'un MNT de référence et d'une base d'images radar satellite. L'objectif est d'atteindre des précisions altimétriques de 2-3 m sur le MNT résultant grâce à la complémentarité des données utilisées.

Après la définition de la problématique, un bref état de l'art est présenté. Une analyse théorique basée sur des critères géométriques est ensuite menée afin de définir une procédure sur le choix des images radar à utiliser et comment les exploiter. Une première chaîne de traitement est alors proposée.

Elle est testée sur un jeu de données ERS acquises en mode interférométrie sur la région de Marseille et plusieurs MNT de référence. Les précisions des MNT obtenus sont évaluées par rapport à un MNT de validation selon la pente des terrains et le choix du MNT de référence.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Avancement dans le calendrier au 31 mars 2005 – Lot 1	11
3. Analyse du sujet	13
3.1. DÉFINITION DU CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	13
3.1.1.Problématique	13
3.1.2.Géométrie de prise de vue et notations.....	14
3.1.3.MNT de référence.....	17
3.1.4.Récents concepts de missions topographiques	18
3.2. BIBLIOGRAPHIE	20
3.2.1. Sur l'utilisation d'un MNT de référence en interférométrie radar	20
3.2.2.Fusion de mesures altimétriques et interférométriques.....	22
3.2.3. Sur les zones de renversement/compression/ombres	26
3.2.4. Conclusion.....	27
3.3. CHOIX DE CONFIGURATIONS INTERFÉROMÉTRIQUES.....	27
3.3.1.Contexte	27
3.3.2.Niveau de cohérence.....	28
3.3.3.Altitudes d'ambiguïté/précision du MNT de référence	29
3.3.4.Altitudes d'ambiguïté/pentes du terrain	30
3.3.5.Altitudes d'ambiguïté ou baselines requises	31
3.3.6. Angles d'incidence.....	33
3.3.7.Processus itératif	34
3.4. CONCLUSION.....	36
4. Chaîne expérimentale de traitement	37
4.1. SCHÉMA GÉNÉRAL	37
4.2. DÉTAILS DES ÉTAPES	38
4.3. PRÉCISIONS SUR CERTAINS MODULES DU LOGICIEL GAMMA.....	40
4.3.1.Précisions sur le filtrage des interférogrammes	40
4.3.2.Précisions sur l'algorithme de déroulement.....	40

4.4. MÉTHODE ENVISAGÉE SUR LES ZONES D'OMBRES ET DE RENVERSEMENT	41
5. Expériences	43
5.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES	43
5.1.1. Images radar	43
5.1.2. MNT	45
5.1.3. Conclusion sur l'utilisation des MNT et des images radar	53
5.2. CHOIX DES CONFIGURATIONS INTERFÉROMÉTRIQUES	54
5.3. ANALYSE DES MNT INTERFÉROMÉTRIQUES INDIVIDUELS À L'ÉTAPE 1	54
5.3.1. Observation des interférogrammes différentiels	54
5.3.2. Distribution des écarts altimétriques	58
5.3.3. Évaluation des MNT	59
5.4. CONCLUSION	61
6. Conclusion et perspectives	63
7. Bibliographie	65

Liste des figures

Figure 1 - Géométrie de la prise de vue.	14
Figure 2 - Niveau moyen de cohérence avant et après filtrage (cf. 4.3.1) en fonction de la baseline.	28
Figure 3 - Altitudes d'ambiguïté (m) maximales selon la baseline pour des pentes nulles et différentes missions radar : $\diamond$ ASAR, + Cosmo-Skymed, Δ TerraSAR-L, * TerraSAR-X.	33
Figure 4 - a) Géométrie simplifiée, b) longueurs cumulées des zones d'ombre et de renversement (sans la longueur de la pente) en fonction de l'angle d'incidence et de la pente.	33
Figure 5 - Cas 1 : choix du rapport de baseline entre étape 2 et étape 1 selon le MNT de référence et l'altitude d'ambiguïté choisie en étape 1 entre 2.P2 et P2/k.	35
Figure 6 - Cas 2 : choix du rapport de baseline entre étape 2 et étape 1 selon l'altitude d'ambiguïté choisie en étape 1 entre 2.P1 et P1/k.	36
Figure 7 - Schéma général visant en une amélioration successive des précisions altimétriques par interférométrie radar à partir d'un MNT de référence.	37
Figure 8 - Exemple de réseau à maille carrée utilisé pour une méthode de déroulement MCF et déterminé par parcours en boucle sur 4 pixels.	41

Figure 9 - À gauche : représentation graphique des données ERS de la Track 65, Frame 2727 ou 2729. À droite : sélection de données dans un intervalle de temps.	43
Figure 10 - MNT ombrés SRTM30 et SRTM3.	46
Figure 11 - MNT ombrés IGN50 et IGN-BDZ.	48
Figure 12 - MNT ombrés SPOT5 HRS et SPOT5 P+XS.	49
Figure 13 - MNT ombrés DEM_UCL_858_145.5_30 et DEM_IGN_846.6_146_10.	50
Figure 14 - MNT ombrés sur la montagne Sainte-Victoire (point culminant 1 011 m).	51
Figure 15 - MNT ombrés sur le mont Carpiagne (point culminant à 656 m).	51
Figure 16 - Image classifiée des pentes estimées sur les MNT SPOT5-HRS et DEM_IGN_846.6_146_10. Blanc : pentes supérieures à 20 %, noir : pentes inférieures à 20 %, gris : mer ou bords.	52
Figure 17 - Interférogrammes différentiels non déroulés.	55
Figure 18 - Interférogrammes différentiels non déroulés sur le mont Carpiagne.	55
Figure 19 - Interférogrammes différentiels non déroulés sur la montagne Sainte-Victoire.	56
Figure 20 - Interférogrammes différentiels déroulés avec correction de l'ellipsoïde et avec correction par le MNT SPOT-HRS pour le couple 21963-41636 (baseline de 84 m). Une frange de couleur correspond à π	57
Figure 21 - Interférogrammes différentiels déroulés.	57
Figure 22 - Interférogrammes différentiels déroulés sur la montagne Sainte-Victoire.	58
Figure 23 - Distributions des écarts altimétriques obtenus à partir des interférogrammes différentiels.	59

Liste des tableaux

Tableau 1 - Standards de MNE.	17
Tableau 2 - Caractéristiques des MNT de référence possibles (voir Synthèse, 2004 par exemple).	18
Tableau 3 - Identification des cas de déroulement et d'amélioration possible des précisions altimétriques.	30
Tableau 4 - Altitudes d'ambiguïté selon la pente du terrain pour une configuration de type ERS à la portée proximale pour une baseline de 10 m.	31
Tableau 5 - Cas 1 : baselines correspondant à 2.P1, P1/k, 2.P2, P2/k avec $k = 0,17$ et à $\theta = 25^\circ$	32
Tableau 6 - Cas 2 : baselines correspondant à 2.P1 et P1/k avec $k = 0,04$ et $\theta = 45^\circ$	32
Tableau 7 - Cas 1: choix des baselines pour l'étape 1.	34
Tableau 8 - Cas 2: choix des baselines pour l'étape 1.	35
Tableau 9 - Liste des images ERS utilisées.	44
Tableau 10 - Récapitulatif des caractéristiques des MNT utilisés. Coordonnées exprimées en Lambert 3.	50

Tableau 11 - Statistiques des erreurs sur les deux classes considérées de l'image des pentes.	52
Tableau 12 - Précisions altimétriques des MNT de référence par rapport au MNT SPOT5-HRS sur la zone commune aux images radar (niveau de confiance 100 %).	53
Tableau 13 - Précisions altimétriques des MNT de référence par rapport au MNT DEM_IGN_846.6_146_10 sur la zone commune avec les images radar (niveau de confiance 100 %).	53
Tableau 14 - Les différents groupes de configurations interférométriques selon le MN de référence et les objectifs visés (déroulement, amélioration des précisions altimétriques).	54
Tableau 15 - Évaluation des précisions altimétriques des MNT interférométriques, mesurées sur les points de cohérence supérieure à 0,4, par rapport au MNT SPOT5-HRS (niveau de confiance 100 %).	60
Tableau 16 - Évaluation des précisions altimétriques des MNT interférométriques, mesurées sur les points de cohérence supérieure à 0,4, par rapport au MNT DEM_IGN_846.6_146_10 (niveau de confiance 100 %).	60

Liste des annexes

Annexe 1 - Caractéristiques des principaux capteurs satellite passés, actuels et futurs.....	67
Annexe 2 - Données fournies par le CNES	71

1. Introduction

Depuis plus de dix ans, l'interférométrie radar a largement démontré ses capacités pour la mesure de la topographie et de la déformation du sol. Nous nous intéressons ici à l'utilisation de l'interférométrie radar pour calculer des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Classiquement, une précision altimétrique RMS (Erreur Quadratique Moyenne) de l'ordre de 10 m est obtenue à partir d'un couple d'images ERS tandem. Cependant, en dehors de la présence éventuelle d'un signal de déformation du sol, la technique est limitée par la présence d'un signal atmosphérique pouvant atteindre plusieurs franges, des zones d'ombre et de renversement qui compliquent l'étape de déroulement de franges et par les changements temporels des propriétés de la surface où la cohérence du signal est totalement dégradée. Pourtant le besoin de données topographiques précises est sollicité par nombre d'utilisateurs civils et militaires pour toutes sortes d'applications (science de la Terre, urbanisme, préparation de mission, ...).

La mission topographique SRTM (SRTM30 Documentation, 2004) lancée en 2000 (NASA, NIMA, DLR, ASI) a permis d'acquérir en 11 jours des images couvrant 80 % du globe entre 56°S et 60°N, en mode interférométrique simultané. Ce système satellite est constitué de deux antennes, l'une émettrice et réceptrice et la seconde réceptrice placée au bout d'un bras de 60 m. Deux types d'antennes, bande C et bande X, ont été embarqués. L'acquisition simultanée prévient des limites liées aux changements des surfaces et aux perturbations atmosphériques. Les MNT produits ont des précisions altimétriques relatives de 6 m avec une maille de 30 m pour les produits ITED-2 et 10 m avec une maille de 90 m pour les produits ITED-1. Par ailleurs, 50 % des surfaces imagées le sont au moins 3 fois.

Suite à cette mission, les agences spatiales (DLR, CNES) réfléchissent à des concepts de mission topographique pour la mise à jour des MNT existants et l'obtention d'un MNT global de précision altimétrique de 2-3 m grâce à la complémentarité des données utilisées. Plusieurs configurations de satellites sont actuellement discutées. Dans ce contexte, la présente étude vise à mesurer l'apport d'un MNT de référence pour l'amélioration du déroulement de franges en interférométrie radar d'une base d'images radar satellite.

Après la définition de la problématique, un bref état de l'art est présenté en section 3. Une analyse théorique basée sur des critères géométriques est ensuite menée afin de définir une procédure sur le choix des images radar à utiliser et comment les exploiter. Une première chaîne de traitement est alors proposée (section 4).

Elle est testée grâce à un jeu de données ERS acquis en mode interférométrique sur la région de Marseille et à plusieurs MNT de référence (section 5). Une partie du travail dans la première phase de ce projet a concerné la comparaison des MNT de référence. Les précisions des MNT obtenus sont évaluées par rapport à un MNT de validation selon la pente des terrains et le choix du MNT de référence.

2. Avancement dans le calendrier au 31 mars 2005 – Lot 1

nom de la tache	01-déc	02-janv	03-févr	04-mars	05-avr	06-mai	07-juin	08-juil	total jours	pourcenta ge effectué
1.1 Potentialité des configurations			5	2					7	100,0
1.2 Processus itératif, analyse					2	3	2		7	28,6
2.1 Analyse sur terrain chahuté			2	1					3	33,3
3.1 Déroutement de franges			1	3	2				6	16,7
3.2 Production du MNT amélioré				2	2	2			6	33,3
3.3 Empilement de MNT				2	2	2	2		8	25,0
3.4 Processus itératif						1	5	4	10	0,0
4.1 Assimilation des données	2	6	3						11	100,0
4.2 Expériences avec MNT SRTM et IGN sans processus itératif, analyse des résultats		2	2	3	4	4			15	60,0
4.3 Expériences sur le schéma itératif et analyse des résultats							4	4	8	0,0
total jours par période	2	8	13	13	12	12	13	8	81	43,2
avancement prévu	2,5	12,3	28,4	44,4	59,3	74,1	90,1	100,0		

La réalisation est conforme au chrono prévisionnel.

Le lot 1 marque l'avancement sur l'analyse de la potentialité des configurations, les prémices du processus itératif, une première chaîne simple de traitement pour le déroulement, la production du MNT et l'empilement du MNT, l'assimilation des données et les premières expériences.

Le lot 2 devra marquer un net avancement sur les problématiques suivantes : amélioration des résultats du lot 1, analyse en terrain chahuté, développement méthodologique sur le déroulement de franges en terrain chahuté et processus itératif (suite de l'analyse et expériences).

3. Analyse du sujet

Nous définissons tout d'abord le cadre de travail (3.1) : problématique, géométrie et notations, caractéristiques de MNT de référence possibles, concepts de missions topographiques futures. Nous proposons ensuite un état de l'art sur l'utilisation d'un MNT de référence et la combinaison de cartes de phases ou d'altitudes dans un contexte interférométrique (3.2). Dans le paragraphe 3.3, nous nous intéressons au choix des configurations interférométriques selon des critères géométriques et les caractéristiques du MNT de référence utilisé.

3.1. DÉFINITION DU CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Dans l'ensemble de ce rapport, les termes MNT (Terrain) et MNE (Elévations) sont utilisés indifféremment pour désigner la donnée topographique obtenue par différentes sources et différentes méthodes, car l'altitude mesurée peut en fait correspondre selon le cas à celle du sol, celle des arbres, celle des toits de bâtiment ou encore une combinaison de plusieurs altitudes.

3.1.1. Problématique

Nous allons étudier les quatre points suivants :

- 1) Est-il possible d'améliorer les précisions altimétriques d'un MNT de couverture planétaire à partir d'une base de données d'images radar par un traitement interférométrique ?
- 2) Quelle configuration interférométrique choisir ?
- 3) Quel peut être le choix de la méthode de combinaison des données ?
- 4) Quelle différence résulte du choix du MNT de référence : radar (SRTM 90 m ou 30 m, GTOPO30) ou optique (SPOT, IGN) ?

Trois hypothèses de travail sont posées :

- il n'y a pas d'effets atmosphériques sur les interférogrammes ;
- le terrain ne présente pas de phénomènes de déformation du sol ;
- nous ne considérons pas les bords des images ou des limites des MNT de référence.

Lors d'une expérimentation utilisant des données existantes (par exemple un MNT SRTM à 90 m et une archive ERS), l'évaluation des résultats nécessite de distinguer :

- le type de terrain (selon la pente) ;

- le MNT de référence injecté ;
- la configuration interférométrique utilisée ;
- les zones présentant des effets atmosphériques évidents.

3.1.2. Géométrie de prise de vue et notations

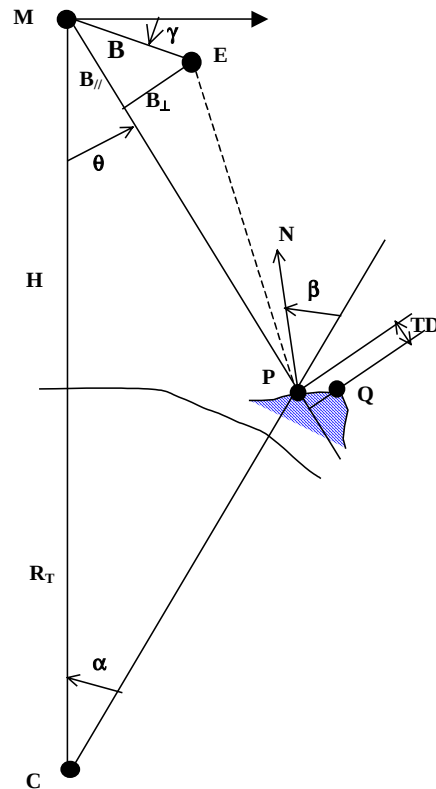


Figure 1 - Géométrie de la prise de vue.

On note (fig. 1) :

- M et E les positions du capteur à l'instant d'acquisition de deux lignes correspondantes dans les images radar Maître et Esclave ;
- C le centre de la Terre ;
- P un point sur le terrain à l'altitude h ;
- B la base ou distance EM ;
- $B_{\perp}$ la base perpendiculaire : distance EM dans la direction perpendiculaire à la visée ;
- $B_{\parallel}$ la base parallèle : distance EM dans la direction parallèle à la visée ;
- γ l'angle complémentaire entre les vecteurs MC et ME ;

- α l'angle au centre de la Terre entre **CM** et **CP** ;
- θ l'angle de visée, entre **MC** et **MP** ;
- λ la longueur d'onde ;
- TD la taille du pixel dans l'image radar ;
- **N** est le vecteur normal à la surface locale au point P ;
- β l'angle de la pente locale du terrain, entre **CP** et **N** ;
- Q est un point sur le terrain situé dans la direction de la pente locale en P et à une distance de P équivalente à TD dans la direction **MP** de visée du radar.

La **base** est exprimée en deux composantes, une composante perpendiculaire (notée **baseline**) à l'axe de visée depuis la position Maître ($B_{\perp}$) et la seconde dans la direction de cet axe ($B_{//}$) :

$$\text{Équation 1 : } \begin{cases} B_{\perp} = B \cos(\theta - \gamma) \\ B_{//} = B \sin(\theta - \gamma) \end{cases}$$

Au point P , la **phase interférométrique** s'exprime par :

$$\text{Équation 2 : } \Delta\varphi_P = \frac{4\pi}{\lambda} (EP - MP) = \frac{4\pi}{\lambda} MP \left(\sqrt{1 - 2 \frac{B \sin(\theta - \gamma)}{MP} + \frac{B^2}{MP^2}} - 1 \right)$$

B est de l'ordre du mètre à quelques kilomètres. La distance MP dépend de l'altitude du satellite et de l'angle de visée. D'après les caractéristiques des capteurs qui nous intéressent (cf. ann. 1), la condition **$B \ll MP$** est vérifiée et :

$$\text{Équation 3 : } \Delta\varphi_P \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(-B \sin(\theta - \gamma) + \frac{B^2 \cos^2(\theta - \gamma)}{2MP} \right) = \frac{4\pi}{\lambda} \left(-B_{//} + \frac{B_{\perp}^2}{2MP} \right)$$

Le premier terme donne lieu à des franges orbitales et le second à des franges orbitales et topographiques.

La différence de phase liée à l'altitude h du point peut s'écrire (Monti Guarnieri A., 1999) :

$$\text{Équation 4 : } |\phi| = |\Delta\varphi_P - \Delta\varphi_{P0}| \approx \left| \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \cos(\theta - \gamma)}{MP} \frac{h}{\sin(\theta + \alpha)} \right|$$

D'après les rappels issus de (Tarayre H., 1996), les deux signaux restent cohérents si la variation de la phase à l'échelle du pixel est inférieure à π . Comme **$TD \ll MP$** , ceci donne une condition sur la variation de la phase interférométrique entre le début et la fin d'un pixel qui équivaut à une condition sur la **baseline maximale**. Pour cela, on exprime la différence de phase entre deux points adjacents dans l'image radar (distance **TD**), P et Q .

Le point Q est ici situé dans la direction de la pente locale :

$$\text{Équation 5 : } |\phi| = |\Delta\varphi_P - \Delta\varphi_Q| \approx \left| -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \cos(\theta - \gamma)}{MP} TD \tan \omega \right|$$

D'où :

$$\text{Équation 6: } B_{\perp} < \frac{\lambda MP}{2TD \tan \omega}$$

avec $\omega = \frac{\pi}{2} - (\theta + \alpha - \beta)$ est l'angle complémentaire à l'angle d'incidence local

Pour un sol plat ($\beta=0$) : $\omega = \frac{\pi}{2} - (\theta + \alpha)$ et $B_{\perp} < \frac{\lambda MP}{2TD} \tan(\theta + \alpha)$

Du fait de la mesure de phase par le capteur modulo 2π , l'ambiguïté de mesure se traduit par un taux de franges topographiques lié aux paramètres d'acquisition et au relief. L'**altitude d'ambiguïté** (Massonnet D. *et al.*, 1993) donne la différence d'altitude entre deux points alignés dans la direction de visée du satellite qui résulte en un saut de phase de 2π :

$$\text{Équation 7 : } H_a = \frac{\lambda MP \cos \omega}{2B_{\perp}}$$

Pour un sol plat ($\beta=0$) et en négligeant l'angle α :

$$\text{Équation 8: } H_a = \frac{\lambda MP \sin \theta}{2B_{\perp}}$$

L'impact de la décorrélation sur l'estimation d'altitudes par interférométrie peut alors être estimé par (Zebker H.A. *et al.*, 1992) :

$$\text{Équation 9 : } \sigma_h = \frac{H_a}{2\pi} \sigma_{\text{phase}}$$

Les erreurs d'estimation des altitudes sont liées aux erreurs de mesure de phase résultant de la décorrélation (bruit du système, décorrélation temporelle, décorrélation géométrique, imprécision des traitements de recalage) et de retard de propagation (effets atmosphériques). Plusieurs auteurs donnent des estimations de l'impact des effets atmosphériques, cependant cet aspect n'est pas l'objet de la présente étude.

3.1.3. MNT de référence

a) Spécifications standard des MNT

L'agence américaine NGA (*National Geospatial-Intelligent Agency*) a défini des standards pour les MNE caractérisant leurs spécifications telles que : maille, précisions relatives et absolues horizontales et verticales. Ces standards DTED (Digital Terrain Elevation Data, http://assist.daps.dla.mil/quicksearch/quicksearch_query.cfm) ont plusieurs niveaux.

Comme dans (Moreira A. et al., 2004) ou encore à l'adresse http://www.spotimage.fr/html/167_224_584.php, les précisions horizontales sont exprimées par l'erreur CE90 %, signifiant erreur circulaire mesurée avec un niveau de confiance de 90 %. Les précisions altimétriques sont exprimées par le calcul de l'erreur LE90 %, erreur linéaire avec un niveau de confiance de 90 %. Considérant que les erreurs altimétriques sont distribuées selon une fonction gaussienne, la précision altimétrique d'un MNT peut être indiquée par le biais et l'écart-type des erreurs d'altitudes. En pratique, la RMSE (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) est calculée, avec éventuellement un niveau de confiance de 90 %. D'après (Synoptics, 2004), la mesure LE90 % vaut environ 1.6 fois la RMSE dans le contexte gaussien. On rappelle que l'écart-type et la RMSE sont égaux si le biais est nul.

Selon ces critères, le tableau 1 rappelle les spécificités des standards DTED. Les précisions réelles d'un produit sont estimées grâce à des points de contrôle ou un MNT fiable.

Standard	Maille en arcsec	Maille à l'Equateur en mètre	Précision horizontale absolue (CE90 %)	Précision horizontale relative (90 %)	Précision altimétrique absolue (LE90 %)	Précision altimétrique relative (90 %)
DTED-1	3	90	< 50 m	< 30 m	< 30 m	< 20 m
DTED-2	1	30	< 23 m	< 15 m	< 18 m	< 12 m
DTED-3 (HRTI-3)	0,4	12	< 10 m	< 3 m	< 10 m	< 2 m, 4 m sur les pentes > 20 %

Tableau 1 - Standards de MNE.

b) Caractéristiques de MNT existants

Le tableau 2 résume les caractéristiques des MNT globaux pouvant être utilisés comme MNT de référence. Les précisions planimétriques et altimétriques sont indiquées à titre d'information. En effet, dans la littérature, ces chiffres varient de telle sorte qu'il n'est pas toujours possible de donner des valeurs standard et compatibles entre LE90 et RMSE par exemple. À titre comparatif, les précisions attendues par

interférométrie d'images ERS tandem sont de 25 m RMS en horizontal et 10 m en vertical (Synoptics, 2004 ; Crosetto M. *et al.*, 1998 ; Ferretti A. *et al.*, 1997).

	GTOPO30/SRTM30	SRTM3 (ITED-1)	SRTM1 (ITED-2)	SPOT-5 HRS	IGN
Maille	30'' (environ 800 m en France)	90 m	30 m	20 m	50 m
Référentiel, système altimétrique	WGS84, EGM96	WGS84, EGM96	WGS84, EGM96	WGS84, EGM96	Lambert 2 étendu, NGF-IGN69
Coût	Gratuit	Gratuit			
Disponibilité	Monde	Monde (80%)	Non	Monde	France
Précision planimétrique (90 = intervalle de confiance 90 %, <i>CE</i> = <i>erreur circulaire</i>).					
CE90 absolue	500m	20 m	20 m	15 m	
RMSE	300 m	13-15 m	13-15 m	10 m	
Précision altimétrique (90 = niveau de confiance 90 %, <i>LE</i> = <i>erreur linéaire</i>).					
LE90 absolue	15 à 500 m	16 m	16 m	10m (10-30 m)	
RMSE	9 à 304 m	10 m	10m (2 à 25 m)	6m (3 à 28 m)	3m (2 à 40 m)

Tableau 2 - Caractéristiques des MNT de référence possibles (voir Synoptics, 2004 par exemple).

3.1.4. Récents concepts de missions topographiques

Plusieurs systèmes sont en phase de réflexion ou de réalisation : Cosmo-Skymed de l'ASI (inclus dans le programme Pléiades du CNES), TerraSAR-X et TerraSAR-L de l'ESA, RADARSAT-2 de CSA. Leurs caractéristiques sont comparables (voir annexe 1) : altitude vers 600 km, bande X et L, multi-polarisation (mode polarimétrique pour TerraSAR), multi-mode (*spotlight*, *scansar*, *stripmap*), multi-résolution (atteignant le mètre en mode *spotlight*), multi-incidence (entre 15°-20° et 60°). Intéressons-nous aux applications topographiques.

D. Massonnet présente en 2001 dans (Massonnet D., 2001) le principe général d'une mission topographique appelée **roue interférométrique**. Il s'agit de 3 micro-satellites récepteurs qui suivent un satellite portant une antenne émettrice à 20 ou 30 km de distance. Les 3 satellites forment une ellipse « horizontale » située dans le plan orbital du satellite émetteur. La configuration de la roue proposée permet de définir des bases spatiales perpendiculaires et parallèles stables, qui se situent entre 1.5 et 1.7 fois la valeur du petit axe de l'ellipse quelle que soit la position des satellites au-dessus de la

Terre. Dans l'optique d'une mission topographique de mise à jour et d'amélioration de MNT, l'auteur propose d'envoyer régulièrement un nouveau micro-satellite afin d'accéder à des baselines variables au cours des années. Dans le cas où l'on disposerait de MNT de référence SRTM de 30 m de précision altimétrique, l'auteur propose de construire une première roue avec un faible rayon (par exemple 1 000 m avec ERS-2, équivalent à une altitude d'ambiguïté de 30 m) puis une seconde roue de grand rayon (5 km maximum, équivalent à une altitude d'ambiguïté inférieure à quelques mètres). Ceci permettrait de produire des MNT de précision altimétrique de 3 m puis de 1 m. L'idée de produire des MNT ou d'affiner les MNT existants en plusieurs étapes selon le choix de baselines a sans doute inspiré la définition de récents concepts de missions radar.

Avec **TerraSAR-L** de l'ESA, il a été étudié l'apport d'y adjoindre une roue interférométrique (Zink M. *et al.*, 2003). Plusieurs géométries ont été proposées : **roue interférométrique** (Massonnet D., 2001) (CNES), **roue two-scale** (CNES), **pendule cross-track** (DLR), **pendule trinodal** (DLR). La roue *two-scale* et le pendule trinodal permettent d'acquérir des couples de baselines variables mais avec un rapport constant des baselines entre les 3 satellites. Les auteurs montrent que des MNT de maille 12 m avec des précisions altimétriques relatives de 1 m pourront être obtenus en utilisant tout d'abord des configurations de baseline de l'ordre de 1 km (altitudes d'ambiguïté de 75 à 100 m) puis de 5 km (altitudes d'ambiguïté de 10 à 15 m). Acquérir en une seule mission des couples interférométriques avec un tel rapport de 5 entre baselines serait réalisable avec le pendule trinodal (Fiedler H. *et al.*, 2004). Un MNT global serait alors produit en 1 an et demi. Par ailleurs, d'après (Zink M. *et al.*, 2003), l'information d'altitudes dans le cas de rétrodiffusion volumique peut être grandement détériorée avec de grandes baselines, montrant l'intérêt d'exploiter de façon complémentaire deux familles de configurations interférométriques selon les baselines.

Le projet **Tandem TerraSAR-X** du DLR et EADS Astrium, vise la production par interférométrie de MNT DTED-3 avec deux satellites identiques. Deux configurations sont étudiées (Moreira A. *et al.*, 2004) : Pendule 2SAT et Hélice 2SAT. Dans les deux cas, le satellite tandem est placé sur une orbite voisine à la première définissant ainsi une distance horizontale entre les deux orbites. Dans le Pendule 2SAT, les deux orbites se croisent au pôle, alors que pour Hélice 2SAT, une distance perpendiculaire apparaît. Par ailleurs, deux modes sont envisagés : monostatique et bistatique. Les deux satellites sont distants de 30-50 km en mode monostatique ou 2 km en mode bistatique. Comme la baseline interférométrique bistatique vaut deux fois celle du mode monostatique, l'idée est d'exploiter les deux modes afin de créer une base d'interférogrammes à la fois avec de grandes et de petites baselines, avec un ratio de 2.

Ainsi, dans le cadre de ces missions, il apparaît que l'idée de produire un MNT ou d'affiner un MNT existant en deux étapes selon les baselines semble mettre d'accord un certain nombre d'auteurs.

La mission **Cosmo-Skymed** repose aussi sur plusieurs satellites identiques, entre 2 et 4, et placés sur la même orbite (Adragna F., 2003 ; ASI, 2004). Les lancements seraient réalisés entre 2006 et 2008 et la mission pourrait durer 5 ans. Les satellites sont équidistribués en distance sur l'orbite si l'on se fie aux figures dans (ASI, 2004) et

les orbites se croisent aux pôles au cours du temps. La période de revisite d'un satellite est de 16 jours. Si l'interférométrie croisée entre deux satellites du système s'avère possible, l'intervalle de temps pour l'interférométrie serait alors ramené à la période de revisite indépendamment du satellite, soit globalement moins de 12 h avec 4 satellites.

3.2. BIBLIOGRAPHIE

Plusieurs publications ici présentées montrent que le déroulement de franges inévitable avec de grandes baselines serait amélioré avec l'utilisation d'un MNT initial. D'après (Seymour M. *et al.*, 1997), la base géométrique devrait être connue avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde (5 cm) pour atteindre des RMSE sur les mesures d'altitudes de l'ordre de 10 m avec ERS. Or les données actuelles sur les orbites ne sont pas toujours fournies avec une telle précision. Un MNT initial permet à la fois de corriger la géométrie et de simplifier le déroulement de franges en diminuant le nombre de franges et de résidus (Seymour M. *et al.*, 1997). En même temps, des travaux montrent que la combinaison de données interférométriques et topographiques (stéréoscopie optique, interpolation de cartes de contours scannées, ...) peut permettre d'aboutir à de meilleures précisions altimétriques ou à une information plus complète. L'ensemble de ces travaux a contribué à l'effort méthodologique, survenu par exemple pour la mission SRTM, visant à fusionner, faire des mosaïques et mettre à jour les MNT avec l'interférométrie. Nous discutons ici de quelques références situant le contexte d'utilisation d'un MNT de référence en interférométrie radar pour la géométrie, le déroulement ou la fusion.

3.2.1. Sur l'utilisation d'un MNT de référence en interférométrie radar

Dans Crosetto M. *et al.* (1998) l'intérêt d'exploiter un MNT SPOT lors du déroulement de frange est étudié. Pour cela, la carte des zones de renversement et de compression calculée grâce au MNT SPOT sert à masquer ces zones lors de l'étape de recherche des lignes de discontinuités. La géométrie radar est par ailleurs affinée par utilisation de points de contrôle. Le MNT radar est alors corrigé des biais systématiques par rapport au MNT SPOT par une surface polynomiale d'ordre 3. Les deux sortes de données sont ensuite fusionnées par une méthode de POLIMI considérant une pondération de chaque altitude par la valeur de cohérence ou de corrélation. La grille du MNT est interpolée par des fonctions splines bilinéaires estimées par moindres carrés. Dans l'application proposée, le MNT radar ERS seul a un biais en altimétrie de 1,4 m et une RMSE de 21 m par rapport à un MNT aérien photogrammétrique de RMSE 1 m. Le MNT SPOT seul a un biais de 1 m et une RMSE de 12,2 m. Après intégration de l'information issue du MNT SPOT, le biais du MNT ERS est de 1,8 m et la RMSE de 14,5 m. L'expérience montre un intérêt pour le remplissage des zones sous les nuages ou peu texturées.

De manière comparable, dans Crosetto M. *et al.* (1999) un MNT stéréo-radargrammétrique est utilisé comme composante basse fréquence du MNT réel. Les hautes fréquences sont apportées par un MNT interférométrique. L'objectif est de corriger la composante basse fréquence de l'atmosphère du MNT interférométrique.

Pour cela, les traitements radargrammétrique et interférométrique sont effectués séparément. Des points de contrôle sont utilisés pour la calibration géométrique dans les deux techniques. Le traitement interférométrique repose sur une méthode mise au point par POLIMI qui permet de fusionner directement plusieurs paires de mode ascendant et descendant. Dans les expériences, un MNT aérien est utilisé pour la validation. Le MNT radargrammétrique RADARSAT présente une RMSE de 26 m. Le MNT interférométrique est obtenu avec des données ERS. Le MNT final a une RMSE de 14 m.

L'origine de la méthode utilisée dans les deux références ci-dessus n'est pas précisée mais on peut supposer qu'il s'agit de la méthode décrite dans Ferretti A. *et al.* (1999), basée sur la fusion de MNT avec les ondelettes ou celle décrite dans Ferretti A. *et al.* (1997), basée sur la fusion d'interférogrammes (cf. 3.2.2).

Dans (Synoptics, 2004), un MNT radargrammétrique sert également de référence pour le traitement interférométrique : calcul différentiel, correction de baseline, ajustement des ambiguïtés lors du déroulement. Les deux sortes de MNT sont ensuite fusionnées selon le relief et la végétation (la méthode n'est pas détaillée). Les post-traitements sont également d'importance : remplissage des zones de faible cohérence ou non renseignées (avec le MNT stéréoscopique et certains MNT interférométriques de meilleure qualité sur ces points), correction sur les zones d'eau détectées à partir des amplitudes radar, interpolation des artefacts de faible étendue par un modèle surfacique. Selon le site, différentes données topographiques sont exploitées pour l'évaluation des résultats tels que des mesures d'un altimètre laser aérien ou la carte scannée des contours interpolée. Des données ASAR ont été utilisées. Les MNT stéréoscopiques présentent des RMSE de l'ordre de 40 m. Les MNT interférométriques présentent des erreurs de déroulement. Le MNT combinant les deux techniques aurait des RMSE de l'ordre de 10 m.

Dans Seymour M. *et al.* (2004), les auteurs proposent une méthode de mise à jour de MNT à partir d'interférométrie d'images SAR RADARSAT-1. Un MNT de référence est utilisé pour préparer l'interférogramme (correction de la baseline sur l'interférogramme non déroulé) et définir les paramètres de conversion des phases déroulées en altitudes géocodées. Entre ces deux étapes, l'interférogramme différentiel est déroulé après un sous-échantillonnage limitant la quantité de points à dérouler et est filtré. La baseline (effective) est alors à nouveau affinée. Un nouvel interférogramme différentiel est calculé avec cette dernière géométrie. Les différences de phase sont ensuite intégrées dans le MNT de référence connaissant la géométrie d'acquisition. Lors de l'intégration, l'ambiguïté de phase peut être corrigée manuellement selon la carte labellisée issue du déroulement et le MNT initial. Dans les expériences, les MNT utilisés sont le MNT GTOPO30, un MNT canadien DTED-1 issu de cartes scannées, un MNT anglais TRIM de précision altimétrique 5 m LE90. Comparés au MNT TRIM, le MNT DTED-1 a une précision absolue de 61 m LE90 et un biais de - 16 m. Le MNT GTOPO30 a une précision absolue de 144 m et un biais de 7,8 m. Des effets de pentes d'Est en Ouest sont de plus observés par les auteurs entre ces MNT. Le MNT obtenu avec le couple RADARSAT-1 et le MNT DTED-1 a une précision altimétrique 37 m LE90. Celui obtenu avec le GTOPO30 a une précision altimétrique LE90 de 112 m et présente aussi des erreurs de déroulement de franges. Des précisions comparables sont par contre

atteintes avec DTED-1 et GTOPO30 si une correction grossière des biais et pentes observée par rapport au MNT TRIM, est préalablement effectuée. Les précisions sont alors de l'ordre de 20 m LE90 en absolu (écart-type de 14 m). Les zones de faible cohérence ou non vues ne sont pas traitées.

Un point intéressant des travaux de Seymour M. *et al.* (2004) par rapport aux références précédentes est que le MNT existant sert de référence à la localisation absolue, c'est-à-dire qu'il joue le rôle des points d'appuis. L'utilisation de MNT radar suffisamment précis pour apporter des points d'appuis pourrait devenir une application importante. Par exemple, une stratégie récente de calcul de MNT optique consiste à exploiter des B/H très faibles de l'ordre de 0,02. Les avantages de cette stratégie sont détaillés dans Vadon H. (2003). Les MNT optiques produits sont précis en altimétrie (précisions de 10 à 15 m RMS) et pourraient s'appuyer sur des MNT radar précis pour la localisation.

3.2.2. Fusion de mesures altimétriques et interférométriques

Dans le cadre d'un empilement d'informations avec des mesures interférométriques, deux possibilités émergent : fusionner les altitudes issues des différentes données ou fusionner préalablement les interférogrammes déroulés ou non déroulés. Dans le premier cas, les techniques peuvent s'inspirer de l'état de l'art concernant la fusion ou le mosaïchage de MNT. Plusieurs contributions nous paraissent intéressantes.

Dans Knöpfle W. *et al.* (1998), en préparation de la production des MNT SRTM bande X, le DLR a proposé une méthode de mosaïchage de MNT interférométriques et de MNT optiques stéréoscopiques. L'altitude résultante en chaque point est estimée par une somme pondérée des altitudes disponibles considérant l'erreur d'estimation associée. L'équation notée équivaut à une estimation par maximum de vraisemblance. L'erreur d'estimation d'une altitude est donnée par la variance des erreurs liées au bruit de phase et à la géométrie du couple. Une estimation plus robuste de l'altitude est proposée en détectant et éliminant itérativement les valeurs aberrantes. Ceci est réalisé par un test de Student sur les résidus d'altitudes (écarts d'une altitude par rapport à l'altitude estimée dans la fusion). Les auteurs ont testé la méthode avec des images ERS1/2 en mode ascendant et descendant et une paire stéréoscopique SPOT XS. Une dizaine à une quarantaine de points de contrôle (leur origine n'est pas précisée) sont identifiés pour améliorer la précision du modèle géométrique des couples de données ERS ou SPOT. Les résultats sont comparés à une référence « DHM M745 » fournie par l'agence allemande AmilGeo. Trois variantes sont testées : somme simple, somme pondérée et somme pondérée avec rejet des valeurs aberrantes. Le meilleur résultat de fusion est obtenu par somme pondérée avec rejet des valeurs aberrantes, aboutissant à 10,7 m de RMSE altimétrique.

Dans Ferretti A. *et al.* (1999), les auteurs proposent une méthode de combinaison d'interférogrammes prenant en compte une modélisation des effets atmosphériques. La contribution atmosphérique peut être modélisée par une phase additive dont la densité spectrale de puissance (dsp) suit une fonction de turbulence en $1/f^{8/3}$ où f est la fréquence spatiale, dans la direction des azimuts ou des distances radar. Comme les phénomènes de turbulence auraient des statistiques invariantes avec l'échelle au

moins au second ordre, les auteurs rappellent que dans ce cas, le signal est fractal. L'idée est donc de travailler dans le domaine spectral défini par des ondelettes qui sont appropriées pour décrire des signaux fractals et de caractériser à la fois la contribution atmosphérique et celle du bruit de décorrélation. Les deux contributions sont considérées indépendantes entre MNT. Leur différence est modélisée par des gaussiennes de moyenne nulle et de dsp en $1/f$ pour l'atmosphère et de dsp constante pour le bruit de décorrélation. Les coefficients en ondelettes $d_{n,i}^m$ d'un MNT interférométrique sont alors décrits par la somme de trois contributions : topographie t_n^m , atmosphère $a_{n,i}^m$ et bruit de décorrélation $w_{n,i}^m$. Les paramètres n et m désignent respectivement la dilatation et la translation. Les coefficients de la topographie sont estimés par MV :

$$\text{Équation 10 : } t_n^m = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \frac{d_{n,i}^m}{\sigma_{\min}^2}}{\sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{\sigma_{\min}^2}}$$

Avec $d_{n,i}^m$ les coefficients du $i^{\text{ème}}$ MNT et $\sigma_{\min}^2$ la variance du coefficient. Cette variance est écrite :

$$\text{Équation 11 : } \sigma_{\min}^2 = \hat{\sigma}_{ai}^2 2^{-\alpha m} + \hat{\sigma}_{win}^2$$

Le paramètre α vaut donc 8/3. Afin d'estimer les deux autres paramètres de variance de l'équation, les auteurs exploitent les transformées en ondelettes des différences entre deux MNT. En effet, dans ce cas, les estimations de variance sont obtenues par inversion d'un système d'équations. Quatre méthodes de combinaison des altitudes sont finalement comparées :

- la moyenne arithmétique (estimation par maximum de vraisemblance (MV) où l'écart-type de chaque mesure vaut 1) ;
- l'estimation par maximum de vraisemblance (MV) où l'écart-type dépend de la baseline seule ;
- l'estimation MV où l'écart-type dépend de la baseline et du niveau de bruit (cohérence) ;
- approche basée sur les ondelettes.

Les précisions altimétriques RMSE dans la géométrie radar, obtenues à partir de données ERS, sont respectivement 10,3, 5,4, 5,5 et 4,9 m relativement à un MNT photogrammétrique. Des points de contrôle ont été utilisés pour affiner la géométrie. On constate qu'en introduisant l'information de baseline dans la somme pondérée, l'estimation est fortement améliorée, tandis que l'insertion de l'information de cohérence n'apporte pas d'amélioration. En fait, les auteurs expliquent que des simulations ont montré qu'en l'absence d'effets atmosphériques, l'ajout de la cohérence dans le poids améliore la performance mais au contraire la détériore si des effets atmosphériques significatifs existent. L'approche par ondelettes leur permet par

contre de prendre en compte les deux contributions, bruit de décorrélation et atmosphère.

Une estimation MV (Maximum de Vraisemblance) utilisant un MNT de référence est mise en œuvre dans Ferretti A. *et al.* (1997) par la même équipe. L'image est traitée par bloc de 1 km² de telle sorte que l'on puisse considérer les orbites rectilignes, les distorsions de phase dues aux effets atmosphériques linéaires et la fonction de conversion de la phase en altitude également linéaire. Ainsi, sur chaque bloc de chaque interférogramme, les altitudes des points sont exprimées relativement à un point de référence dans le bloc par un modèle linéaire reliant la différence d'altitude, dh , à la différence de distance dr , d'azimut dy et de phase $\Delta\phi$ entre les deux points, plus une constante, D :

$$\text{Équation 12 : } dh = A.dr + B.dy + C.\Delta\phi + D$$

Le point de référence est sélectionné pour sa haute valeur de cohérence sur tous les interférogrammes. Les coefficients de ce modèle sont calculés itérativement. Pour cela, un algorithme de déroulement dans chaque bloc est mis en œuvre par croissance de région en déroulant à chaque étape le point le plus sûr dans le voisinage du dernier point déroulé. Celui-ci est identifié d'après la mesure d'un critère de confiance. Ce paramètre résulte de la pdf (densité de probabilité) de l'écart d'altitude dh entre ce point et le point de référence. Ce point est d'autant plus sûr que le pic de la pdf empirique est étroit. L'expression de la pdf *a posteriori* est calculée par :

$$\text{Équation 13 : } pdf(dh / \Delta\phi_1, \dots, \Delta\phi_N) = pdf_{MNT}(dh) \prod_i pdf(\Delta\phi_i / dh)$$

Les mesures sont supposées ici indépendantes. Cette hypothèse est reprise dans Eineder M. *et al.* (2005) et commentée ci-dessous. La pdf de la phase *a priori* utilise les niveaux de cohérence et l'expression rappelée par exemple dans Maître H. *et al.* (2001). La mesure dh est celle qui maximise la pdf. Ayant estimé dh , l'ambiguïté de phase pour chaque interférogramme en ce point est facilement déduite. A chaque nouveau point déroulé, le modèle de l'équation 12 peut être affiné. Pour aligner les blocs, le même principe de déroulement par croissance de régions est mis en œuvre en partant du point de référence de plus forte cohérence et en se propageant vers les points de référence des autres blocs. L'ambiguïté relative de chaque bloc est alors connue. Les altitudes sont calculées par une relation d'ordre 3 entre phase déroulée et altitude (modèle non fourni dans la publication). Les paramètres de ce modèle sont affinés en minimisant la moyenne pondérée par la cohérence des écarts d'altitudes avec un MNT de référence. Les cartes d'altitudes sont enfin empilées par une somme pondérée par un coefficient dépendant de la cohérence et de la baseline. Les résultats montrent que les MNT résultant d'une dizaine d'images ERS ont un écart-type des erreurs par rapport à une référence d'environ 10 m sur le Vésuve et sur l'Etna.

Ce type de méthode, basé sur des sommes pondérées, a l'avantage de pouvoir réunir des MNT interférométriques issus de différents modes. Ces méthodes nécessitent cependant de dérouler les interférogrammes.

Massonnet D. *et al.* (1996) apportent une contribution significative. Il s'agit de combiner linéairement deux interférogrammes non déroulés en les pondérant par des entiers afin de créer un nouvel interférogramme dont l'altitude d'ambiguïté est plus grande ou plus petite que les deux précédentes :

$$\text{Équation 14 : } \frac{1}{H_a} = \frac{q_1}{H_{a1}} + \frac{q_2}{H_{a2}}$$

Si l'altitude d'ambiguïté simulée est plus grande, le taux de franges résiduelles est plus faible et le déroulement plus simple. Les entiers sont choisis entre - 3 et 3 afin de limiter l'accroissement du bruit de décorrélation lors de la multiplication des phases. Si seule une configuration peut être utilisée en géométrie radar, des configurations quelconques sont compatibles par cette technique en géométrie terrain. Dans le cadre de notre étude, cette stratégie peut être utilisée pour limiter le déroulement dans un processus itératif, en particulier lorsque seule une famille de couples de faibles altitudes d'ambiguïté est disponible.

Une publication récente (Eineder M. *et al.*, 2005) montre qu'il est possible de s'affranchir totalement du déroulement de franges et de fusionner en plus différentes sources d'informations (longueur d'onde, baseline, incidence, sens de visée). La méthode est basée sur (Ferretti A. *et al.*, 1997) où cette fois l'estimation n'est pas relative à un point de référence. Le principe repose sur une estimation MV de l'altitude telle que la fonction de probabilité jointe de la variable $\Delta\phi$ soit maximale. Pour chaque interférogramme, cette variable représente l'erreur sur la mesure de la phase interférométrique par rapport à la phase qui serait estimée à partir d'une altitude donnée :

$$\text{Équation 15 : } \Delta\phi_i = \phi_i - \hat{\phi}_{i,0}$$

Le pdf relative à un interférogramme est modélisée par le produit de deux pdf de variables considérées indépendantes :

- celle de l'erreur sur la mesure de la phase interférométrique due à la décorrélation traduite par le paramètre de la cohérence, qui dépend entre autre du bruit thermique et de l'imprécision de la base, et au nombre de vues effectif. Son expression peut être trouvée dans Eineder M. *et al.* (2005) et dérive directement de la pdf modélisant la phase interférométrique. Elle s'écrit sous forme de fonctions cosinus, gamma et hypergéométrique. L'erreur de mesure est considérée indépendante par les auteurs entre les interférogrammes car la décorrélation dépend surtout de facteurs pouvant être considérés eux-mêmes indépendants (erreur sur la base, bruit thermique) ;
- celle des erreurs d'interprétation géométrique de la phase liées à l'erreur sur la base géométrique, dont l'expression est ici donnée par une gaussienne. Les erreurs de base peuvent être considérées indépendantes entre les interférogrammes.

Ainsi :

$$\text{Équation 16 : } pdf(\Delta\phi_i) = pdf_{geo}(\Delta\phi_i) pdf_{interf}(\Delta\phi_i)$$

Et sous l'hypothèse d'indépendance des erreurs liées à la décorrélation et des erreurs géométriques entre interférogrammes, les auteurs écrivent la pdf jointe comme le produit des pdf individuelles, cas sans ou avec MNT initial :

$$\text{Équation 17 : } pdf(\Delta\phi_1, \dots, \Delta\phi_N / \hat{z}) = \prod_i pdf(\Delta\phi_i / \hat{z}) \text{ sans MNT initial}$$

$$\text{Équation 18 : } pdf(\Delta\phi_1, \dots, \Delta\phi_N / \hat{z}) = pdf_{MNT}(\hat{z}) \prod_i pdf(\Delta\phi_i / \hat{z}) \text{ avec MNT de référence}$$

Cette approche permet d'exprimer l'erreur de chaque mesure (variance) :

$$\text{Équation 19 : } \sigma^2(x, y) = \frac{\int pdf(z / \phi_i) (z - \hat{z})^2 dz}{\int pdf(z / \phi_i) dz}$$

À partir d'un couple d'images SRTM bande X de mode descendant, la précision altimétrique mesurée par rapport à un MNT SRTM bande C de maille 30 m de la NASA/JPL est de 1 394 m écart-type. En combinant le MNT SRTM30 avec 4 images de bande X en mode descendant et de bande C en mode ascendant, la précision altimétrique mesurée est alors de 248 m. En intégrant en plus un MNT grossier GLOBE de maille 1 km et de précision altimétrique 500 m écart-type, la précision altimétrique obtenue est de 43 m. Les phases pour la bande C ont été ici simulées par rapport au MNT de référence dégradé avec un pas de 90 m et bruitées par un bruit gaussien.

La méthode permettrait donc de s'affranchir du déroulement. Dans le cas où peu de données sont disponibles, les auteurs suggèrent plutôt d'exploiter cette méthode avec la carte des facteurs de qualité définis par l'équation 19 en chaque pixel, comme appui au déroulement de franges.

3.2.3. Sur les zones de renversement/compression/ombres

Peu d'études concernent le traitement des zones de renversement ou d'ombre lors du déroulement. Le déroulement consiste justement à détecter les points de discontinuité pour ne pas propager de façon erronée l'ambiguïté de phase estimée. Nous avons évoqué que dans Crosetto M. *et al.* (1998), un MNT initial permet de produire une carte des zones à masquer lors de la recherche des lignes de discontinuités pour le déroulement.

Après déroulement, c'est l'exploitation conjointe de nombreux types de données (source, bande, incidence, mode) qui doit résoudre le manque d'information (stratégie d'empilement des altitudes).

Dans Eineder M. *et al.* (2005), le déroulement est évité. La résolution des ambiguïtés lorsque le nombre de données augmente est fortement améliorée. En réalité, des

problèmes de continuité des altitudes peuvent probablement subsister du fait que le traitement est réalisé point à point.

Dans Eineder M. *et al.* (2003), il est montré que la différence de phase déroulée ou non déroulée entre deux pixels alignés en distance de part et d'autre d'une zone d'ombre est négligeable. Ainsi, les auteurs proposent de combler les lignes d'ombres dans la direction des distances, détectées d'après les niveaux des cohérences, par une phase constante. Ceci doit simplifier l'étape de déroulement. Cette constante doit être remplacée par une pente si les interférogrammes sont préalablement corrigés par un ellipsoïde ou un MNT de référence. Ceci risque de compliquer l'automatisation d'un tel traitement. Cependant, cette stratégie permet d'accéder à une information jusqu'alors considérée comme perdue à partir d'un seul couple et donc d'un seul mode d'acquisition.

3.2.4. Conclusion

Ces différentes réflexions montrent l'avantage d'utiliser un MNT de référence pour le déroulement, la géométrie et la fusion et, dans certains cas, prouvent bien que les précisions altimétriques sont améliorées par rapport au MNT de référence et au MNT radar seul. De plus, de récentes études portant sur la définition de nouveaux concepts de missions topographiques interférométriques mettent en évidence l'opportunité d'exploiter itérativement différentes configurations : d'abord les faibles baselines, puis les fortes baselines. Ci-dessous, le choix de configurations interférométriques à considérer dans le cadre de la présente étude est guidé par ce contexte : quelle famille de baselines choisir en première étape de mise à jour d'un MNT de référence ? A-t-on besoin de plusieurs étapes pour atteindre des précisions altimétriques de 2-3 m ? Quel rapport de baseline est requis entre les familles exploitées ? Ces choix dépendent des caractéristiques du MNT de référence utilisé.

3.3. CHOIX DE CONFIGURATIONS INTERFÉROMÉTRIQUES

3.3.1. Contexte

Nous considérons ici des critères géométriques. Une étude approfondie serait nécessaire pour intégrer également des critères liés à la décorrélation volumétrique, l'impact des pentes du terrain et du sens des pentes sur le niveau de bruit des interférogrammes (Zink M. *et al.*, 2003). Nous choisissons de baser notre analyse sur deux cas :

- **Cas 1**
 - Bases temporelles variables, rarement moins d'une vingtaine de jours telles que pour les données existantes ERS.
 - Terrain comportant des zones plates et du relief chahuté.
 - Angle d'incidence de l'ordre de 25°.

• Cas 2

- Bases temporelles d'1 jour.
- Terrain plat ou peu chahuté.
- Angle d'incidence de 45°.

Dans l'analyse, nous prendrons l'exemple de systèmes connus (ERS, ASAR, COSMO-SKYMED, TERRASAR-X, TERRASAR-L) même si, par exemple, le système ASAR ne fournit pas de données avec une base temporelle d'1 jour. Le but est d'analyser une stratégie de traitement pour des paramètres de système donnés dans les deux cas définis.

3.3.2. Niveau de cohérence

Afin d'exploiter l'équation 9, nous devons considérer une estimation du bruit de mesure sur la phase. Ce bruit est lié au niveau moyen de la cohérence interférométrique (cf. fig. 5 de Zebker H.A. *et al.*, 1992). Celui-ci diminue sur un même terrain avec la baseline géométrique et la base temporelle. Nous avons relevé les niveaux de cohérence moyens sur 34 interférogrammes différentiels ERS (sur Marseille et sa région, données décrites dans la section 5) pour des bases temporelles inférieures à 3 mois et des baselines variant de 0 à 1 200 m (fig. 2). Une analyse en fonction des pentes serait sans doute intéressante. Cependant, cette analyse devrait aussi prendre en compte une carte d'occupation des sols (végétation, cultures, villes, ...).

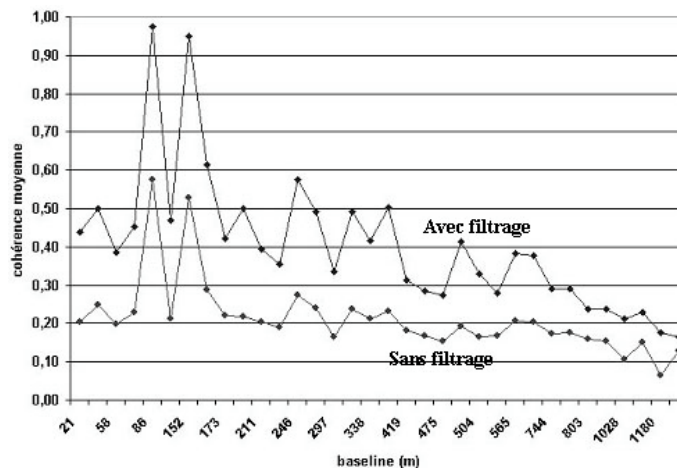


Figure 2 - Niveau moyen de cohérence avant et après filtrage (cf. 4.3.1) en fonction de la baseline pour 34 interférogrammes différentiels ERS (en multilook 1 x 5) utilisant un MNT SRTM 3" sur la région de Marseille avec des bases temporelles inférieures à 120 jours. Les deux pics correspondent à deux couples tandem.

Dans les applications numériques suivantes pour le cas 1 défini ci-dessus, il nous paraît raisonnable de considérer un niveau moyen des cohérences de 0,4. Dans le

cadre d'une mission dédiée à faible période de revisite (cas 2), le niveau de cohérence attendu est plutôt de l'ordre de 0,9. D'après Zebker H.A. *et al.* (1992) :

$$\text{Équation 20: } \rho = 0.4 \Rightarrow \sigma_{\varphi} \approx 60^{\circ} \text{ et } \rho = 0.9 \Rightarrow \sigma_{\varphi} \approx 15^{\circ}$$

On note $k = \sigma_{\varphi} / 2\pi$, cette valeur reste inférieure à 1. La précision attendue est de l'ordre de :

$$\text{Équation 21: } \sigma_h = kH_a \text{ avec } k = 0.17 \text{ pour } \rho = 0.4 \text{ et } k = 0.04 \text{ pour } \rho = 0.9$$

Le niveau de cohérence de l'interférogramme différentiel dépend du bruit d'acquisition lié au capteur, de la baseline, du nombre de vues mais aussi de la précision altimétrique du MNT de référence, de la précision du recalage du MNT dans la géométrie radar et des pentes. Ces effets pourraient être quantifiés en s'inspirant des travaux développés dans Monti Guarnieri A. *et al.* (1999), où est modélisé l'impact des erreurs de recalage du MNT sur l'estimation des réflectivités radar, et en utilisant des modèles de pdf existant de la phase interférométrique, rappelés par exemple dans Maître H. *et al.* (2001). En prévision d'une telle étude, l'estimation empirique des niveaux de cohérence moyens selon le MNT de référence et les pentes est réalisée dans les expériences de la section 5.

3.3.3. Altitudes d'ambiguïté/précision du MNT de référence

Nous pouvons distinguer trois cas selon l'altitude d'ambiguïté, la précision attendue et la précision initiale. Rappelons que des franges liées aux imprécisions altimétriques du MNT initial peuvent se produire sur l'interférogramme différentiel dès que l'erreur entre deux pixels adjacents équivaut à H_a . Cette erreur peut atteindre deux fois la précision en écart-type du MNT initial. Donc :

- la précision altimétrique attendue et l'altitude d'ambiguïté sont inférieures respectivement à la précision altimétrique du MNT initial et à deux fois cette valeur. L'interférogramme permet théoriquement d'améliorer la mesure altimétrique du MNT initial. Cependant, un déroulement de franges sera probablement nécessaire ;
- la précision altimétrique attendue est inférieure à la précision altimétrique du MNT initial et l'altitude d'ambiguïté est supérieure à deux fois la précision altimétrique du MNT initial. L'interférogramme permet théoriquement d'améliorer la mesure altimétrique du MNT initial. Dans le cas idéal, l'interférogramme différentiel ne présente plus de franges à dérouler ;
- la précision altimétrique attendue et l'altitude d'ambiguïté sont supérieures respectivement à la précision altimétrique du MNT initial et à deux fois cette valeur. L'interférogramme ne permet pas théoriquement d'améliorer la mesure altimétrique du MNT initial.

3.3.4. Altitudes d'ambiguïté/pentes du terrain

La précision des MNT n'est généralement pas homogène, il convient alors de distinguer davantage de cas selon le relief. Dans la fiche produit SPOT 'Référence 3D', sont distingués les cas de terrains :

- plats : pentes inférieures à 20 % ;
- moyennement chahutés : pentes entre 20 et 40 % ;
- chahutés : pentes > 40 %.

Dans un premier temps, considérons seulement deux classes : pentes supérieures ou inférieures à 20 %. Dans ce cas, notons P1 la précision du MNT initial en terrain plat et P2 la précision en terrain chahuté. Le comportement attendu en terme de précision altimétrique et déroulement de franges est résumé dans le tableau 3. Nous sommes intéressés par les cas permettant d'améliorer les précisions initiales avec idéalement possibilité de s'affranchir de l'étape de déroulement de franges.

	$H_a < 2.P1$	$H_a < P1 / k$	$H_a < 2.P2$	$H_a < P2 / k$
Pentes < 20 %	déroutement			
Pentes > 20 %			déroutement	
Pour P1 = 3 m, P2 = 20 m, k = 0,17	$H_a < 6$ m	$H_a < 18$ m	$H_a < 40$ m	$H_a < 118$ m
Pour P1 = 3 m, P2 = 20 m, k = 0,04	$H_a < 6$ m	$H_a < 75$ m	$H_a < 40$ m	$H_a < 500$ m

Tableau 3 - Identification des cas de déroulement et d'amélioration possible des précisions altimétriques (cases grises) selon les pentes, la précision du MNT initial et l'altitude d'ambiguïté. Selon les valeurs de P1, P2 et k, les cas ne sont pas nécessairement dans cet ordre.

Dans le cadre d'un processus de traitement en plusieurs étapes, pour P1 = 3 m, P2 = 20 m et k = 0,17, il conviendrait alors de choisir des altitudes d'ambiguïté inférieures à 118 m puis inférieures à 40 m puis 18 m pour une précision finale de 3 m. Pour k = 0,04, il conviendrait de choisir des altitudes d'ambiguïté inférieures à 500 m, puis 75 m puis 6 m. En réalité, la précision altimétrique attendue est idéalement améliorée à chaque étape de traitement, ce qui modifie successivement le choix des altitudes d'ambiguïtés. Ceci est discuté dans le paragraphe 3.3.7 pour les cas 1 et 2 définis au paragraphe 3.3.1.

Par ailleurs, du fait de la visée latérale du capteur radar, l'altitude d'ambiguïté et donc la précision d'un MNT radar dépendent de la pente locale et de la distance qui varie entre la portée proximale et la portée distale. Nous pouvons du moins calculer l'influence de la pente sur l'altitude d'ambiguïté selon la baseline perpendiculaire, par exemple au point d'indice 0 en distance (cf. notations de la section 3.1.2) :

$$MP = H \cos \theta + R_T \cos \theta - R_T \left(1 - \left(1 + \frac{H}{R_T} \right)^2 \sin^2 \theta \right)$$

$$\sin \alpha = \frac{MP \sin \theta}{R_T}$$

$$H_a = \frac{\lambda MP \sin(\theta + \alpha - \beta)}{2B_{\perp}}$$

Dans le tableau 4 sont indiquées les valeurs de l'altitude d'ambiguïté pour une configuration de type ERS (incidence 23°, altitudes du satellite 785 km), des pentes de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ et $\pm 30\%$ (angles β respectivement de $\pm 6^\circ$, $\pm 11^\circ$ et $\pm 17^\circ$) et une baseline de 10 m. On observe que l'altitude d'ambiguïté diminue lorsque la pente augmente dans le cas d'une pente positive par rapport à la normale locale et inversement pour une pente négative. Nous pouvons raisonnablement choisir de sélectionner les altitudes d'ambiguïtés dans notre projet permettant d'assurer le niveau de précision altimétrique attendue pour les pentes de -30% (environ -20°) –cas défavorable– dans le cas du terrain chahuté et pour les pentes nulles en terrain plat.

Pente	- 30 %	- 20 %	- 10 %	0 %	10 %	20 %	30 %
Baseline = 10 m	1 618 m	1 420 m	1 020 m	784 m	784 m	581 m	332 m

Tableau 4 - Altitudes d'ambiguïté selon la pente du terrain pour un configuration de type ERS à la portée proximale pour une baseline de 10 m.

3.3.5. Altitudes d'ambiguïté ou baselines requises

Selon les considérations précédentes, nous pouvons calculer les baselines requises équivalentes aux altitudes d'ambiguïté limite des différents cas de figure : déroulement, amélioration des résolutions altimétriques sur terrain plat ou sur les pentes. Le tableau 5 résume les conditions dans le cas d'étude 1 et le tableau 6 dans le cas d'étude 2.

Le tableau 5 donne ainsi les deux conditions liées à P1 et P2 en termes de baselines selon le MNT utilisé et la mission radar pour le cas d'étude 1. Les valeurs de P1 et P2 sont des ordres de grandeur. Ces chiffres se basent sur une comparaison avec un MNT dont la RMSE serait métrique. Ces valeurs nous suffisent pour identifier des groupes de configurations interférométriques. Ce tableau montrerait que d'un point de vue géométrique, il est possible d'améliorer les précisions altimétriques en deçà de 5 m avec ERS mais avec des baselines supérieures à 650 m à 25° d'incidence en mode *stripmap*, ce qui peut être en contradiction avec des niveaux de cohérence acceptables. Par contre, les capteurs en bande X seraient plus prometteurs pour atteindre de meilleure résolution. Ce tableau met aussi en évidence l'influence du MNT de référence utilisé sur le choix des configurations interférométriques.

Le tableau équivalent pour le cas d'étude 2 est aussi construit (tabl. 6). Il apparaît qu'en dehors d'un système de type ASAR en bande C, les baselines pertinentes sont bien inférieures aux baselines critiques.

	λ (cm)	H (km)	TD (m)	$B_{\perp}^{\max}$ (km)	GTOPO30 P1 = 20 m P1/k = 118 m P2 = 50 m P2/k = 294 m	SRTM 90 m, SPOT P + XS P1 = 6 m P1/k = 35 m P2 = 45 m P2/k = 265 m	IGN 50 m, SRTM 30 m P1 = 3 m P1/k = 18 m P2 = 35 m P2/k = 206 m	SPOT5-HRS P1 = 3 m P1/k = 18 m P2 = 10 m P2/k = 59 m
ERS ou ASAR	5,66	785	8	1,500	290 m 100 m 170 m 60 m	980 m 330 m 190 m 60 m	1 960 m 650 m 250 m 80 m	1 960 m 650 m 880 m 290 m
Cosmo-Skymed	3,1	620	3	1,350	120 m 40 m 70 m 20 m	410 m 140 m 80 m 20 m	830 m 270 m 100 m 30 m	830 m 270 m 370 m 120 m
TerraSAR-X	3,1	515	3	1,350	100 m 30 m 60 m 20 m	330 m 110 m 60 m 20 m	670 m 220 m 80 m 30 m	670 m 220 m 310 m 100 m
TerraSAR-L	23,5	630	5	7,700	950 m 310 m 580 m 190 m	3 190 m 1 090 m 640 m 210 m	6 390 m 2 130 m 820 m 280 m	6 390 m 2 130 m 980 m 290 m

Tableau 5 - Cas 1 : baselines correspondant à 2.P1, P1/k, 2.P2, P2/k avec $k = 0,17$ et à $\theta = 25^\circ$.

Les baselines critiques avant décorrélation géométrique sont également calculées d'après la taille du pixel radar en distance (TD) du mode stripmap. La condition minimale de baseline relative à P1 est calculée pour une pente nulle et la condition de baseline relative à P2 est calculée pour une pente de - 30% (vers - 20°).

	λ (cm)	H (km)	TD (m)	$B_{\perp}^{\max}$ (km)	GTOPO30 P1 = 20 m P1/k = 500 m	SRTM 90m, SPOT P+XS P1 = 6 m P1/k = 150 m	IGN 50 m, SRTM 30 m, SPOT5-HRS P1 = 3 m P1/k = 75 m
ASAR	5,66	785	8	5,500	660 m 50 m	2 220 m 170 m	4 450 m 350 m
Cosmo-Skymed	3,1	620	3	4,700	270 m 20 m	920 m 70 m	1 850 m 140 m
TerraSAR-X	3,1	515	3	4,700	220 m 10 m	750 m 60 m	1 500 m 120 m
TerraSAR-L	23,5	630	5	27,00	2 140 m 170 m	7 150 m 570 m	14 300 m 1 140 m

Tableau 6 - Cas 2 : baselines correspondant à 2.P1 et P1/k avec $k = 0,04$ et $\theta = 45^\circ$.

Les baselines critiques avant décorrélation géométrique sont calculées d'après la taille du pixel radar en distance (TD) du mode stripmap. La condition minimale de baseline est calculée pour une pente nulle.

3.3.6. Angles d'incidence

Les futures missions et la mission ASAR permettent d'acquérir des données avec des angles d'incidence pouvant atteindre 45° ou 60°. A 45°, les baselines critiques sont augmentées entre 5,5 km pour ASAR, 4,7 km pour Cosmo-Skymed et TerraSAR-X et 27 km pour TerraSAR-L. Ainsi, augmenter l'incidence permet d'un point de vue géométrique de construire des configurations interférométriques aboutissant à de meilleures précisions altimétriques (fig. 3) : 5 m pour ASAR, 2 m pour Cosmo-Skymed et TerraSAR-X et 4 m pour TerraSAR-L.

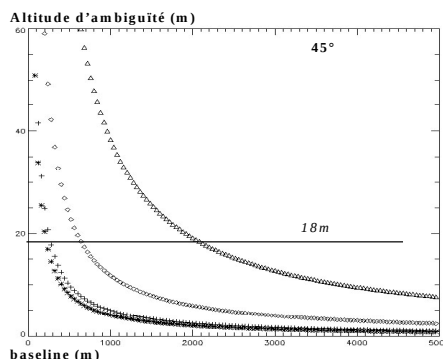


Figure 3 - Altitudes d'ambiguïté (m) maximales selon la baseline pour des pentes nulles et différentes missions radar : $\diamond$ ASAR, + Cosmo-Skymed, Δ TerraSAR-L, * TerraSAR-X.

De plus, utiliser différentes incidences permettrait d'accéder à une information plus complète sur les terrains en pente. L'angle de visée a une influence directe sur l'étendue des zones de renversement et d'ombres. Dans la géométrie la plus simple (terre plate), on exprime deux longueurs pertinentes pour notre mesure par (fig. 4-a) :

$$\text{Équation 22: } L_{\text{ombre}} = h \tan \theta - h / \tan \beta \text{ et } L_{\text{renversement}} = h / \tan \theta - h / \tan \beta$$

Pour une pente donnée, l'ombre existe pour une incidence supérieure à l'angle complémentaire à la pente et le renversement pour une incidence inférieure à la pente. En mesurant les longueurs cumulées selon l'incidence et la pente, un angle d'incidence élevé autour de 45° permet de réduire l'influence cumulée des zones de renversement et d'ombre sur les faibles et forts reliefs (fig. 4-b).

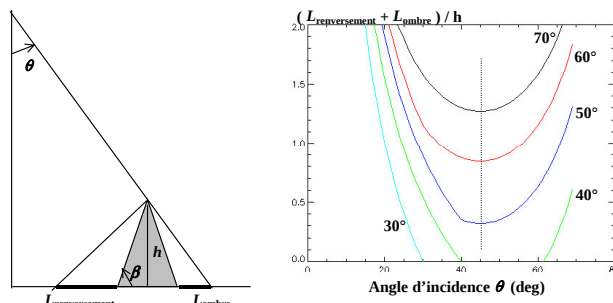


Figure 4 - a) Géométrie simplifiée, b) longueurs cumulées des zones d'ombre et de renversement (sans la longueur de la pente) en fonction de l'angle d'incidence et de la pente.

3.3.7. Processus itératif

Dans le cadre d'un processus itératif, le MNT de référence utilisé à chaque étape est celui obtenu à l'itération précédente. Il est attendu que les précisions altimétriques de ce MNT soient améliorées à chaque étape. Plusieurs stratégies sont envisageables. Nous nous plaçons dans les deux cas définis au 3.3.1.

a) Cas 1 : bases temporelles variables et terrain de pentes variables

En respectant notre analyse précédente prenant en compte le critère des pentes, nous considérerons la stratégie suivante :

- étape 1 : améliorer les précisions sur les pentes, si possible sans déroulement ;
- étape 2 : améliorer les précisions sur les pentes et le terrain plat, si possible sans déroulement.

Pour l'étape 1, nous nous référons au tableau 5 pour le choix des baselines à exploiter permettant d'améliorer idéalement les précisions altimétriques sur le relief sans déroulement (tabl. 7). Notons H_{a1} l'altitude d'ambiguïté choisie à cette étape, comprise entre $P2/k$ et $2.P2$.

Etape 1	GTOPO30	SRTM 90 m	IGN 50 m, SRTM 30 m	SPOT5-HRS
ERS, ASAR	60 à 170 m	60 à 190 m	80 à 250 m	290 à 880 m
COSMO-SkyMed	20 à 70 m	20 à 80 m	30 à 100 m	120 à 370 m
TerraSAR-X	20 à 60 m	20 à 60 m	30 à 80 m	100 à 310 m
TerraSAR-L	190 à 580 m	210 à 640 m	280 à 820 m	290 à 980 m

Tableau 7 - Cas 1 : choix des baselines pour l'étape 1.

À l'issue de l'étape 1, sans prendre en compte une éventuelle détérioration de la précision altimétrique en un point (due à un mauvais niveau de cohérence en particulier), il est attendu que les précisions sur le relief chahuté soit de l'ordre de $P3 = k.H_{a1}$. $P3$ est inclus entre $P2$ et $2kP2$. Selon le choix de baseline à l'étape 1 et le MNT de référence, la figure 5 donne la représentation du choix du rapport des baselines entre étape 1 et étape 2 pour assurer dans le cas idéal l'amélioration des précisions altimétriques et sans déroulement. Par exemple avec SRTM3, il faudrait selon ces courbes choisir un rapport de baseline supérieur à 3. La différence de courbes pour SRTM3 par rapport à celles pour GTOPO30 et SPOT HRS, tient du fait des valeurs de $P1$ et $P2$ dont la différence est plus importante que pour les deux autres types de MNT de référence. Pour SRTM3, un processus en plus de deux itérations serait une solution. On observe alors qu'un rapport de baseline de 2 est approprié dans la plupart des cas représentés entre étape 1 et étape 2.

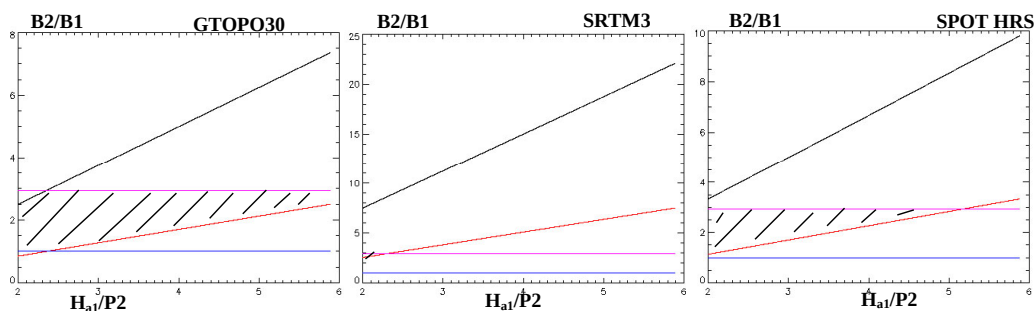


Figure 5 - Cas 1 : choix du rapport de baseline entre étape 2 et étape 1 selon le MNT de référence et l'altitude d'ambiguïté choisie en étape 1 entre $2.P2$ et $P2/k$. Les lignes représentent les conditions relatives à $2.P1$ (noire), $P1/k$ (rouge), $2.P3$ (rose), $P3/k$ (bleue). Pour H_{a1} donnée, le rapport des baselines doit être choisi au-dessus des lignes bleues et rouge pour assurer idéalement l'amélioration des précisions verticales, et en-dessous des lignes noires et violettes pour ne pas dérouler. La zone hachurée montre l'intersection des deux conditions.

b) Cas 2 : base temporelle faible et terrain plat

Dans le cas 2, la stratégie suivante est plus simplement d'améliorer itérativement les précisions sur un sol plat. Pour l'étape 1, nous nous référons directement au tableau 6 et repris dans le tableau 8 pour le choix des baselines à exploiter permettant d'améliorer idéalement les précisions altimétriques sans déroulement. Notons H_{a1} l'altitude d'ambiguïté choisie à cette étape, comprise entre $P1/k$ et $2.P1$.

Etape 1	GTOPO30	SRTM 90 m	IGN50m, SRTM 30m, HRS
ASAR	50 à 660 m	170 à 2 220 m	350 à 4 450 m
COSMO-Skymed	20 à 270 m	70 à 920 m	140 à 1 850 m
TerraSAR-X	10 à 220 m	60 à 750 m	120 à 1 500 m
TerraSAR-L	170 à 2 140 m	570 à 7 150 m	1 140 à 14 300 m

Tableau 8 - Cas 2 : choix des baselines pour l'étape 1.

À l'issue de l'étape 1, il est attendu que les précisions soient de l'ordre de $P3 = k.H_{a1}$. $P3$ est inclus entre $P1$ et $2kP1$. Selon le choix de baseline à l'étape 1 et le MNT de référence, la figure 6 donne la représentation du choix du rapport des baselines entre étape 1 et étape 2 pour assurer dans le cas idéal l'amélioration des précisions altimétriques et sans déroulement. Un rapport de baseline entre 1 et $1/2k$ (ici valant 12.5) pourrait être choisi. Le choix peut être limité par ailleurs par la condition sur le déroulement $2.P1$. Un rapport entre 1 et $H_{a1}/2.P1$ est alors plus approprié.

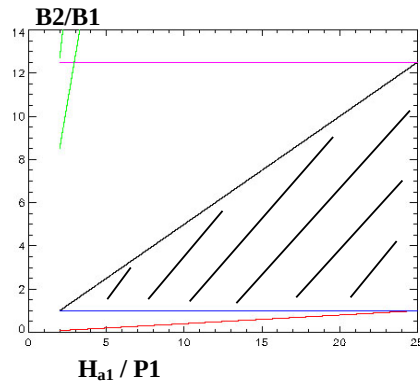


Figure 6 - Cas 2 : choix du rapport de baseline entre étape 2 et étape 1 selon l'altitude d'ambiguïté choisie en étape 1 entre $2.P1$ et $P1/k$. Les lignes représentent les conditions relatives à $2.P1$ (noire), $P1/k$ (rouge), $2.P3$ (rose), $P3/k$ (bleue). Pour H_{a1} donnée, le rapport des baselines doit être choisi au-dessus des lignes bleues et rouge pour assurer idéalement l'amélioration des précisions verticales, et en-dessous des lignes noires et violettes pour ne pas dérouler. La zone hachurée montre l'intersection des deux conditions.

3.4. CONCLUSION

Nous avons proposé une procédure pour choisir, d'après des critères géométriques, les configurations interférométriques selon la précision attendue, les caractéristiques des images radar et le MNT de référence utilisé.

Ainsi, dans le cas de terrain plat et dans le cadre d'une mission d'incidence 45° et acquérant des couples de faible base temporelle (cas 2), un rapport entre 1 et $H_{a1}/2.P1$ est préconisé, où H_{a1} est l'altitude d'ambiguïté choisie en étape 1 et $P1$ la précision du MNT de référence. H_{a1} est choisi entre $2.P1$ et $25.P1$.

Dans le cadre plus réel de terrains pentus, nous retiendrons qu'un rapport de 2 est approprié à la plupart des cas représentés.

Suite à la précédente synthèse bibliographique, la section suivante propose une première chaîne de traitement qui sera améliorée lors de la seconde phase du projet.

4.2. DÉTAILS DES ÉTAPES

Les étapes classiques d'assimilation des données radar, de géocodage et de calcul interférométrique utilisent le logiciel de la société GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG (Urs Wegmüller, Charles Werner, Tazio Strozzi, Andreas Wiesmann, <http://www.gamma-rs.ch>).

- **MNT initial et choix des configurations interférométriques** : comme il a été étudié dans les paragraphes 3.3, le choix des baselines à chaque étape doit être adapté au MNT initial utilisé. Une telle mise en pratique est présentée dans le paragraphe 5.2.
- **Préparation des images radar** : une image de référence est choisie et toutes les autres données sont recalées sur cette image par mise en correspondance et compensation des distorsions bilinéaires d'ordre 2. L'interpolation des valeurs complexes utilise une fonction sinc 2D. Ceci permet de travailler dans une unique géométrie radar et facilite les étapes suivantes d'empilement. Le choix de l'image de référence vise à minimiser une distance globale dans l'espace 2D base temporelle/baseline (voir en 5.1.1).
- **Conversion image/terrain et calcul des interférogrammes différentiels** : ces étapes sont classiques en interférométrie. Les grilles de passage terrain/image sont affinées par corrélation entre l'image d'amplitude radar et une simulation de l'image d'amplitude radar à partir du MNT et calcul d'un polynôme bilinéaire en distance et en azimuth. Lors de ces calculs, la carte des angles d'incidence locaux ainsi que celle des zones d'ombre et de renversement (sans distinction entre les deux) sont automatiquement produites. Sur les zones de renversement, les grilles de passage peuvent indiquer au choix des valeurs nulles, des valeurs interpolées linéairement ou des valeurs constantes. Le choix des valeurs à relever est discuté dans le paragraphe 4.4.
- **Filtrage, déroulement, correction des bases et calcul des interférogrammes différentiels avec les nouvelles valeurs de bases** : le logiciel GammaRS permet d'affiner les valeurs de bases à partir des interférogrammes différentiels déroulés et du MNT projeté en géométrie radar et parfaitement recalé. Les interférogrammes sont préalablement filtrés par l'algorithme communément utilisé de Goldstein et Werner (cf. 4.3.1). La méthode de déroulement est présentée dans le paragraphe 4.3.2. Les bases corrigées permettent de calculer de nouveaux interférogrammes différentiels qui sont à nouveau déroulés.
- **Calcul des cartes d'écarts d'altitudes, alignement des cartes et ajout de la composante basse fréquence** : chaque interférogramme déroulé représente la phase correspondant à l'écart d'altitude au MNT initial, en dehors d'autres contributions (atmosphère, bruit géométrique, changement temporel). Un module de Gamma nous permet de calculer les altitudes radar à partir de l'interférogramme différentiel déroulé. Cependant, la présence de biais et de pentes ne permet pas d'ajouter les deux contributions directement. Nous proposons de compenser une surface polynomiale d'ordre 1 (par une procédure IDL). Nous faisons ensuite

l'hypothèse que les écarts d'altitude sont distribués par une gaussienne de moyenne nulle. Ceci nous permet de corriger le biais. Cette hypothèse est discutée dans le paragraphe 5.3.2 où nous vérifions que la pdf s'approche bien d'une gaussienne.

- **Calcul des MNT interférométriques en géométrie radar et empilement :** L'empilement des altitudes avant géocodage est dans cette première proposition simple : il s'agit d'une moyenne pondérée par la valeur de baseline et de cohérence telle qu'utilisée dans Ferretti A. *et al.* (1997) (estimation MV de l'altitude considérant que chaque bruit des mesures est distribué par une loi gaussienne) :

$$\text{Équation 23 : } \hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \frac{z_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{\sigma_i^2}}$$

D'après l'équation 4 et pour des cartes issues de données radar superposables (même configuration), on peut écrire :

$$\text{Équation 24 : } \hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \frac{B_{\perp i}^2 z_i}{\sigma_{\phi i}^2}}{\sum_{i=1}^{N_i} \frac{B_{\perp i}^2}{\sigma_{\phi i}^2}}$$

La variance du bruit de phase peut être estimée empiriquement sur chaque interférogramme. L'estimation de l'altitude pourrait sans doute être améliorée en prenant en compte également la distribution du MNT initial et en réalisant une analyse statistique plus poussée sur la distribution du MNT radar selon les pentes par exemple. De plus, cette estimation introduit un facteur de pondération qui ne dépend pas du pixel sauf si le bruit de phase est estimé localement. Pour cela, et afin d'être suffisamment robuste dans l'estimation, une approche pourrait être de mesurer l'écart de la distribution locale à la distribution globale du bruit de phase sur l'interférogramme.

- **Géocodage du MNT radar :** il s'appuie sur le MNT initial et les grilles de transformation précédemment calculées. Deux approches sont intuitives : utiliser la grille précédente et projeter les valeurs d'altitudes nouvellement estimées ou calculer une nouvelle grille. A priori il est difficile de prévoir la performance de ces deux approches étant donné que la géométrie radar a été corrigée d'après la géométrie et les altitudes du MNT initial. Cependant, nous pensons qu'en utilisant les nouvelles altitudes, le géocodage pourrait être meilleur. En effet, il est raisonnable de penser que les résidus d'altitudes précédemment calculés englobent une partie des erreurs d'altitudes dues à une mauvaise localisation planimétrique. Dans ce cas, une nouvelle grille est calculée. Un décalage et des distorsions (rotation, dilatation) apparaissent après projection du nouveau MNT sur

le terrain par rapport au MNT initial. Pour y remédier, nous projetons l'image d'amplitude radar simulée à partir du MNT initial sur le terrain et la comparons avec celle d'origine. Leur mise en correspondance permet de définir une correction des grilles de la même manière que dans la première étape de géocodage. Idéalement, seuls des écarts locaux peuvent apparaître en lien avec l'amélioration locale du MNT.

4.3. PRÉCISIONS SUR CERTAINS MODULES DU LOGICIEL GAMMA

4.3.1. Précisions sur le filtrage des interférogrammes

Le filtrage de Goldstein et Werner (Goldstein R. et al., 1998) est basé sur une analyse spectrale par fenêtre glissante. Localement, l'estimation du spectre de l'interferogramme complexe est réalisée par transformée de Fourier rapide (FFT). Assimilant localement l'interférogramme à un plan, l'information de phase qui nous intéresse est contenue autour de la fréquence maximale du spectre qui est directement liée au gradient de phase local. Le spectre est alors élevé à une puissance α généralement comprise entre 0 et 1. Ceci a pour effet de resserrer le spectre autour de son maximum d'amplitude. Après FFT inverse, on obtient un filtrage adapté au gradient local de la phase, plus ou moins important selon α et la taille de fenêtre de filtrage. Ce filtrage, contrairement à un filtrage passe-bas de type *multilook*, est moins sensible au phénomène de « repliement » lié au choix de la taille de la fenêtre et à la présence de plusieurs pentes dans une même fenêtre.

4.3.2. Précisions sur l'algorithme de déroulement

L'algorithme de déroulement du logiciel GAMMA (Wegmuller U. et al., 2002) repose sur la méthode MCF, *Minimum Cost Flow*, consistant à minimiser le coût global dans un graphe. Cette méthode utilise un réseau de nœuds connectés par des arcs orientés. Chacun des arcs est caractérisé par une valeur de flot, un coût par unité de flot et une capacité. Les nœuds du réseau sont définis par les parcours locaux en boucles utilisés dans le calcul des résidus. Ainsi, un pixel est entouré d'arcs et de nœuds (fig. 8). Dans le logiciel Gamma, le réseau est défini par triangulation de Delaunay. Ceci permet de rejeter des nœuds que l'on souhaite masquer (cohérence trop faible par exemple) par rapport au choix d'un réseau régulier de maille carrée. Les parcours des résidus positifs sont les nœuds sources alors que les négatifs sont les nœuds demandeurs. Un arc est orienté des nœuds sources vers les nœuds demandeurs. L'objectif est alors d'obtenir une répartition globale des flots qui permette de transférer l'ensemble des flots issus des nœuds sources vers les nœuds demandeurs au moindre coût.

Le flot d'un arc est la valeur entière du nombre de cycles à ajouter au gradient de phase entre deux pixels successifs parcourus lors d'un déroulement si le parcours de déroulement coupe cet arc. Les coûts des arcs peuvent être définis en utilisant la valeur de cohérence (l'aide Gamma ne précise pas comment est défini le coût).

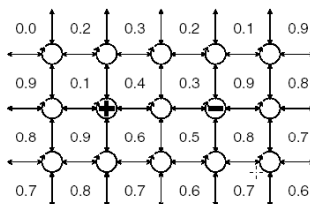


Figure 8 - Exemple de réseau à maille carrée utilisé pour une méthode de déroulement MCF et déterminé par parcours en boucle sur 4 pixels. Les valeurs des phases sont indiquées en cycles, + et - correspondent à des positions de résidus positifs et négatifs (d'après Chen C., 2001).

La fonction de coût global utilisée dans le logiciel Gamma est une distance L1 cumulée entre le gradient de la phase déroulée que l'on cherche, Φ , et le gradient de la phase initiale, Ψ :

$$C = \left\{ \sum_{i,j} c_{ij}^x |\Delta \Phi_{ij}^x - \Delta \Psi_{ij}^x| + \sum_{i,j} c_{ij}^y |\Delta \Phi_{ij}^y - \Delta \Psi_{ij}^y| \right\}$$

x et y désignant la direction de calcul du gradient en ligne ou en colonne,

i, j indice des nœuds,

c_{ij} poids dans $[0, 1]$ affecté à l'arc reliant les nœuds i et j .

Cette fonction présente l'avantage d'être linéaire simplifiant alors sa résolution. Gamma utilise une méthode des plus courts chemins successifs (*Successive Shortest Path* – SSP).

4.4. MÉTHODE ENVISAGÉE SUR LES ZONES D'OMBRES ET DE RENVERSEMENT

En l'absence de données de visée opposée, nous ne nous intéressons pas précisément aux zones d'ombre. Rappelons que Eineder M. *et al.* (2003) proposent déjà une stratégie de traitement de ces zones.

En dehors de l'utilisation d'images d'incidence différentes, les zones de compression ne sont pas ici traitées de manière particulière : les valeurs d'altitudes sont interpolées lors du géocodage.

Par contre, le traitement des zones de renversement, s'inspirant de Eineder M. *et al.*, (2003) qui n'utilisent qu'un seul couple interférométrique et donc qu'un seul type de configuration, est un enjeu auquel il convient de s'intéresser dans cette étude. Une première réflexion est commencée qui pourrait être développée, mise en œuvre et testée lors de la phase 2 de ce projet. L'idée serait de s'appuyer sur le MNT initial pour définir la forme de la surface sur la zone du renversement.

5. Expériences

Notre choix s'est arrêté sur le site de Marseille présentant à la fois des hauts reliefs et des zones urbaines. Le BRGM et le CNES ont par ailleurs en leur possession des données sur le site permettant de réaliser les expériences à moindre coût. Les données fournies par le CNES au BRGM sont énumérées en annexe 2.

5.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES

5.1.1. Images radar

a) Sélection parmi les données disponibles

L'archive ERS pour la Track 65, Frame 2727 ou 2729 est exploitée. La figure 9 montre l'ensemble des données acquises par les capteurs ERS1 et 2 et celles qui seront utilisées. Ces données sont disponibles au BRGM (projet RESUM et projet ESA-CAT-1 ID.3106 *Improving DEM accuracy from a pre-existing DEM and a multibaseline INSAR technique*, PI. Nadine Pourthié, CNES) ou au CNES (ann. 2). On choisit de se placer sur une plage temporelle restreinte contenant un ensemble de couples interférométriques de bases perpendiculaires variées qui répondent aux conclusions de l'analyse précédente.

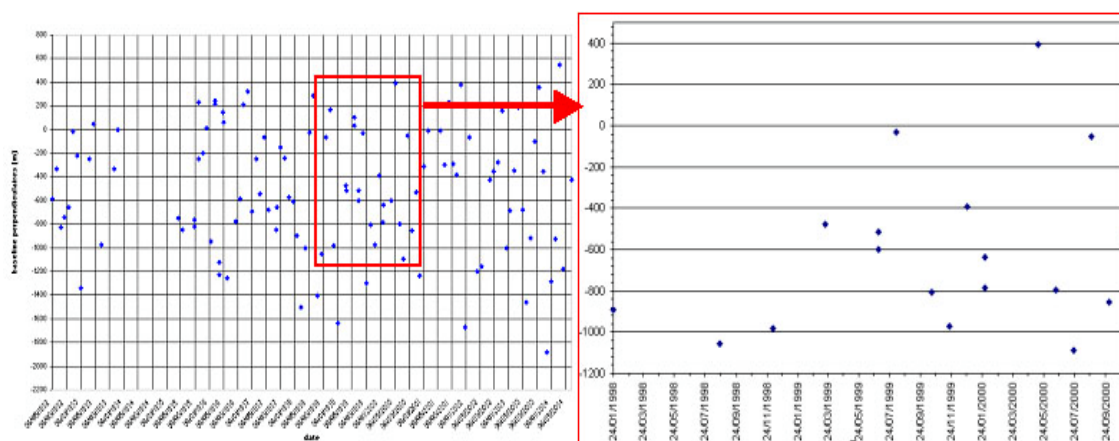


Figure 9 - À gauche : représentation graphique des données ERS de la Track 65, Frame 2727 ou 2729. À droite : sélection de données dans un intervalle de temps restreint offrant la possibilité de nombreuses configurations interférométriques (bases perpendiculaires variées). Les valeurs de bases perpendiculaires relatives sont issues de l'application DESCW de l'ESA.

La fenêtre de travail choisie contient 18 données ERS (tabl. 9). Les baselines perpendiculaires relatives varient entre – 1 091 m et 392 m. Cette liste englobe deux couples tandem.

Mission	Date	Orbite	Base _ _	Delta Jours	Origine	Format
E2	24/01/1998	14448	-894	1529	BRGM	RAW
E2	22/08/1998	17454	-1055	1739	BRGM	RAW
E2	05/12/1998	18957	-981	1844	BRGM	RAW
E1	19/03/1999	40133	-478	1948	CNES	SLCI
E1	02/07/1999	41636	-514	2053	CNES	RAW
E2	03/07/1999	21963	-598	2054	CNES	SLCI
E2	07/08/1999	22464	-33	2089	CNES	SLCI
E2	16/10/1999	23466	-807	2159	BRGM	RAW
E2	20/11/1999	23967	-974	2194	BRGM	RAW
E2	25/12/1999	24468	-393	2229	CNES	SLCI
E1	28/01/2000	44642	-788	2263	BRGM	RAW
E2	29/01/2000	24969	-638	2264	CNES	SLCI
E2	13/05/2000	26472	392	2369	CNES	SLCI
E2	17/06/2000	26973	-796	2404	BRGM	RAW
E2	22/07/2000	27474	-1091	2439	CNES	SLCI
E2	26/08/2000	27975	-55	2474	CNES	SLCI
E2	30/09/2000	28476	-855	2509	BRGM	RAW
E2	04/11/2000	28977	-533	2544	CNES	SLCI

Tableau 9 - Liste des images ERS utilisées.

b) Préparation des données

Les données au format RAW sont traitées avec le logiciel GAMMA-MSP incluant les étapes de traitement suivantes :

- correction des données orbitales en fonction des fournitures ODR (*Orbital Data Records*) de l'université de DELFT, qui sont accessibles à l'adresse <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/>.
- détection et remplissage des lignes manquantes ;
- estimation du *doppler centroid* –parties entière (l'ambiguïté) et fractionnelle de PRF– par la méthode MLCC (*Multi-look Cross Correlation*) (Wong F. *et al.*, 1996). La variation de la fréquence Doppler le long des distances peut ensuite être modélisée par un polynôme d'ordre 3 ;
- traitement en distance ;
- focalisation ;
- traitement en azimuth.

Les données SLC sont recalées sur une même image maîtresse, ce qui permet alors de produire l'ensemble des interférogrammes en une seule étape. Afin de limiter l'influence des écarts orbitaux et temporels sur le niveau de cohérence des

interférogrammes entre deux images esclaves, l'image maîtresse est choisie au 'centre' de l'ensemble des données. Pour cela, nous avons opté pour celle qui minimise une simple distance quadratique cumulée entre une image et les autres :

$$i_{ref} = \min_i \sum_{j=1}^N \left[(B_t^i - B_t^j)^2 + (B_{\perp}^i - B_{\perp}^j)^2 \right]$$

avec B_t^i la base temporelle relative et $B_{\perp}^i$ la base perpendiculaire relative pour l'orbite i .

Ici, l'image de référence choisie est celle de numéro d'orbite **24969**.

Le recalage des images sur l'image maîtresse est réalisé classiquement par calcul des décalages en ligne et en colonne et estimation d'un polynôme d'ordre 2 pour transformer l'image esclave vers la géométrie de l'image maîtresse.

Le logiciel Gamma considère que dans la géométrie radar, toutes les mesures altimétriques sont des hauteurs ellipsoïdales sur l'ellipsoïde WGS84. Nous choisissons donc dans la suite de produire des mesures sur cet ellipsoïde et de les projeter sur la projection associée UTM. Ceci implique que toutes les données MNT de référence sont préalablement projetées en UTM et les altitudes ou hauteurs sont converties en hauteurs ellipsoïdales WGS84.

5.1.2. MNT

Le tableau 10 récapitule les données exploitées.

a) MNT SRTM30

Le MNT GTOPO30 de l'USGS couvre tout le globe (de - 90° à 90° en latitude et de - 180° à 180° en longitude). Le système géodésique utilisé est WGS84 et les hauteurs ont pour référence le niveau moyen de la mer. Le MNT est issu de 8 données différentes : raster et vecteur. Les RMS en altitudes varient de 9 à 304 m. Des artefacts sont liés aux données raster (effet de bloc, effet de « bande ») et aux données vecteur (effets de terrasse, monts ou dépressions artificielles) (GTOPO30 Documentation, 2000). Aujourd'hui, le MNT GTOPO30 a été mis à jour avec les données SRTM. Le nouveau MNT s'appelle SRTM30 et présente les mêmes caractéristiques que le MNT GTOPO30 (SRTM30 Documentation, 2004).

Depuis <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/SRTM30/>, nous avons récupéré la brique W020N90 dont les caractéristiques sont :

- système géodésique WGS84, altitudes sur le géoïde EGM96 ;
- latitudes de 40° à 90°, longitude de - 20 à 20°, maille 30'' (0.008333°) ;
- codage sur 16 bits signés (« *Big Endian* »). Valeurs vides à - 9999.

74,2 % des valeurs non vides sont issus de SRTM, 23 % de DTED (*Digital Terrain Elevation Data*) et 2,8 % de MNT 1° de l'USGS. La brique est découpée entre les latitudes 43° et 44° et les longitudes 5° et 6°.

Les routines du logiciel GAMMA ne permettent pas de traiter des altitudes indiquées sur le géoïde. Une première étape est donc nécessaire pour convertir les altitudes EGM96 en hauteurs ellipsoïdales WGS84. Pour cela, nous utilisons la carte des hauteurs ellipsoïdales du géoïde fournie par le NIMA (<http://earth-info.nima.mil/GandG/wgsegm/egm96.html>) avec un pas de 0.25°. Cette carte est ré-échantillonnée au pas voulu avec une interpolation bicubique. Sur la brique découpée, les hauteurs varient entre 47,9750 m et 51,0840 m.

Le MNT est ensuite projeté en UTM, zone 31 Nord avec une maille de 700 m grâce à une routine du logiciel GAMMA.

b) MNT SRTM3

Depuis <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/Eurasia/>, nous avons récupéré la brique N43E005.HGT dont les caractéristiques sont :

- système géodésique WGS84, altitudes sur le géoïde EGM96 ;
- latitudes de 43° à 44°, longitude de 5° à 6°, maille 90 m ;
- codage sur 16 bits signés (« *Big Endian* »). Valeurs vides remplies par l'exécutable SRTMFill.exe.

Comme pour le MNT SRTM30, les altitudes sur le géoïde sont tout d'abord converties en hauteurs ellipsoïdales WGS84 en utilisant la carte du NIMA. Le MNT est ensuite projeté en UTM, zone 31 Nord avec une maille de 90 m grâce à une routine du logiciel GAMMA (fig. 10).

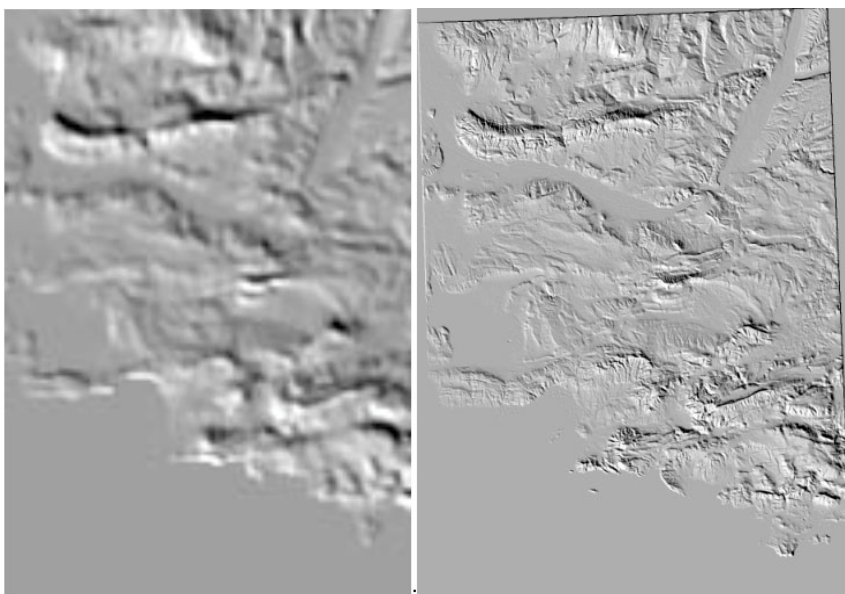


Figure 10 - MNT ombrés SRTM30 et SRTM3.

c) MNT IGN50

Caractéristiques du MNT utilisé :

- système de projection Lambert 2 étendu, altitudes dans le système NGF-IGN69 ;
- coin nord-est : Y 1860000, X 800000, maille 50 m ;
- codage sur 16 bits signés (« *Big Endian* »).

Nous avons constaté que la routine du logiciel Gamma, ainsi que les outils de ENVI, considèrent que les valeurs de hauteurs du système NTF sont données sur l'ellipsoïde de Clarke 80, ce qui n'est pas le cas. Un traitement préalable est donc nécessaire pour convertir les altitudes du MNT donné par l'IGN en hauteurs sur l'ellipsoïde de Clarke.

Pour cela, nous n'avons pas trouvé de grilles donnant la transformation exacte entre IGN69 et ellipsoïde de Clarke, mais nous savons que le système NGF-IGN69 est une bonne approximation locale du géoïde à l'échelle de travail. Nous utilisons donc la carte précédente du NIMA des hauteurs ellipsoïdales WGS84 sur le géoïde. La carte des hauteurs ellipsoïdales WGS84 sur l'ellipsoïde de Clarke 80 a quant à elle été produite par interpolation à partir de quelques points dont les hauteurs ont été converties avec le logiciel CIRCE2000 de l'IGN. Par combinaison de ces deux cartes, on obtient la carte indiquant les altitudes du géoïde sur l'ellipsoïde de Clarke. Sur une brique de 1° par 1° vers Marseille, l'ellipsoïde de Clarke est environ 8 m au-dessus du géoïde et 41 m en dessous de l'ellipsoïde WGS84. Les hauteurs WGS84 sur l'ellipsoïde de Clarke varient très peu, entre - 41,39 m et - 41,98 m. Le MNT peut enfin être projeté en UTM, zone 31 Nord, altitudes sur l'ellipsoïde WGS84, avec une maille de 50 m grâce à une routine du logiciel GAMMA.

d) MNT IGN-BDZ

Le MNT fourni par le CNES a les caractéristiques suivantes :

- système de projection Lambert 3, altitudes dans le système NGF-IGN69 ;
- coin nord-est : Y123480, X841880, 368 colonnes x 472 lignes, maille 40 m ;
- codage sur 16 bits signés (« *Big Endian* »).

Le MNT est projeté en UTM, zone 31 Nord, altitudes sur l'ellipsoïde WGS84, avec une maille de 40 m grâce à une routine du logiciel GAMMA et l'étape décrite ci-dessus permettant de convertir préalablement les altitudes en hauteurs ellipsoïdales de Clarke (fig. 11).

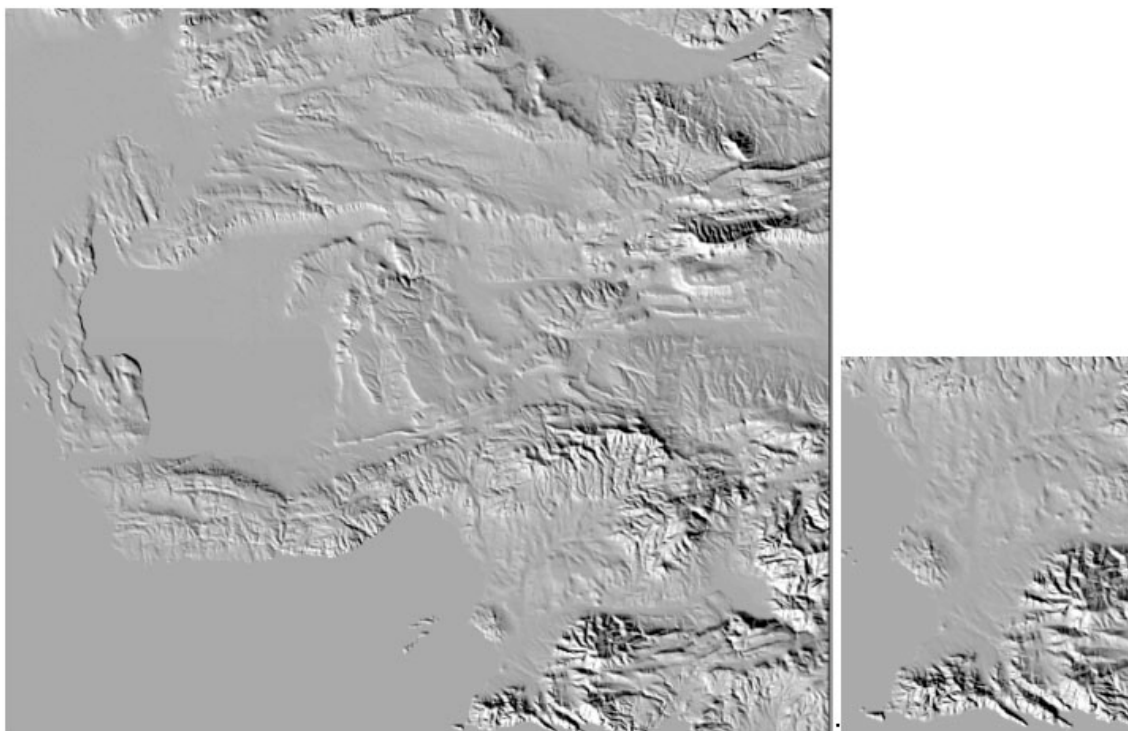


Figure 11 - MNT ombrés IGN50 et IGN-BDZ.

e) MNT SPOT HRS

Le MNT SPOT-5 HRS fourni par le CNES a les caractéristiques suivantes :

- système de projection UTM Zone 31N, hauteurs sur le géoïde EGM96 ;
- coin nord-est : Y4807089.8, X687748.3, 1287 colonnes x 1 286 lignes, maille 20 m ;
- codage sur 16 bits signés (« *Big Endian* »).

Comme pour les MNT SRTM30 et SRTM3, les altitudes sur le géoïde sont converties en hauteurs ellipsoïdales WGS84 avec la grille du NIMA.

f) MNT SPOT P+XS

Le MNT SPOT-5 P+XS fourni par le CNES a les caractéristiques suivantes :

- système géodésique WGS84, hauteurs sur l'ellipsoïde WGS84 ;
- coin Nord-Est : 43.6904°N 4.9446°E, 2 500 colonnes x 2 500 lignes, maille 0,0004° (environ 40 m) ;
- codage sur 16 bits signés (« *Little Endian* »).

Le MNT est projeté en UTM, zone 31 Nord avec une maille de 40 m grâce à une routine du logiciel GAMMA (fig. 12).

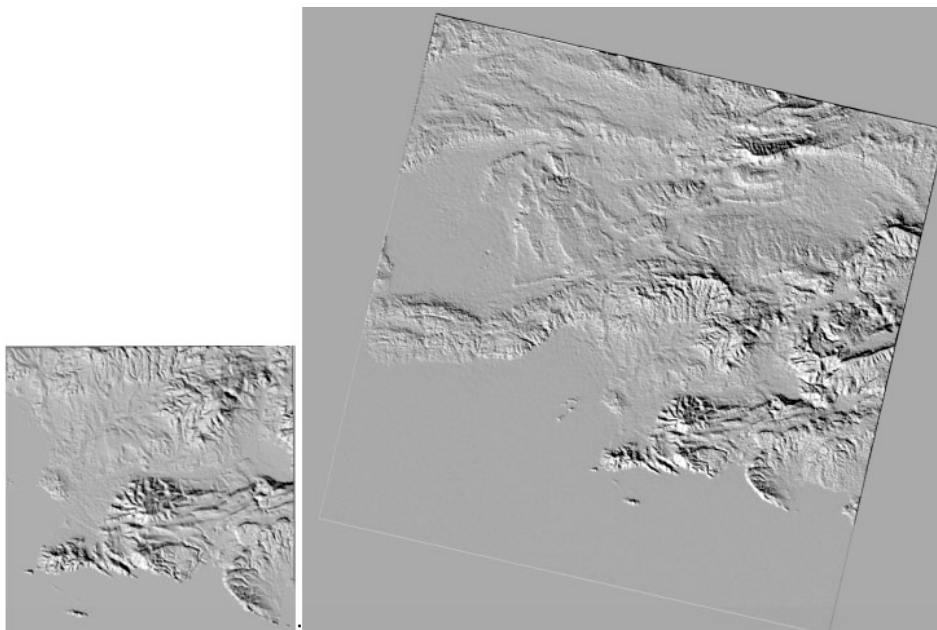


Figure 12 - MNT ombrés SPOT5 HRS et SPOT5 P+XS.

g) DEM_UCL_858_145.5_30

Ce MNT fourni par le CNES a les caractéristiques suivantes :

- système de projection Lambert 3, altitudes dans le système NGF-IGN69 ;
- maille 30 m, étendue de 12,4 km x 6,9 km (montagne de la Sainte-Victoire) ;
- précision altimétrique attendue de 1,30 m RMS.

Le MNT est projeté en UTM, zone 31 Nord, hauteurs sur l'ellipsoïde WGS84, avec une maille de 30 m grâce à une routine du logiciel GAMMA et l'étape décrite ci-dessus permettant de convertir préalablement les altitudes initiales en hauteurs ellipsoïdales de Clarke.

h) DEM_IGN_846.6_146_10

Ce MNT fourni par le CNES a les caractéristiques suivantes :

- système de projection Lambert 3, altitudes dans le système NGF-IGN69 ;
- maille 10 m, étendue de 31 km x 21 km ;
- précision altimétrique attendue de 1 m RMS.

Le MNT est projeté en UTM, zone 31 Nord, altitudes sur l'ellipsoïde WGS84, avec une maille de 10 m grâce à une routine du logiciel GAMMA et l'étape décrite ci-dessus permettant de convertir préalablement les altitudes initiales en hauteurs ellipsoïdales de Clarke (fig. 13).

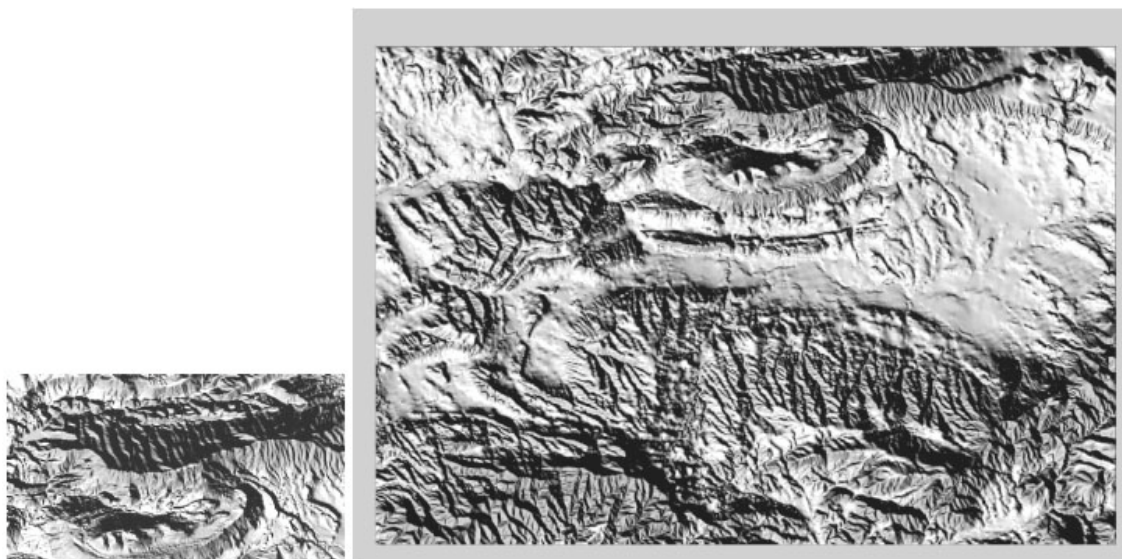


Figure 13 - MNT ombrés DEM_UCL_858_145.5_30 et DEM_IGN_846.6_146_10.

Nom	X0 (m)	Y0 (m)	DXxDY (m)	Nb colonnes	Nb lignes	RMSE attendues des altitudes
SRTM30	813565	195340	700 x 700	200	200	9 à 300 m
SRTM3	813565	195344	90 x 90	947	1270	10 m
SPOT HRS	841518	126095	20 x 20	1298	1297	5 à 28 m
SPOT P+XS	810213	160784	40 x 40	1850	1860	10 m
IGN BDZ	841880	123480	40 x 40	368	472	3 m
IGN50	799645	160057	50 x 50	1441	1102	2 à 40 m
DEM_UCL_858_145.5_30	858000	145500	30 x 30	415	231	1,3 m
DEM_IGN_846.6_146_10	846600	146000	10 x 10	3060	2170	1 m

Tableau 10 - Récapitulatif des caractéristiques des MNT utilisés.
Coordonnées exprimées en Lambert 3.

• Autres données MNT

- MNT DEM_IGN_817_166_50 de maille 50 m, il est englobé dans le MNT IGN50.

Comparaison qualitative des MNT sur du relief

On observe sur la figure 14 les aspects lissés des MNT SRTM3 et IGN50 alors que le MNT SPOT5 P+XS est granuleux. Les détails apportés par les MNT DEM_UCL_858_145.5_30 et DEM_IGN_846.6_146_10 par rapport aux autres MNT sont clairement visibles. Le MNT DEM_IGN_846.6_146_10 a en plus une maille de seulement 10 m. Ce MNT apparaît donc être propice pour servir de MNT de validation. Malheureusement, il ne couvre qu'une zone restreinte qui ne coupe pas celle du MNT SPOT5 HRS. Celui-ci présente davantage de rugosité que le MNT IGN50 (fig. 15). Le MNT IGN-BDZ n'apporte pas beaucoup plus d'information que le MNT SPOT-HRS et est similaire au MNT IGN50.

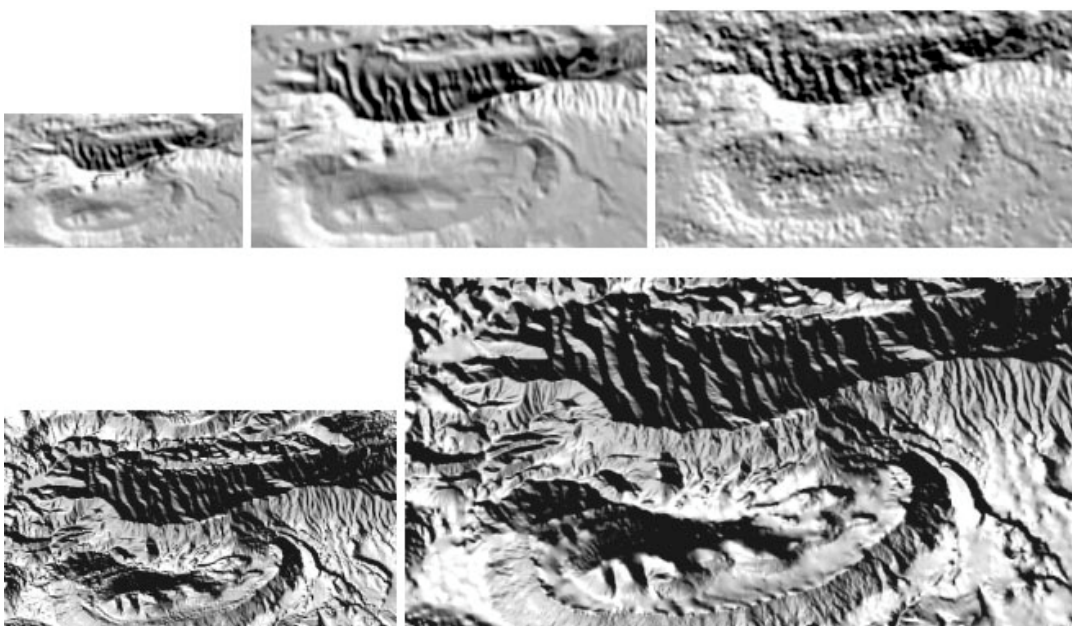


Figure 14 - MNT ombrés sur la montagne Sainte-Victoire (point culminant 1 011 m) : SRTM3, IGN50, SPOT5 P+XS, DEM_UCL_858_145.5_30 et DEM_IGN_846.6_146_10 (proportions non conservées).

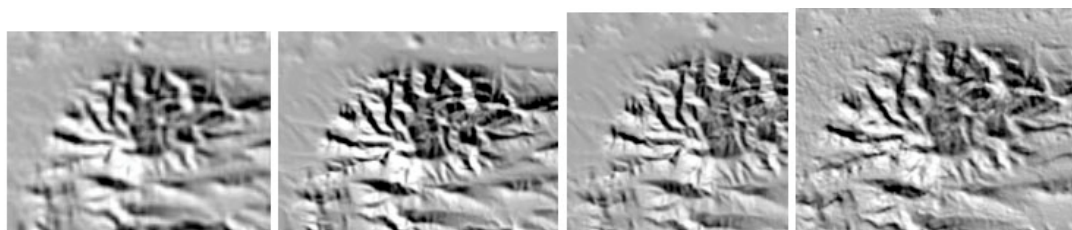


Figure 15 - MNT ombrés sur le mont Carpiagne (point culminant à 656 m) : SRTM3, IGN50, IGN-BDZ et SPOT5 HRS (proportions non conservées).

Image des pentes et classification

L'image des pentes que nous utilisons dans la suite pour mesurer les précisions altimétriques est calculée sur les MNT SPOT5-HRS et DEM_IGN_846.6_146_10 grâce au module « *Topographic Modeling* » du logiciel ENVI V3.6. Les pentes sont estimées par ajustement d'une surface quadratique sur le MNT dans un voisinage 3 x 3. Les angles sont exprimés en degré entre 0 et 90° ; 0° correspond au terrain plat. Une image RMS indiquant la qualité de correspondance entre la surface estimée avec le MNT est aussi générée. Nous avons alors produit l'image classifiée des pentes supérieures et inférieures à 20 %, équivalent à un angle de 11,3° (fig. 16). Les statistiques des erreurs d'estimation des pentes par la RMS pour ces classes sont résumées dans le tableau 11. On observe que l'estimation de la pente est moins bonne en terrain chahuté qu'en terrain plat, sans doute du fait d'une variabilité locale de la pente plus importante.

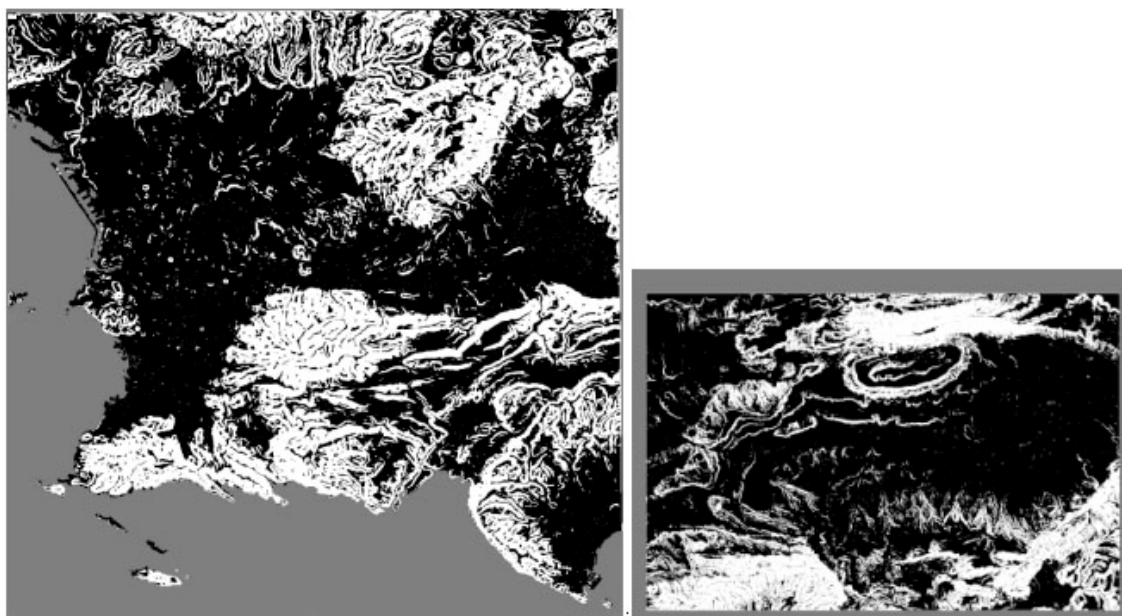


Figure 16 - Image classifiée des pentes estimées sur les MNT SPOT5-HRS et DEM_IGN_846.6_146_10. Blanc : pentes supérieures à 20 %, noir : pentes inférieures à 20 %, gris : mer ou bords.

	Pourcentage	Moyenne des RMS	Ecart-type des RMS
Classe des pentes inférieures à 20 %	63 %	1,42	0,89
Classe des pentes supérieures à 20 %	37 %	2,35	10,77

Tableau 11 - Statistiques des erreurs sur les deux classes considérées de l'image des pentes.

Comparaison quantitative des MNT

Les tableaux 12 et 13 donnent les biais et RMS des écarts d'altitudes entre les MNT utilisés et respectivement le MNT SPOT5-HRS et le MNT DEM_IGN_846.6_146_10. Les écarts sont mesurés sur toute valeur renseignée globalement et en fonction des pentes. Pour cela, les MNT sont ici ré-échantillonnés dans une même géométrie avec une maille de 20 m (choix lié à la taille du pixel radar ERS au sol). Des décalages ont été observés pour certains MNT par rapport au MNT de validation et ont été compensés manuellement :

- 120 m en Y pour le MNT SPOT P+XS (3 pixels de 40 m) ;
- 1 000 m en X et 1 200 m en Y pour SRTM30 (moins de 2 pixels de 700 m) ;
- 40 m en X et 40 m en Y pour SRTM3 (1/2 pixels de 90 m).

On constate sur ces deux tableaux que les écarts mesurés sont globalement concordants avec les spécificités annoncées de ces MNT.

Nom	MNT complet		Pentes < 20%		Pentes > 20%	
	μ	RMS	μ	RMS	μ	RMS
SRTM30	- 3,1	28,6	- 0,1	20,8	- 9,3	39,6
SRTM3	- 1,4	9,7	- 1,1	5,7	- 2,2	14,9
SPOT P+XS	1,2	9,8	1,5	6,9	0,6	13,9
IGN50	- 0,2	8,2	- 0,1	5,8	- 0,4	11,6

Tableau 12 - Précisions altimétriques des MNT de référence par rapport au MNT SPOT5-HRS sur la zone commune aux images radar (niveau de confiance 100 %), calculées dans la projection UTM-31N, hauteurs ellipsoïdales WGS84, avec une maille de 20 m. μ : moyenne empirique des écarts altimétriques et RMS des écarts altimétriques.

Nom	MNT complet		Pentes < 20%		Pentes > 20%	
	μ	RMS	μ	RMS	μ	RMS
SRTM30	- 1,7	25,2	- 0,2	18,0	- 5,2	36,0
SRTM3	- 1,5	5,5	- 1,5	3,7	- 1,4	8,2
SPOT P+XS	- 2,2	9,1	- 2,4	7,5	- 1,9	11,9
IGN50	1,2	4,5	1,5	4,1	0,7	5,1

Tableau 13 - Précisions altimétriques des MNT de référence par rapport au MNT DEM_IGN_846.6_146_10 sur la zone commune avec les images radar (niveau de confiance 100 %), calculées dans la projection UTM-31N, hauteurs ellipsoïdales WGS84, avec une maille de 20 m. μ : moyenne empirique des écarts altimétriques et RMS des écarts altimétriques.

5.1.3. Conclusion sur l'utilisation des MNT et des images radar

Un test global sera réalisé avec un pas d'échantillonnage 1 x 5 des images radar lors des traitements. Les produits seront géocodés avec une maille de 20 m. Le MNT de référence sera : SRTM30, SRTM3, IGN50m ou SPOT5 HRS. Le MNT de validation sera le MNT SPOT5 HRS qui paraît être le plus détaillé. Lorsque le MNT SPOT5 HRS

sera utilisé en référence, l'amélioration de la qualité altimétrique ne pourra être évaluée que qualitativement.

Un test local sera réalisé sur la montagne Sainte-Victoire. Les produits seront géocodés avec une maille de 20m. Le MNT de référence sera : SRTM30, SRTM3, IGN50m ou SPOT5 P+XS. Le MNT de validation sera le MNT DEM_IGN_846.6_146_10.

5.2. CHOIX DES CONFIGURATIONS INTERFÉROMÉTRIQUES

Par rapport à l'analyse de la section 3, les expériences se situent dans le cas d'étude 1. Nous utilisons alors les résultats du paragraphe 3.3.7, cas 1. Nous adaptons dans le tableau 14 plus précisément le tableau 7 et la figure 5 à nos données en choisissant un rapport de l'ordre de 2 entre baseline à l'étape 1 et l'étape 2.

	SRTM30	SRTM3, SPOT P+XS	IGN 50m	SPOT5-HRS
Etape 1	De 60 à 170 m	De 60 à 190 m	De 80 à 250 m	De 290 à 880 m
Etape 2	De 170 m à 340 m	De 190 m à 380 m	De 160 m à 500 m	X

Tableau 14 - Les différents groupes de configurations interférométriques selon le MNT de référence et les objectifs visés (déroulement, amélioration des précisions altimétriques). Les intersections indiquent des valeurs de baseline.

Pour les MNT SRTM30, SRTM3 et IGN50, nous allons réaliser deux étapes de traitement des interférogrammes de base temporelle inférieure à 120 jours. Pour le MNT SPOT-HRS, une seule étape sera réalisée.

5.3. ANALYSE DES MNT INTERFÉROMÉTRIQUES INDIVIDUELS À L'ÉTAPE 1

5.3.1. Observation des interférogrammes différentiels

On s'intéresse à l'analyse des interférogrammes différentiels non déroulés et déroulés après correction des bases en géométrie radar. Nous avons sélectionné trois paires de baseline respectivement de 84 m, 150 m et 167 m.

a) Interférogrammes non déroulés

Sur les figures 17 à 19, on peut observer la forte diminution du nombre de franges avec l'augmentation des précisions planimétriques et altimétriques du MNT de référence. Ainsi, l'utilisation du MNT SRTM30 présente un avantage certain par rapport à l'ellipsoïde seul. L'utilisation des MNT SRTM3, IGN50 ou SPOT-PXS semble presque équivalente. Le MNT SPOT-HRS apporte par contre des informations supplémentaires. Cependant pour ces baselines (inférieures à 290 m), aucune amélioration altimétrique n'est attendue.

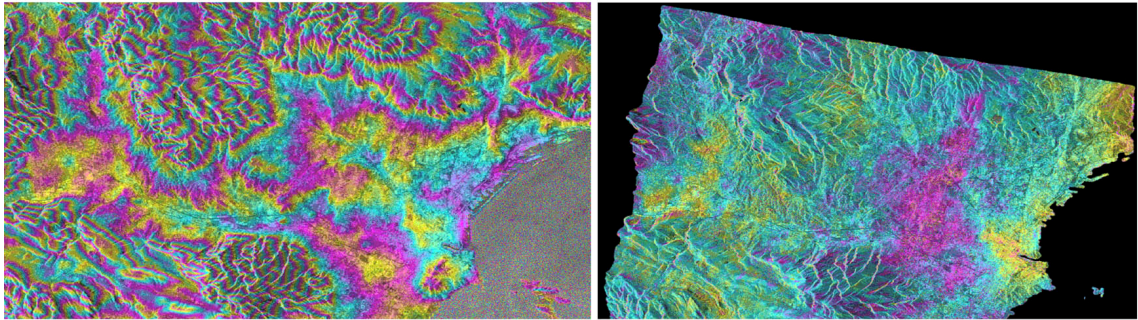


Figure 17 - Interférogrammes différentiels non déroulés avec correction de l'ellipsoïde et avec correction par le MNT SPOT-HRS pour le couple 21963-41636 (baseline de 84 m). Une frange de couleur correspond à une ambiguïté de phase de 2π .

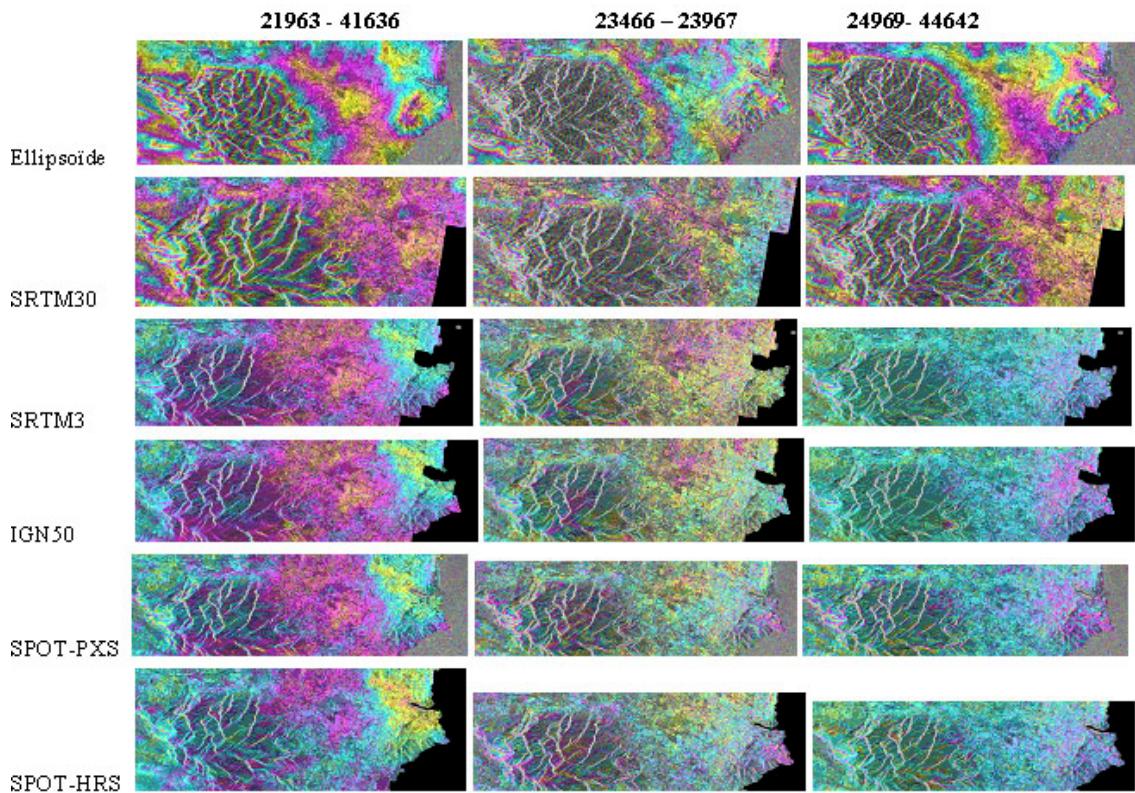


Figure 18 - Interférogrammes différentiels non déroulés sur le mont Carpiagne. Une frange de couleur correspond à une ambiguïté de phase de 2π . Les baselines sont respectivement de gauche à droite de 84, 167 et 150 m.

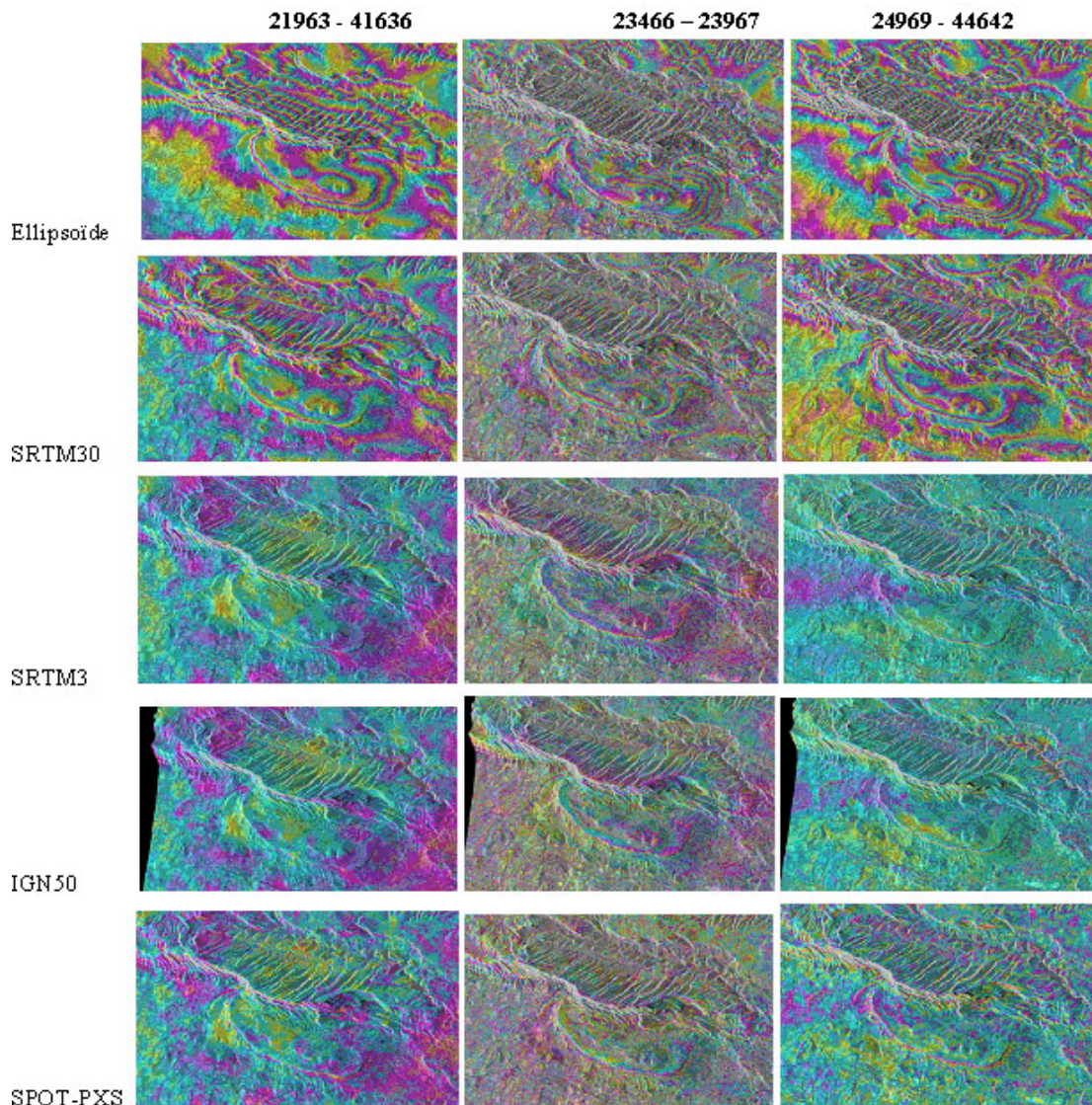


Figure 19 - Interférogrammes différentiels non déroulés sur la montagne Sainte-Victoire.
Une frange de couleur correspond à une ambiguïté de phase de 2π . Les baselines sont respectivement de gauche à droite de 84, 167 et 150 m.

b) Interférogrammes déroulés

D'après les figures 20 à 22, quelques erreurs de déroulement semblent apparaître en particulier pour le couple de baseline de 167 m. Ces figures seront exploitées plus en détail lors d'une analyse des comportements en zone de renversement et d'ombre.

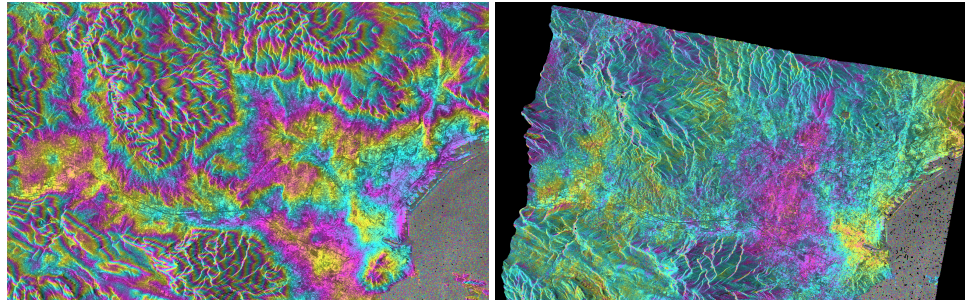


Figure 20 - Interférogrammes différentiels déroulés avec correction de l'ellipsoïde et avec correction par le MNT SPOT-HRS pour le couple 21963-41636 (baseline de 84 m). Une frange de couleur correspond à π .

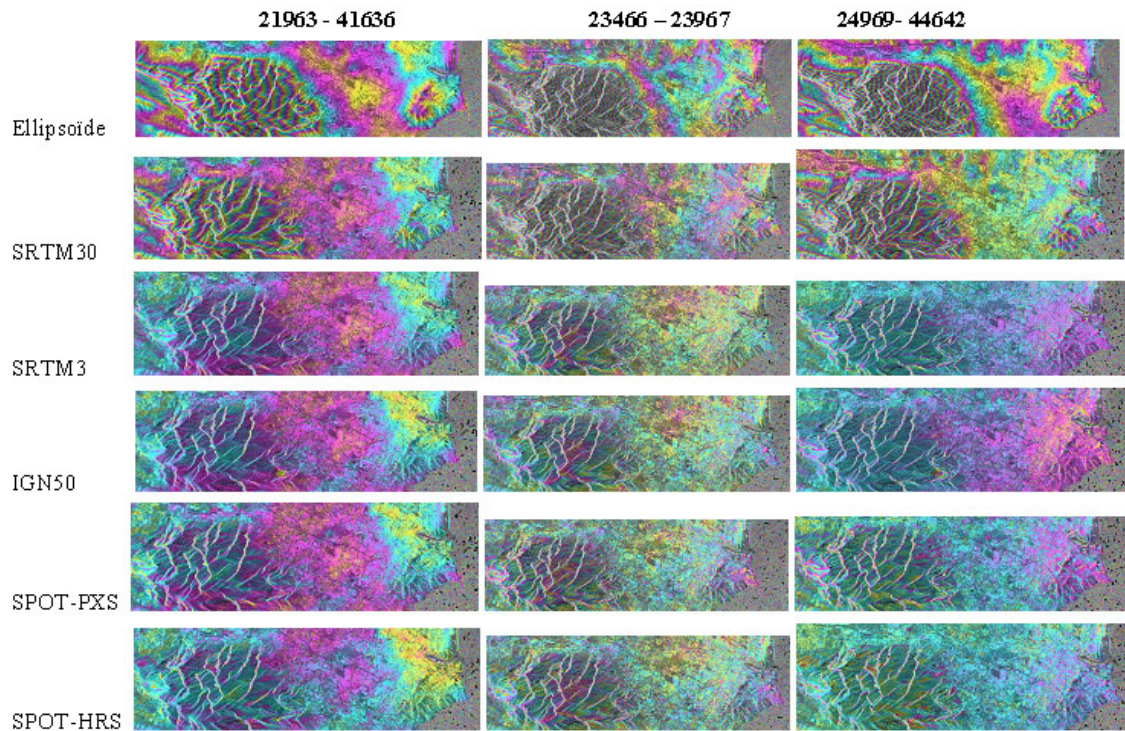


Figure 21 - Interférogrammes différentiels déroulés sur le mont Carpiagne. Une frange de couleur correspond à π . Les baselines sont respectivement de gauche à droite de 84, 167 et 150 m.

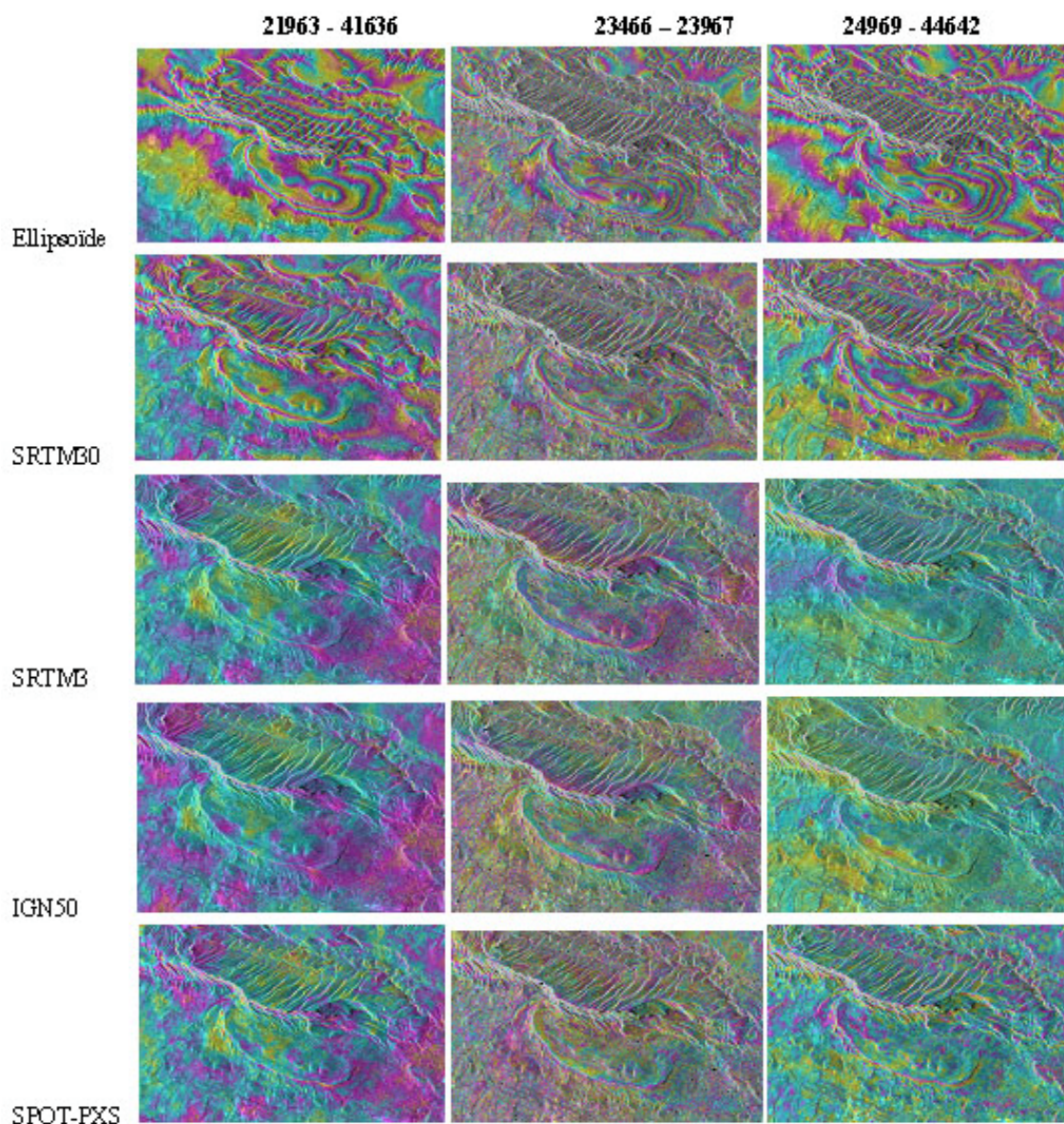


Figure 22 - Interférogrammes différentiels déroulés sur la montagne Sainte-Victoire. Une frange de couleur correspond à π . Les baselines sont respectivement de gauche à droite de 84, 167 et 150 m.

5.3.2. Distribution des écarts altimétriques

La figure 23 suivante montre la distribution des cartes des écarts altimétriques issues des interférogrammes différentiels pour les 3 couples étudiés et les différents MNT, après correction d'une surface d'ordre 1 et d'un biais global.

On constate d'une part que la fonction gaussienne (en pointillés) n'est pas dans tous les cas une très bonne approximation. Un test de Kolmogorov-Smirnov permettrait d'en

quantifier la qualité. D'autre part, on retrouve ce qui a été observé sur les interférogrammes déroulés : les erreurs résiduelles sont moindres avec le MNT SPOT-HRS. Ainsi, les courbes sont légèrement plus étroites avec le MNT HRS que celles obtenues avec les MNT SRTM3, SPOT-PXS ou IGN50, elles-mêmes plus étroites qu'avec le MNT SRTM30. Enfin, les distributions réelles semblent relativement bien centrées autour de la moyenne nulle.

Les écart-types de ces distributions sont compris entre 19 et 33 m avec le couple tandem de baseline 84 m, entre 21 et 25 m pour le couple tandem de baseline 150m et entre 17 et 60 m pour le couple non tandem de baseline 167 m. Avec le MNT SRTM30 et des baseline supérieures à 150 m, il est possible que l'interférogramme apporte une nette amélioration sur les mesures des altitudes ou qu'il survienne beaucoup d'erreurs de déroulement.

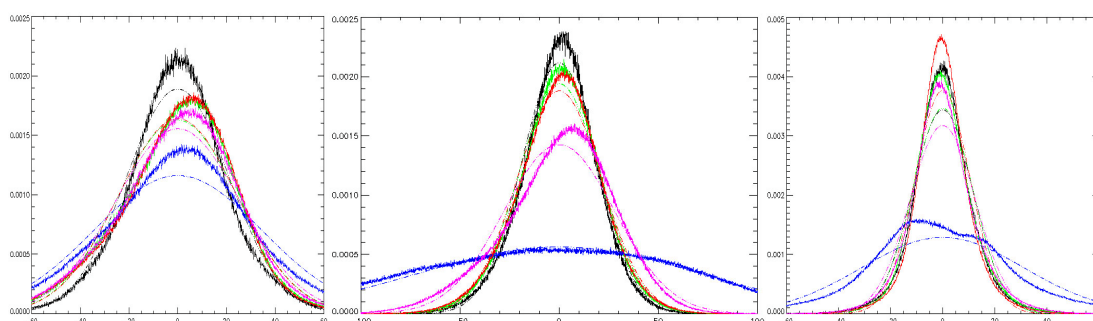


Figure 23 - Distributions des écarts altimétriques obtenus à partir des interférogrammes différentiels : 21963 – 41636, 23466 – 23967 et 24969 – 44642 et différents MNT de référence. Bleu : SRTM30, rouge : SRTM3, vert : IGN50, noir : SPOT5-HRS, rose : SPOT5-P+XS. En trait plein: distribution empirique. En traits pointillés: approximation gaussienne.

5.3.3. Évaluation des MNT

Le tableau 15 présente les précisions altimétriques obtenues pour les MNT individuels par rapport au MNT SPOT5-HRS et le tableau 16 par rapport au MNT DEM_IGN_846.6_146_10. L'évaluation est réalisée dans la géométrie des produits de la chaîne de traitement, c'est-à-dire dans la projection UTM-31N sur l'ellipsoïde WGS84 avec une maille de 20 m.

Globalement, il apparaît que les écarts altimétriques en moyenne sont souvent plus grands lorsque l'on compare les MNT avec le MNT SPOT-HRS qui est le plus étendu des deux MNT de validation. On peut soupçonner une pente, des biais systématiques ou des valeurs aberrantes sur les MNT. Ces défauts auraient alors une influence plus forte sur le calcul des précisions sur une zone plus grande. Les biais mesurés sont souvent détériorés par rapport aux biais initiaux. La méthode de correction des biais devrait donc être améliorée, en se basant par exemple uniquement sur les points de bonne cohérence. En effet, le pourcentage de points de cohérence supérieure à 0,4 diminue rapidement avec la baseline puisque seul 30 % de points satisfont le critère de qualité avec une baseline de 167 m.

		21963 - 41636			23466 - 23967			24969 - 44642		
$B_{\perp}$ (m)		84			167			150		
Statistiques		%	μ	RMS	%	μ	RMS	%	μ	RMS
SRTM30	Global	87	2,5	28,5	30	51,9	58,4	71	12,3	19,0
	Pentes > 20 %	77	0,1	33,6	24	46,7	71,5	51	12,6	28,8
	Pentes < 20 %	92	3,5	25,9	32	53,9	52,3	81	12,3	14,6
SRTM3	Global	89	4,6	27,8	33	5,9	19,4	77	1,3	11,0
	Pentes > 20 %	80	3,6	31,1	31	- 1,0	21,6	60	3,3	16,1
	Pentes < 20 %	93	5,0	26,1	35	9,0	17,5	86	0,6	8,2
IGN50	Global	89	1,6	26,2	34	2,9	18,5	77	- 2,3	10,8
	Pentes > 20 %	80	0,9	29,4	32	- 2,5	20,9	61	0,2	15,3
	Pentes < 20 %	93	1,9	24,6	35	5,4	16,7	86	- 3,2	8,3
SPOT P+XS	Global	88	0,3	24,7	31	- 8,5	17,4	75	0,1	9,9
	Pentes > 20 %	79	- 1,6	25,9	27	- 13,0	20,3	56	1,4	14,1
	Pentes < 20 %	93	1,1	24,1	33	- 6,6	15,7	85	- 0,4	7,8

Tableau 15 - Évaluation des précisions altimétriques des MNT interférométriques, mesurées sur les points de cohérence supérieure à 0,4, par rapport au MNT SPOT5-HRS (niveau de confiance 100 %). % : pourcentage de points contribuant à l'estimation sur la région, μ : moyenne empirique des écarts altimétriques, RMS des écarts altimétriques.

		21963 - 41636			23466 - 23967			24969 - 44642		
$B_{\perp}$ (m)		84			167			150		
Statistiques		%	μ	RMS	%	μ	RMS	%	μ	RMS
SRTM30	Global	84	7,4	26,4	14	- 6,4	55,1	72	5,8	16,2
	Pentes > 20 %	73	6,8	33,5	13	2,1	68,2	49	2,5	24,2
	Pentes < 20 %	88	7,6	23,2	15	- 9,9	48,5	83	6,7	13,1
SRTM3	Global	86	5,7	22,9	16	2,8	18,0	76	4,2	6,5
	Pentes > 20 %	77	7,1	24,8	16	0,1	20,3	57	4,4	7,7
	Pentes < 20 %	90	5,2	22,0	16	4,1	16,7	87	4,1	6,1
IGN50	Global	85	5,1	23,2	16	1,0	16,2	78	3,1	6,7
	Pentes > 20 %	76	4,4	22,8	16	- 1,2	19,0	59	3,5	8,5
	Pentes < 20 %	89	5,4	23,3	16	2,0	14,7	86	2,9	6,0
SPOT P+XS	Global	85	8,0	23,8	14	11,5	27,0	75	4,9	6,4
	Pentes > 20 %	75	7,5	26,6	13	10,4	31,0	52	4,9	8,0
	Pentes < 20 %	89	8,2	22,7	14	12,0	25,1	85	4,9	5,9

Tableau 16 - Évaluation des précisions altimétriques des MNT interférométriques, mesurées sur les points de cohérence supérieure à 0,4, par rapport au MNT DEM_IGN_846.6_146_10 (niveau de confiance 100 %). % : pourcentage de points contribuant à l'estimation sur la région, μ : moyenne empirique des écarts altimétriques, RMS des écarts altimétriques.

Le pourcentage de points participatifs ainsi que les performances en terme de RMS sont plus faibles sur terrain chahuté que sur terrain plat. Les mesures de RMSE sont à comparer avec les précisions mesurées sur le MNT initial pour la même zone (tabl. 12 et 13). On constate que les précisions RMS ne sont améliorées que dans quelques cas avec le MNT SRTM30 si l'on considère le MNT SPOT5-HRS comme MNT de validation (en gras sur le tabl. 15). Si l'on compare maintenant avec le MNT

DEM_IGN_846.6_146_10, le couple de baseline 150 m permet d'améliorer les précisions altimétriques des MNT SRTM30, SPOT P + Xs et SRTM3 sur les pentes (en gras dans le tabl. 16). Le MNT IGN50 étant initialement précis sur cette zone n'est pas amélioré avec ces couples. Ce résultat est encourageant.

5.4. CONCLUSION

Afin de tester la chaîne de traitement proposée, nous avons ici exploité une base de données ERS, quatre MNT de référence et deux MNT de validation. Les données radar et les MNT ont été préparés. Les premiers essais ont concerné l'obtention du MNT de référence enrichi par un seul MNT interférométrique et l'évaluation de ses précisions.

Ces premiers tests montrent qu'avec un seul couple interférométrique, on peut améliorer les précisions verticales en terme de RMS. Les biais mesurés sont par contre généralement détériorés.

Ainsi, il semble que la méthode de correction des biais est insuffisante et demande des améliorations pour continuer le projet : empilement et processus itératif.

6. Conclusion et perspectives

Bilan sur le lot 1

Nous avons défini la problématique et des solutions simples pour répondre au problème posé en s'appuyant sur l'état de l'art. Ceci nous a permis de définir une méthodologie générale, sur le choix des MNT de référence et des configurations interférométriques, qui se base sur des critères géométriques. Une chaîne de traitement a alors été proposée et mise en œuvre.

Objectif attendu du lot 2

Dans la seconde phase du projet, un effort est attendu au niveau de l'empilement et du processus itératif et une analyse du comportement dans les zones d'ombre et de renversement.

Perspectives futures de l'étude

Une prochaine étape sera la combinaison de modes ascendant/descendant ou différentes incidences, d'une part pour compléter les mesures dans les zones d'ombre et de renversement et d'autre part pour améliorer les mesures selon la pente du terrain et le choix des incidences.

L'utilisation d'une carte d'occupation des sols permettrait d'adapter les méthodes de calcul du MNT selon le type de terrain (sols nus, végétation, cultures, zones urbaines, ...).

Des travaux récents concernent l'utilisation d'un modèle multifractal des pentes pour exprimer la dsp de l'interférogramme en fonction des fréquences spatiales en distance et en azimut elles-mêmes modélisées par des pdf liées aux pentes (Monti Guarnieri A., 2002). Les auteurs suggèrent d'utiliser un tel modèle pour améliorer le filtrage des interférogrammes, la correction des baselines ou le déroulement. On peut imaginer utiliser ce modèle pour tenter d'affiner le MNT interférométrique en contraignant localement les surfaces à répondre au modèle topographique des pentes.

7. Bibliographie

Adragna F. (2003) - *Cosmo-Skymed: description simplifiée du système et des performances images*, rapport CNES DSO/OT/OA, 31 octobre 2003.

ASI (2004) - *Cosmo-skymed: the italian earth observation constellation for risk management and security*, présentation au CNES, 13 décembre 2004.

Chen C. (2001) - *Statistical cost network flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry*, PhD thesis, Stanford University.

Crosetto M., Crippa B. (1998) - Optical and radar data fusion for DEM generation, in Proc. IAPRS, 32(Part 4), Stuttgart, p. 128-134.

Crosetto M., Perez Aragues F. (1999) - Radargrammetry and SAR interferometry for DEM generation : validation and data fusion, in Proc. CEOS'99.

Eineder M., Suchandt S. (2003) - Recovering radar shadow to improve interferometric phase unwrapping and DEM reconstruction, *IEEE Trans. on GRS*, 41(12), p. 2959-2962.

Eineder M., Adam N. (2005) - A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model, *IEEE Trans. on GRS*, 43(1), p. 24-36.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. et al. (1997) - Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction, in Proc. ERS Symposium.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (1999) -Multibaseline InSAR DEM reconstruction : the wavelet approach, *IEEE Trans. on GRS*, 37 (2), p. 705-715.

Fiedler H., Krieger G. (2004) - Close formation flight of passive receiving micro-satellites, in Proc. 18th int. Symposium on Space Flight Dynamics, Munich, Germany.

Goldstein R., Werner C. (1998) - Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophysical Research Letters*, 21, p. 4035-4038.

Knöpfle W., Strunz G., Roth A. (1998) - Mosaicking of digital elevation models derived by SAR interferometry, in Proc. IAPRS, 32 (Part 4), Stuttgart, p. 306-313.

Maître H. et al. (2001) - *Traitement des images de RSO*, Edition Hermès Sciences.

Massonnet D., Rabaute T. (1993) - Radar interferometry: limits and potential, *IEEE Trans. on GRS*, 31(2), p. 455-464.

Massonnet D., Vadon H., Rossi M. (1996) - Reduction of the need for phase unwrapping in radar interferometry, *IEEE Trans. on GRS*, 34 (2), p. 489-497.

Massonnet D. (2001) - The interferometric cartwheel: a constellation of passive satellites to produce radar images to be coherently combined, *Int. J. Remote Sensing*, 22 (12), p. 2413-2430.

Moreira A. et al. (2004) - A tandem TerraSAR-X configuration for single-pass interferometry, *Radar 2004*.

Monti Guarnieri A., Rocca F. (1999) - Combination of low- and high-resolution SAR images for differential interferometry, *IEEE Trans. on GRS*, 37 (4), p. 2035-2049.

Monti Guarnieri A. (2002) - SAR interferometry and statistical topography, *IEEE Trans. on GRS*, 40 (12), p. 2567-2581.

Seymour M., Cumming I. (1997) - INSAR terrain height estimation using low-quality sparse DEMs, in *Proc. 3rd ERS Symposium*, Florence.

Seymour M., Cumming I. (2004) - Updating DEMs using RADARSAT-1 data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, p. 927-942.

Synoptics (2004) - TISAR - DEM/ORI production and service for the ERS & ENVISAT ASAR system, *Final Report*, ESRIN Contract Number 15722, V. 6.2.

Tarayre H. (1996) - *Extraction de modèles numériques de terrain par interférométrie radar satellitaire : algorithmie et artefacts atmosphériques*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

Vadon H. (2003) - 3D navigation over merged panchromatic-multispectral high resolution SPOT5 images, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV-5/W10, ISPRS commission V, Tarasp, Switzerland, 24-28 Feb. 2003.

Wegmuller U., Werner C., Strozzi T. et al. (2002) - *Phase unwrapping with Gamma ISP*, Gamma Technical Report, 13 May 2002.

Wong F., Cumming I. (1996) - A combined SAR Doppler Centroid estimation scheme based upon signal phase, *IEEE Trans. on GRS*, 34 (3), p. 696-707.

Zebker H.A., Villasenor J. (1992) - Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Trans. on GRS*, 30 (5), p. 950-959.

Zink M., Krieger G., Amiot T. (2003) - Interferometric performance of a Cartwheel constellation for TerraSAR-L, in *Proc. of FRINGE'03*.

GTOPO30 Documentation (2000) - <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/README.asp>.

SRTM30 Documentation (2004) - <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/SRTM30/>.

Annexe 1

Caractéristiques des principaux capteurs satellite passés, actuels et futurs

Satellite	Lancement- fin de vie	Ban- de	Sens de la visée	Résolution en distance au sol	Pas pixel radar,azrg(m.)	Pas au sol en distance	Inciden- ce	Couverture nominale	Altitude de l'orbite	Polarisation	Répétitivité
JERS1	1992-1998	L	droite	18 m	4.54 x 8.78	13 m	38°	75 km	568 km	HH	44 j
ERS1	1991-2000	C	droite	25 m	7.95 x 7.90	18 m	23°	100 km	785 km	VV	3,35,176 j
ERS2	1995-	C	droite	25 m	7.95 x 7.90	18 m	23°	100 km	785 km	VV	35 j
ENVISAT-ASAR mode IMS ou APS	2002-	C	droite	25 m	3.98 x 7.80	10 à 27 m	15-45°	56-100 km	785 km	VV, HH, HH+VV, HH+HV, VV+VH	35 j
RADARSAT1 Mode Fin	1995-	C	droite	10 m	4.96 x 4.64	5 à 7 m	37-48°	50 km	798 km	HH	24 j
Mode Standard				25 m	4.96 x 11.6	14 à 30 m	20-49°	100 km			
RADARSAT2 Modes Radarsat1	2005	C	droite ou gauche	Idem	Idem	Idem	10-60°	Idem	798 km	HH, VV, HV, VH HH+HV, VV+VH	24 j
Mode Ultra-Fin				3 m	1.56 x 1.56	2 à 3 m	30-40°	20 km		HH, VV, HV, VH	
Mode Stand. QP				25 m			20-41°	25 km		Full pola	
Mode Fin QP				11 m			30-41°	25 km		Full pola	
ALOS, Fine mode	2004-	L	droite	10 m	? x 5.5	7 à 44 m	8-60°	40 à 70 km	692 km	VV, HH	49 j
Dual mode				?	? x 11	14 à 88 m	8-60°	40 à 70 km		HH+HV, VV+VH	
Mode polarimetric				?	? x 11	24 à 89 m	8-30°	20 à 65 km		Full pola	
COSMO-SKYMED Mode Spotlight	2006	X	droite ou gauche	1 m			20-60°	10 km	620 km	HH, VV	16 j (12 h entre satellite ou modes)
Mode Stripmap				3 ou 15 m			20-60°	40 km		single ou dual	
Mode ScanSAR				30ou100 m			20-60°	100ou200 km		HH, VV, HV, VH	
TerraSAR L Mode Stripmap	?	L	droite ou gauche	5 m			20-45°	70 km	630 km	single ou dual	14 j
Mode StripmapQP				9 m			20-36°	40 km		Full pola	
Mode ScanSAR				5 m			20-45°	>200 km		single	
Mode ScanSAR				50 m			20-45°	>200 km		dual	
TerraSAR X Mode stripmap	2006	X	droite ou gauche	3 m			15-60°	30 km	515 km	Full pola	11 j
Mode scansar				16 m				100 km			
Mode spotlight				1.2 m				10 km			

Annexe 2

Données fournies par le CNES

Données altimétriques

Type	Format	Support	Date de réception
MNT SPOT5 P+XS	SLCI	DVD	25/11/2004
MNT HRS		DVD	25/11/2004
MNT IGN extrait		DVD	25/11/2004
MNT SRTM 90m		DVD	25/11/2004
Carte scannée		FTP	07/01/2005
DEM_IGN 50m		DVD	25/11/2004
DEM_IGN 10m		DVD	25/11/2004
DEM_UCL 30m		DVD	25/11/2004

Images radar, Track 65, Frame 2727

Satellite	Date d'acquisition	Orbite	Format	Support	Date de réception
E1	19/03/1999	40133	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	03/07/1999	21963	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	25/12/1999	24468	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	13/05/2000	26472	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	26/08/2000	27975	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	07/08/1999	22464	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	29/01/2000	24969	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	22/07/2000	27474	SLCI	DVD	23/12/2004
E2	04/11/2000	28977	SLCI	DVD	23/12/2004
E1	02/07/1999	41636	RAW	CDRom	23/12/2004



Centre scientifique et technique
Service Aménagement et risques naturels
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34