

Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture par Analyse en Ondelettes Continues Multidimensionnelles

soutenue par

Mohamed TRIA

le 18 novembre 2005.

Directeur de thèse : M. BENIDIR.

Encadrant ONERA : J-P. OVARLEZ.

Co-Encadrants ONERA : L. VIGNAUD, J-C. CASTELLI.

Plan de soutenance

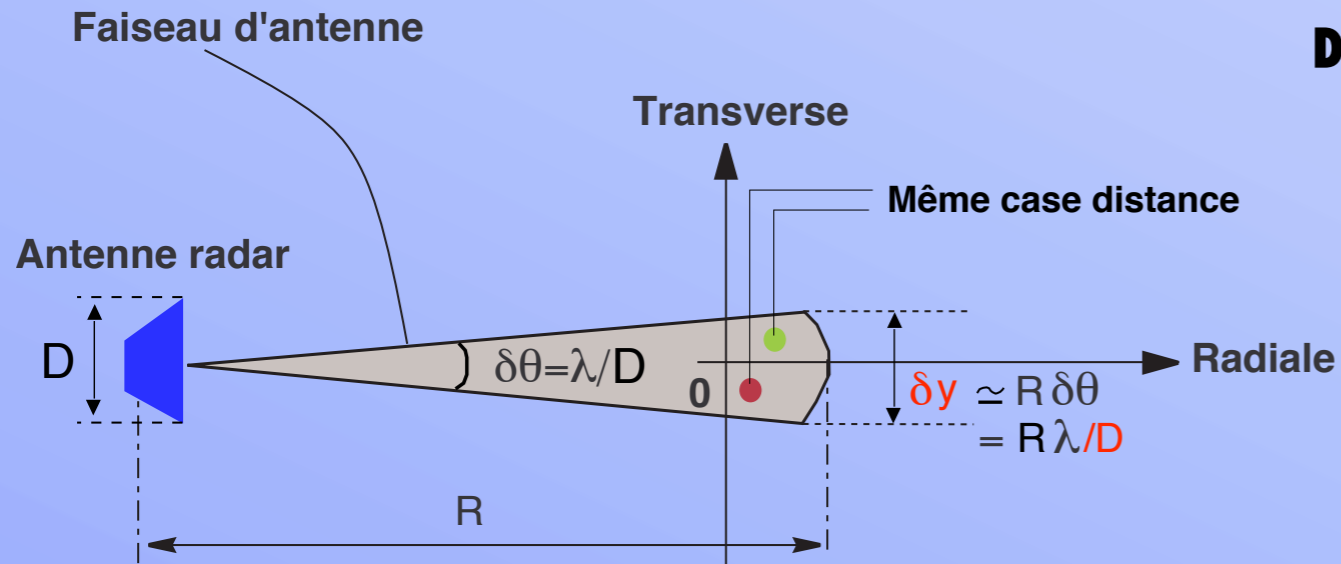
- I. Présentation générale des enjeux en imagerie SAR.**
- II. Mise en lumière de la coloration et de l'anisotropie grâce à l'analyse par ondelettes continues.**
- III. Développement d'un algorithme de discrimination de cibles.**
- IV. Extension de l'analyse par ondelettes continues à la polarimétrie et l'interférométrie.**
- V. Conclusions et perspectives.**

I. Présentation générale des enjeux de l'imagerie SAR

1. Former des images à haute résolution.
2. Exploiter l'information polarimétrique d'une image SAR.
3. Reconstruire une image 3D grâce à l'interférométrie.

Formation d'image à haute résolution

Résolution transverse en radar



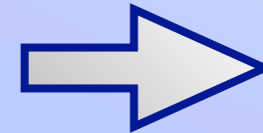
Radar RAMSES* à l'ONERA



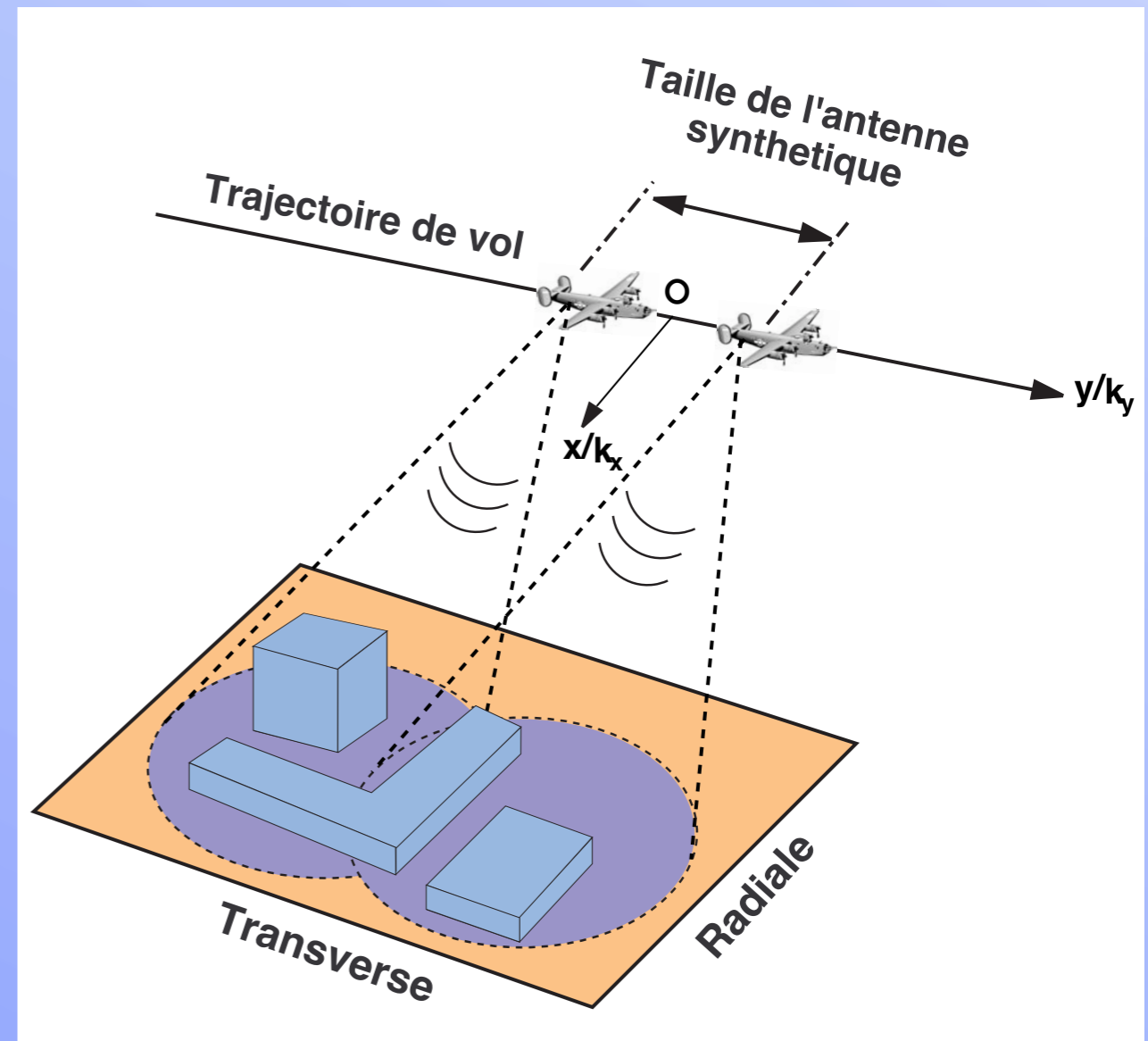
* **RAMSES** : Radar d'Analyse MultiSpectrale et d'Etudes de Signatures

Principe de l'imagerie SAR

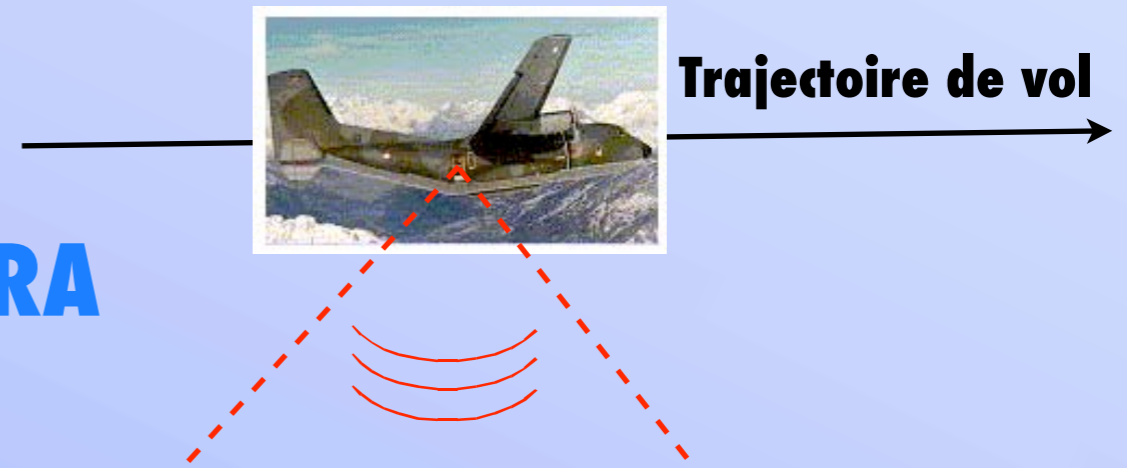
Déplacement de l'antenne
= **antenne virtuelle** de
grande dimension



Meilleure
résolution transverse



Formation d'images SAR à l'ONERA avec le radar RAMSES



Photographie aérienne

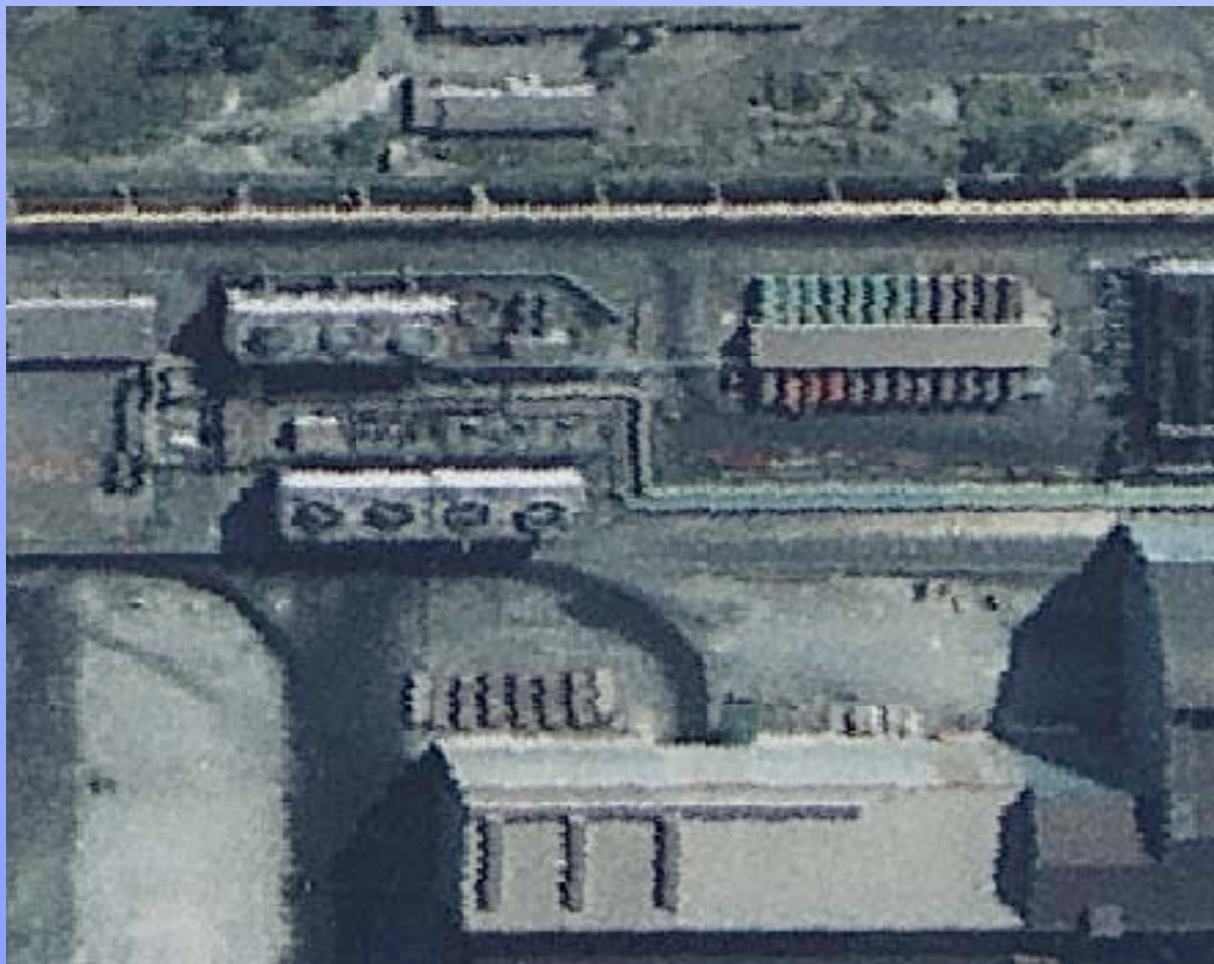
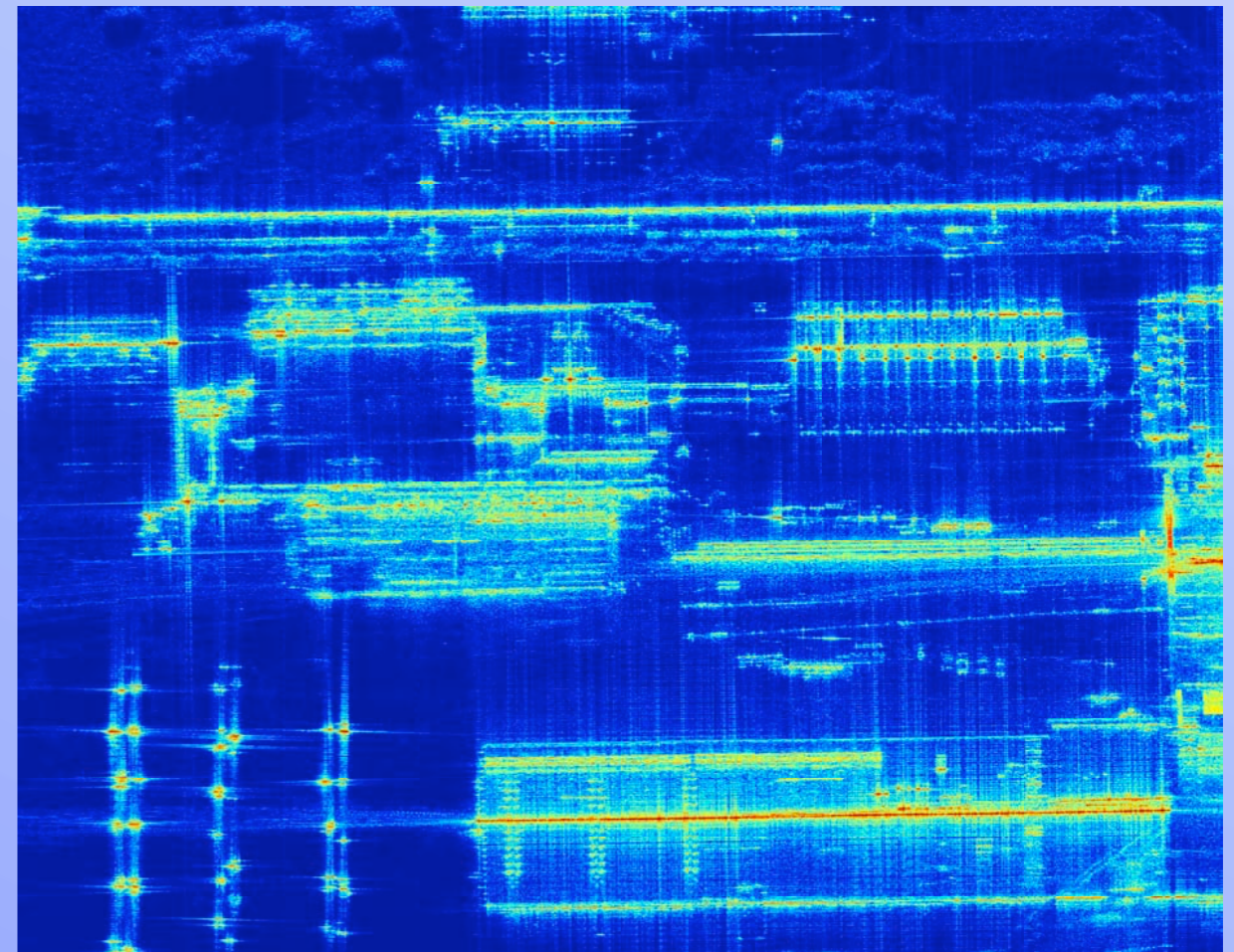


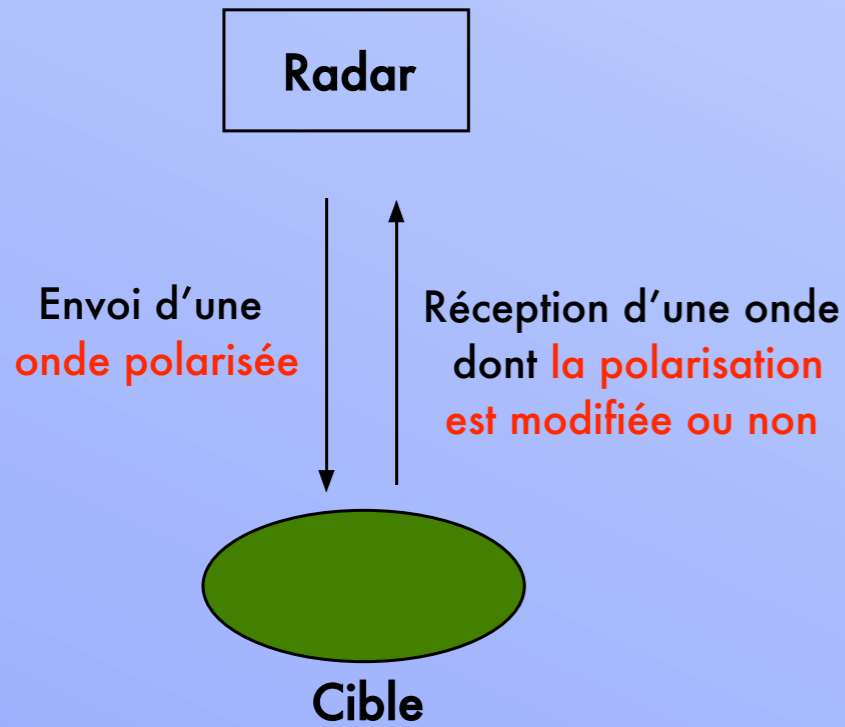
Image SAR



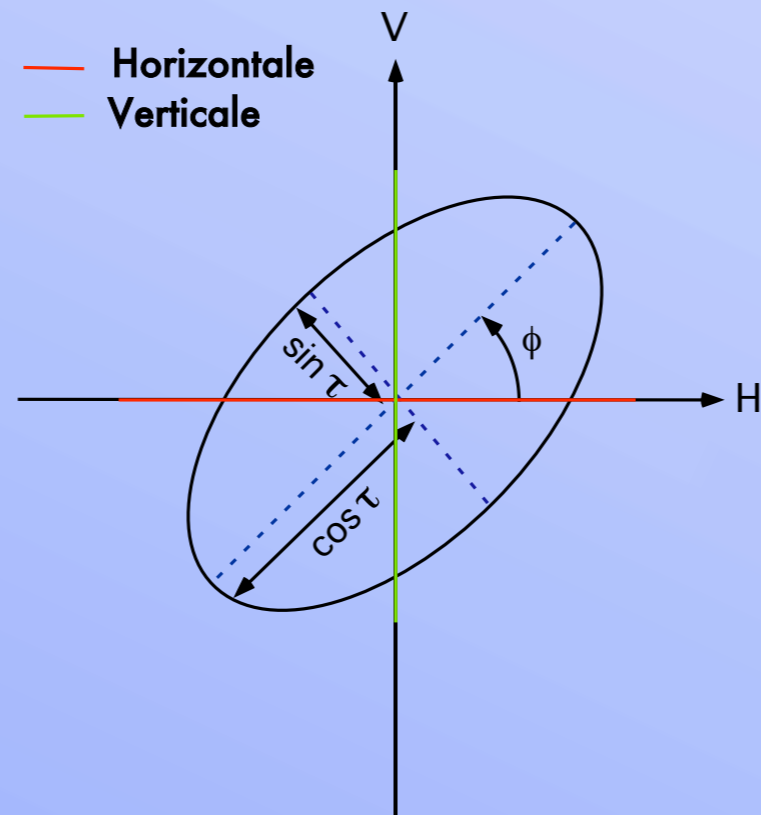
Position radiale

Position transverse

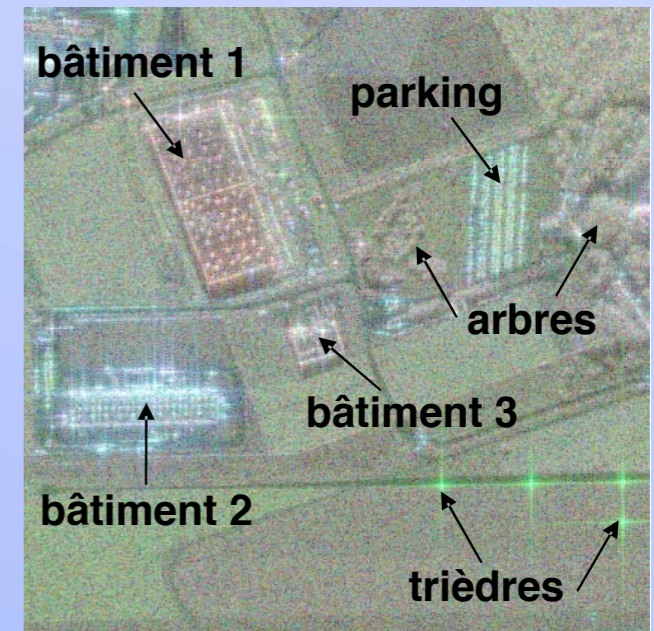
Principe et enjeux de la polarimétrie



Principe de la polarimétrie



Polarisation d'une onde



Hh+Vv

Hh-Vv

2Hv

Image polarimétrique

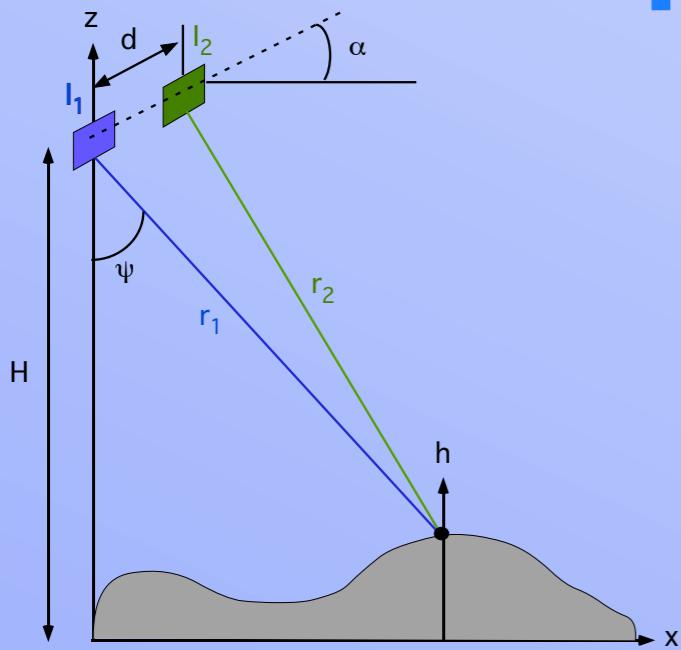
$$S = \begin{pmatrix} S_{Hh} & S_{Hv} \\ S_{Vh} & S_{Vv} \end{pmatrix}$$

Matrice de diffusion

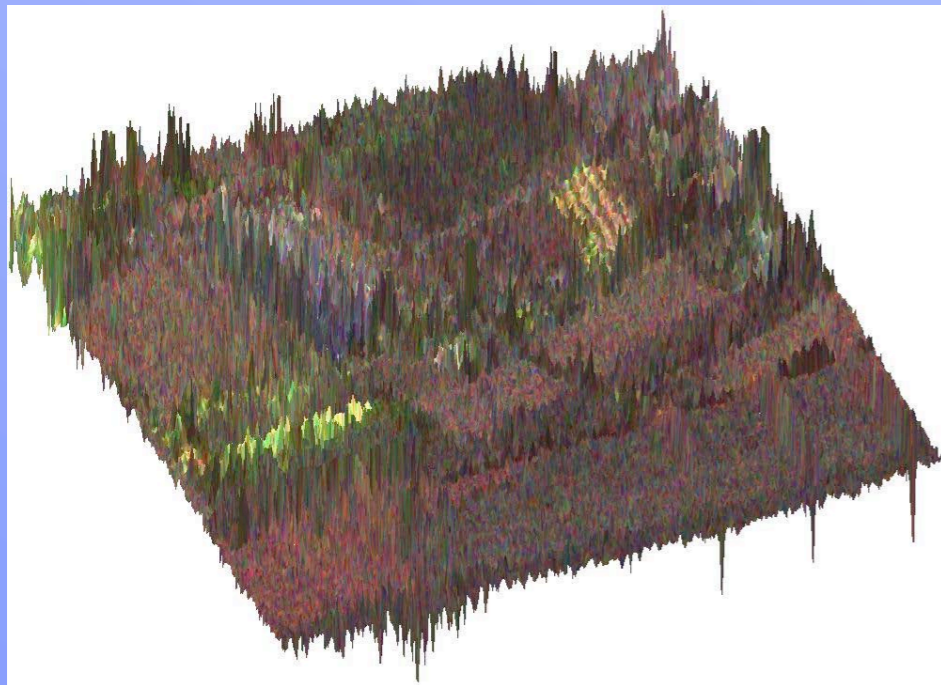
Paramètres polarimétriques
(ex : entropie, paramètres de Muller, ...)

Séparer et identifier
les mécanismes
électromagnétiques
(ex : réflexion par simple
et double rebond, ...)

Principe et objectif de l'interférométrie



Deux antennes faiblement délocalisées spatialement



Interférogramme

Cohérence interférométrique

$$\gamma(x, y) = \frac{\langle S_1(x, y) S_2^*(x, y) \rangle}{\sqrt{\langle S_1(x, y) S_1^*(x, y) \rangle} \sqrt{\langle S_2(x, y) S_2^*(x, y) \rangle}}$$

Argument

Module

$$\Phi(x, y) = \arg[\gamma(x, y)]$$

$$|\gamma(x, y)|$$

Estimation de hauteur

$$h(x, y) = \frac{\Phi(x, y)}{2\pi} h_a$$

Fiabilité de l'estimation

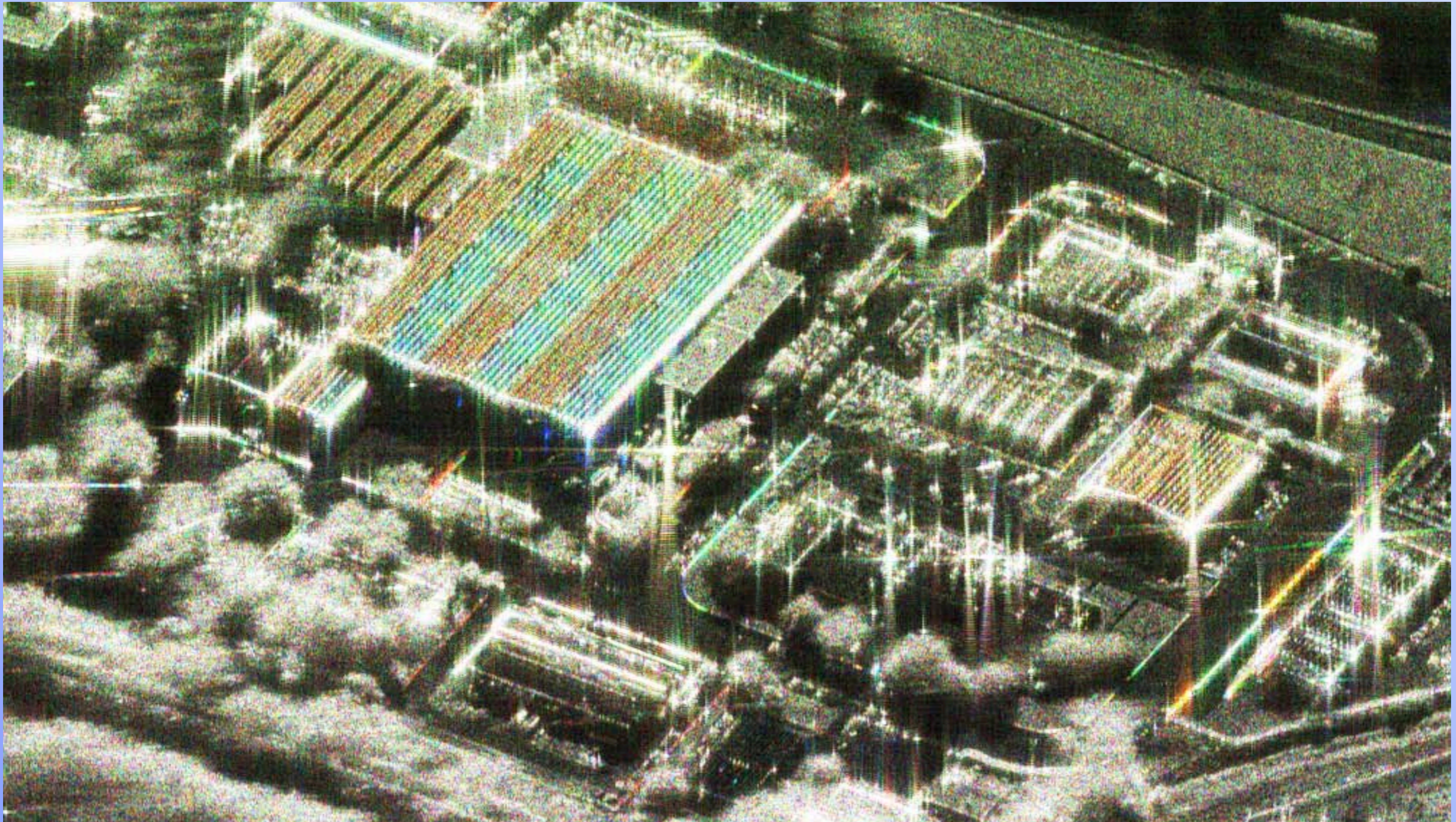
h_a : hauteur d'ambiguïté

Coloration des réflecteurs

Rouge : $f_c = 8.82$ Ghz

Vert : $f_c = 9.37$ Ghz

Bleu : $f_c = 10$ Ghz

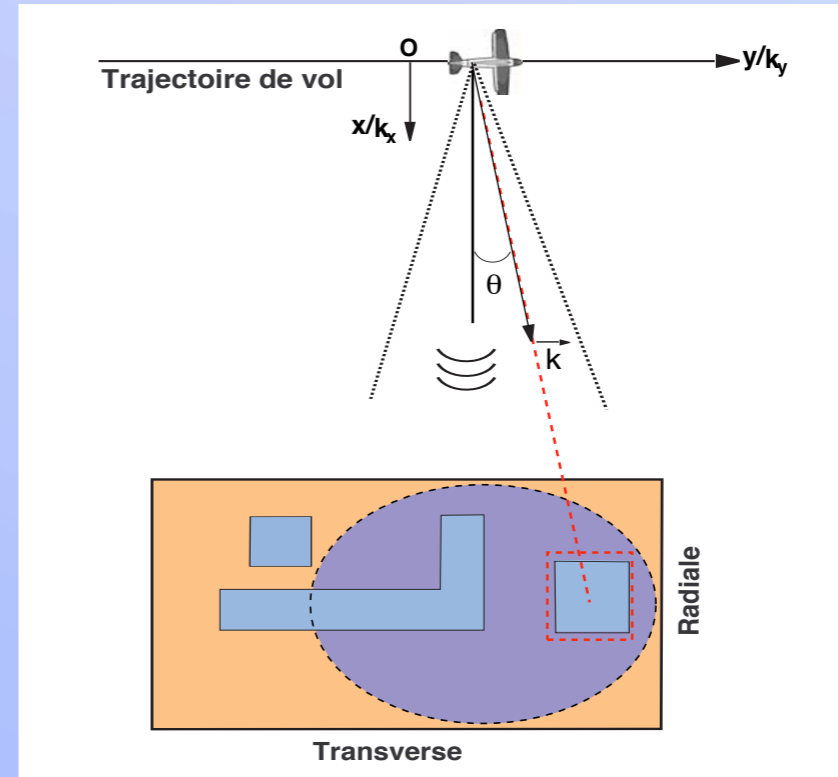
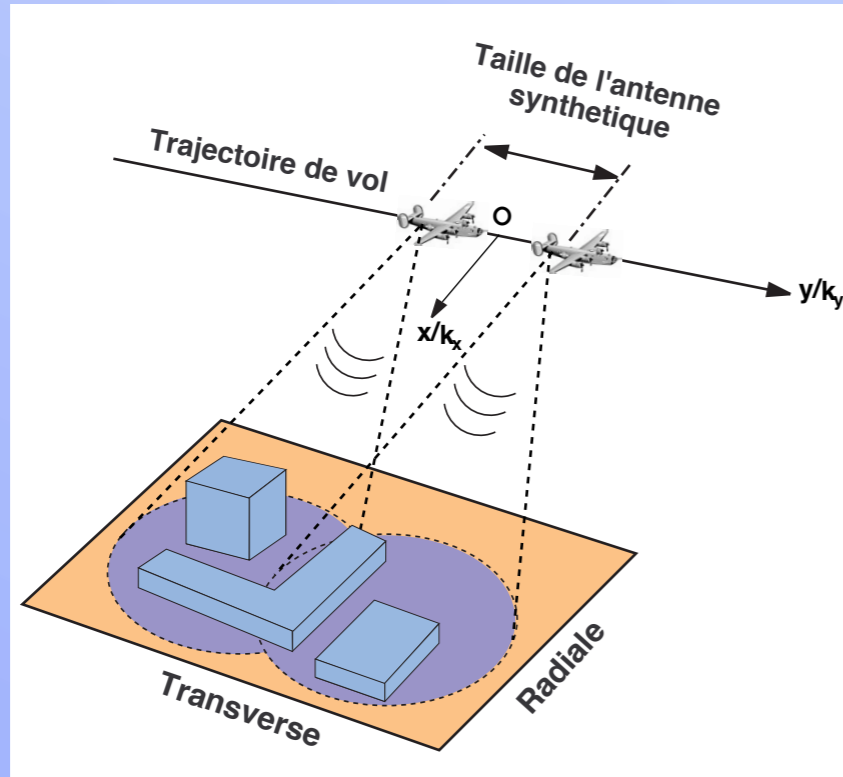


Codage RVB d'une image SAR à l'ONERA

II. Mise en lumière de la coloration et de l'anisotropie grâce à l'analyse par ondelettes continues

1. Principe et limitation de l'imagerie classique.
2. Construction du concept d'hyperimage grâce à l'analyse par ondelettes continues.
3. Mise en lumière de la coloration et de l'anisotropie des réflecteurs.
4. Mise en évidence de signatures énergétiques.

II.1 Principe et limitation de l'imagerie classique



$$\mathcal{F}^{-1}$$

$$\vec{k} \rightarrow \vec{r}$$



Signal SAR

$$H(\vec{k}) = \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i \exp(-j2\pi \vec{k} \cdot \vec{r}_i)$$

Image SAR

$$I(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i \delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$$

$\vec{k} = (k_x, k_y) = (k \cos(\theta), k \sin(\theta))$: vecteur d'onde avec $|\vec{k}| = k = 2f/c$.

α_i : réflectivité du réflecteur **isotrope** et **blanc**.

$\vec{r}_i = (x_i, y_i)$: vecteur position du $i^{\text{ème}}$ diffuseur.

Coloration et anisotropie

$$\alpha_i(f, \theta)$$

Hyperimage $I(\vec{r}, \vec{k})$

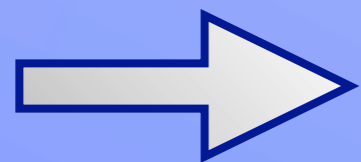
ONERA

Inversion du modèle classique par transformée de Fourier

$$H(\vec{k}) = \int I(\vec{r}) \exp(-j2\pi\vec{k} \cdot \vec{r}) d\vec{r} \quad \xrightarrow{\text{Fourier}} \quad I(\vec{r})$$

Impossibilité d'inverser le modèle des réflecteurs colorés et anisotropes

$$H(\vec{k}) = \int I(\vec{r}, \vec{k}) \exp(-j2\pi\vec{k} \cdot \vec{r}) d\vec{r} \quad \xrightarrow{\text{Fourier}} \quad I(\vec{r}, \vec{k})$$



Nécessité d'introduire l'analyse temps-fréquence.

II.2 Construction d'hyperimage par analyse temps-fréquence

L'analyse temps-fréquence tient compte de la **non-stationnarité** des signaux.

↳ Elle fournit une **représentation** $P_z(t, f)$ **d'un signal** $z(t)$ dans le plan temps-fréquence.

Représentation t-f des signaux bande étroite (classe de Cohen)

Respect du diagramme de covariance relatif aux **translations en temps et en fréquence**.

Exemples : spectrogramme, wigner-ville, ...

Représentation t-f des signaux large bande (classe affine)

Respect du diagramme de covariance relatif au **groupe affine** (translation+transformation d'échelle en temps).

Exemples : scalogramme, distribution unitaire, ...

Distribution de Wigner-Ville

$$I_H(\vec{r}, \vec{k}) = \int_{\mathbb{R}^2} H\left(\vec{k} + \frac{\vec{\xi}}{2}\right) H^*\left(\vec{k} - \frac{\vec{\xi}}{2}\right) e^{j2\pi\vec{\xi}\vec{r}} d\vec{\xi}$$

→ Réelle mais **non positive**.

→ Crée **des interférences** entre les composantes du signal :

$$I_{H_1+H_2}(\vec{r}, \vec{k}) = I_{H_1}(\vec{r}, \vec{k}) + I_{H_2}(\vec{r}, \vec{k}) + 2\mathcal{R}_e \left[I_{H_1 H_2}(\vec{r}, \vec{k}) \right].$$

→ Outil théorique adapté aux **signaux bande étroite**.

Distribution apparentée au spectrogramme

$$I_H(\vec{r}_o, \vec{k}_o) = \left| \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{+\infty} dk k H(k, \theta) F^*(k - k_o, \theta - \theta_o) e^{j2\pi\vec{k}\vec{r}_o} \right|^2$$

→ **Positive**.

→ Vérifie l'inégalité d'Heisenberg : $\sigma_{k_x} \sigma_x \geq \frac{1}{4\pi}$, $\sigma_{k_y} \sigma_y \geq \frac{1}{4\pi}$.

→ Outil théorique adapté aux **signaux bande étroite**.

Construction de l'hyperimage grâce à l'analyse par ondelettes continues

$$I_H(\vec{r}_o, \vec{k}_o) = \frac{1}{A_\phi} \left| \int_{\mathbb{R}^2} H(\vec{k}) \Psi_{\vec{k}_o, \vec{r}_o}^*(\vec{k}) d\vec{k} \right|^2$$

avec
$$\Psi_{\vec{k}_o, \vec{r}_o}(\vec{k}) = \frac{1}{k_o} \phi\left(\frac{1}{k_o} \mathcal{R}_{\theta_o}^{-1} \vec{k}\right) e^{-j2\pi \vec{k} \vec{r}_o}$$
$$= \frac{1}{k_o} \phi\left(\frac{k}{k_o}, \theta - \theta_o\right) e^{-j2\pi \vec{k} \vec{r}_o}$$

et
$$A_\phi = \int_{\mathbb{R}^2} \left| \phi(\vec{k}) \right|^2 \frac{d\vec{k}}{k^2} < +\infty$$

→ **Positive.**

→ Vérifie l'inégalité d'heisenberg : $\sigma_{k_x} \sigma_x \geq \frac{1}{4\pi}$, $\sigma_{k_y} \sigma_y \geq \frac{1}{4\pi}$.

→ Outil théorique adapté aux **signaux large bande.**

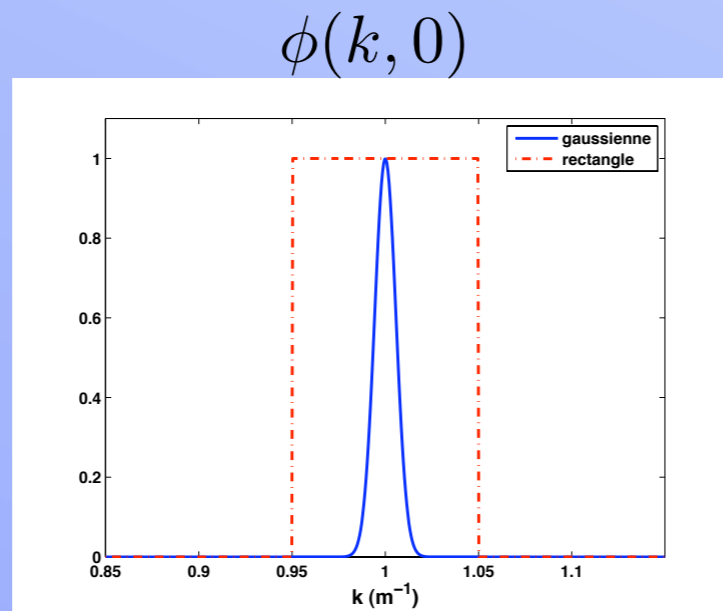
Information sur l'ondelette mère

L'ondelette mère $\phi(k, \theta)$ est localisée autour de $(k, \theta) = (1, 0)$.

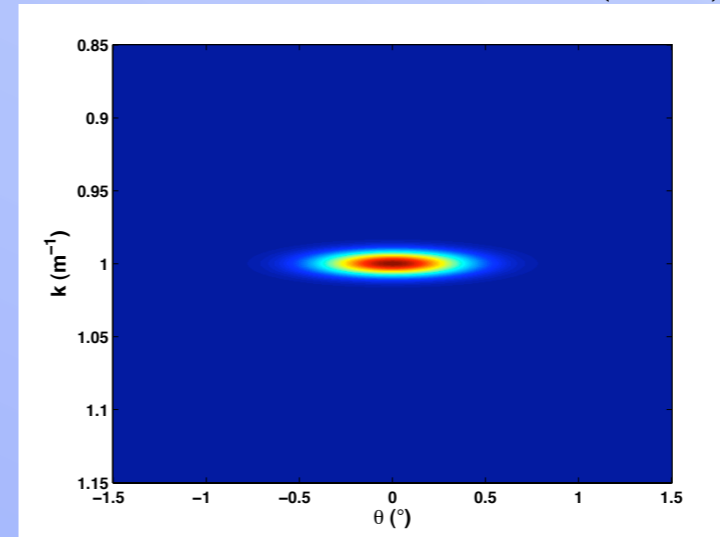
En pratique : elle est choisie gaussienne en fréquence et en angle

$$\phi(k, \theta) = \underset{[-\delta/2 \ \delta/2]}{\text{rect}}(k - 1) e^{-(k-1)^2 / \sigma_k^2} e^{-\theta^2 / \sigma_\theta^2}$$

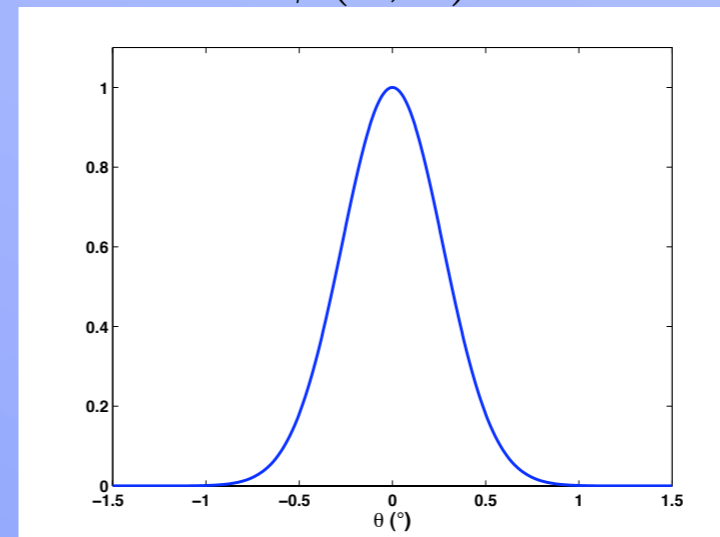
en fréquence



Ondelette mère $\phi(k, \theta)$



$\phi(1, \theta)$



en angle

Admissibilité de l'ondelette

$$A_\phi = \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{+\infty} dk \frac{|\phi(k, \theta)|^2}{k} < +\infty$$

La transformée en ondelettes en pratique

Image $I(x, y)$

Fourier

Spectre $H(k_x, k_y)$

Décomposition

$\langle H, \Psi_{\vec{r}_o, \vec{k}_o} \rangle$

$\frac{1}{A_\phi} |\cdot|^2$

$I_H(\vec{r}_o, \vec{k}_o)$

II.3 Mise en lumière de la coloration et de l'anisotropie

Réécriture de l'hyperimage

$$I_H(\vec{r}, \vec{k}) \equiv I_H(x, y; f, \theta)$$

$$I_H(x, y; f_o, \theta_o)$$



Répartition spatiale des réflecteurs répondant à (f_o, θ_o) .

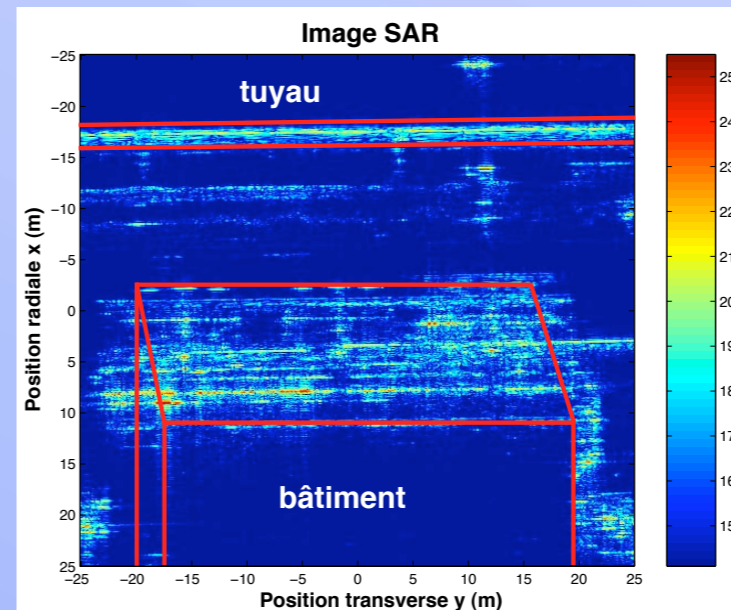
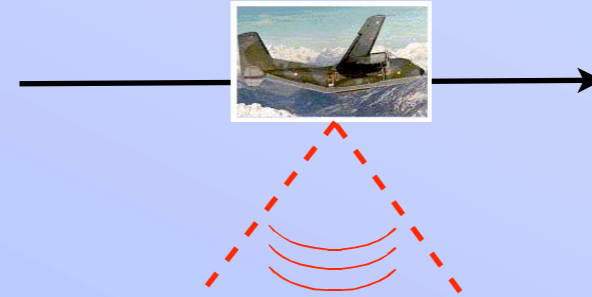
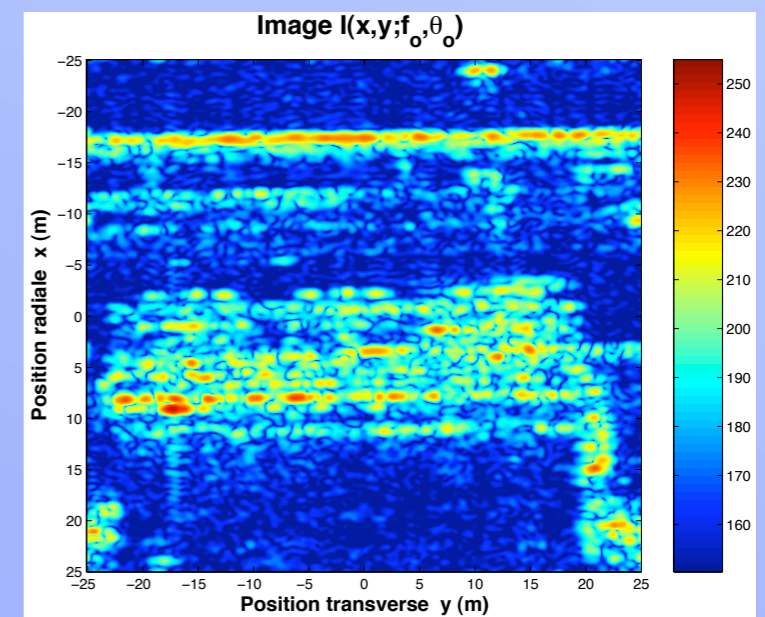
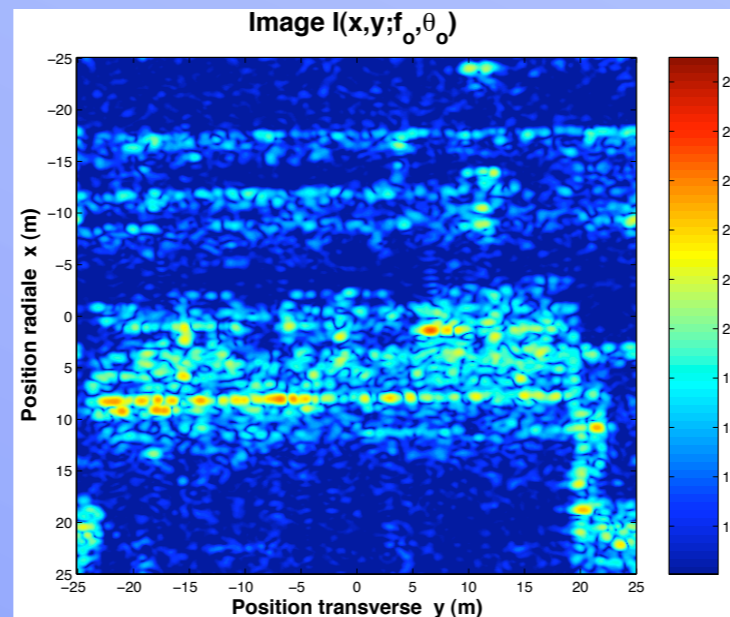


Image SAR initiale

Réflecteurs **anisotropes** sur le tuyau.



$$(f_o, \theta_o) = (14.25 \text{ Ghz}, -1^\circ)$$

$$(f_o, \theta_o) = (14.25 \text{ Ghz}, 0.66^\circ)$$

$$I_H(x_o, y_o; f, \theta)$$



Répartition d'énergie du réflecteur localisé en (x_o, y_o) .

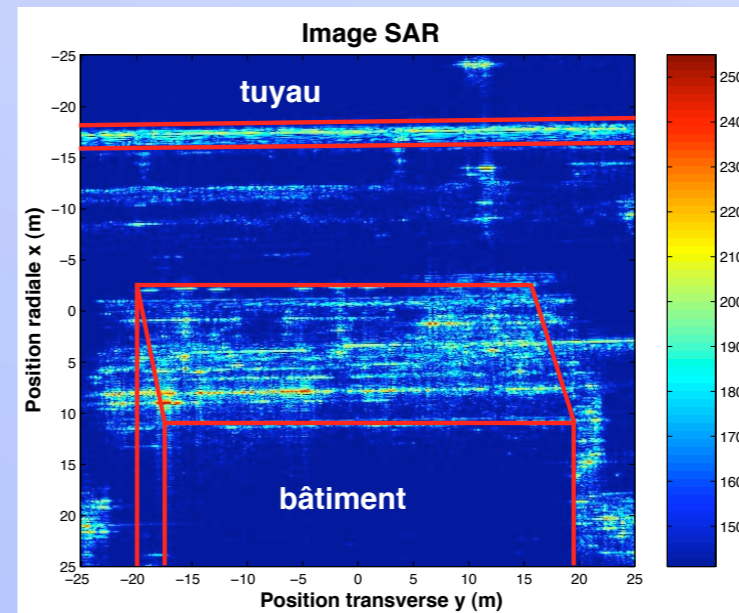
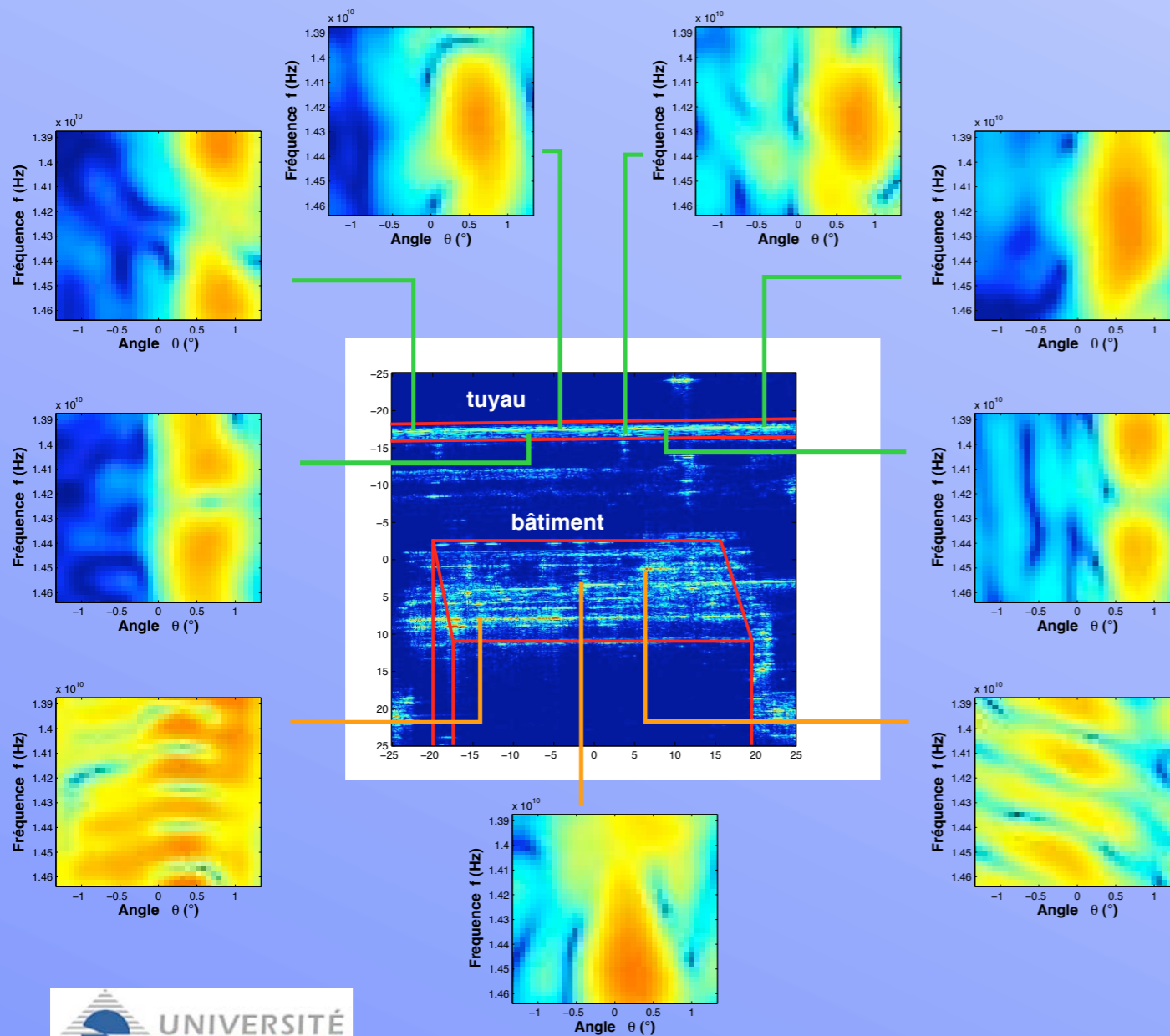
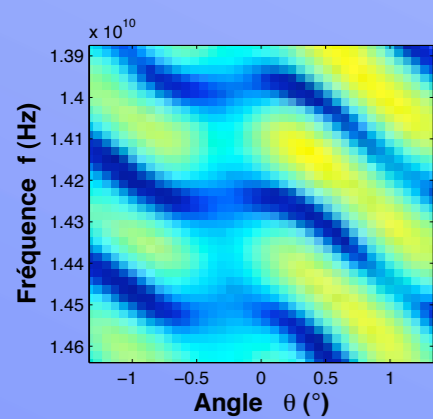
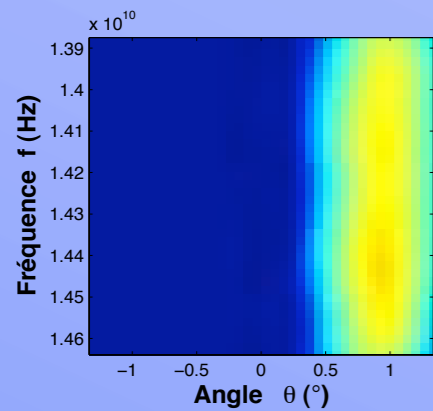
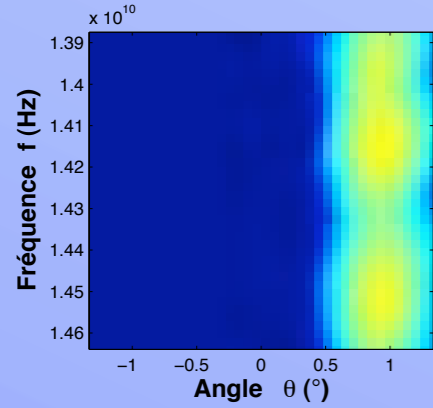
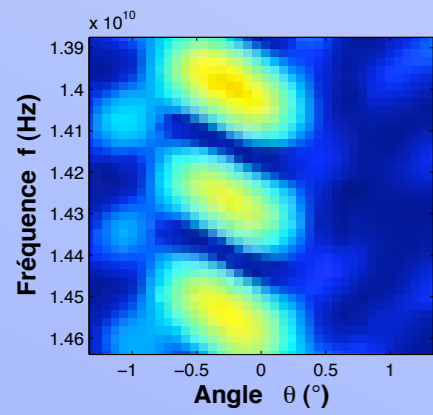


Image SAR initiale



— tuyau
— toit bâtiment

Réflecteurs colorés et anisotropes.



— cuves
— passerelle
— escalier

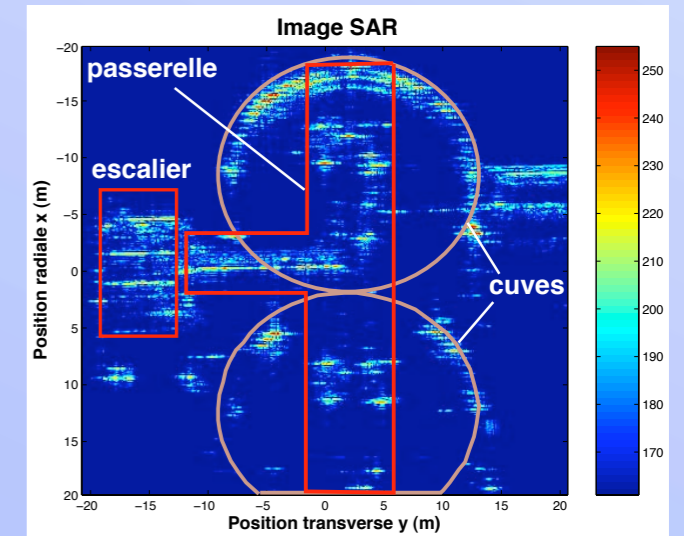
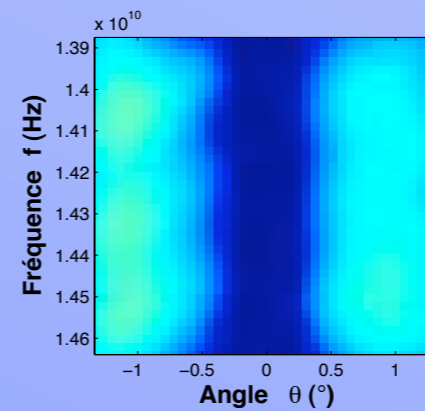
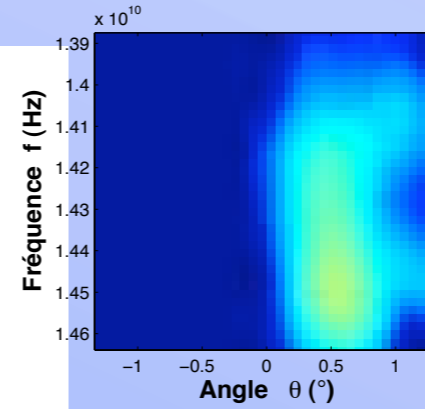
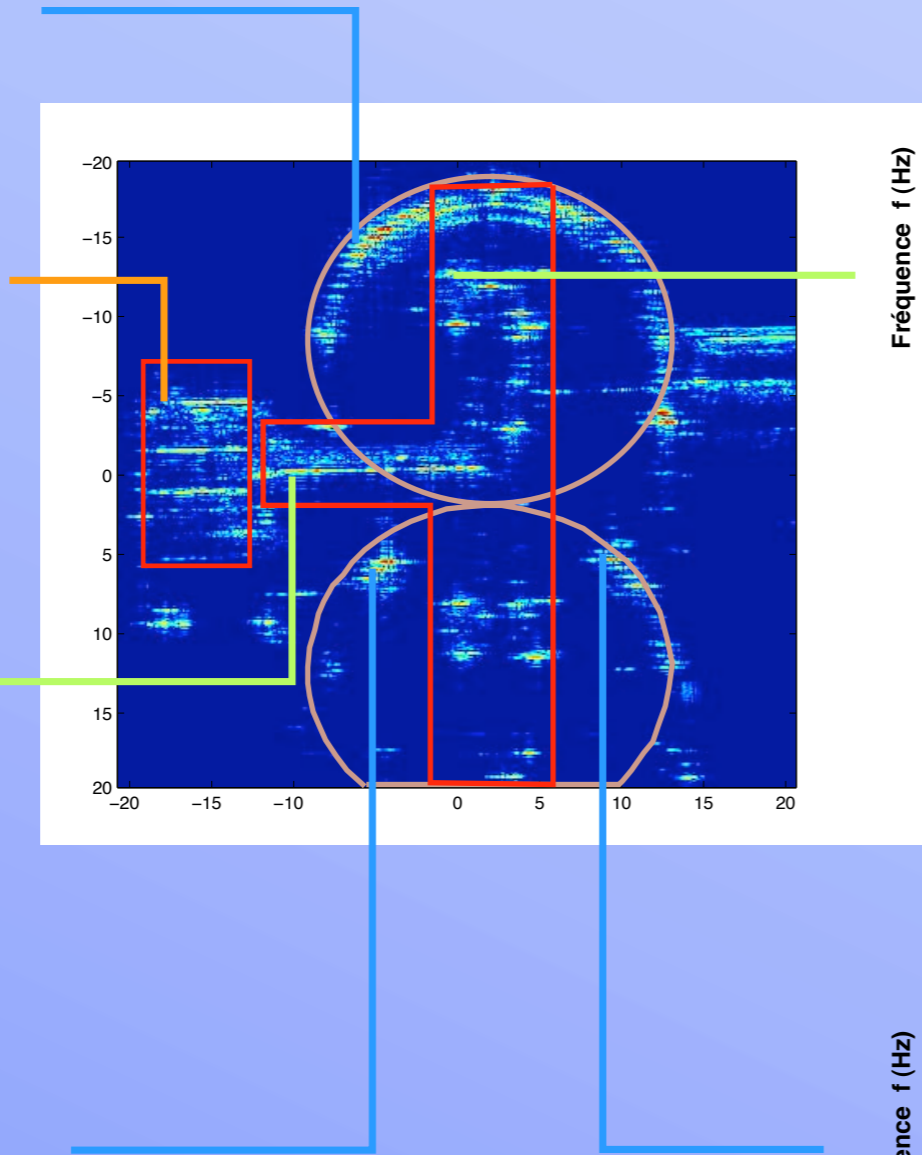
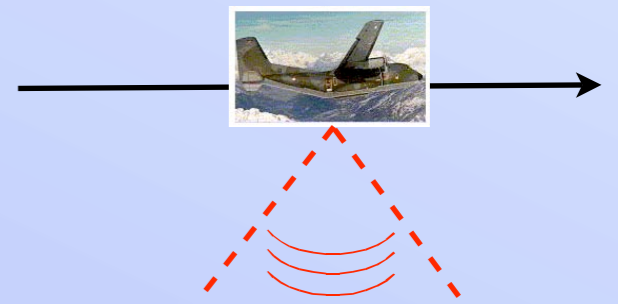


Image SAR

Réflecteurs **colorés,**
blancs et anisotropes.

II.4 Mise en évidence de signatures énergétiques

Bâtiment et tuyau

- tuyau
- arête bâtiment
- toit bâtiment

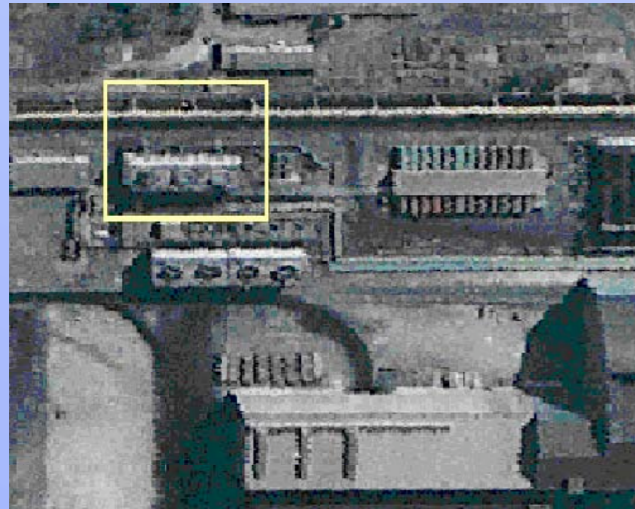


Photo aérienne (IGN)

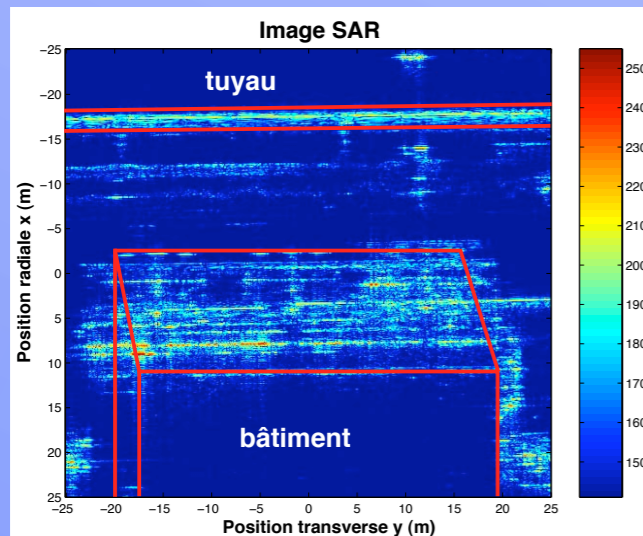
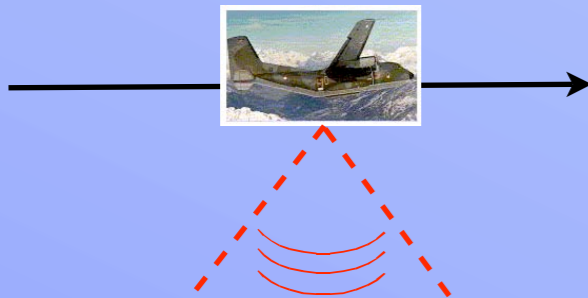
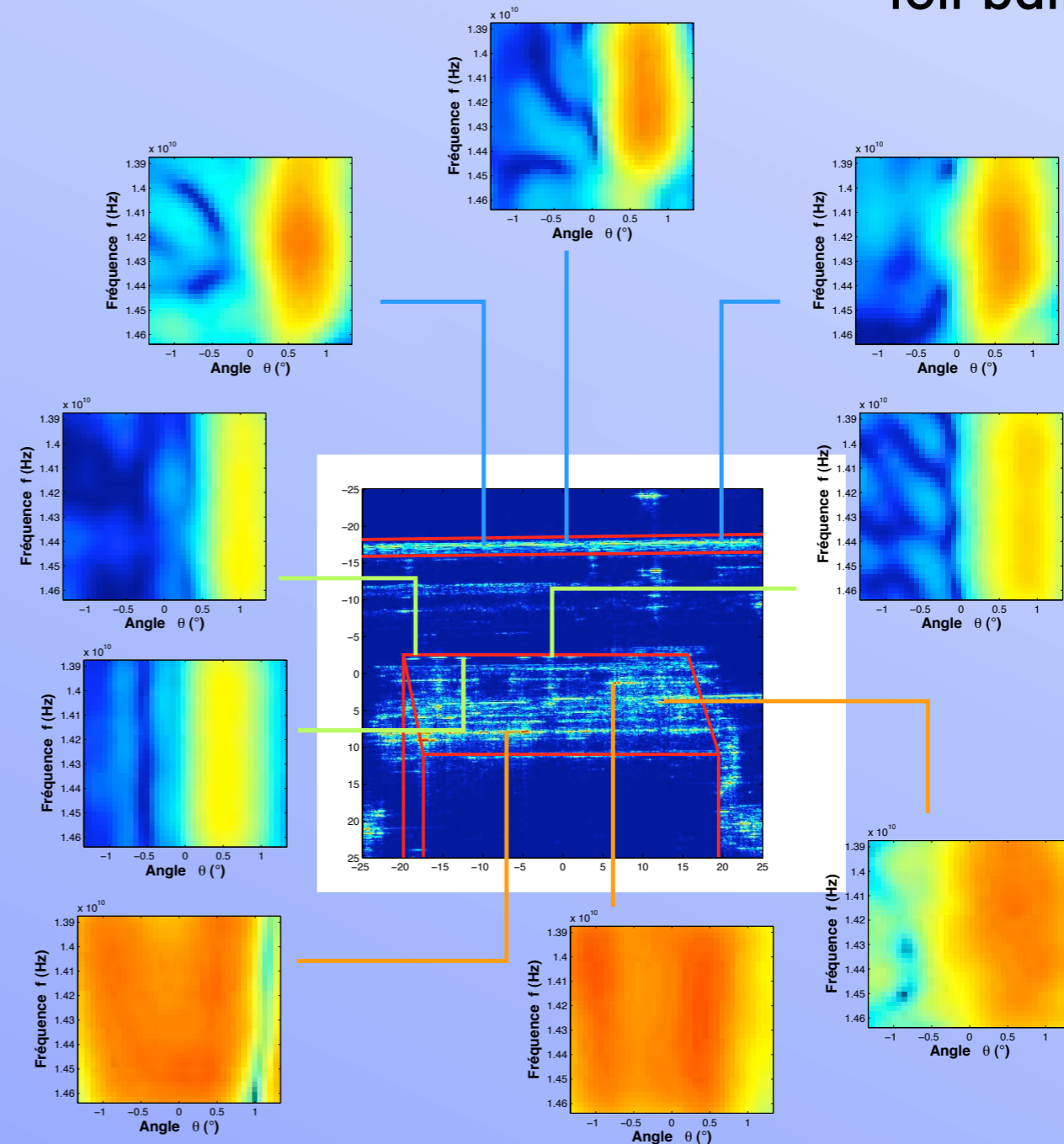


Image SAR



Distribution d'énergie de différents réflecteurs.

Paire de cuves

- cuves
- passerelle
- escalier



Photo aérienne (IGN)

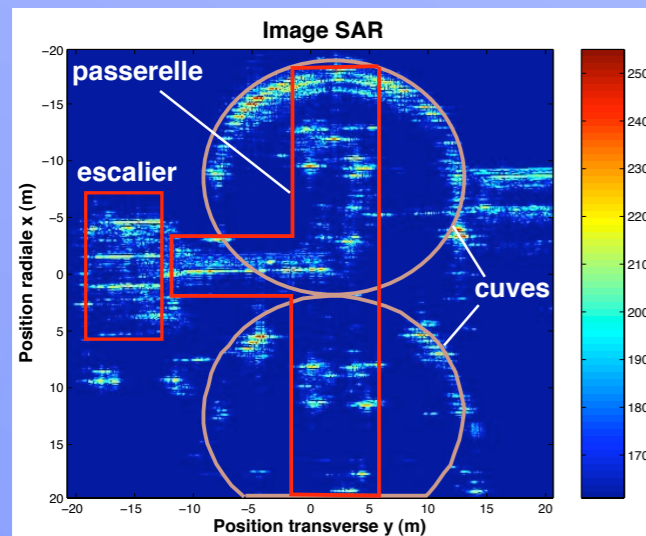
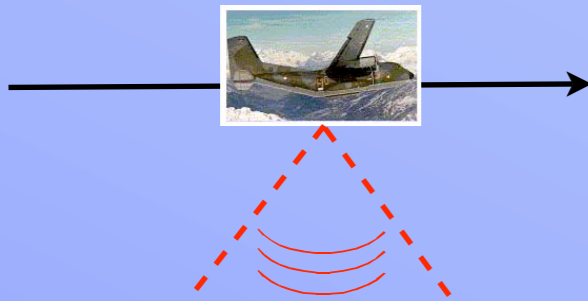
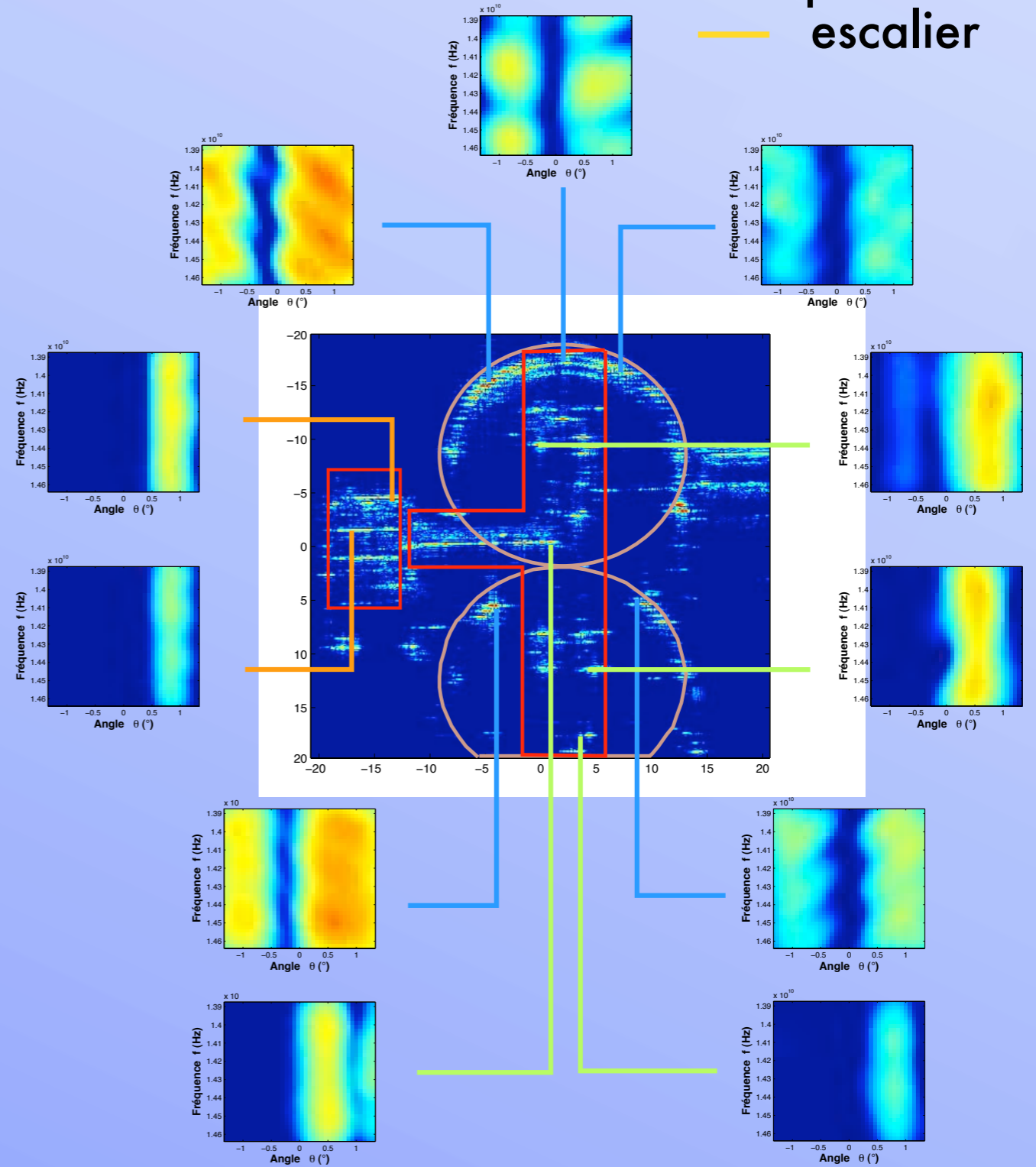


Image SAR



Distribution d'énergie de différents réflecteurs.

Ensemble de bâtiments

— arête bâtiment central
— toit bâtiments latéraux



Photo aérienne (IGN)

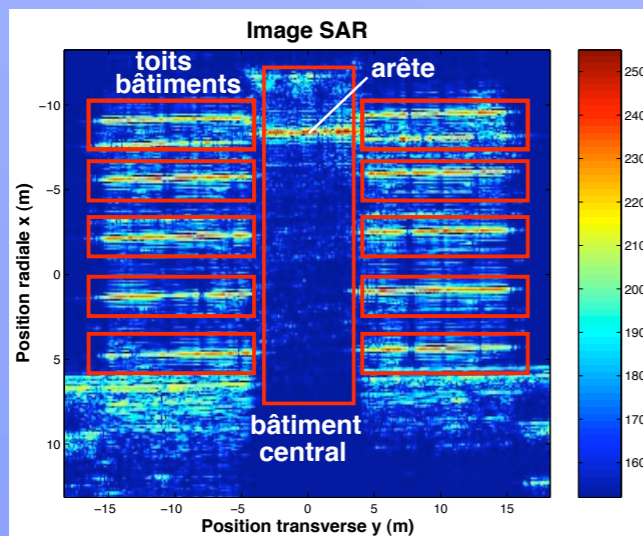
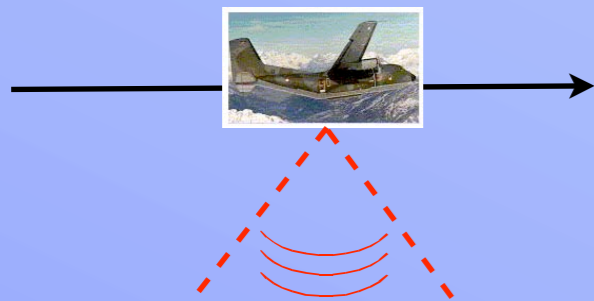
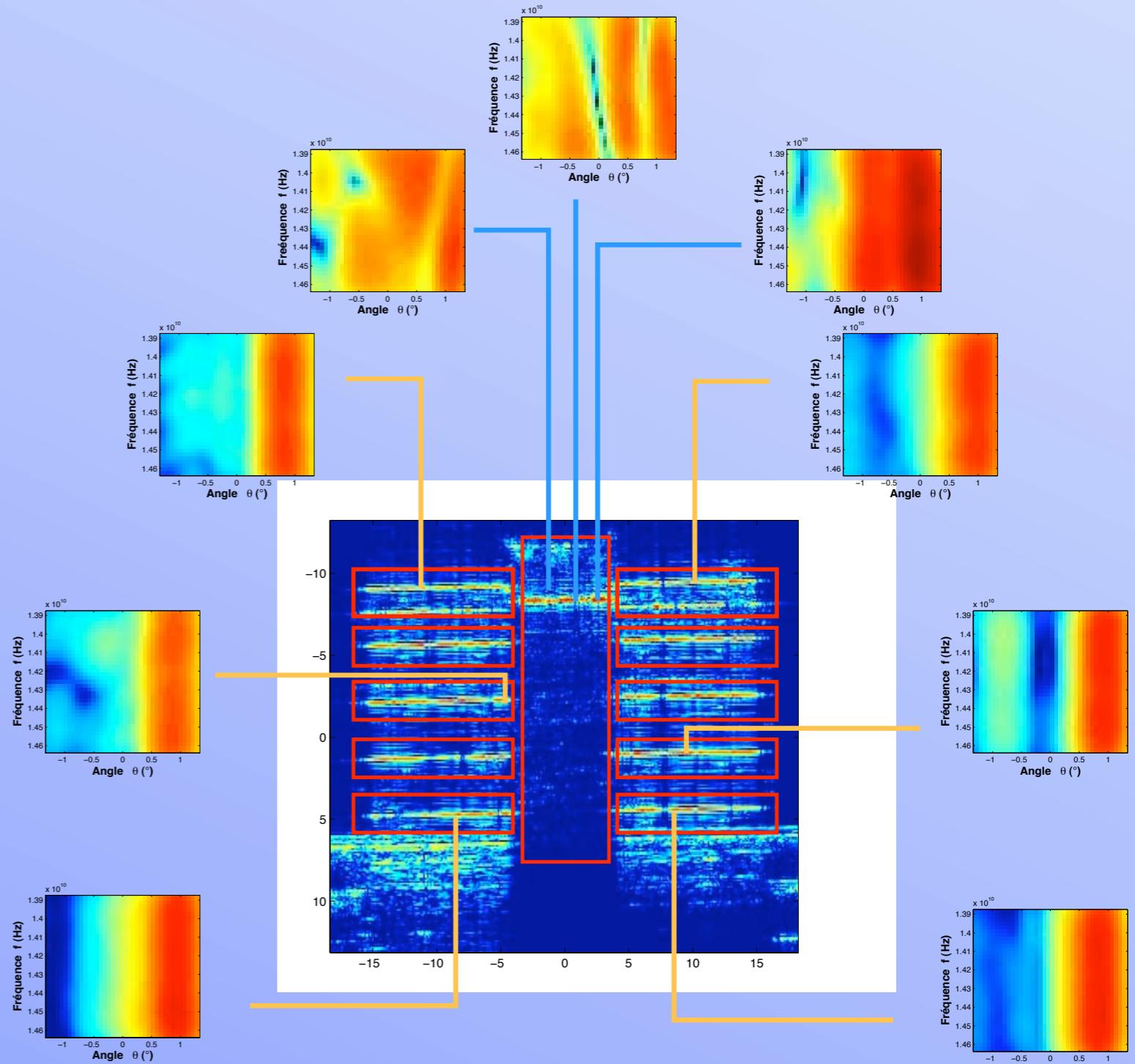


Image SAR



Distribution d'énergie de différents réflecteurs.

Observations et premières conclusions

**Distributions énergétiques
= signatures**



**Différentes classes
de réflecteurs**



Différents types d'objets

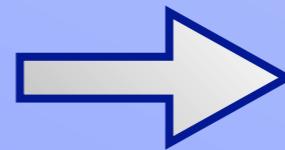
**Modèle issu de la théorie
géométrique de la diffraction**

$$\alpha_i(f, \theta) = F(f, \theta; \gamma_i, \nu_i, L_i; \theta_i)$$

forme

taille

réflecteurs localisés
orientation



Séparer les objets.

III. Développement d'un algorithme de discrimination de cibles

1. Description de l'algorithme.
2. Résultats de discrimination d'objets.
3. Modification de l'algorithme et résultat.

III.1 Description de l'algorithme

Algorithme de discrimination

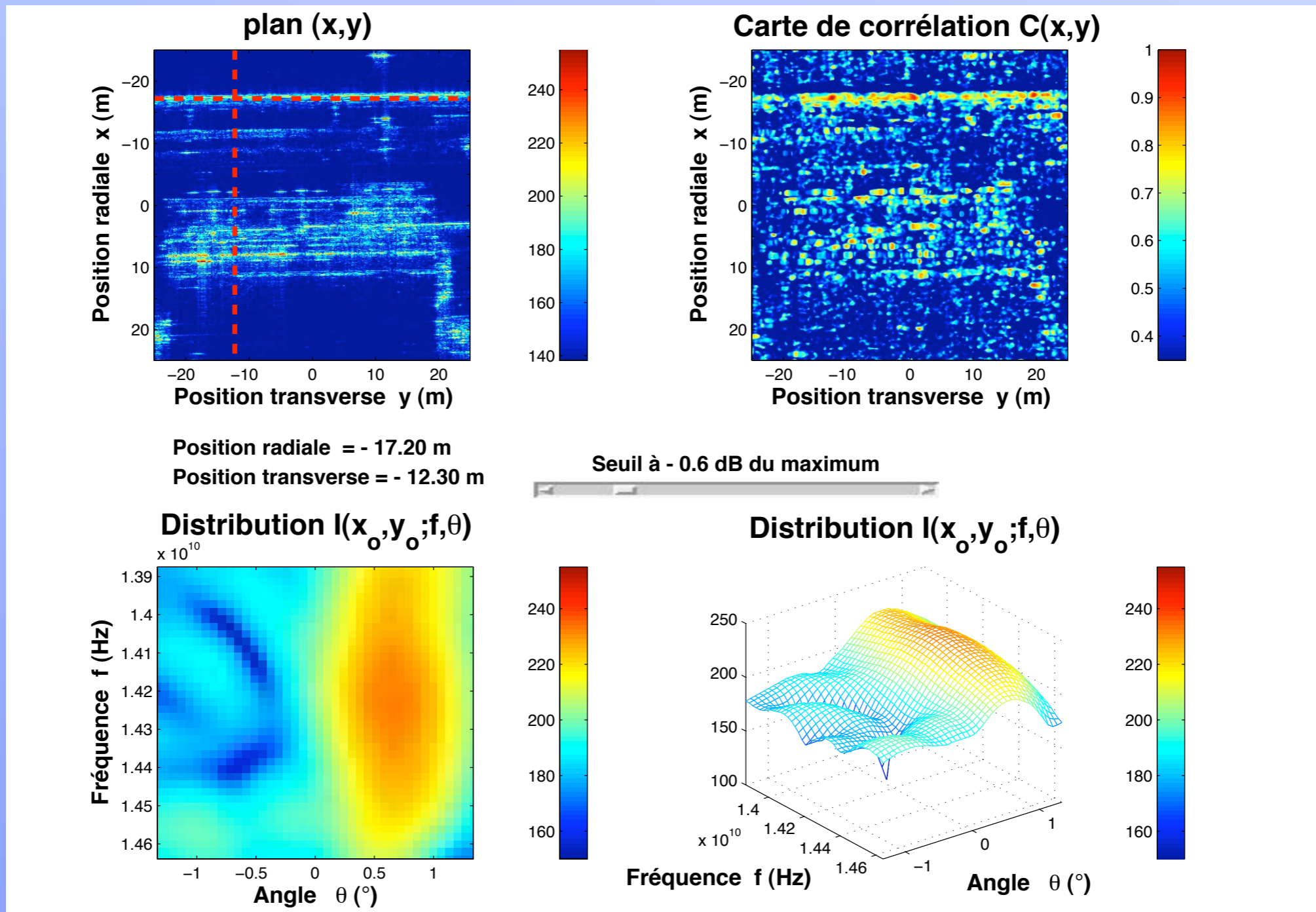
- (1)** Choisir réflecteur de position $(x_{ref}, y_{ref}) \longrightarrow I(x_{ref}, y_{ref}; f, \theta) = \text{Référence.}$
- (2)** Pour chaque pixel (i, j) de l'image

$$C_{ref}(i, j) := \frac{\int I(x_{ref}, y_{ref}; f, \theta) I(x_i, y_j; f, \theta) df d\theta}{\sqrt{E_{ref}} \sqrt{E_{i,j}}}$$

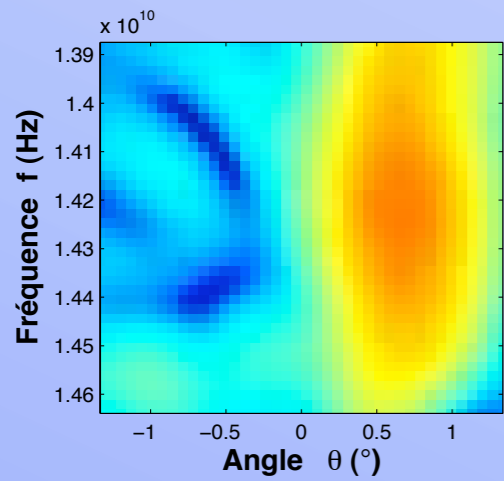
où $E_{i,j} = \int |I(x_i, y_j; f, \theta)|^2 df d\theta$ et $E_{ref} = \int |I(x_{ref}, y_{ref}; f, \theta)|^2 df d\theta.$

III.2 Résultats de discrimination de cibles

Interface graphique illustrant l'algorithme de discrimination d'objets



Discrimination du tuyau métallique



— référence sur tuyau

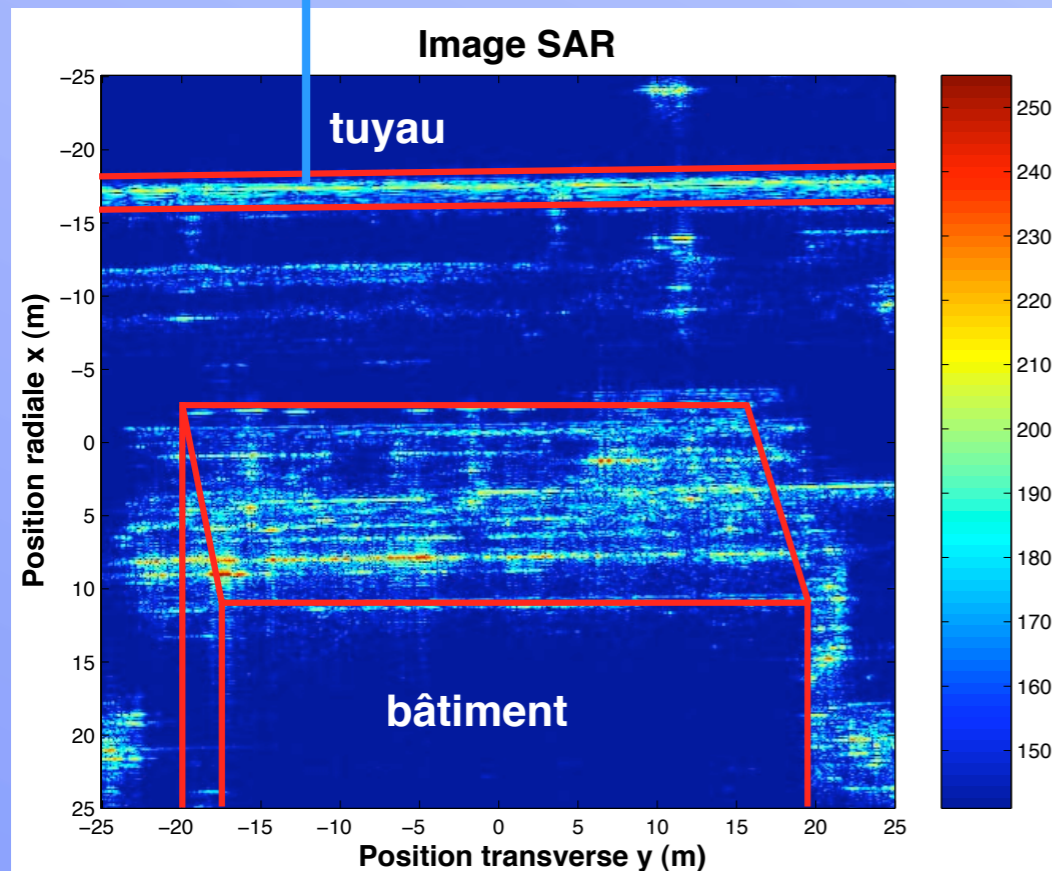
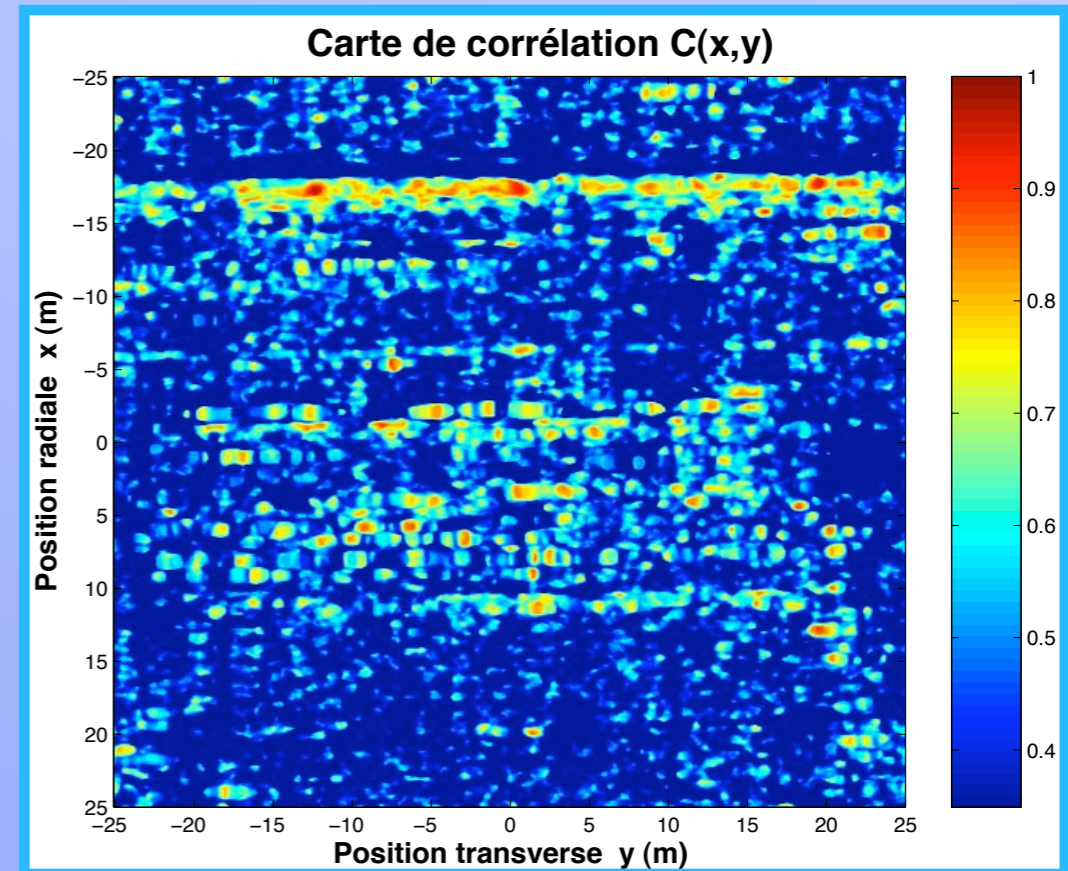


Image SAR



Carte de corrélation issue de l'algorithme

Séparation d'une paire de cuves et d'une passerelle

- référence sur cuve
- référence sur passerelle

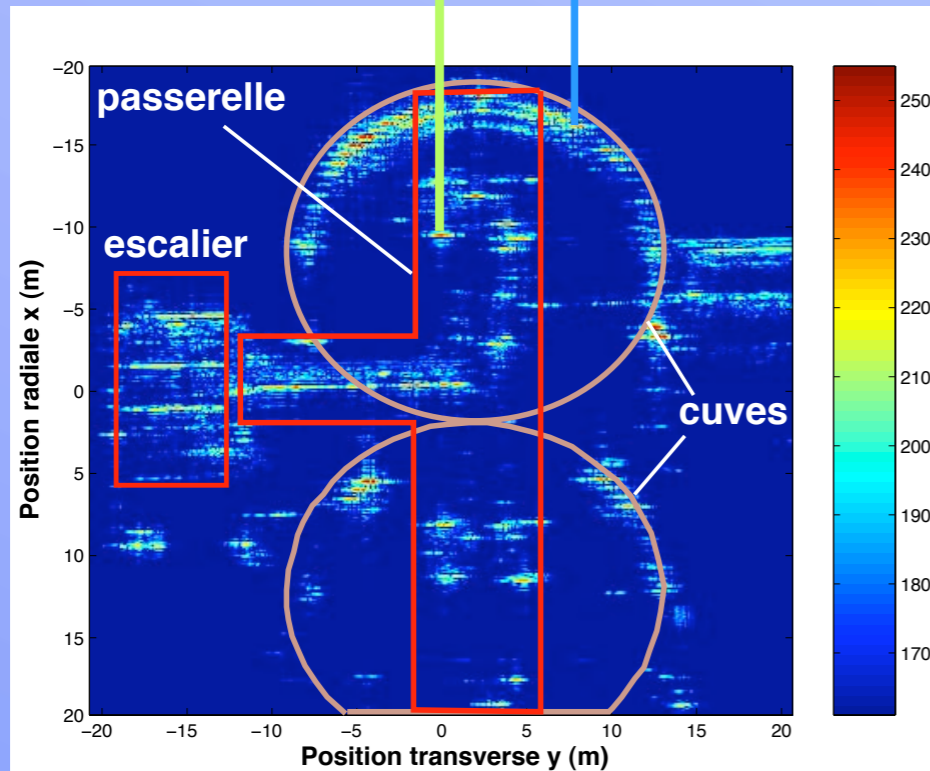
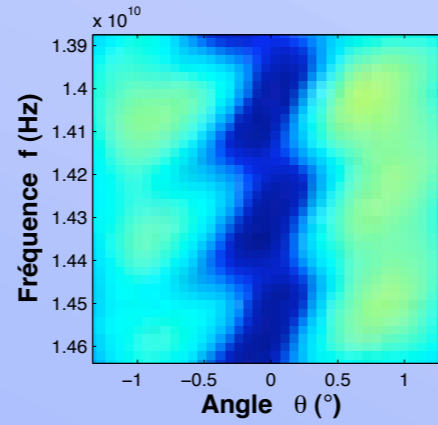
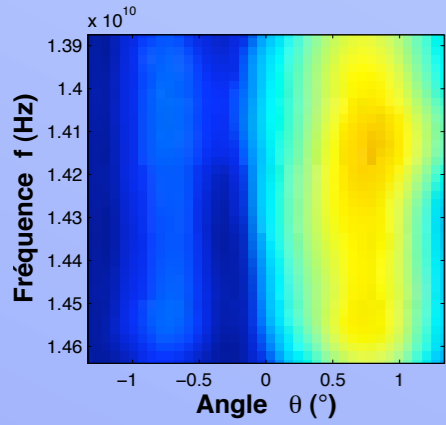
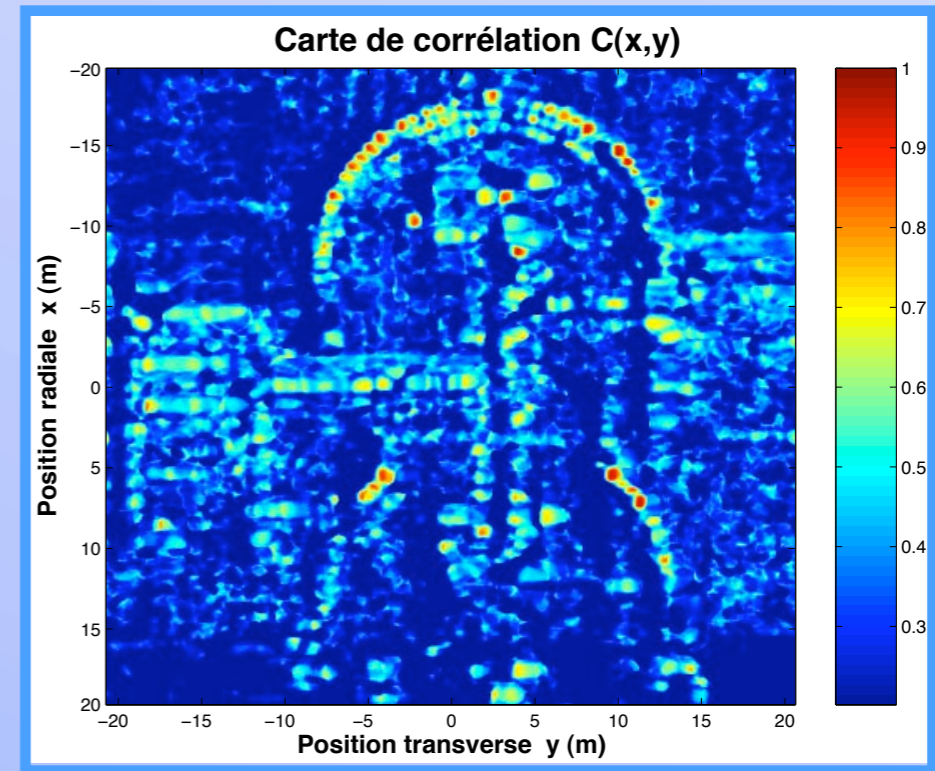
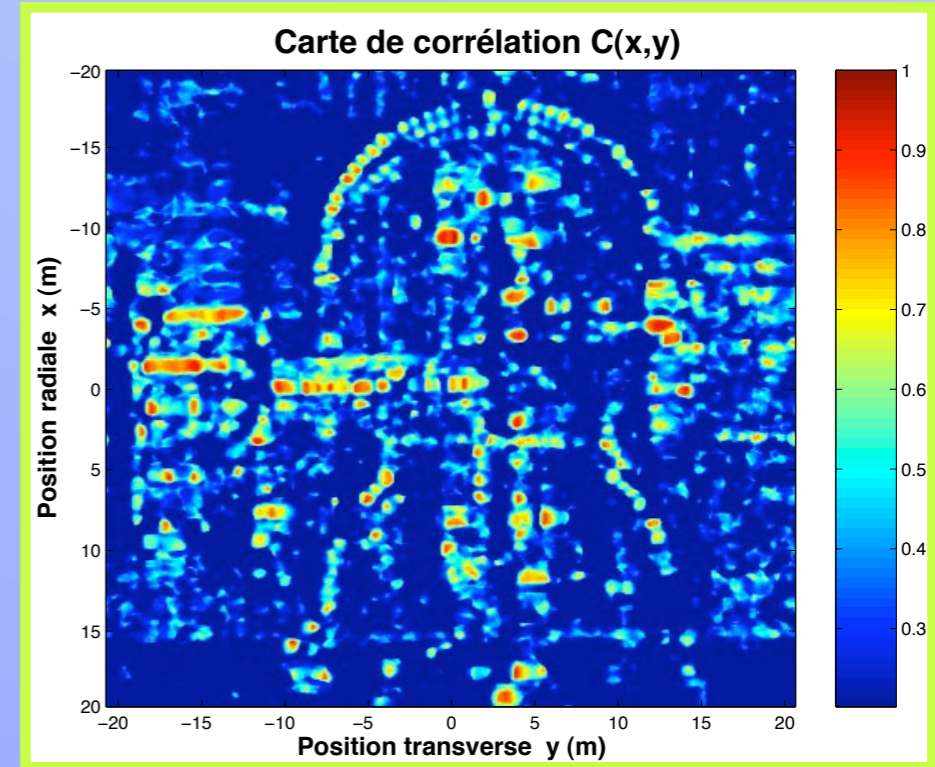


Image SAR

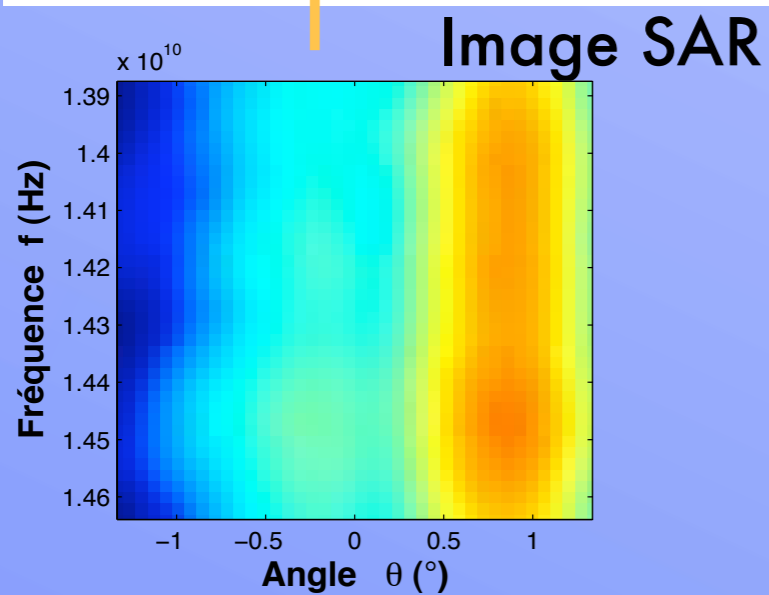
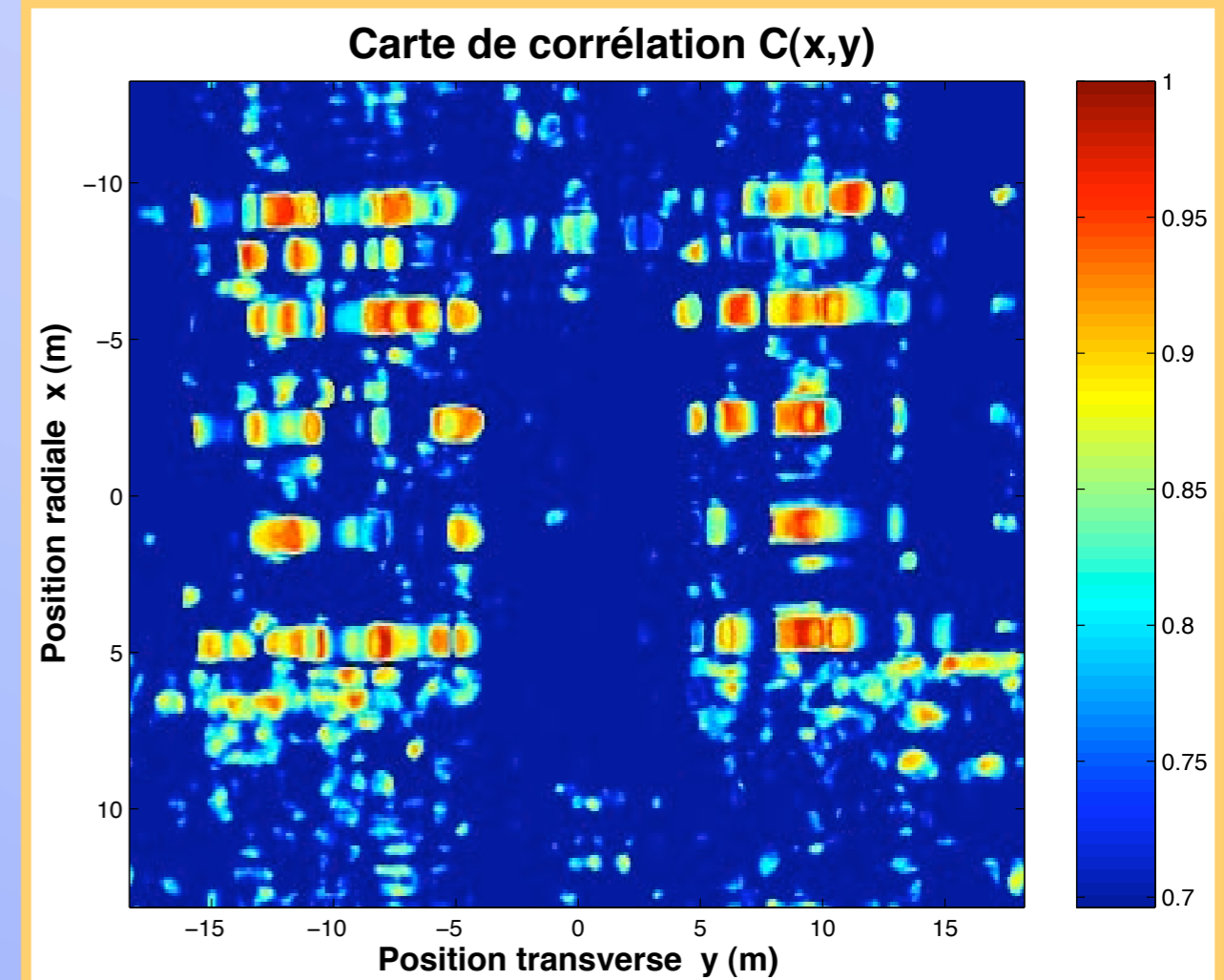
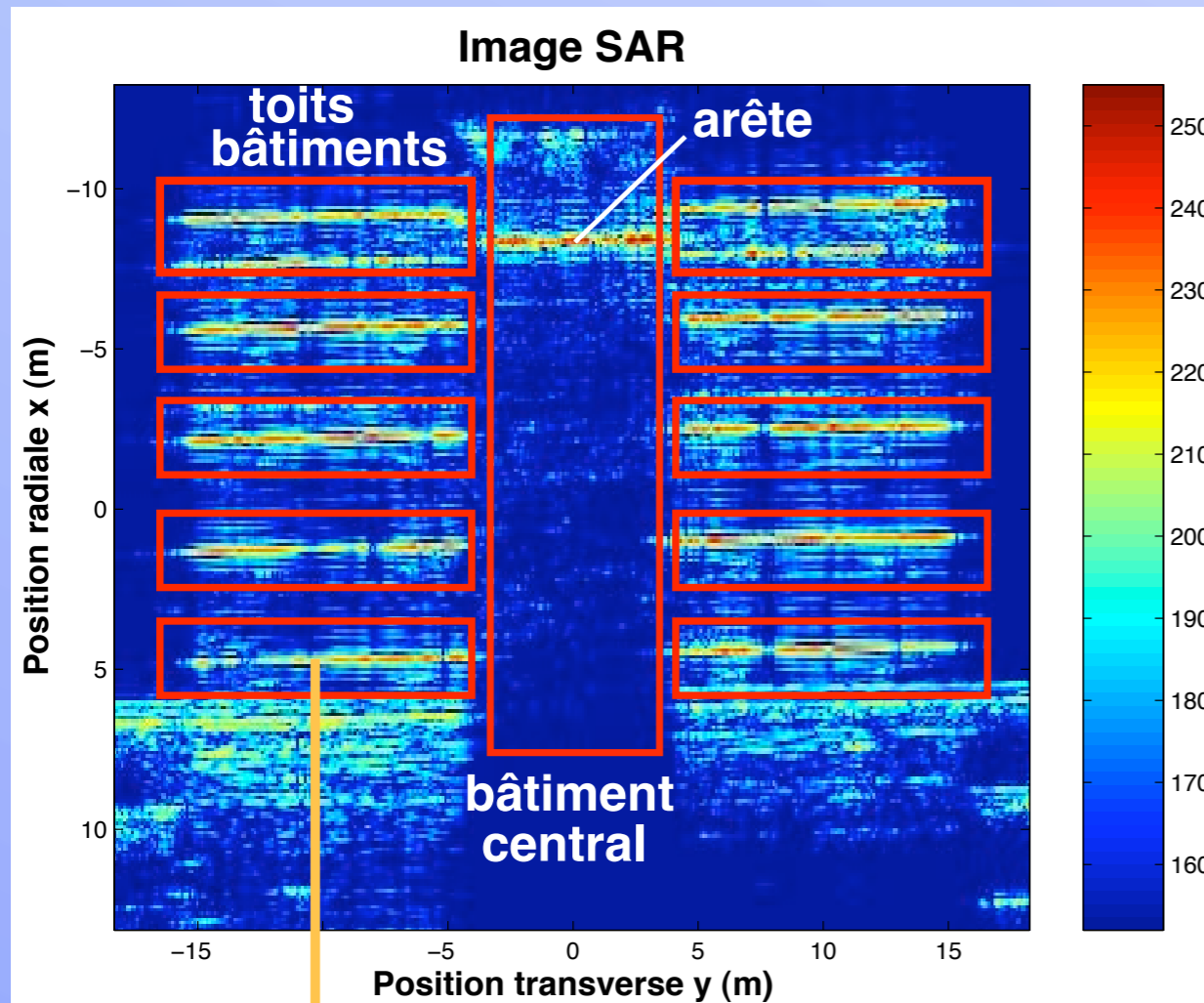


Cartes de corrélation



Suppression de l'arête d'un bâtiment

— référence sur bâtiment latéral



Carte de corrélation

III.3 Modification de l'algorithme et résultats

$$C_{ref}(i, j) := \frac{\int I(x_{ref}, y_{ref}; f, \theta) I(x_i, y_j; f, \theta) df d\theta}{\sqrt{E_{ref}} \sqrt{E_{i,j}}}$$

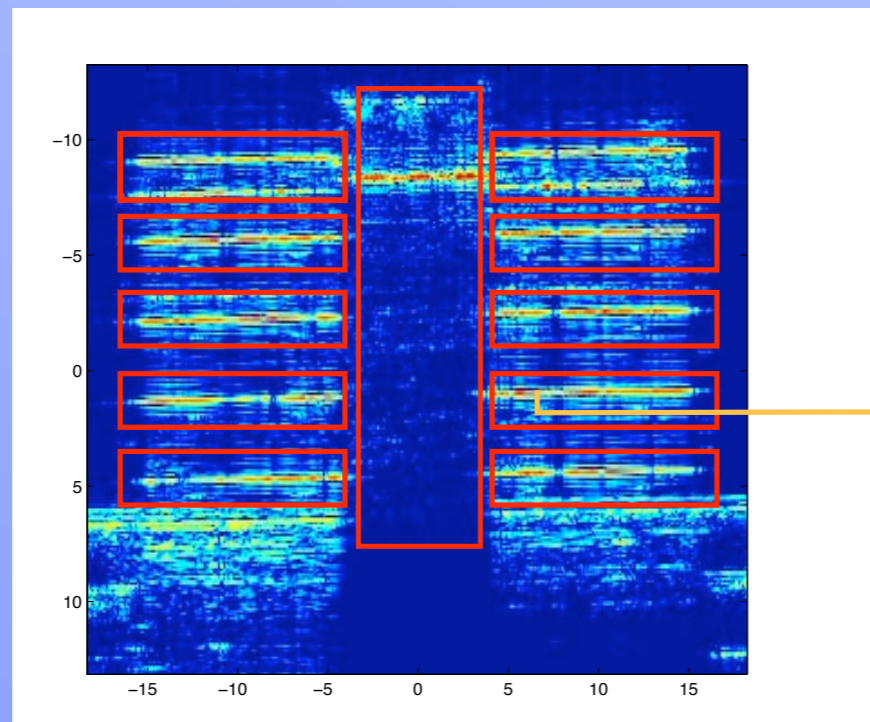
où $I_H(\vec{r}_o, \vec{k}_o) = \frac{1}{A_\phi} |W(\vec{r}_o, \vec{k}_o)|^2$

avec $W(\vec{r}_o, \vec{k}_o) = \int_{\mathbb{R}^2} H(\vec{k}) \Psi_{\vec{k}_o, \vec{r}_o}^*(\vec{k}) d\vec{k}$.

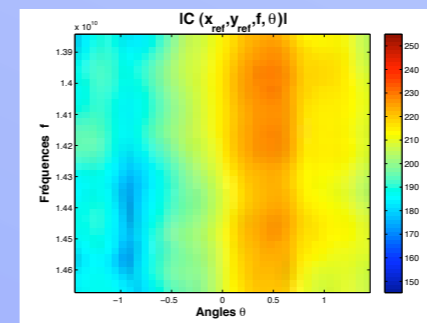
$$C_{ref}(i, j) := \frac{\int W(x_{ref}, y_{ref}; f, \theta) W^*(x_i, y_j; f, \theta) df d\theta}{\sqrt{E_{ref}} \sqrt{E_{i,j}}}$$

$$E_{i,j} = \int |W(x_i, y_j; f, \theta)|^2 df d\theta$$

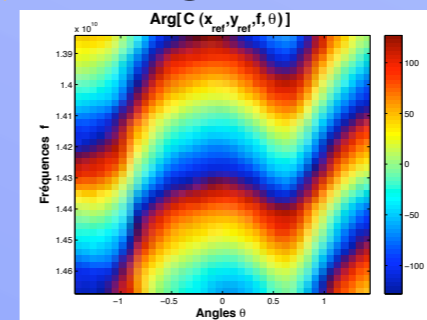
Application sur image SAR



Module

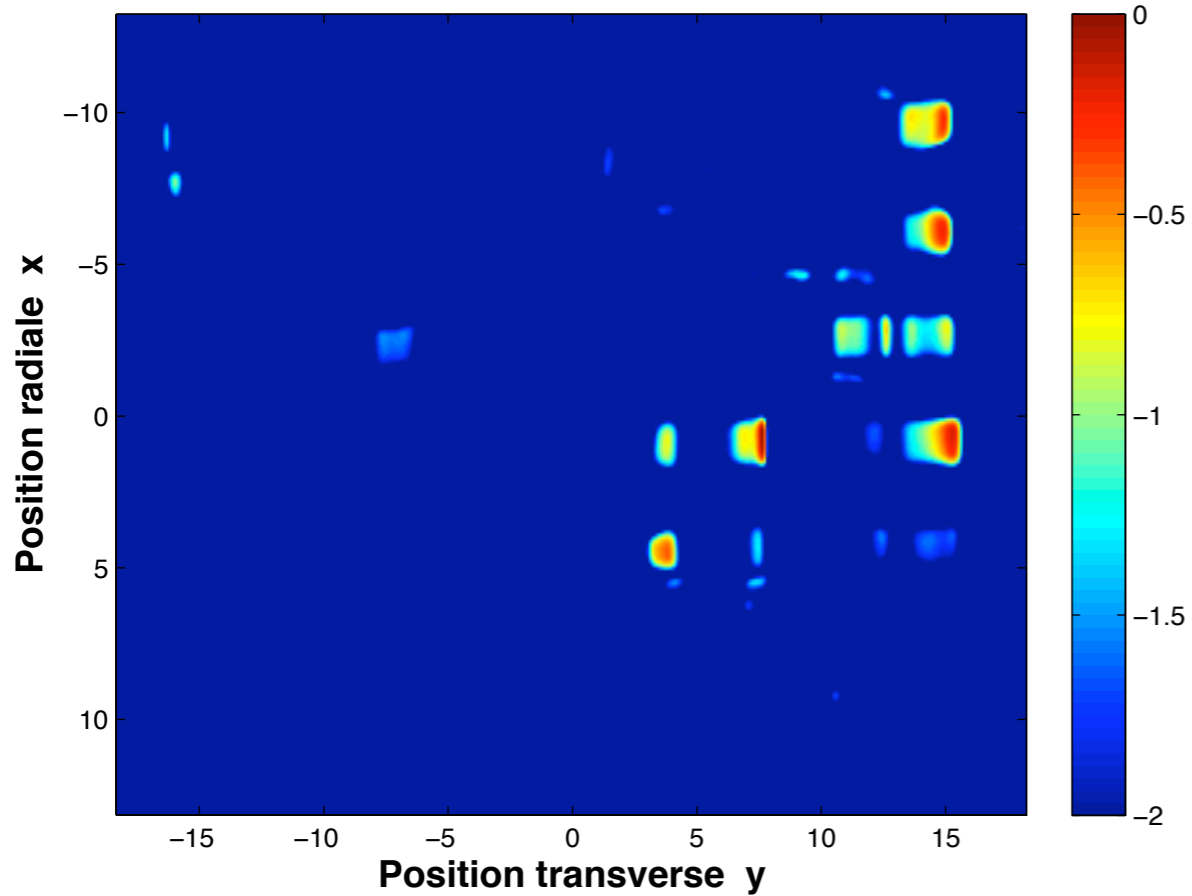


Argument



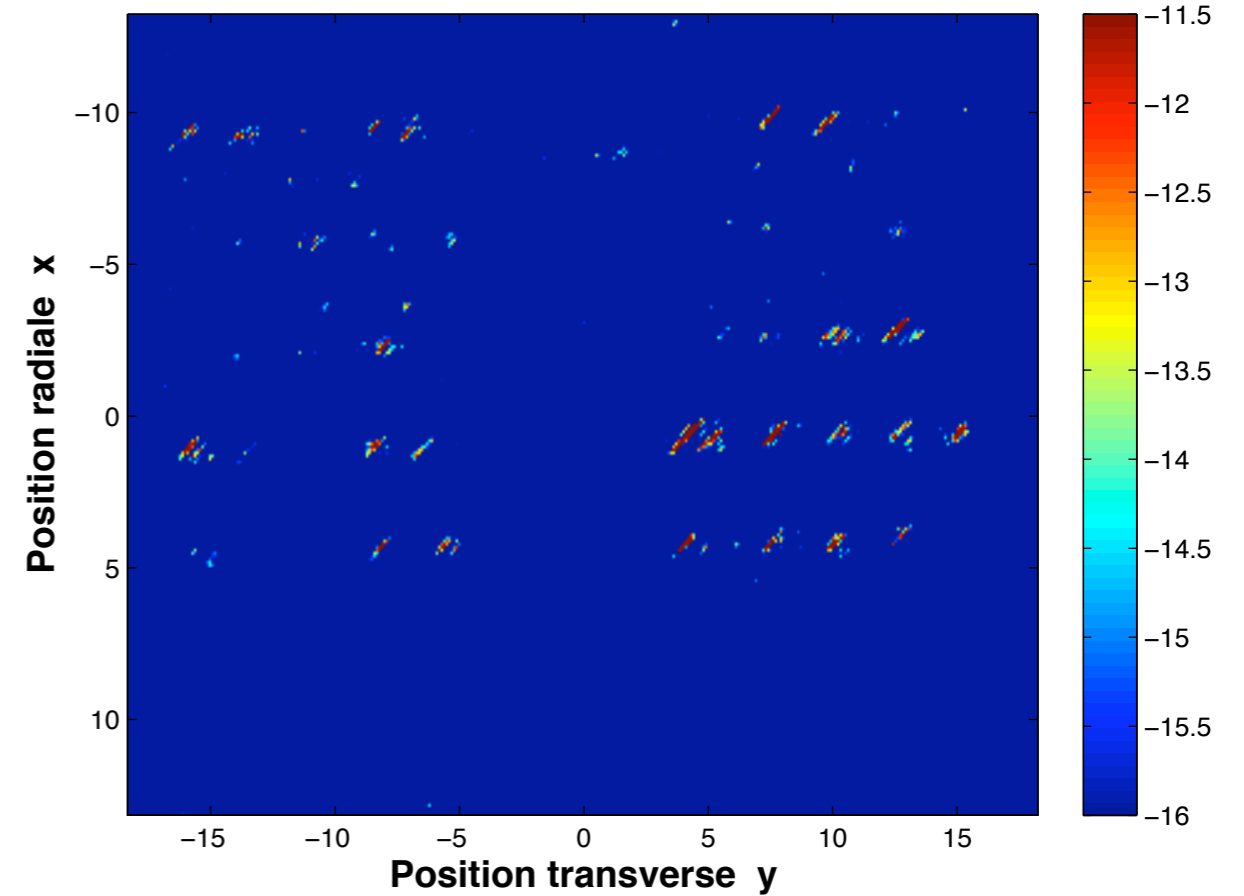
Comparaison des cartes de corrélation

Carte de corrélation



Corrélation des distributions d'énergie

Carte de corrélation



Corrélation des coefficients d'ondelette

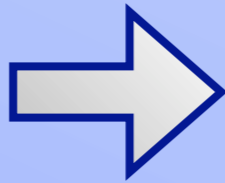
IV. Extension de l'analyse par ondelettes continues en Polarimétrie et Interférométrie

1. Accentuer le contraste entre cibles aléatoires et cibles déterministes en polarimétrie.
2. Améliorer l'estimation de hauteur en interférométrie.

IV.1 L'analyse par ondelettes en polarimétrie

Constat

Coloration et anisotropie dans une **configuration polarimétrique donnée**.



Objectif du temps-fréquence en polarimétrie

Comportement polarimétrique en fonction de la fréquence et de l'angle.



Reconnaissance de cibles
(extraction de signatures, classification, ...).

Thèse Mickaël Duquenoy 2004-2007.

Thèse Élise Colin 2002-2005.

$$S(f_o, \theta_o) = \begin{pmatrix} S_{Hh}(f_o, \theta_o) & S_{Hv}(f_o, \theta_o) \\ S_{Vh}(f_o, \theta_o) & S_{Vv}(f_o, \theta_o) \end{pmatrix}$$

Matrice de diffusion

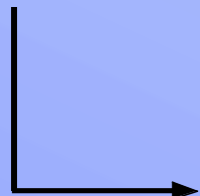


Paramètres polarimétriques en fonction de la fréquence et l'angle (ex : entropie, paramètres de Muller, ...)



Meilleure séparation et identification des mécanismes électromagnétiques.

Entropie : **indicateur du caractère aléatoire** du phénomène de rétrodiffusion.

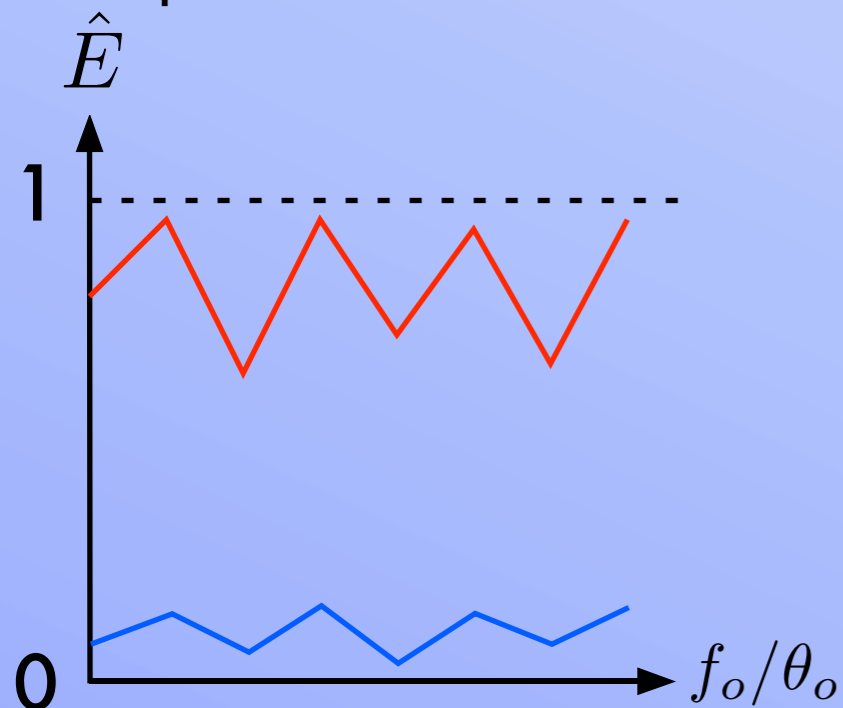


distinguer les **cibles aléatoires** (exemple : forêt) des **cibles déterministes** (exemple : bâtiment).

Polarimétrie classique	Ondelettes continues
$E(x, y)$	$\hat{E}(x, y; f_o, \theta_o)$

Amélioration de la classification des cibles aléatoires et cibles déterministes

— pixel sur cible aléatoire
 — pixel sur cible déterministe



Évolution de l'entropie

$$\hat{E}_{max}(x_o, y_o) = \max_{f_o, \theta_o} \hat{E}(x_o, y_o; f_o, \theta_o)$$



Améliorer contraste
 entre cibles aléatoires et
 cibles déterministes.

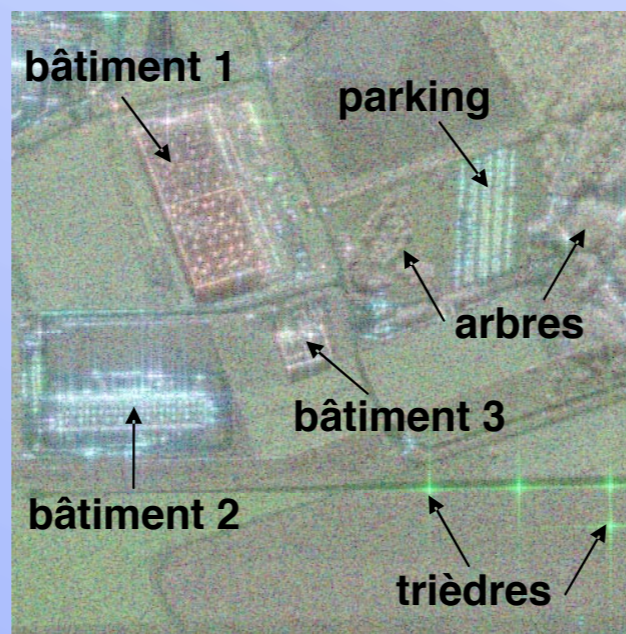
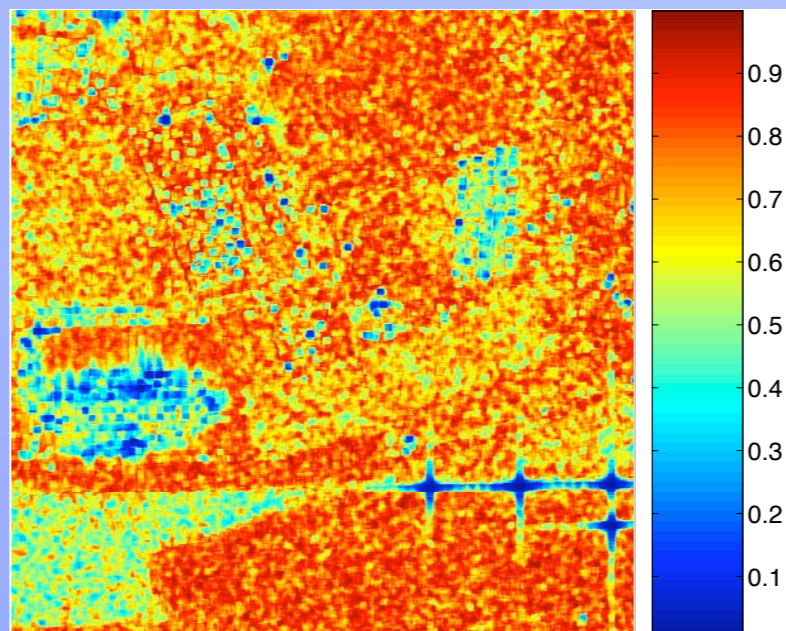


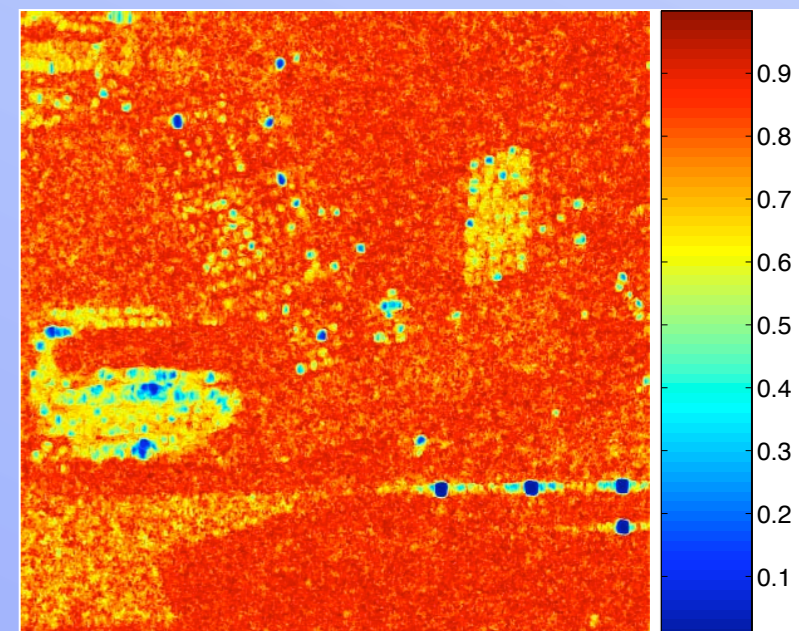
Image polarimétrique



Photographie



Entropie initiale

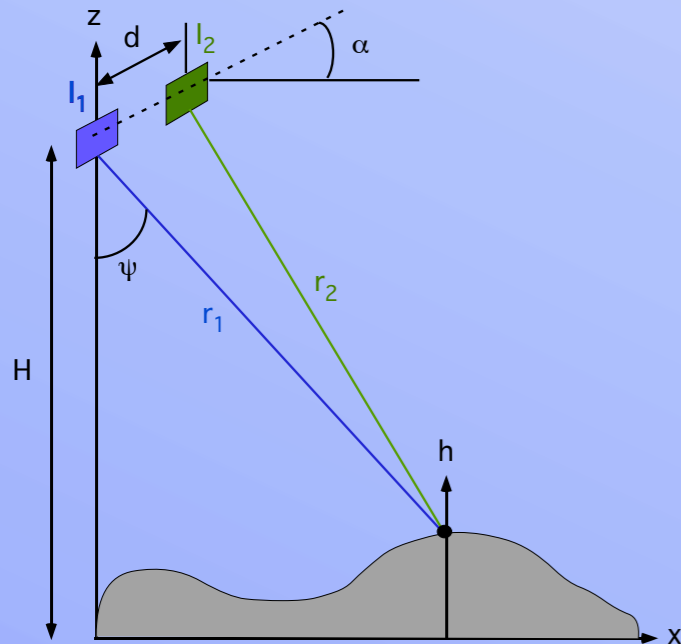


Maximisation de l'entropie
 après ondelettes

ONERA

IV.2 L'analyse par ondelettes en Interférométrie

Cohérence interférométrique en pratique



Deux antennes faiblement délocalisées spatialement.

$$\tilde{\gamma}(x, y) = \frac{\langle \overline{S_1(x, y) S_2^*(x, y)} \rangle}{\sqrt{\langle \overline{S_1(x, y) S_1^*(x, y)} \rangle} \sqrt{\langle \overline{S_2(x, y) S_2^*(x, y)} \rangle}}$$

avec $\langle \overline{S_1(x, y) S_2^*(x, y)} \rangle = \sum_{j=-N}^N \sum_{i=-N}^N S_1(x+i, y+j) S_2^*(x+i, y+j)$

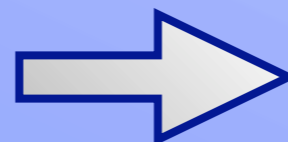
Introduction de l'analyse par ondelettes

$$\overline{W}_{12}(x_o, y_o) = \sum_{(f_o, \theta_o)} W_1(x_o, y_o; f_o, \theta_o) W_2^*(x_o, y_o; f_o, \theta_o)$$

avec $W_n(x_o, y_o; f_o, \theta_o) = \int_{\mathbb{R}^2} H_n(\vec{k}) \Psi_{\vec{r}_o, \vec{k}_o}^*(\vec{k}) d\vec{k}$

| n = 1, 2

Cohérence interférométrique par ondelettes continues



Meilleure estimation de la hauteur des cibles

Meilleure estimation de la hauteur des cibles

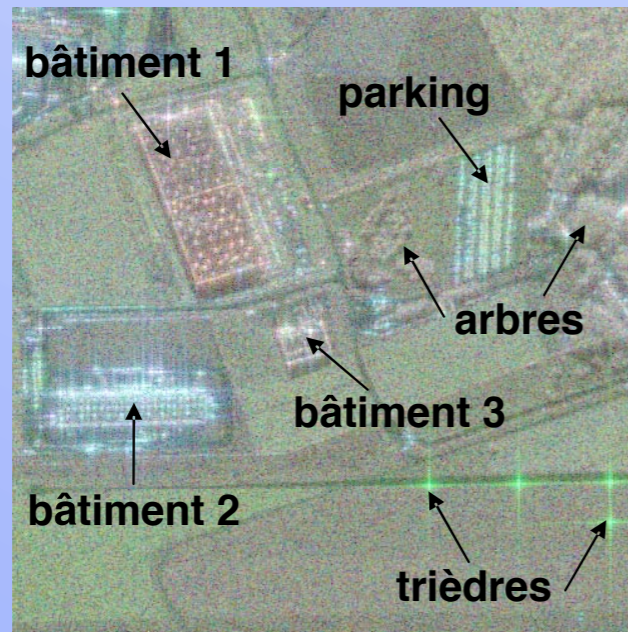
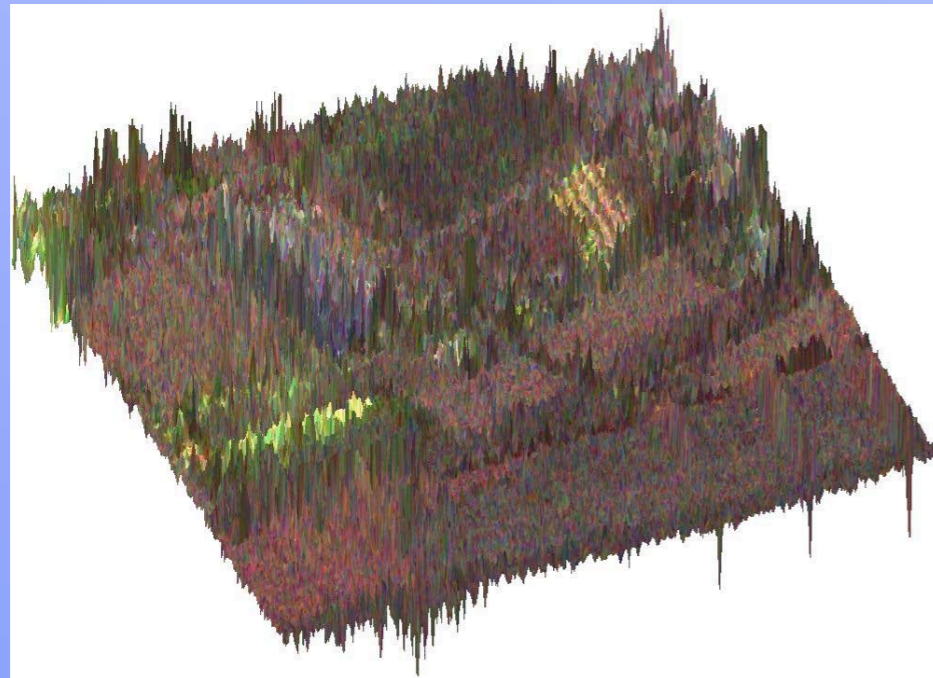


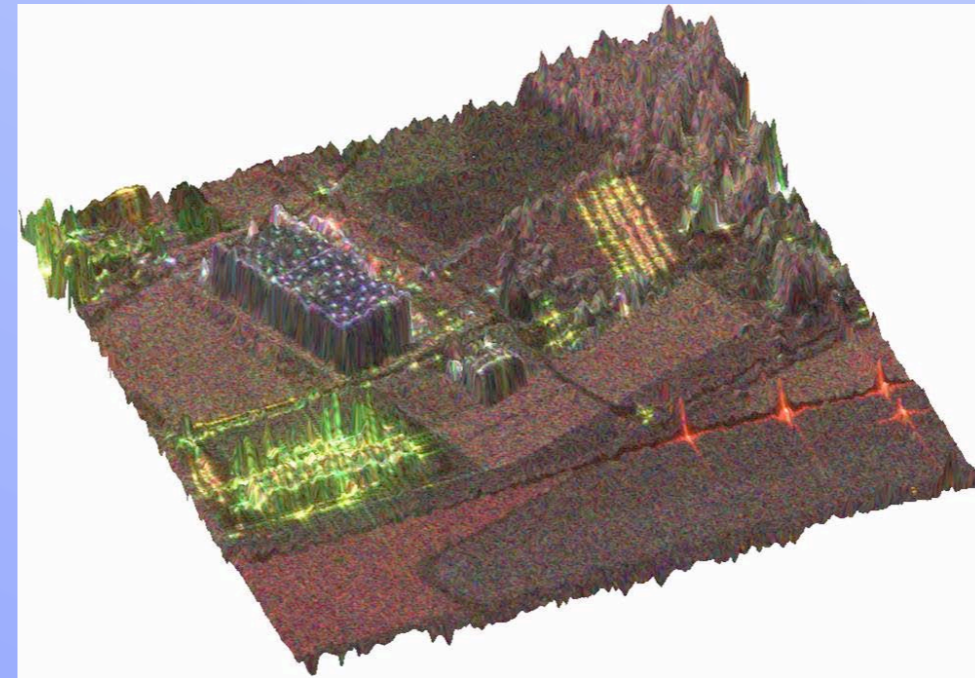
Image polarimétrique



Photographie



Carte interférométrique initiale



Carte interférométrique après
l'analyse par ondelettes

Conclusion et perspectives

Conclusions

- Mise en lumière la coloration et l'anisotropie des réflecteurs.
- Le caractère coloré et anisotrope constitue **une véritable signature**.
- L'analyse en ondelettes permet d'effectuer une **maximisation de l'entropie qui améliore la classification des cibles**.
- L'analyse en ondelettes, en interférométrie, permet d'**améliorer la reconstruction 3D de l'image**.

L'analyse en ondelettes continues



Discrimination d'objets
à géométrie simple



Meilleure classification
cibles aléatoires/déterministes



Meilleure estimation
de la hauteur
des cibles

Perspectives

- **Améliorer l'algorithme** de discrimination d'objets : **choix des paramètres** $(\sigma_f, \sigma_\theta)$ de l'ondelette mère, **choix de l'ondelette mère**, distribution d'énergie en un **ensemble de pixels**, **objets canoniques** (trièdre, dièdre, cylindre, ...) pris comme références.
- **Appliquer l'analyse en ondelettes** dans le cas d'un signal **large bande** en émission, d'un **secteur angulaire important**.
- **Relier les ondelettes** à d'autres grandeurs physiques.
- **Mettre en lumière la dépendance en fréquence et angle** des paramètres polarimétriques et interférométriques.
- **S'intéresser aux méthodes de séparation de sources** pour la discrimination d'objets.

Publications en revue et travaux

Tria, M. and Ovarlez, J.P. and Vignaud, L. and Castelli, J.C. and Benidir, M.,
Improving Target Extraction in Radar Imaging by Correlating Wavelet Coefficients,
à soumettre à *IEE-Radar, Sonar and Navigation*.

Tria, M. and Ovarlez, J.P. and Vignaud, L. and Castelli, J.C. and Benidir, M.,
**Discriminating Real Objects in Radar Imaging by Exploiting the Squared Modulus of the
Continuous Wavelet Transform,** soumis à *IEE-Radar, Sonar and Navigation*.

Colin, E. and Tria, M. and Titin-Schnaider, C. and Ovarlez, J.P. and Benidir, M.,
**SAR Imaging Using the Multidimensional Continuous Wavelet Transform and Applications to
Polarimetry and Interferometry,** *International Journal of Imaging Systems and Technology*,
vol. 14, Issue 5, pp. 206-212.

Ovarlez, J.P. and Vignaud, L. and Castelli, J.C. and Tria, M. and Benidir, M.,
Analysis of SAR images by Multidimensional Wavelet Transform, *IEE-Radar, Sonar and
Navigation - Special Issue on Time-Frequency Analysis for Synthetic Aperture Radar and
Feature Extraction*, vol. 150 (august 2003), pp. 234-241.