



MESURE DE LA DILATATION THERMIQUE DE LA TOUR EIFFEL PAR INTERFÉROMÉTRIE RSO DIFFERENTIELLE

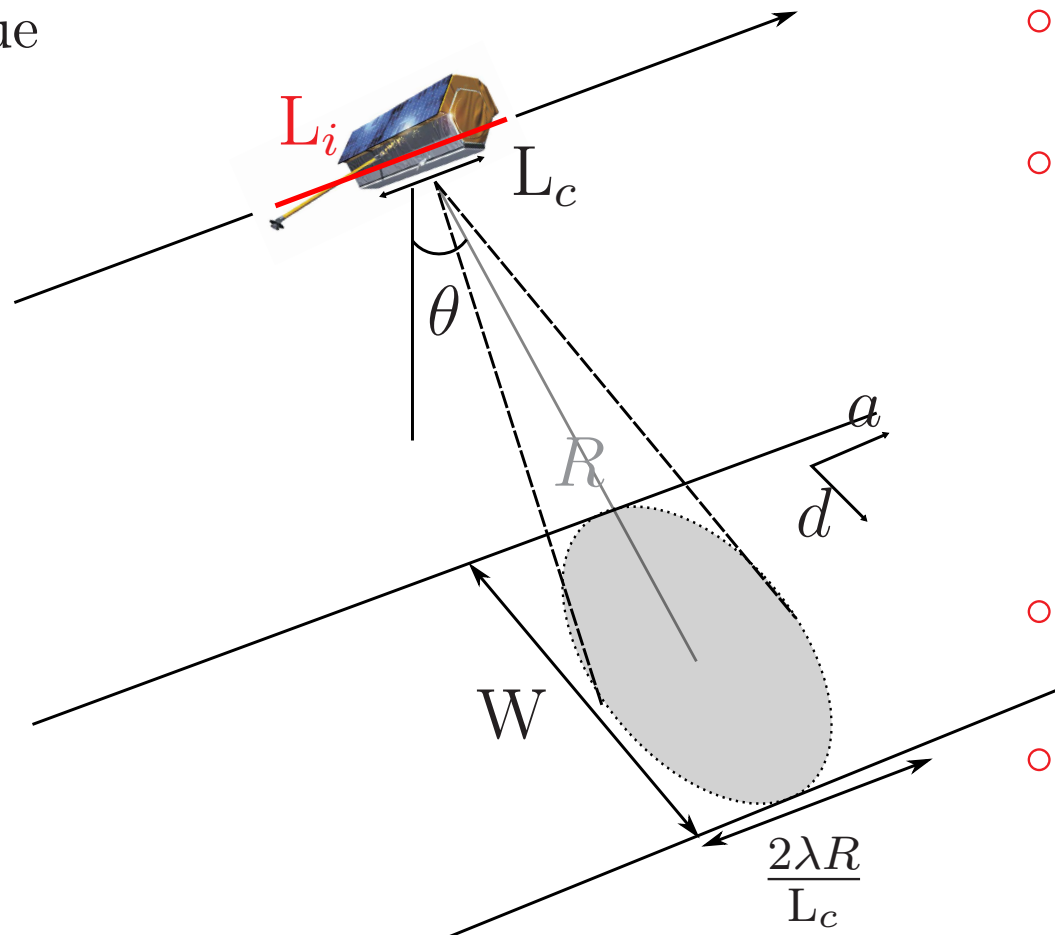
Flora Weissgerber, Jean-Marie Nicolas, Elise Colin-Koeniguer, Nicolas Trouve
 flora.weissgerber@telecom-paristech.fr, elise.koeniguer@onera.fr, nicolas.trouve@onera.fr,
 jean-marie.nicolas@telecom-paristech.fr

RSO, Interférométrie, Interférométrie différentielle

Le Radar à Synthèse d'Ouverture

- Émission d'une onde électromagnétique
- Réception de l'onde rétrodiffusée
- Estimation du temps d'aller-retour
- Synthèse

L_i : longueur d'intégration
 θ : angle d'incidence
 R : distance Terre-Capteur
 W : largeur de fauchée
 λ : longueur d'onde centrale
 B_w : bande passante du signal émis
 L_c : taille physique de l'antenne
 $\frac{2\lambda R}{L_c}$: largeur de la tâche de diffraction

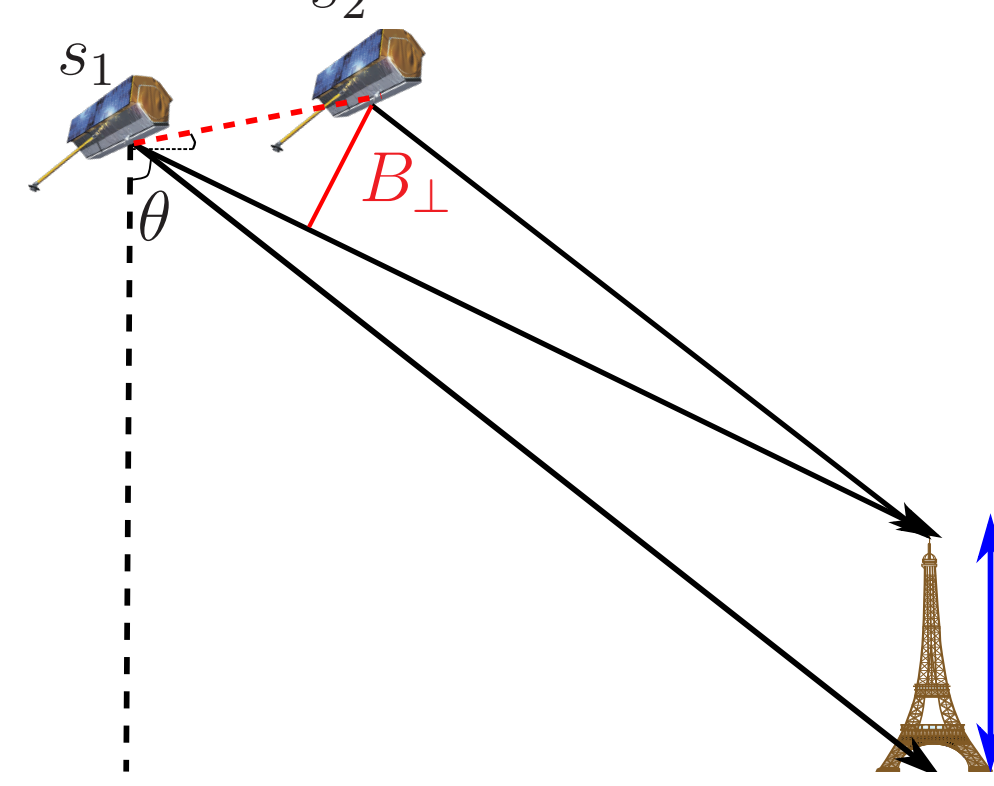


L'interférométrie RSO

- Images s_1 et s_2 séparées par ligne de base perpendiculaire $B_\perp$.
- Différence de phase $\rightarrow$ hauteur des diffuseurs z

$$\Delta\Phi = k_z z$$

- $k_z = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_\perp}{R \sin(\theta)}$ la sensibilité à la hauteur
- $z_{2\pi} = \frac{2\pi}{k_z}$ la hauteur d'ambiguïté

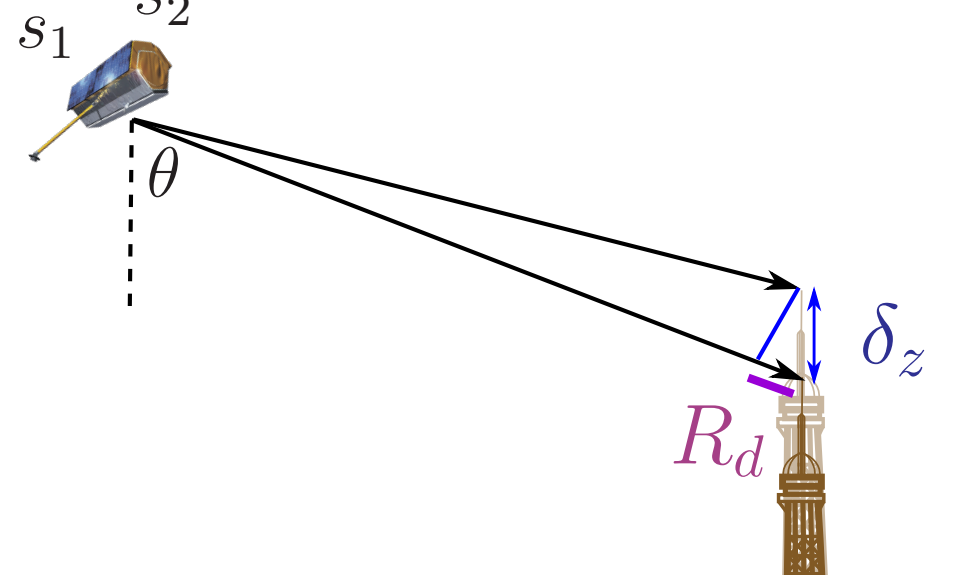


L'interférométrie différentielle RSO

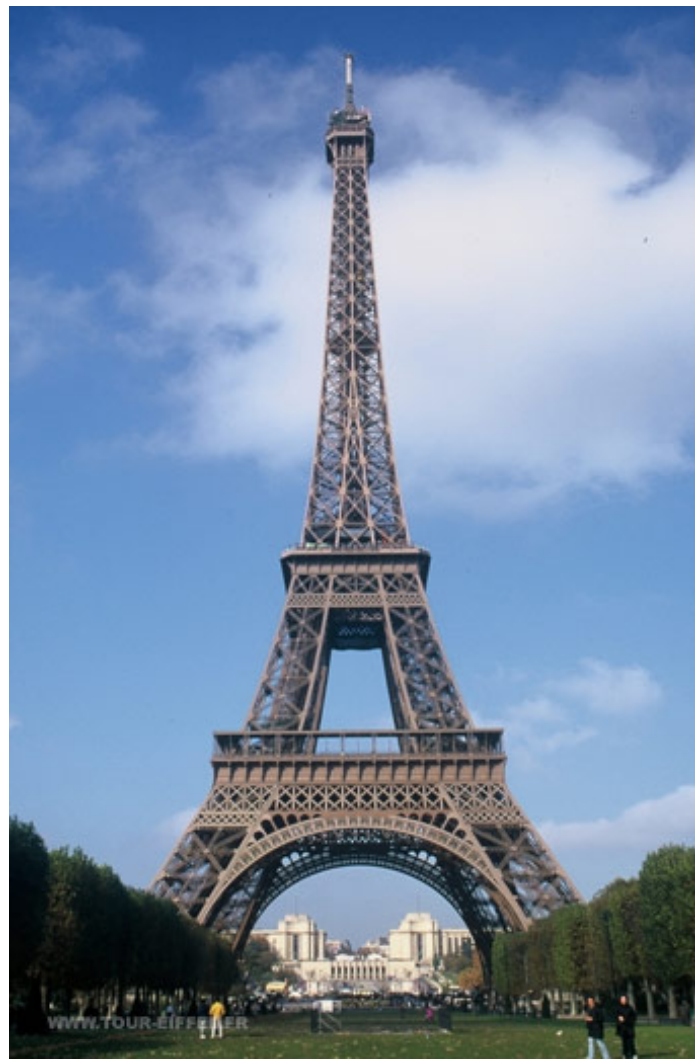
- Images s_1 et s_2 séparées par Δt .
- Différence de phase $\rightarrow$ déplacement des diffuseurs R_d le long de la ligne de visée

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} R_d$$

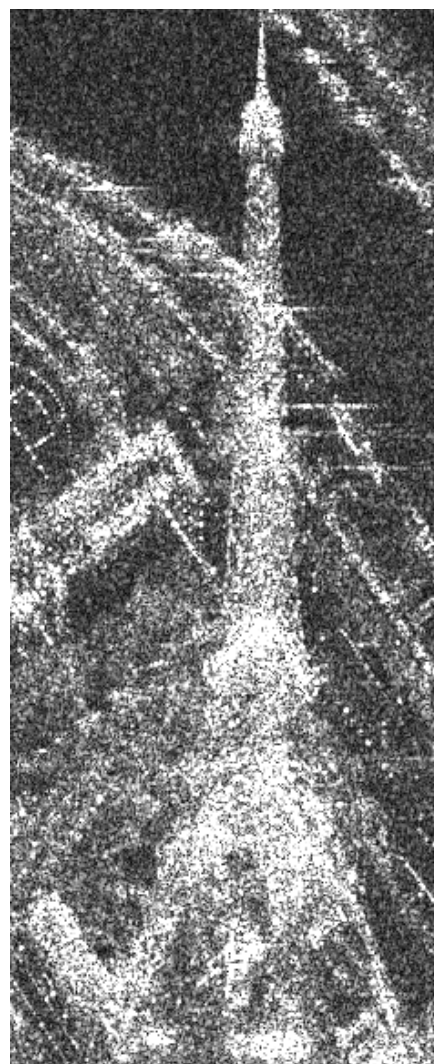
- Déplacement vertical $\delta_z = \frac{R_d}{\cos(\theta)}$



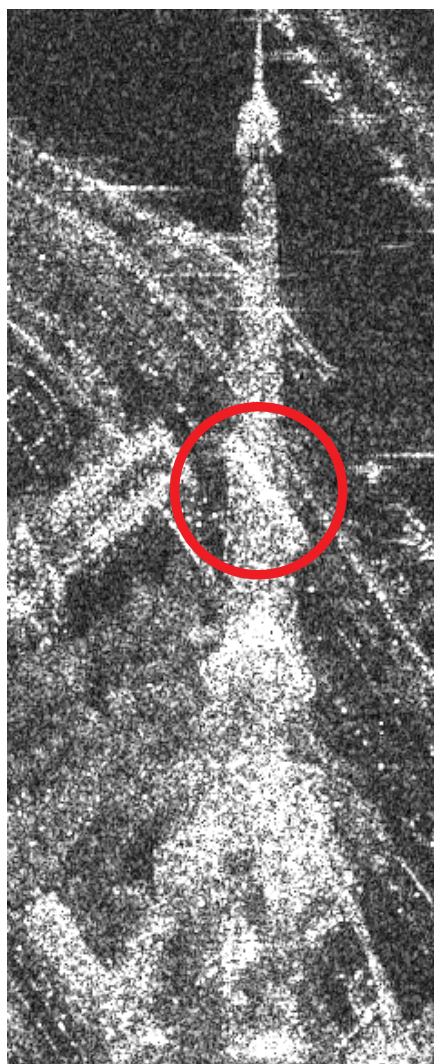
La Tour Eiffel en RSO



B. Michau http://www.toureffel.paris.fr/photos.html?view=galerieimage_id=39



2009-01-24



2009-03-09

10 images

2009-01-24
 2009-02-04
 2009-02-15
 2009-03-09
 2009-03-20
 2009-04-11
 2009-04-22
 2009-05-03
 2009-05-13
 2009-05-25

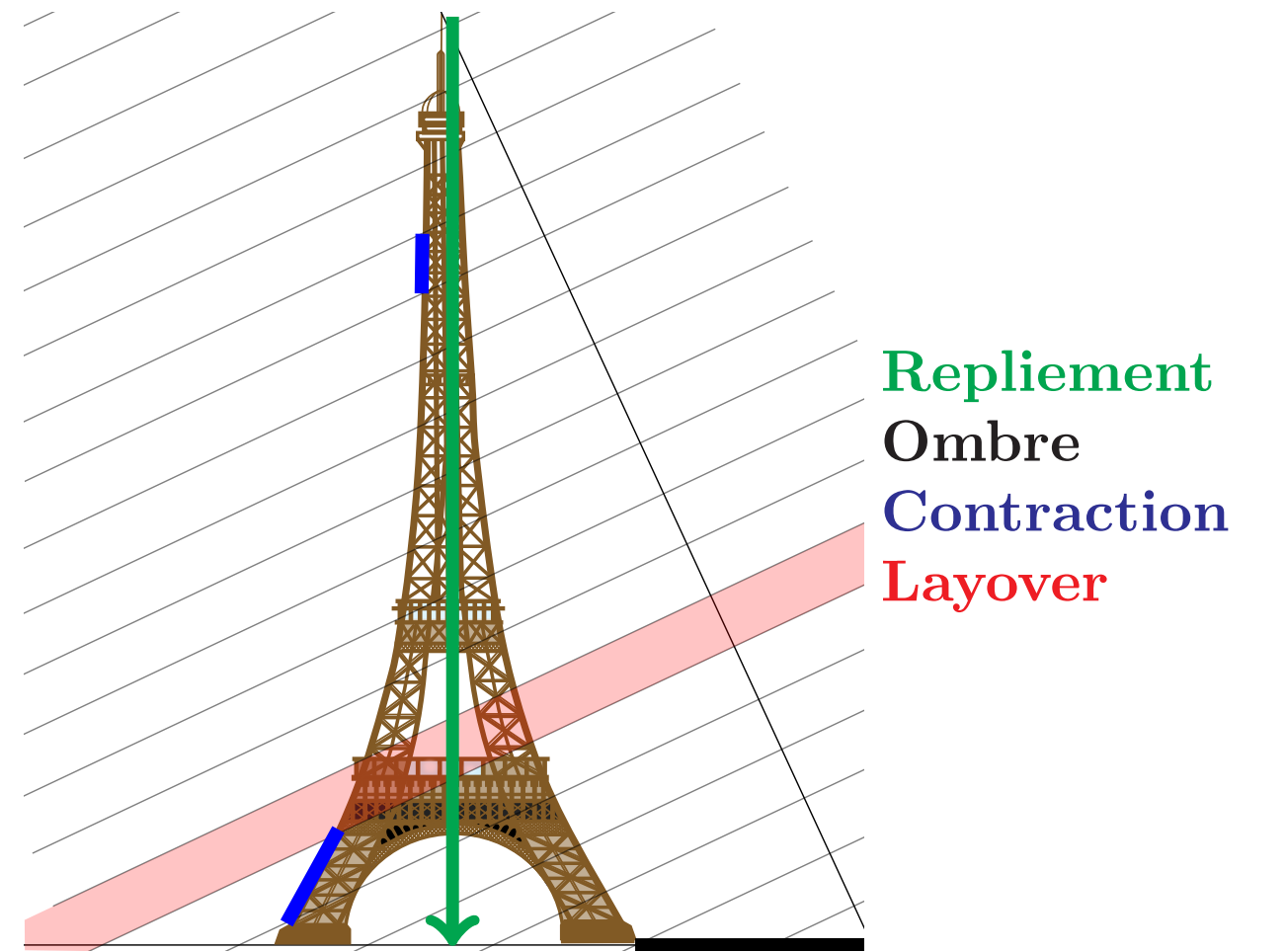
Layover avec une péniche

Configuration du capteur

Mode : HR Spotlight
 Bande passante B_w : 300 MHz
 Angle d'incidence θ : 34.6 °
 Résolution azimut δ_a : 0.86 m
 Résolution distance oblique δ_d : 0.5 m
 Résolution distance sol δ_{sol} : 0.88 m
 Heure d'acquisition : 17:34:35
 Orbite : Ascendante

projet DLR LAN1746

Géométrie



La précision

L'estimation de la hauteur z et de la dilatation R_d sont liées :

$$\Delta\Phi = k_z(z + \epsilon_z) + \frac{4\pi}{\lambda}(R_d + \epsilon_{R_d})$$

- ϵ_z : erreur sur l'estimation de la hauteur
- ϵ_{R_d} : erreur sur l'estimation de la dilatation

$$k_z \epsilon_z = -\frac{4\pi}{\lambda} \epsilon_{R_d} \Leftrightarrow \epsilon_z = -2 \frac{z_{2\pi}}{\lambda} \epsilon_{R_d}$$

Pour cette étude : $\left. \begin{matrix} z_{2\pi} \in [28 & 411] \text{m} \\ \lambda = & 0.031 \text{m} \end{matrix} \right\} z_{2\pi} \in [1800 & 26500]$

Influence de ϵ_z

$\epsilon_z = 1\text{m} \rightarrow \epsilon_{R_d} \in [0.5 & 0.04]\text{cm}$

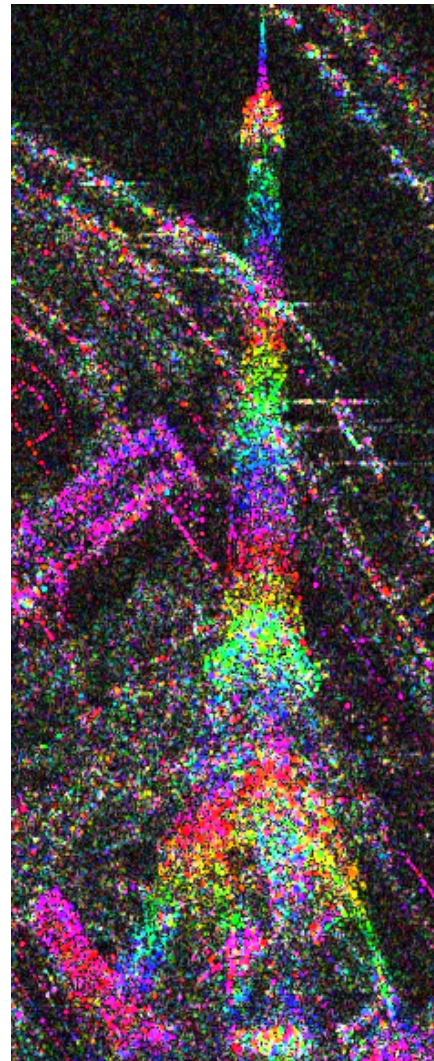
Influence de ϵ_{R_d}

$\epsilon_{R_d} = 1\text{cm} \rightarrow \epsilon_z \in [18 & 265]\text{m}$

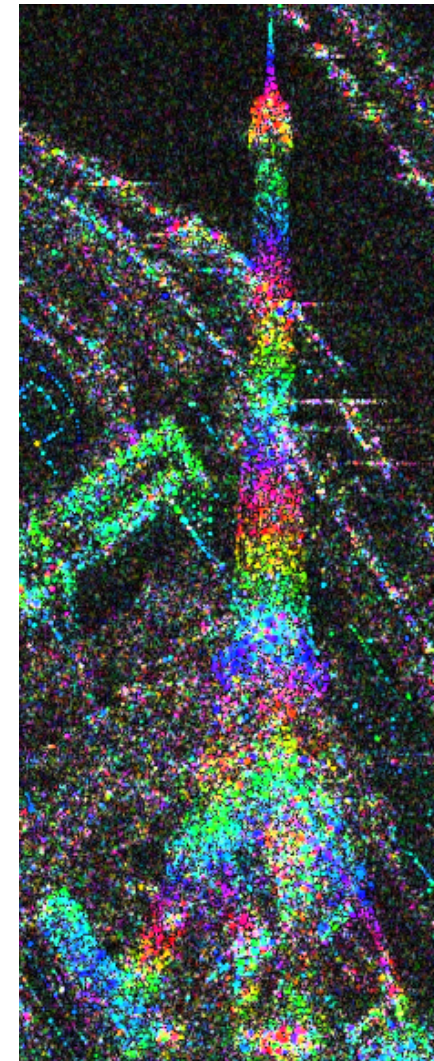
L'interférométrie

Date	$z_{2\pi}$	$\Delta\Phi$	δ_h m
01-24			
02-04	32.63	36.05	187.2
02-15	61.50	20.15	197.2
03-09	28.04	44.56	198.9
03-20	45.90	28.40	207.5
04-11	-411.90	-17.80	1166.9
04-22	-52.83	-25.42	213.7
05-03	315.04	4.51	225.9
05-14	266.39	-20.18	855.6
05-25	-43.35	-38.34	264.5

- 04-11 : 4 franges > 0.8 frange
- 05-14 : 5 franges > 1.2 franges
- Dilatation non prise en compte ?



2009-04-11



2009-05-14

L'interférométrie différentielle

Date	$\tilde{\delta}_z$ cm	T ₇ °C	T ₁₇ °C
01-24		3.2	6.1
02-04	-1.26	-2.2	2.2
02-15	-0.36	0.2	4.8
03-09	-0.68	4	9
03-20	-0.06	5	11
04-11	4.38	11.5	17.5
04-22	0.17	9.5	19
05-03	0.10	10.2	13
05-14	4.58	14	18
05-25	2.41	18.5	29

Hauteur de référence :

- Estimation préalable [Fornaro et al., 2011]
- L'estimation peut-être biaisée par la dilatation
- Incluse dans le modèle $\rightarrow$ pas de modèle pour la Tour Eiffel
- MNT : $\delta_h^{theo} = 209\text{m}$

Analyse des résultats :

- $\delta_z = \alpha \delta_h^{theo} \Delta T$
 $\alpha = 11.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$: coefficient de dilatation de l'acier.
 $+ \Delta T = 11\text{K} \rightarrow \delta_z = 3\text{cm}$
 $- \tilde{\delta}_z$ pas linéaire avec $\Delta T \rightarrow$ autres mouvements ?

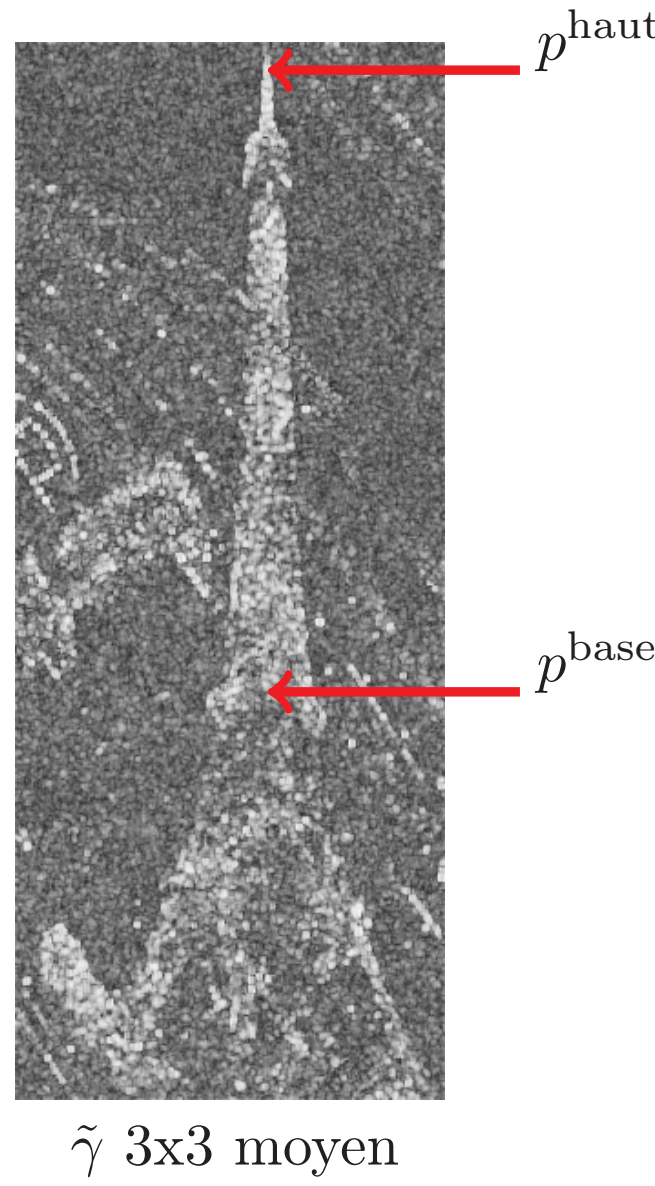
$$\delta_z = (\Delta\Phi - k_z \delta_h^{theo}) \frac{\lambda \cos(\theta)}{4\pi}$$

Estimation de la différence de phase

Estimation pixel à pixel de $\tilde{\phi}_{1,2}$

$$\tilde{\gamma} e^{i\tilde{\phi}_{1,2}} = \frac{\sum_{k=1}^L s_{1,k} s_{2,k}^*}{\sqrt{\sum_{k=1}^L s_{1,k} s_{1,k}^* \sum_{k=1}^L s_{2,k} s_{2,k}^*}}$$

$\tilde{\gamma}$: degré de cohérence estimé
 $\phi_{1,2}$: différence de phase estimée
 $s_{1,k}, s_{2,k}$: pixels de l'image 1 et 2
 L : nombre de pixels voisins



$\tilde{\gamma}$ 3x3 moyen

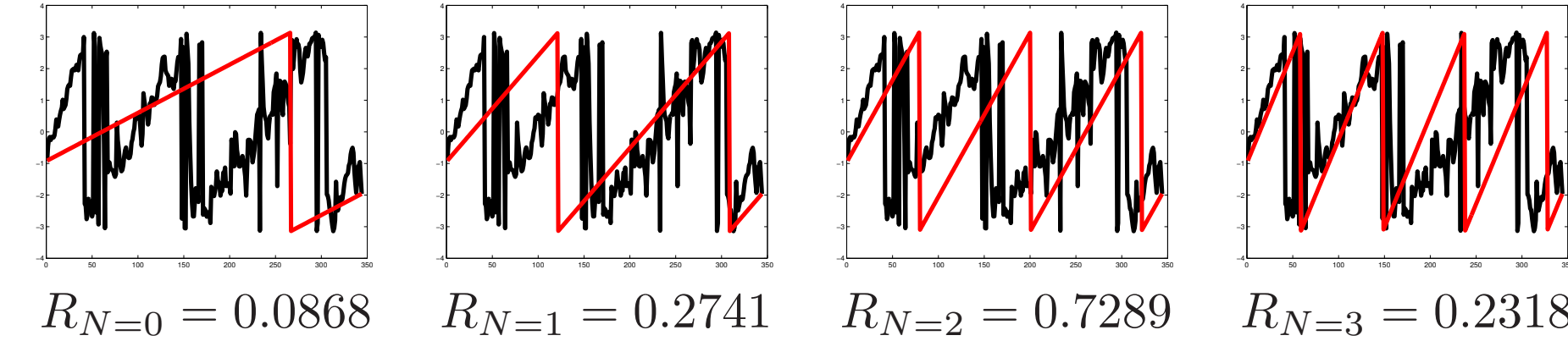
Déroulement de $\tilde{\phi}_{1,2}$

$$\Delta\Phi = \phi_{1,2}^{\text{haut}} - \phi_{1,2}^{\text{base}} + N2\pi$$

- Comparaison avec une phase simulée ϕ_{sim}^N contenant N franges
- Pas de moyennage spatial
- Critère de ressemblance : la dispersion de la phase [Mardia and Jupp, 1999]

$$R(\phi_{1,2}, \phi_{\text{sim}}^N) = \frac{1}{M} \left| \sum_{k=1}^M e^{i(\phi_{\text{sim}}^N - \phi_{1,2})} \right|$$

- $N_{\text{franges}} = \text{argmax}_N R(\phi_{1,2}, \phi_{\text{sim}}^N)$



$R_{N=0} = 0.0868$ $R_{N=1} = 0.2741$ $R_{N=2} = 0.7289$ $R_{N=3} = 0.2318$

Les permanent scatterers (PS)

Définition

PS $\neq$ speckle [Ferretti et al., 2001]:

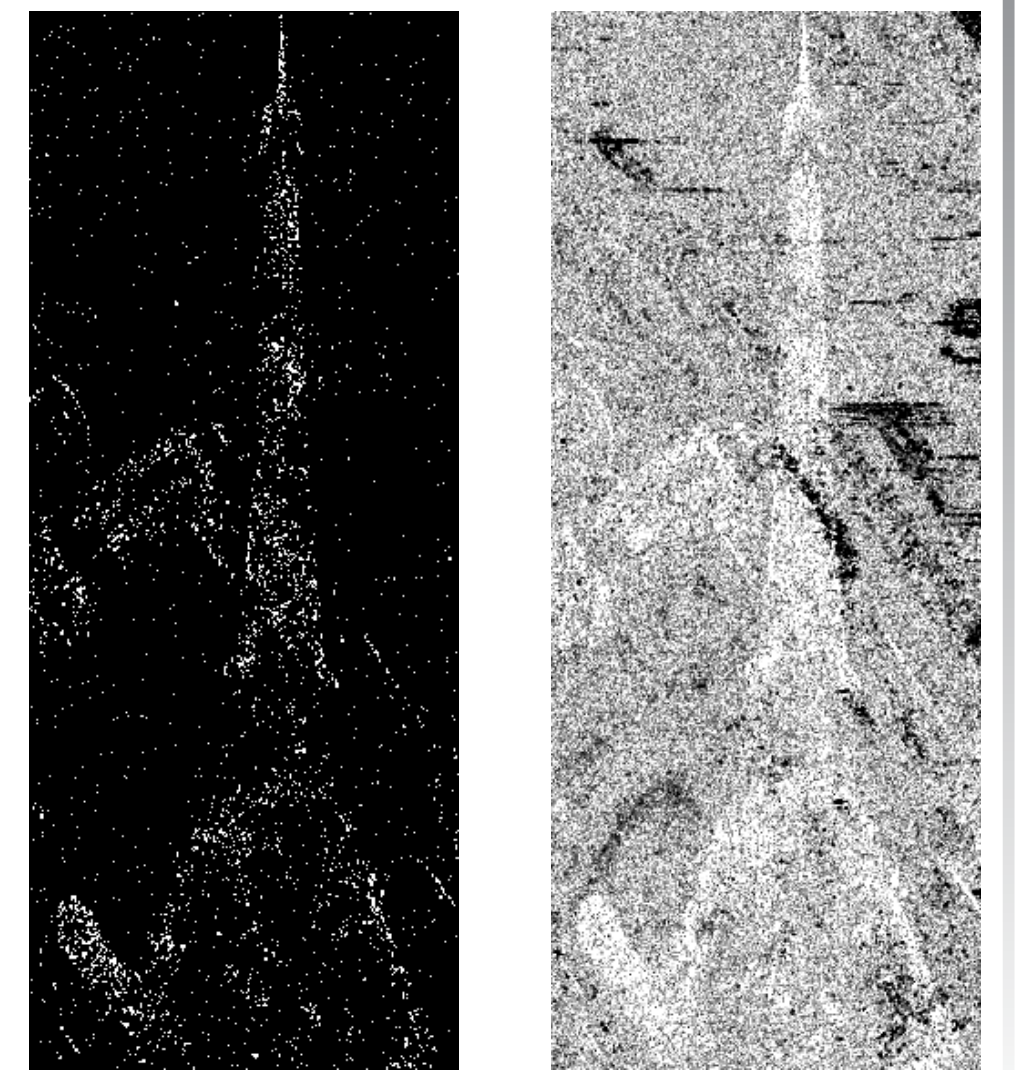
- Amplitude stable
- Indice de dispersion faible

$$\mathcal{D}_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A}$$

- μ_A moyenne de l'amplitude
- σ_A écart type de l'amplitude
- Phase peu bruitée

Les PS de la Tour Eiffel

- Les pixels p^{haut} et p^{base} sont des PS
- 20% des points utilisés pour dérouler la phase sont des PS



PS : $\mathcal{D}_A < 0.25$

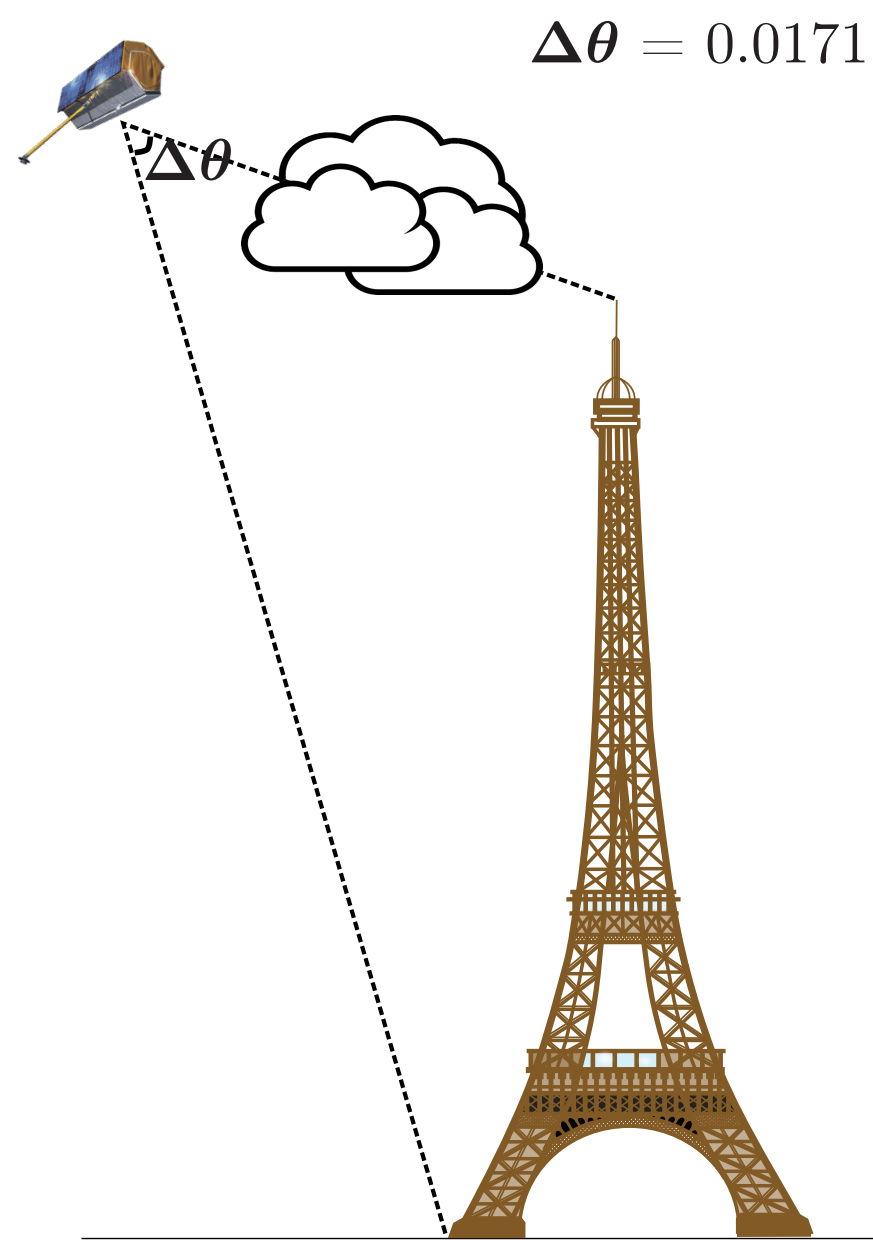
$-\log(\mathcal{D}_A)$

L'effet de l'atmosphère

La traversée de la troposphère peut introduire un retard.

2 causes possibles :

- Atmosphère standard :**
 - Modification de la pression et de la température
 - Ne dépend que de la hauteur [Doin et al., 2009]
 - Peu d'effet sur 300m
- Atmosphère humide :**
 - Variation de la pression de vapeur d'eau
 - Longueur de cohérence de l'ordre du km [Ferretti et al., 1999]
 - Nécessite des informations complémentaires



Influence si retard différent pour le bas et pour le haut

La dilatation de la Tour Eiffel

Le vent

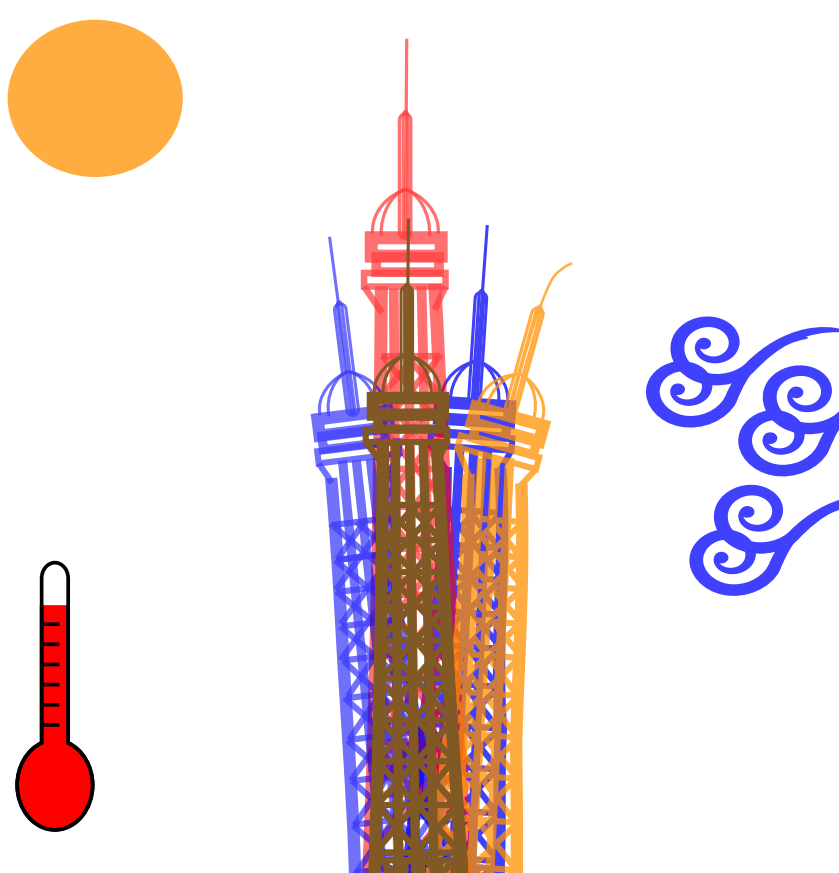
- Peu de prise au vent
- Mouvement horizontal
- Rafales à 200km/h $\rightarrow$ 20cm

La température extérieure

- Tour Eiffel $\approx$ poutrelle métallique
- Mouvement vertical
- $\Delta T = 10\text{K} \rightarrow \delta_z = 4\text{cm}$

L'ensoleillement

- Paramètre prédominant
- Mouvement opposé à la direction d'ensoleillement
- Gradient thermique entre les parties exposées au soleil et celles qui ne le sont pas
- Déformation de 20cm



Bibliographie

Références

- [Doin et al., 2009] Doin, M.-P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O., and Doubre, C. (2009). Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1):35–50.
- [Ferretti et al., 1999] Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (1999). Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: The Wavelet Approach. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2):705–715.
- [Ferretti et al., 2001] Ferretti, a., Prati, C., and Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1):8–20.
- [Fornaro et al., 2011] Fornaro, G., Pauciuolo, A., Reale, D., Zhu, X., and Bamler, R. (2011). Peculiarities of Urban Area Analysis With Very High Resolution Interferometric SAR Data. In *JURSE 2011 - Joint Urban Remote Sensing Event*, pages 185–188.
- [Mardia and Jupp, 1999] Mardia, K. V. and Jupp, P. E. (1999). *Directional Statistics*. Wiley.