

# Développement d'outils et de méthodes de télédétection spatiale optique et radar nécessaires à la haute résolution spatiale

Lionel BOMBRUN

Directeurs de thèse : Michel Gay et Jérôme Mars  
GIPSA-lab

Département des Images et des Signaux



18 novembre 2008

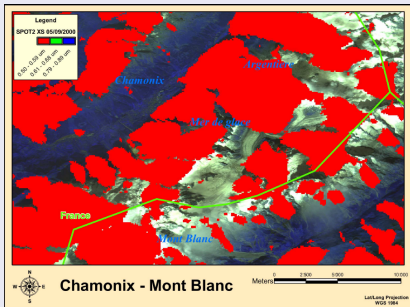
## Contexte de la thèse

- **Développement de méthodes** de traitement des images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) dans le contexte de la **haute résolution spatiale** :
  - L'interférométrie RSO.
  - La polarimétrie radar.

## Estimation de déplacement

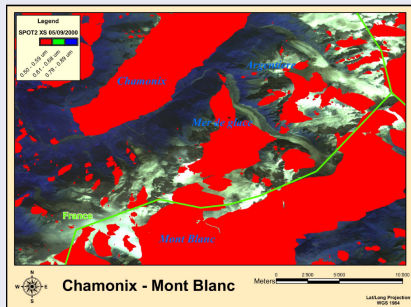
- Nombreux résultats sur les calottes glaciaires.
- Application sur les **glaciers tempérés** (alpins) :
  - Travaux préparatoires aux données à **haute résolution spatiale**.
  - Contexte de **fort relief**.

## Visibilité des glaciers par les satellites ERS-1/2



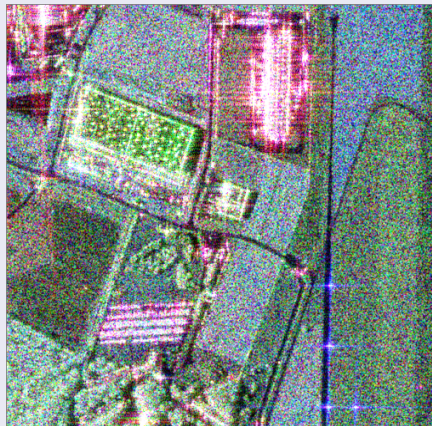
Passé ascendante

- **Estimation de déplacement** par interférométrie RSO.
- Contexte de **fort relief** et de **forte pente**.
- Étude de la **faisabilité de l'interférométrie RSO**.

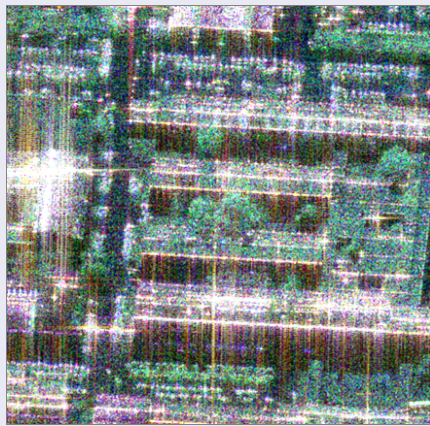


Passé descendante

## La haute résolution spatiale dans les images polarimétriques



Résolution : 1.5m  $\times$  1.5m  
RAMSES, bande X  
Brétigny, France



Résolution : 57cm  $\times$  57cm  
RAMSES, bande X  
Toulouse, France



# Sommaire

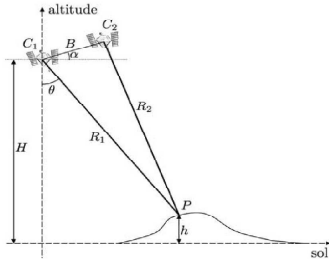
## 1 L'interférométrie RSO

- Les principes de l'interférométrie RSO
- Analyse de la cohérence interférométrique
- Résultats sur une série d'interférogrammes ERS-1/2
- Évaluation des performances

## 2 La segmentation hiérarchique d'images polarimétriques basée sur la texture

## 3 Conclusions et Perspectives

## L'interférométrie RSO



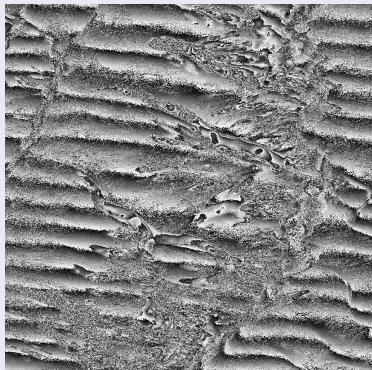
$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= \Phi_1 - \Phi_2 \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R\end{aligned}$$

Les informations contenues dans la phase interférométrique proviennent de plusieurs contributions :

$$\Delta\Phi = \Phi^{orb} + \Phi^{topo} + \Phi^{depl} + \Phi^{atm} + \Phi^{bruit}$$

## L'interférométrie RSO

$$\Delta\Phi = \Phi^{orb} + \Phi^{topo} + \Phi^{depl} + \Phi^{atm} + \Phi^{bruit}$$



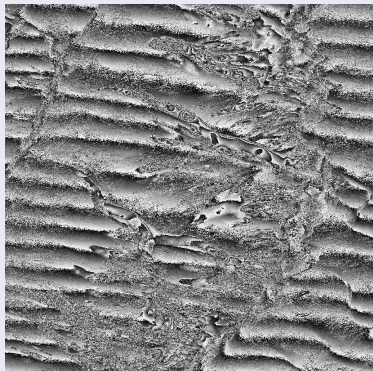
Avant traitements

 $\Phi^{depl}$

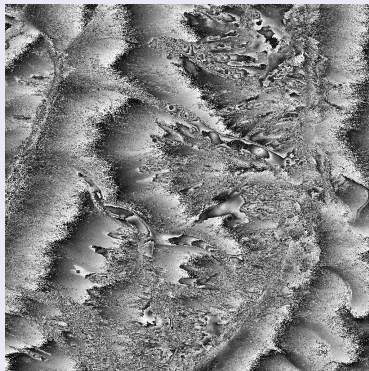
## L'interférométrie RSO

$$\Delta\Phi = \Phi^{orb} + \Phi^{topo} + \Phi^{depl} + \Phi^{atm} + \Phi^{bruit}$$

- Compensation des franges orbitales.



Avant

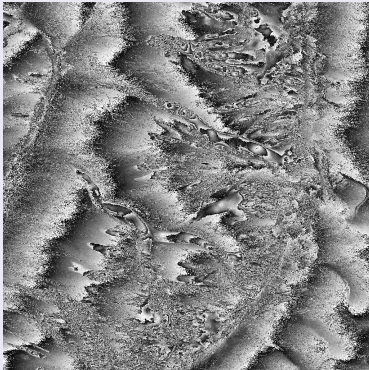


Après

## L'interférométrie RSO

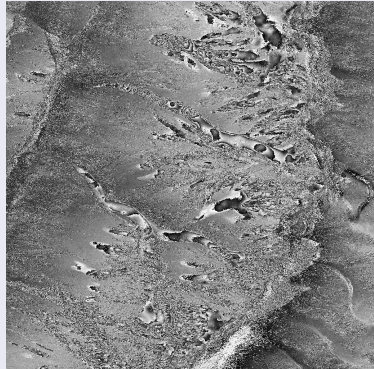
$$\Delta\Phi = \Phi^{topo} + \Phi^{depl} + \Phi^{atm} + \Phi^{bruit}$$

- Utilisation d'un **Modèle Numérique de Terrain (MNT)**.



Avant compensation

Altitude d'ambiguïté : 960m



Après compensation  
des franges topographiques

## L'interférométrie RSO

$$\Delta\Phi = \Phi^{depl} + \Phi^{atm} + \Phi^{bruit}$$

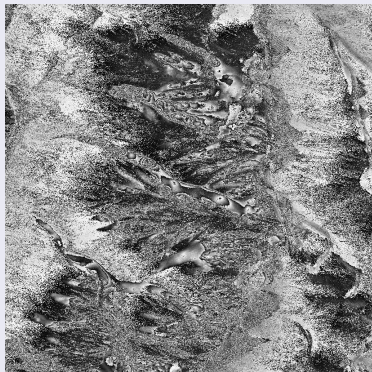
- La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dépend principalement de la **température** et de la **pression de vapeur d'eau**.
- **Changements atmosphériques locaux.**
- La faible pression de vapeur d'eau saturante autour de 0°C sur les glaciers rend **négligeable** a priori les **variations de vitesse** à l'échelle du glacier à 1 jour d'intervalle [1].

[1] E. Trouvé, G. Vasile, M. Gay, L. Bombrun, P. Grussenmeyer, T. Landes, J.-M. Nicolas, Ph. Bolon, I. Pétilot, A. Julea, L. Valet, J. Chanussot et M. Koehl, Combining Airborne Photographs and Spaceborne SAR Data to Monitor Temperate Glaciers. Potentials and Limits, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 6, pp. 905-924, Avril 2007

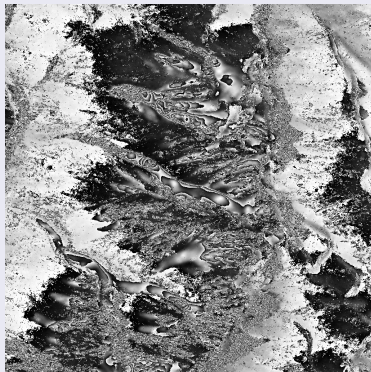
## L'interférométrie RSO

$$\Delta\Phi = \Phi^{depl} + \Phi^{bruit}$$

- Réduction du bruit par **filtrage** adaptatif.



Avant



Après

$$\Rightarrow \Delta\Phi \approx \Phi^{depl}$$

## Calcul d'un interférogramme

Soient  $u_1$  et  $u_2$  deux images acquises par le radar, la **cohérence interférométrique**  $\rho$  et la **phase interférométrique**  $\phi$  sont définies par :

$$\rho e^{j\phi} = \frac{E\{u_1 u_2^*\}}{\sqrt{E\{|u_1|^2\} E\{|u_2|^2\}}}$$



## Présentation des données

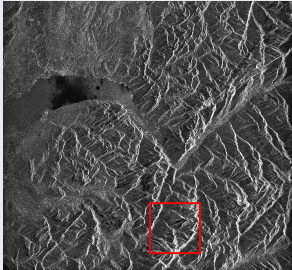
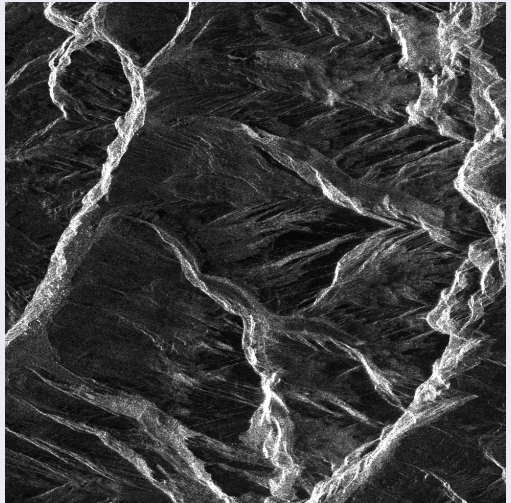


Image d'amplitude  
 $100\text{km} \times 100\text{km}$



$1024 \times 1024$  pixels  
 $20\text{km} \times 20\text{km}$

## Présentation des données

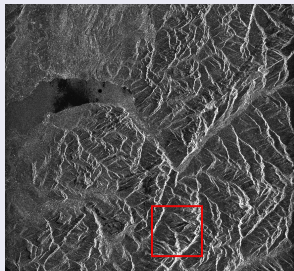
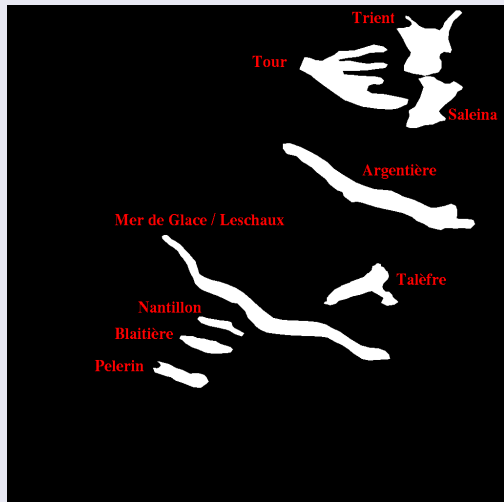
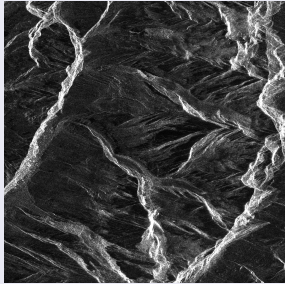


Image d'amplitude  
100km × 100km



1024 × 1024 pixels  
20km × 20km

## Analyse de la cohérence interférométrique

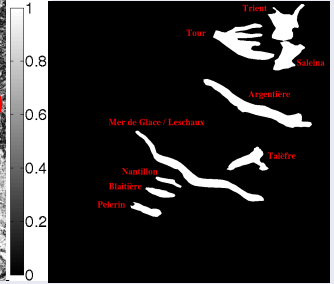


amplitude



9 et 10 Juillet 1995

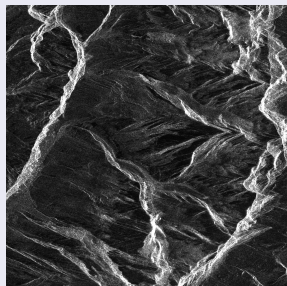
$$B_{\perp} = -29\text{m}$$



masque des glaciers

⇒ **Chute de la cohérence** sur les glaciers en été à cause du changement d'état de surface.

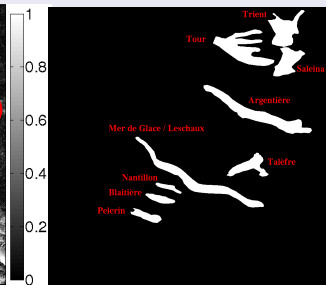
## Analyse de la cohérence interférométrique



amplitude



31 Décembre 1995 et  
1 Janvier 1996  
 $B_{\perp} = 208\text{m}$



masque des glaciers

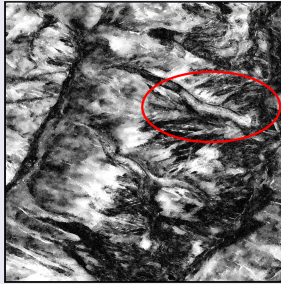
⇒ **Perte de cohérence** due à une baseline perpendiculaire  $B_{\perp}$  élevée ( $B_{\perp} = 208\text{m}$ ).

## Analyse de la cohérence interférométrique



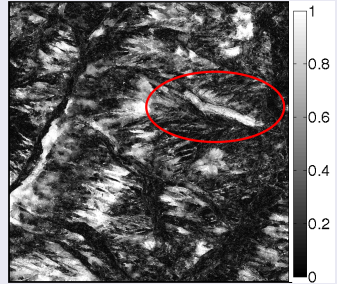
22 et 23 Octobre 1995

$$B_{\perp} = -107\text{m}$$



10 et 11 Mars 1996

$$B_{\perp} = 9\text{m}$$

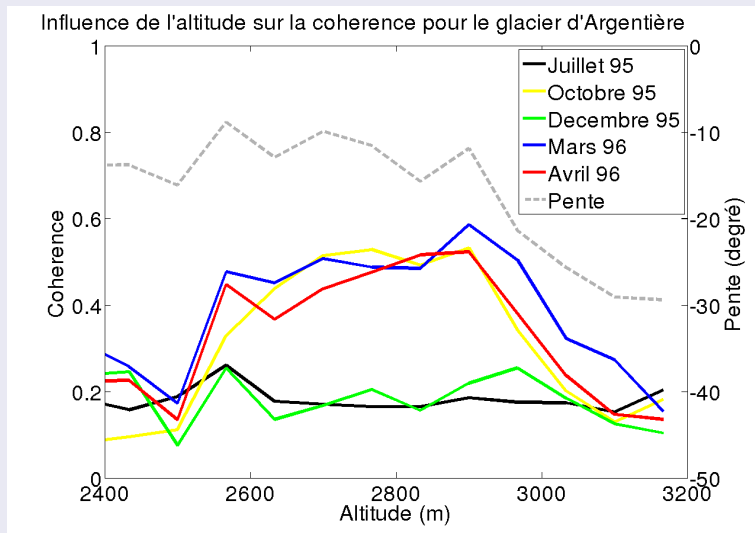


14 et 15 Avril 1996

$$B_{\perp} = 93\text{m}$$

⇒ **Cohérence préservée** sur les glaciers.

## Analyse de la cohérence interférométrique [1]



[1] L. Bombrun *et al.*, Multi-date ERS Tandem Interferogram Analysis: Application to Alpine Glaciers, *Fourth International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Image*, MULTITEMP, Leuven, Belgium, Juillet 2007

## Calage de l'offset de la phase interférométrique [1]

La phase interférométrique déroulée est connue à un offset près.

Différentes méthodes sont envisageables pour fixer cet offset :

- **Combinaison des passes ascendante et descendante.**
- Connaissance d'une zone de **vitesse nulle**.
- Connaissance d'une **mesure de déplacement ponctuelle *in situ*** (balise, mesure GPS, corrélation d'images, ...).

[1] L. Bombrun *et al.*, Three Dimensional Surface Velocities of Argentière and Mer de Glace Glaciers, France, Derived from Radar Interferometry : Analysis and Comparison with *in-situ* Measurements, *EGU*, Vienne, Autriche, 2007.

## Projection du déplacement en ligne de visée du satellite au sol

La phase interférométrique déroulée est reliée au **déplacement au sol projeté dans la ligne de visée du satellite** ( $d_{LOS}$ ) par :

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS}$$

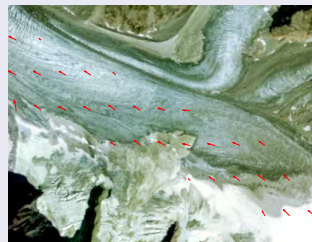
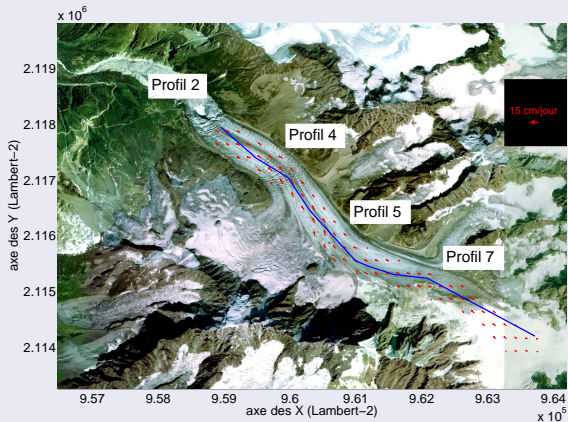
## Hypothèses sur l'écoulement du glacier

- Un **écoulement** selon la **ligne de plus grande pente**.
- **Pas d'ablation** durant le temps  $\Delta T$  (1 jour) qui sépare les deux acquisitions d'images radar.

Glacier	Altitude	Nombre de balises	Erreur moyenne sur la direction de l'écoulement	Déplacement vertical	Ablation
Argentière	2700m	11	8.9°	-5.0m	-0.9m

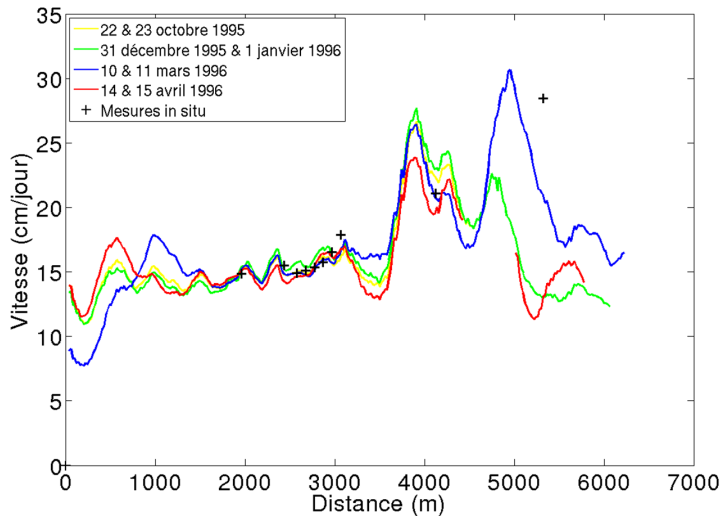


# Résultats sur les images ERS-1/2



Premier champ de déplacement obtenu par interférométrie différentielle sur le glacier d'Argentière dans les Alpes françaises

## Résultats sur les images ERS-1/2

Partie haute  
du glacierPartie basse  
du glacier

## Incertitudes liées aux données et aux traitements

La phase interférométrique mesurée est affectée par :

- **Le bruit de speckle.** Chacun des pixels de l'interférogramme est affecté par une variable aléatoire  $\phi$ .

$$\sigma_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{2M}} \frac{\sqrt{1 - \gamma^2}}{\gamma}$$

où  $\gamma$  est la cohérence du pixel considéré et  $M$  est le nombre de moyennages indépendants effectués pour estimer la phase  $\hat{\phi}$ .

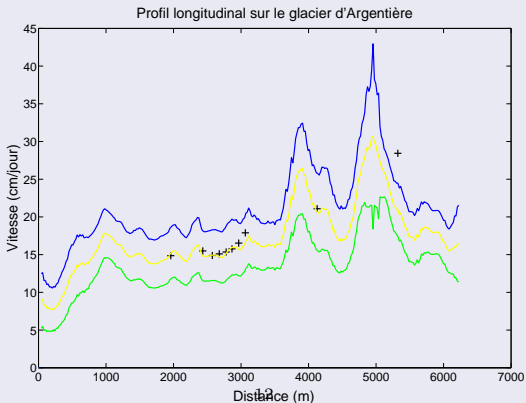
- **La présence de franges résiduelles** qui ne sont pas dues au déplacement [1].
- **Les incertitudes provenant de l'étape de déroulement de phase et du calage de l'offset.**

[1] L. Bombrun *et al.*, DEM Error Retrieval by an Analysis of the Wrapped Phase Difference Between Differential Interferograms, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, en révision, 2008

## Incertitudes liées aux données et aux traitements

Pour caractériser ces incertitudes, nous avons ajouté sur la phase interférométrique :

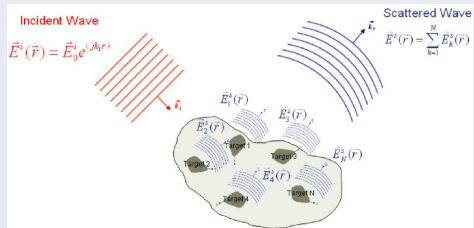
- $\pm\sigma_\phi$  avec un nombre de vue équivalent  $M$  qui vaut environ 25 dans notre cas après filtrage.
- $\pm\frac{\pi}{2}$  (incertitude liée au développement de la phase).



# Sommaire

- 1 L'interférométrie RSO
- 2 La segmentation hiérarchique d'images polarimétriques basée sur la texture
  - Principe de la polarimétrie
  - Distribution de la matrice de covariance
  - Modélisation de la texture
  - Principe de la segmentation hiérarchique
  - Résultats de la segmentation
- 3 Conclusions et Perspectives

# Principe de la polarimétrie



Émission : H et V  
Réception : H et V

$$\vec{E}_s = \frac{e^{jkr}}{r} \mathbf{S} \vec{E}_i$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

- Hypothèse de réciprocité :  $S_{HV} = S_{VH}$ .

## Cible pure

- Vecteur de rétrodiffusion  $\mathbf{k}$ .

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix}$$

## Cibles distribuées

- Matrice de cohérence  $\mathbf{T}$ .

$$\mathbf{T} = E\{\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}^\dagger\}$$

## La haute résolution spatiale dans les images polarimétrique radar

### Objectifs :

- **Faible nombre de rétrodiffuseurs** présents dans chaque cellule de rétrodiffusion.
- **Fouillis non Gaussien.**
- Prise en compte de la **texture.**

### Cas classique : fouillis Gaussien

La matrice de covariance L-vues,  $\mathbf{Z}_h = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \mathbf{x}_{hk} \mathbf{x}_{hk}^\dagger$ , suit une distribution de Wishart :

$$p_{\mathbf{Z}_h}(\mathbf{Z}_h | \Sigma_h) = \frac{L^{Lp} |\mathbf{Z}_h|^{L-p} \exp \left\{ -L \operatorname{tr} (\Sigma_h^{-1} \mathbf{Z}_h) \right\}}{\pi^{\frac{p(p-1)}{2}} \Gamma(L) \cdots \Gamma(L-p+1) |\Sigma_h|^L}$$

## Le modèle multiplicatif scalaire

Pour des zones texturées :

$$\mathbf{Z} = \mu \mathbf{Z}_h$$

- $\mu$  est indépendant du canal de polarisation.

## Distribution de $\mathbf{Z}$ pour une zone texturée

Distribution de la matrice de covariance  $\mathbf{Z}$  :

$$p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{Z}|\Sigma_h, \alpha) = \int_0^{\infty} p_{\mathbf{Z}_h}(\mathbf{Z}|\mu\Sigma_h) p_{\mu}(\mu|\alpha) d\mu$$

où  $\alpha$  représente l'ensemble des paramètres de la distribution de la texture.

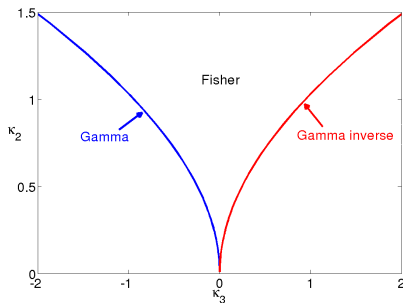


## Loi de texture

La distribution de Fisher, loi à trois paramètres définie par :

$$p_{\mu}(\mu|m, \mathcal{L}, \mathcal{M}) = \frac{\Gamma(\mathcal{L} + \mathcal{M})}{\Gamma(\mathcal{L})\Gamma(\mathcal{M})} \frac{\mathcal{L}}{\mathcal{M}m} \frac{\left(\frac{\mathcal{L}\mu}{\mathcal{M}m}\right)^{\mathcal{L}-1}}{\left(1 + \frac{\mathcal{L}\mu}{\mathcal{M}m}\right)^{\mathcal{L}+\mathcal{M}}}$$

$$\mathcal{F}[m, \mathcal{L}, \mathcal{M}] = \mathcal{G}[m, \mathcal{L}] \hat{\star} \mathcal{GI}[1, \mathcal{M}]$$



Les cumulants de deuxième espèce (log-cumulants)

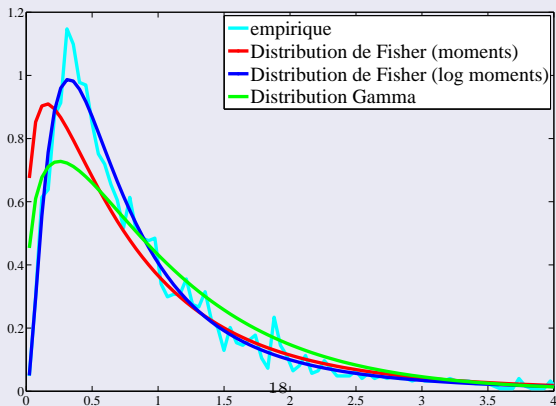
$$\kappa_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(x_i)]$$

$$\kappa_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(x_i) - \kappa_1]^2$$

$$\kappa_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(x_i) - \kappa_1]^3$$

## Modélisation du fouillis en milieu urbain

- Extraction d'une zone urbaine ( $50 \times 50$  pixels) de l'image polarimétrique E-SAR en bande L sur le site test d'Oberpfaffenhofen (Allemagne).
- Résolution :  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$
- Modélisation de la texture par des distributions Gamma et Fisher.



## Distribution de KummerU

$$p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{Z}|\Sigma_h, \mathcal{L}, \mathcal{M}, m) = \int_0^{\infty} p_{\mathbf{Z}_h}(\mathbf{Z}|\mu\Sigma_h) p_{\mu}(\mu|\mathcal{L}, \mathcal{M}, m) d\mu$$

$$p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{Z}|\Sigma_h, \mathcal{L}, \mathcal{M}, m) = \frac{L^{Lp} |\mathbf{Z}|^{L-p}}{\pi^{\frac{p(p-1)}{2}} \Gamma(L) \cdots \Gamma(L-p+1) |\Sigma_h|^L} \\ \times \frac{\Gamma(\mathcal{L} + \mathcal{M})}{\Gamma(\mathcal{L})\Gamma(\mathcal{M})} \left( \frac{\mathcal{L}}{\mathcal{M}m} \right)^{Lp} \Gamma(Lp + \mathcal{M}) U(a, b, z)$$

avec  $z = \frac{L \operatorname{tr}(\Sigma_h^{-1} \mathbf{Z}) \mathcal{L}}{\mathcal{M}m}$ ,  $a = Lp + \mathcal{M}$  et  $b = 1 + Lp - \mathcal{L}$ .

où  $U(\cdot, \cdot, \cdot)$  est la fonction de confluyente hypergéométrique de seconde espèce (KummerU).

- Pour une texture distribuée selon une loi de Fisher, la matrice de covariance suit **une distribution de KummerU** [1].

[1] L. Bombrun et J.-M. Beaulieu, Fisher Distribution for Texture Modeling of Polarimetric SAR Data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, no. 3, Juillet 2008.

## Cas particulier de la distribution de KummerU

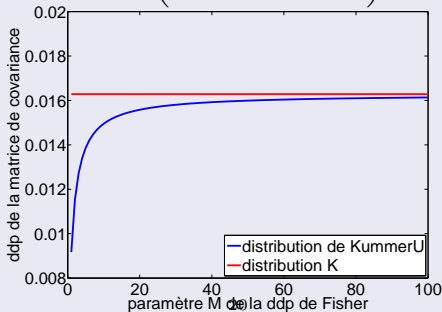
- Si  $\mathcal{M}$  tend vers l'infini, la loi de Fisher tend vers une distribution Gamma.

$$p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{Z}|\Sigma_h, \alpha) = \int_0^{\infty} p_{\mathbf{Z}_h}(\mathbf{Z}|\mu\Sigma_h) p_{\mu}(\mu|\alpha) d\mu$$

Distribution  $\mathcal{K}$  :

$$p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{Z}|\Sigma_h, \mathcal{L}) = \frac{L^{Lp} |\mathbf{Z}|^{L-p}}{\pi^{\frac{p(p-1)}{2}} \Gamma(L) \cdots \Gamma(L-p+1) |\Sigma_h|^L} \frac{2\mathcal{L}^{\mathcal{L}}}{\Gamma(\mathcal{L})} \left[ \frac{L \operatorname{tr}(\Sigma_h^{-1} \mathbf{Z})}{\mathcal{L}} \right]^{\frac{\mathcal{L}-Lp}{2}}$$

$$\times \operatorname{BesselK}_{\mathcal{L}-Lp} \left( 2\sqrt{L\mathcal{L} \operatorname{tr}(\Sigma_h^{-1} \mathbf{Z})} \right)$$



## Le principe de la segmentation hiérarchique

- 1 Définition d'une partition initiale
- 2 Calcul du critère (SC) pour chaque paire de segments 4-connexes.
- 3 Fusion des 2 segments 4-connexes qui minimisent ce critère.
- 4 Itération des étapes 2 et 3 jusqu' à obtention du nombre désiré de segments dans la partition.

## Stepwise Criterion (SC)

$$SC_{i,j} = MLL(S_i) + MLL(S_j) - MLL(S_i \cup S_j)$$

où  $MLL(S)$  est log-vraisemblance maximale du segment  $S$ .

## Calcul du critère pour la distribution de KummerU

$$\begin{aligned}
\text{MLL}(S) &\approx -nL \ln |\hat{\Sigma}_h| + n \ln \left\{ \Gamma(\hat{\mathcal{L}} + \hat{\mathcal{M}}) \right\} \\
&-n \ln \left\{ \Gamma(\hat{\mathcal{L}}) \right\} - n \ln \left\{ \Gamma(\hat{\mathcal{M}}) \right\} + nLp \ln \left( \frac{\hat{\mathcal{L}}}{\hat{\mathcal{M}}\hat{m}} \right) \\
&+ n \ln \left\{ \Gamma(Lp + \hat{\mathcal{M}}) \right\} \\
&+ \sum_{\mathbf{z}_k \in S} \ln \left\{ \text{U} \left( Lp + \hat{\mathcal{M}}; 1 + Lp - \hat{\mathcal{L}}; \frac{L \text{tr} \left( \hat{\Sigma}_h^{-1} \mathbf{z}_k \right) \hat{\mathcal{L}}}{\hat{\mathcal{M}}\hat{m}} \right) \right\}
\end{aligned}$$

## Courbes Caractéristique Opérationnelle de Réception (COR)

**Idée :** Pour chaque nouvelle partition, on calcule un terme de détection et un terme de fausse alarme [1].

- probabilité de détection
- probabilité de fausse alarme

$$p_d(k) = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N \frac{|S_x \cap T_x|}{|T_x|}$$

$$p_{fa}(k) = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N \frac{|S_x \cap C_x|}{|C_x|}$$

$S_x$  : L'ensemble des pixels qui appartiennent au même segment que  $x$ .

$T_x$  : L'ensemble des pixels qui appartiennent au même segment de vérité terrain que  $x$ .

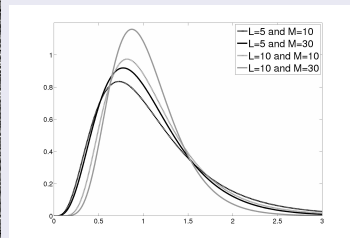
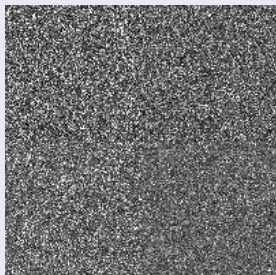
$C_x$  : Le complémentaire de  $T_x$ .

$|T|$  : Le cardinal de l'ensemble  $T$ .

[1] L. Bombrun et J.-M. Beaulieu, Fisher Distribution for Texture Modeling of Polarimetric SAR Data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, no. 3, Juillet 2008.

Segmentation d'une image synthétique ( $200 \times 200$  pixels)

texture 1 $\mathcal{L}=5$ $\mathcal{M}=10$ $m=1$	texture 2 $\mathcal{L}=5$ $\mathcal{M}=30$ $m=1$
texture 3 $\mathcal{L}=10$ $\mathcal{M}=10$ $m=1$	texture 4 $\mathcal{L}=10$ $\mathcal{M}=30$ $m=1$



## Distance de Kolmogorov pour les 4 textures.

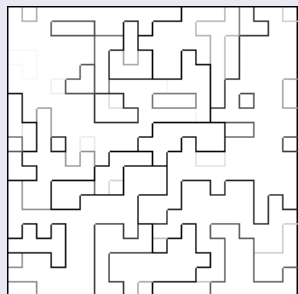
$$d_K = \sup_x |F_1(x) - F_2(x)|$$

textures	1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4
$d_K$	0.049	0.074	0.102	0.063	0.092	0.072

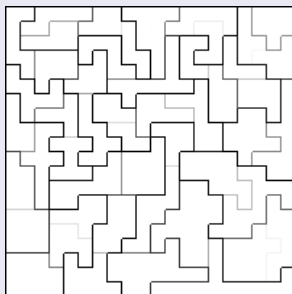


## Résultat de segmentation de l'image synthétique

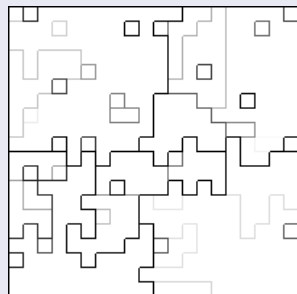
- Partition initiale : chaque segment est composé de  $10 \times 10$  pixels.
- Partitions contenant 50 à 4 segments.



Wishart

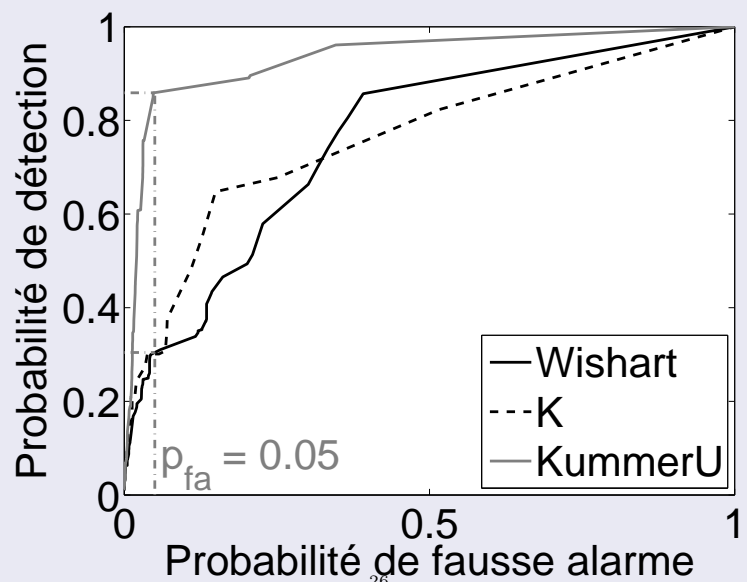


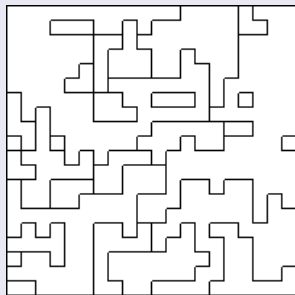
$\mathcal{K}$



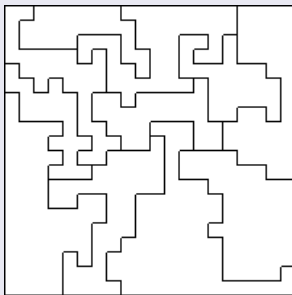
KummerU

# Courbes Caractéristique Opérationnelle de Réception (COR)

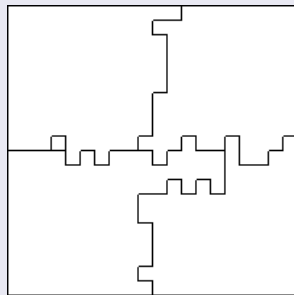


Résultats de segmentation pour  $p_{fa} = 0.05$  [1]

Wishart  
(29 segments)  
 $p_d = 0.3$



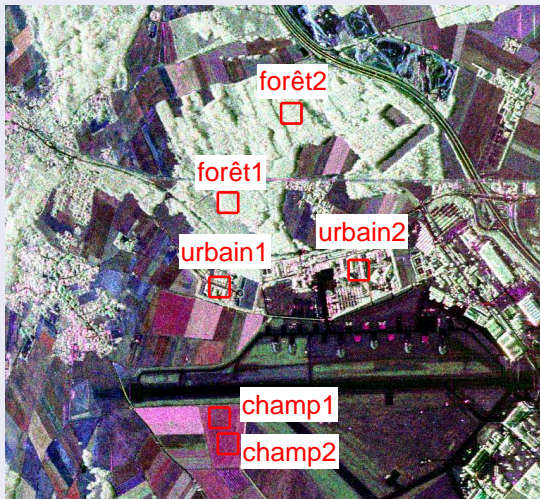
$\mathcal{K}$   
(11 segments)  
 $p_d = 0.3$



KummerU  
(5 segments)  
 $p_d = 0.85$

[1] L. Bombrun et J.-M. Beaulieu, Segmentation of Polarimetric SAR Data Based on the Fisher Distribution for Texture Modeling, *Geoscience and Remote Sensing*, IGARSS '08, Boston, États-Unis, Juillet 2008.

## Résultat de segmentation sur l'image E-SAR en bande L



6 zones ( $30 \times 30$  pixels) :

- 2 zones urbaines
- 2 zones de forêt
- 2 zones de champ

## Comparaison des critères de Wishart, $\mathcal{K}$ et KummerU pour les six zones choisies

	Urbain 1	Urbain 2	Forêt 1	Forêt 2	Champ1
<b>Distribution de Wishart</b>					
Urbain 2	10290				
Forêt 1	6850	7178			
Forêt 2	6826	7238	201		
Champ 1	36116	47936	28600	28235	
Champ 2	36665	48201	29274	28812	116
<b>Distribution <math>\mathcal{K}</math></b>					
Urbain 2	340				
Forêt 1	645	1221			
Forêt 2	609	975	199		
Champ 1	5159	5422	8172	7507	
Champ 2	6286	6351	9547	8696	100
<b>Distribution de KummerU</b>					
Urbain 2	68				
Forêt 1	471	1499			
Forêt 2	436	1244	200		
Champ 1	4239	4723	8147	7486	
Champ 2	8788	5667	9521	8672	100

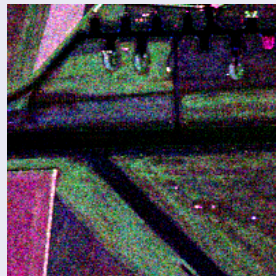
## Comparaison des critères de Wishart, $\mathcal{K}$ et KummerU pour les six zones choisies

	Urbain 1	Urbain 2	Forêt 1	Forêt 2	Champ1
<b>Distribution de Wishart</b>					
Urbain 2	10290				
Forêt 1	6850	7178			
Forêt 2	6826	7238	201		
Champ 1	36116	47936	28600	28235	
Champ 2	36665	48201	29274	28812	116
<b>Distribution <math>\mathcal{K}</math></b>					
Urbain 2	340				
Forêt 1	645	1221			
Forêt 2	609	975	199		
Champ 1	5159	5422	8172	7507	
Champ 2	6286	6351	9547	8696	100
<b>Distribution de KummerU</b>					
Urbain 2	68				
Forêt 1	471	1499			
Forêt 2	436	1244	200		
Champ 1	4239	4723	8147	7486	
Champ 2	8788	5667	9521	8672	100

## Comparaison des critères de Wishart, $\mathcal{K}$ et KummerU pour les six zones choisies

	Urbain 1	Urbain 2	Forêt 1	Forêt 2	Champ1
<b>Distribution de Wishart</b>					
Urbain 2	10290				
Forêt 1	6850	7178			
Forêt 2	6826	7238	201		
Champ 1	36116	47936	28600	28235	
Champ 2	36665	48201	29274	28812	116
<b>Distribution <math>\mathcal{K}</math></b>					
Urbain 2	340				
Forêt 1	645	1221			
Forêt 2	609	975	199		
Champ 1	5159	5422	8172	7507	
Champ 2	6286	6351	9547	8696	100
<b>Distribution de KummerU</b>					
Urbain 2	68				
Forêt 1	471	1499			
Forêt 2	436	1244	200		
Champ 1	4239	4723	8147	7486	
Champ 2	8788	5667	9521	8672	100

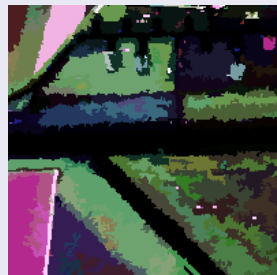
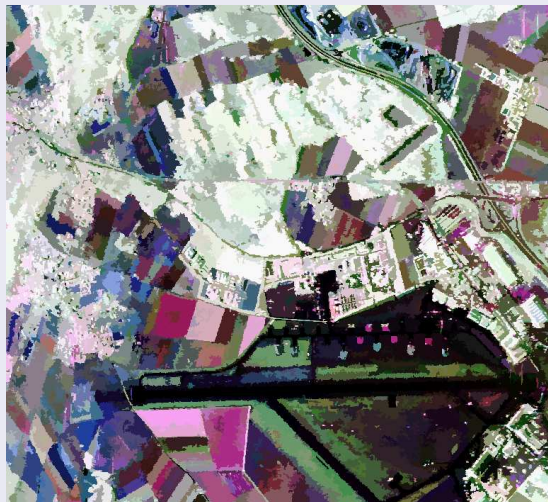
## Résultat de segmentation sur le site test d'Oberpfaffenhofen



$T_{11}$   $T_{33}$   $T_{22}$

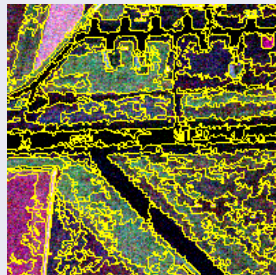
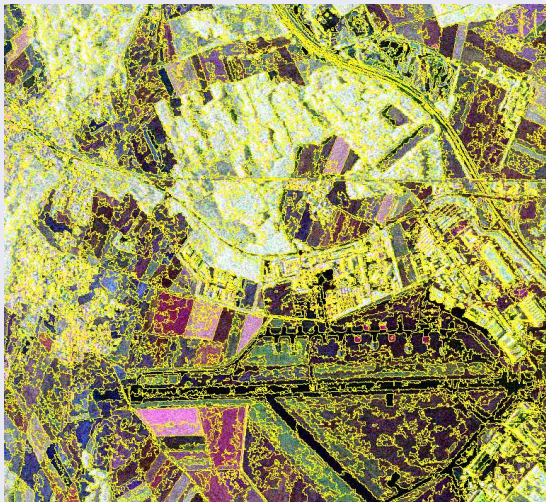


## Résultat de segmentation sur le site test d'Oberpfaffenhofen



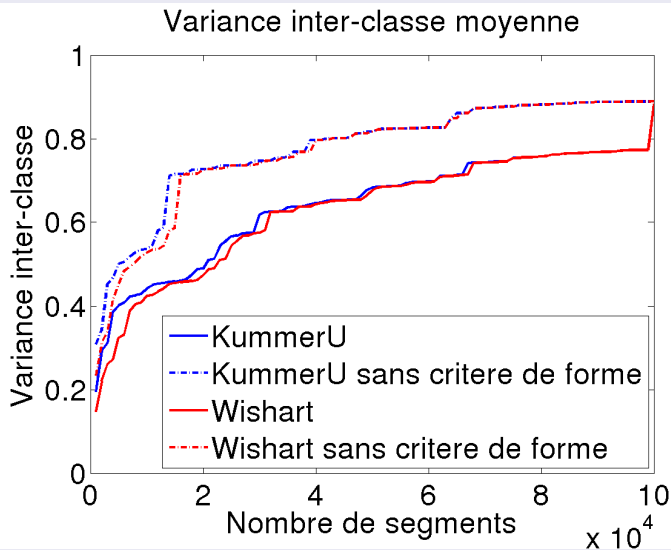
5000 segments, critère de KummerU

## Résultat de segmentation sur le site test d'Oberpfaffenhofen



5000 segments, critère de KummerU

## Résultat de segmentation sur le site test d'Oberpfaffenhofen



# Sommaire

- 1 L'interférométrie RSO
- 2 La segmentation hiérarchique d'images polarimétriques basée sur la texture
- 3 Conclusions et Perspectives

## Partie Interférométrie

- Étude du **potentiel** et des **limites** de l'interférométrie différentielle satellitaire dans le contexte des **forts reliefs**.
- **Analyse de la cohérence** sur une série multi-temporelle d'interférogrammes.
- **Validation des hypothèses** simplificatrices sur l'écoulement des glaciers.
- Obtention du premier champ de vitesse par traitements interférométriques radar dans les Alpes françaises.

## Partie Polarimétrie

- **Modélisation de la texture** par une distribution de **Fisher**.
- Distribution de **KummerU**.
- Implémentation dans un algorithme de **segmentation hiérarchique**.
- Résultats sur des images synthétiques et réelles.
- Nécessité de modéliser la texture par une distribution appropriée pour segmenter les images polarimétriques.

## Perspectives

- **Corrélation d'images basée sur la texture.**
- **Modélisation atmosphérique :**
  - GPS installés sur le glacier d'Argentière et dans la vallée.
  - Correction des franges atmosphériques.
- **Utilisation de ces travaux pour les nouveaux satellites à haute résolution spatiale :**
  - TerraSAR-X
  - SAR Lupe
  - Cosmo Skymed

## Perspectives

- **Extraction de paramètres polarimétriques** (entropie, anisotropie, angle  $\alpha$ , TSVM) à partir d'une partition sur-segmentée.
- Adaptation de ces travaux dans le cas où la texture est dépendante du canal de polarisation.
- Modélisation de la texture en utilisant un **développement en série de Edgeworth**.



## Publications

### • Revue internationale (3) :

- 1 L. Bombrun et J.-M. Beaulieu, **Fisher Distribution for Texture Modeling of Polarimetric SAR Data**, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Juillet 2008, Vol. 5, n. 3, pp. 512-516.
- 2 L. Bombrun, M. Gay, E. Trouvé, G. Vasile et J. Mars, **DEM Error Retrieval by an Analysis of the Wrapped Phase Difference Between Differential Interferograms**, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, en révision.
- 3 E. Trouvé, G. Vasile, M. Gay, L. Bombrun, P. Grussenmeyer, T. Landes, J.-M. Nicolas, P. Bolon, I. Pétillet, A. Julea, L. Valet, J. Chanussot et M. Koehl, **Combining Airborne Photographs and Spaceborne SAR Data to Monitor Temperate Glaciers. Potentials and Limits**, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, n. 4, pp. 905-924.

### • Revue nationale (1) :

- 1 M. Koehl, L. Bombrun, M. Gay, E. Trouvé, P. Bolon, J.-M. Nicolas, G. Vasile, I. Pétillet, T. Landes et P. Grussenmeyer, **Recalage de Mesures Satellitaires de Vitesse d'Écoulement du Glacier d'Argentière par Mesures Géodésiques *in-situ***, *Traitement du Signal*, 2008, en révision.

## ● Conférences internationales avec actes (10):

- 1 L. Bombrun et J.-M. Beaulieu, **Segmentation of Polarimetric SAR Data based on the Fisher Distribution for Texture Modeling**, *IGARSS*, Boston, États-Unis, 2008.
- 2 G. Vasile, J.-P. Ovarlez, F. Pascal, C. Tison, L. Bombrun, M. Gay, E. Trouvé, **Normalized Coherency Matrix Estimation under the Sirv Model - Alpine Glacier PolSAR Data Analysis**, *IGARSS*, Boston, États-Unis, 2008.
- 3 E. Trouvé, I. Pétilot, P. Bolon, M. Gay, L. Bombrun, J.-M. Nicolas, F. Tupin, A. Walpersdorf, N. Cotte, I. Hajnsek et M. Keller, **Monitoring Alpine Glacier Activity by a Combined use of TerraSAR-X Images and Continuous GPS Measurements - the Argentière Glacier Experiment**, *EUSAR*, Friedrichshafen, Allemagne, 2008.
- 4 L. Bombrun, I. Pétilot, G. Vasile, M. Gay, E. Trouvé, P. Bolon, J.-M. Nicolas et T. Landes, **Multi-date ERS Tandem Interferogram Analysis : Application to Alpine Glaciers**, *MULTITEMP*, 2007, Leuven, Belgique.
- 5 T. Landes, M. Gay, E. Trouvé, J.-M. Nicolas, L. Bombrun, G. Vasile et I. Hajnsek, **Monitoring Temperate Glaciers by High Resolution Pol-InSAR Data : First Analysis of Argentière E-SAR Acquisitions and in-situ Measurements**, *IGARSS*, Barcelone, Espagne, 2007, pp. 184-187
- 6 G. Vasile, E. Trouvé, L. Valet, J.-M. Nicolas, L. Bombrun, M. Gay, I. Pétilot, P. Bolon, et V. Buzuloiu, **Coherent-Stable Scatterers Detection in SAR Multi-Interferograms: Feature Fuzzy Fusion in Alpine Glacier Geophysical Context**, *IGARSS*, Barcelone, Espagne, 2007, pp. 4862-4865.
- 7 G. Vasile, E. Trouvé, L. Valet, J.-M. Nicolas, M. Gay, L. Bombrun et P. Bolon, **Feature Detection in POLinSAR Images by an Interactive Fuzzy Fusion Approach. Application to Glacier Monitoring**, *POLinSAR*, Frascati, Italie, 2007.
- 8 L. Bombrun, F. Maussang, E. Moisan et A. Hétet, **Use of Statistical Hypothesis Test for Mines Detection in SAS Imagery**, *EUSIPCO*, Florence, Italie, 2006.
- 9 G. Vasile, I. Petillot, A. Julea, E. Trouvé, P. Bolon, L. Bombrun, M. Gay, T. Landes, P. Grussenmeyer et J.-M. Nicolas, **High Resolution SAR Interferometry: Influence of Local Topography in the Context of Glacier Monitoring**, *IGARSS*, Denver, États-Unis, 2006.
- 10 J. Chanussot, P. Bas et L. Bombrun, **Airborne Remote Sensing of Vineyards for the Detection of Dead Vine Trees**, *IGARSS*, Seoul, Corée du Sud, 2005, Vol. 5, pp. 3090-3093.

## Collaboration

- **Projet MEGATOR**
  - **Mesure de l'Évolution des Glaciers Alpins par Télédétection Optique et Radar**, [www.gipsa-lab.inpg.fr/megator](http://www.gipsa-lab.inpg.fr/megator).
  - **Action Concertée Incitative "Masse de données"** du Ministère de la Recherche de 2004 à 2007.
  - **Action soutenue par le CNES** dans le cadre du volet méthodologique du programme préparatoire **ORFEO** (Optical and Radar Federated Earth Observation).
- **Mobilité de 6 mois à l'Université Laval à Québec en collaboration avec Messieurs Jean-Marie Beaulieu et Ridha Touzi** du Centre Canadien de Télédétection à Ottawa.

# Développement d'outils et de méthodes de télédétection spatiale optique et radar nécessaires à la haute résolution spatiale

Lionel BOMBRUN

Directeurs de thèse : Michel Gay et Jérôme Mars  
GIPSA-lab

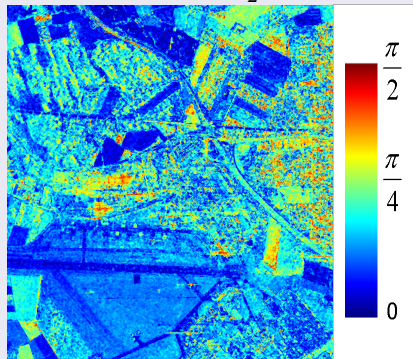
Département des Images et des Signaux



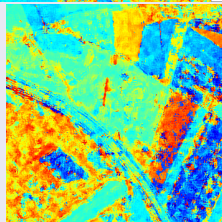
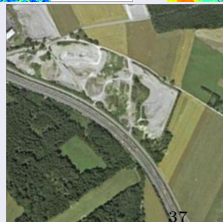
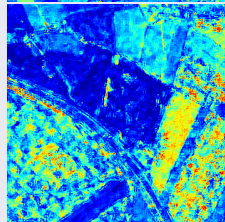
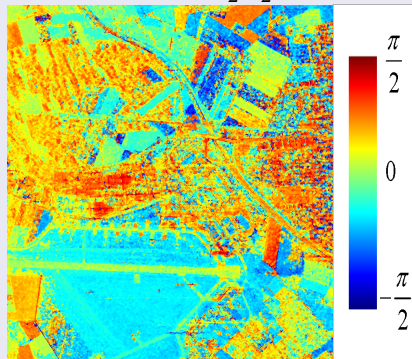
18 novembre 2008

Analyse de l'angle  $\alpha$  du modèle  $\alpha/\beta$ 

$$\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}]$$



$$\alpha \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$$



## Modèle TSVM : Target Scattering Vector Model

Le TSVM est basé sur la décomposition de Huynen.

$$\tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\mathbf{R}}(\psi) \tilde{\mathbf{T}}(\tau_m) \tilde{\mathbf{S}}_d \tilde{\mathbf{T}}(\tau_m) \tilde{\mathbf{R}}(-\psi)$$

avec :

$$\tilde{\mathbf{S}}_d = \begin{bmatrix} m \cdot e^{2j(\nu+\rho)} & 0 \\ 0 & m \cdot \tan^2 \gamma e^{-2j(\nu-\rho)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{bmatrix}$$

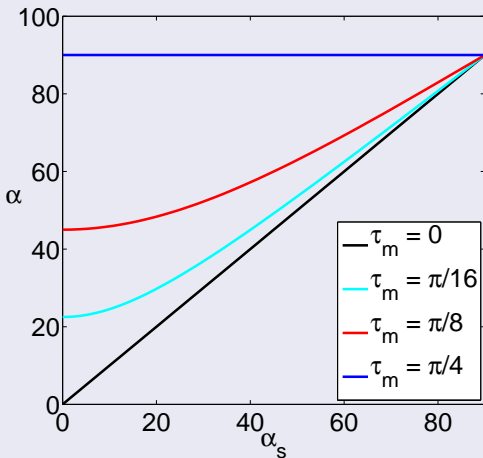
$$\tilde{\mathbf{R}}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{\mathbf{T}}(\tau_m) = \begin{bmatrix} \cos \tau_m & -j \sin \tau_m \\ -j \sin \tau_m & \cos \tau_m \end{bmatrix}$$

## Modèle TSVM: Target Scattering Vector Model

$$\vec{e}_T^{\text{SV}} = m \cdot |\vec{e}_T|_m e^{j\Phi_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\psi) & -\sin(2\psi) \\ 0 & \sin(2\psi) & \cos(2\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_s \cos(2\tau_m) \\ \sin \alpha_s e^{j\Phi_{\alpha_s}} \\ -j \cos \alpha_s \sin(2\tau_m) \end{bmatrix}$$

Modèle  $\alpha/\beta$ 

$$\mathbf{k} = e^{j\theta} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \beta e^{j\delta} \\ \sin \alpha \sin \beta e^{j\gamma} \end{bmatrix}$$

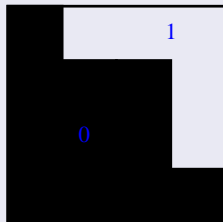
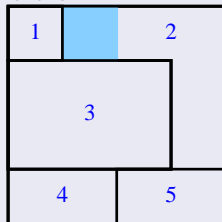
Comparaison des modèles  $\alpha/\beta$  et TSVM

- Pour une **cible symétrique** ( $\tau_m = 0$ ), l'angle  $\alpha$  du modèle  $\alpha/\beta$  est égal à l'angle  $\alpha_s$  du modèle TSVM.



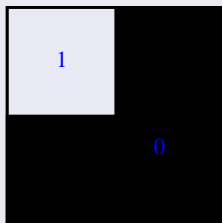
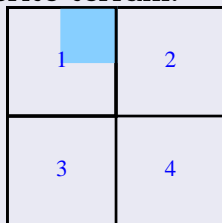
# Courbes Caractéristique Opérationnelle de Réception (COR)

**Partition:**



$S_x$

**Vérité terrain:**



$T_x$

$$\text{détection} = \frac{|S_x \cap T_x|}{|T_x|} = \frac{1}{4}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{fausse alarme} = \frac{|S_x \cap C_x|}{|C_x|} \\ = \frac{4}{3 \times 4} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 p_d &= \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N \frac{|S_x \cap T_x|}{|T_x|} \approx 0.469 \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^P \frac{(K_{ij})^2}{\text{card}(\text{classe } j)}
 \end{aligned}$$

### Matrice de confusion:

$K_{ij}$	1	2	3	4
1	1	0	0	0
2	1	3	0	1
3	2	1	2	1
4	0	0	2	0
5	0	0	0	2

$k$  : Nombre de segments dans la partition

$P$  : Nombre de classes (vérité terrain)

$$\text{card}(\text{classe } j) = \sum_{i=1}^k K_{ij}$$

$$\begin{aligned}
 p_{fa} &= \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N \frac{|S_x \cap C_x|}{|C_x|} \approx 0.208 \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^P \frac{K_{ij} (K_i - K_{ij})}{\text{card}(\overline{\text{classe } j})}
 \end{aligned}$$

### Matrice de confusion:

$K_{ij}$	1	2	3	4
1	1	0	0	0
2	1	3	0	1
3	2	1	2	1
4	0	0	2	0
5	0	0	0	2

$k$  : Nombre de segments dans la partition

$P$  : Nombre de classes (vérité terrain)

$$K_i = \sum_{j=1}^P K_{ij}$$

$$\text{card}(\overline{\text{classe } j}) = N - \sum_{i=1}^k K_{ij}$$

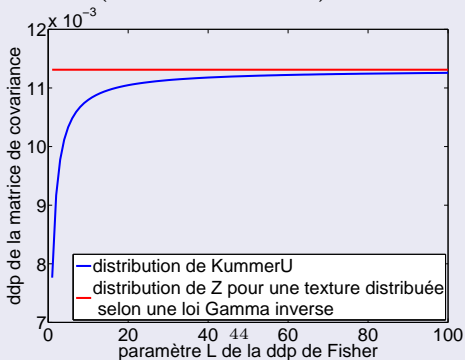
## Cas particulier de la distribution de KummerU

- Si  $\mathcal{L}$  tend vers l'infini, la distribution de Fisher tend vers la distribution Gamma Inverse.

Distribution de  $\mathbf{Z}$  si la texture est distribuée selon une loi Gamma Inverse

$$p_{\mathbf{Z}}(\mathbf{Z}|\Sigma_h, \mathcal{M}) = \frac{L^{Lp} |\mathbf{Z}|^{L-p}}{\pi^{\frac{p(p-1)}{2}} \Gamma(L) \cdots \Gamma(L-p+1) |\Sigma_h|^L \Gamma(\mathcal{M})} \mathcal{M}^{\mathcal{M}}$$

$$\times \left( L \text{tr}(\Sigma_h^{-1} \mathbf{Z}) + \mathcal{M} \right)^{\mathcal{M}+1-Lp} \Gamma(Lp - \mathcal{M} - 2)$$



## Analyses des franges résiduelles

La phase topographique d'un interférogramme est définie par :

$$\begin{aligned}\Phi_{topo}^i &= \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^i}{R_1 \sin \theta} \Delta z^{MNT} + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^i}{R_1 \sin \theta} \Delta z^{err} \\ &= \Phi_{topo}^{i,MNT} + \Phi_{topo}^{i,err}\end{aligned}$$

La différence de phase entre interférogramme différentiel  $\Delta\Phi^{i-j}$  se décompose alors comme la somme de quatre termes par :

$$\begin{aligned}\Delta\Phi^{i-j} &= \left( \Phi^i - \Phi_{topo}^{i,MNT} \right) - \left( \Phi^j - \Phi_{topo}^{j,MNT} \right) \\ &= \Delta\Phi_{topo}^{ij} + \Delta\Phi_{atm}^{ij} + \Delta\Phi_{depl}^{ij} + \Delta\Phi_{bruit}^{ij}\end{aligned}$$

## Analyses des franges résiduelles

Le terme résiduel dû à la topographie s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 \Delta\Phi_{topo}^{ij} &= \left( \Phi_{topo}^i - \Phi_{topo}^{i,MNT} \right) - \left( \Phi_{topo}^j - \Phi_{topo}^{j,MNT} \right) \\
 &= \frac{4\pi}{\lambda} \frac{(B_{\perp}^i - B_{\perp}^j)}{R_1 \sin \theta} \Delta z^{err} \\
 &= \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\Delta B_{\perp}^{ij}}{R_1 \sin \theta} \Delta z^{err} \\
 &= \frac{2\pi}{\Delta e_a^{ij}} \Delta z^{err}
 \end{aligned}$$

avec  $\Delta B_{\perp}^{ij}$  la baseline perpendiculaire équivalente et  $\Delta e_a^{ij}$  l'altitude d'ambiguïté équivalente définies par :

$$\Delta B_{\perp}^{ij} = B_{\perp}^i - B_{\perp}^j \quad \text{et} \quad \Delta e_a^{ij} = \frac{\lambda}{2} \frac{R_1 \sin \theta}{B_{\perp}^i - B_{\perp}^j} = \frac{1}{\frac{1}{e_a^i} - \frac{1}{e_a^j}}$$

## Analyses des franges résiduelles

Soit  $N_{ij}(X, Y)$  le nombre de franges observées sur l'image de différences de phases entre interférogrammes différentiels  $\Delta\Phi^{i-j}$  entre les points  $X$  et  $Y$ . Posons  $\Delta z(X, Y)$  l'élévation non prise en compte par le MNT entre les deux points  $X$  et  $Y$  (l'erreur du MNT).

$$\Delta\Phi_{topo}^{ij} = 2\pi N_{ij}(X, Y)$$

On relie l'erreur du MNT entre les points  $X$  et  $Y$  au nombre de franges observé entre ces points par :

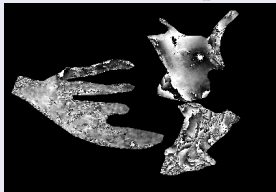
$$\Delta z(X, Y) = N_{ij}(X, Y)\Delta e_a^{ij}$$

Pour les différentes paires d'interférogrammes, on teste :

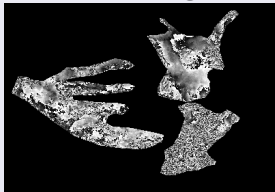
$$N_{ij}(X, Y)\Delta e_a^{ij} = K(X, Y) \quad \forall i, j$$

## Analyses des franges résiduelles

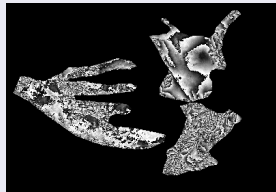
Différences de phases entre interférogrammes différentiels :



Avril-Mars



Avril-Décembre

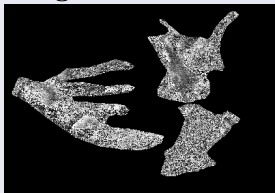


Avril-Octobre

Après suppression des franges résiduelles topographiques :



Avril-Mars



Avril-Décembre



Avril-Octobre



## Combinaison des passes ascendante et descendante

**Objectif :** Estimer les offsets sur les passes ascendante et descendante à partir d'un ensemble de points  $(P_1, \dots, P_N)$  visibles dans les deux passes du satellite.

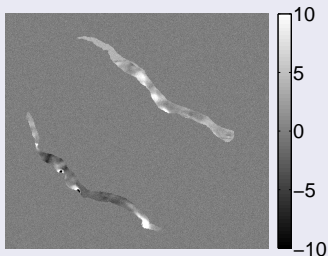
$$\begin{aligned}v(P_i) \vec{e}_{ec}(P_i) \cdot \vec{e}_{LOS_{asc}} &= \phi_{asc}(P_i) + K_{asc} \quad \forall i = 1 \dots N \\v(P_i) \vec{e}_{ec}(P_i) \cdot \vec{e}_{LOS_{desc}} &= \phi_{desc}(P_i) + K_{desc} \quad \forall i = 1 \dots N\end{aligned}$$

Soient  $K_{asc}$  et  $K_{desc}$  les constantes à appliquer sur les phases en LOS en passe ascendante et descendante. On cherche  $K_{asc}$  et  $K_{desc}$  de sorte que l'erreur quadratique moyenne  $R$  soit minimale

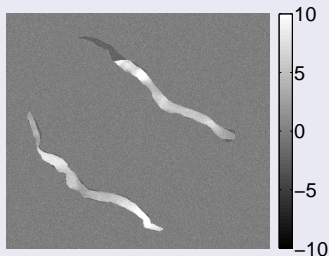
$$R = E \left[ \left( K_{asc} - \hat{K}_{asc} \right)^2 + \left( K_{desc} - \hat{K}_{desc} \right)^2 \right]$$

## Combinaison des passes ascendante et descendante

Exemple synthétique : offset de 4 sur la phase en passe ascendante ( $K_{asc} = -4$ ) et un offset de  $-2$  sur la phase en passe descendante ( $K_{desc} = 2$ ).



passé ascendante



passé descendante

Glacier	nombre de points	$\widehat{K}_{asc}$	$\widehat{K}_{desc}$
Mer de Glace	9191	-4.00579	2.0206
Argentière	8107	-3.98358	1.99097

## Mécanisme de rétrodiffusion moyen

Vecteur de rétrodiffusion associé au mécanisme de rétrodiffusion moyen :

$$\bar{\mathbf{k}} = \sqrt{\lambda_1} e^{j\theta_1} \mathbf{k}_1 + \sqrt{\lambda_2} e^{j\theta_2} \mathbf{k}_2 + \sqrt{\lambda_3} e^{j\theta_3} \mathbf{k}_3$$

$$\bar{\mathbf{T}} = \bar{\mathbf{k}} \bar{\mathbf{k}}^\dagger = \mathbf{T} + \mathbf{T}_N$$

avec

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_N &= \sqrt{\lambda_1 \lambda_2} \left( \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_2^\dagger e^{j(\theta_1 - \theta_2)} + \mathbf{k}_2 \mathbf{k}_1^\dagger e^{j(\theta_2 - \theta_1)} \right) \\ &+ \sqrt{\lambda_1 \lambda_3} \left( \mathbf{k}_1 \mathbf{k}_3^\dagger e^{j(-\theta_2)} + \mathbf{k}_3 \mathbf{k}_1^\dagger e^{j(\theta_2)} \right) \\ &+ \sqrt{\lambda_2 \lambda_3} \left( \mathbf{k}_2 \mathbf{k}_3^\dagger e^{j(-\theta_1)} + \mathbf{k}_3 \mathbf{k}_2^\dagger e^{j(\theta_1)} \right) \end{aligned}$$

On cherche  $\theta_1$  et  $\theta_2$  de sorte que la somme du module des carrés des termes diagonaux de la matrice  $\mathbf{T}_N$  soit minimale.