INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE

ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

Traitement des Images de Télédétection

M1-Géomatique / 2-Observations Radar en Télédétection

Alexandre Hippert-Ferrer
Diapositives issues du cours de E. Kalinicheva, S. Giordano et L. Baudoux

Univ. Gustave Eiffel, LASTIG, IGN-ENSG, Saint-Mandé, France

November 9, 2026

Programme prévisionnel

Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Séance 1	**Introduction à la télédétection et rappel sur l'imagerie optique** Thématique : Rappel et découverte d'OTB, Données : Sentinel-2
Aujourd'hui	**Traitement des images radar** Thématique : Occupation du sol, Données : Sentinel-1 et Sentinel-2
Séance 3	**Clustering** Thématique : Surface des océans, Données : Sentinel-1
Séance 4	**Classification supervisée** Thématique : Occupation du sol, Données : Sentinel-2
Séance 5	**Segmentation et OBIA** Thématique : Essences Forestières, Données : Images aériennes THRS
Séance 6	**Attributs de Texture** Thématique : Architecture, Images terrestres optiques
Séance 7	**Deep-Learning** Thématique : Forêt (+Lidar), Agriculture (+Radar) Données Forêt : Images aériennes THRS, Lidar aéroporté Données Agriculture : Images aériennes THRS, Sentinel-1, Sentinel-2

IGN
INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

1 Généralités

2 Caractéristiques du signal radar

3 Acquisition d'une image radar

4 Radiométrie

INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

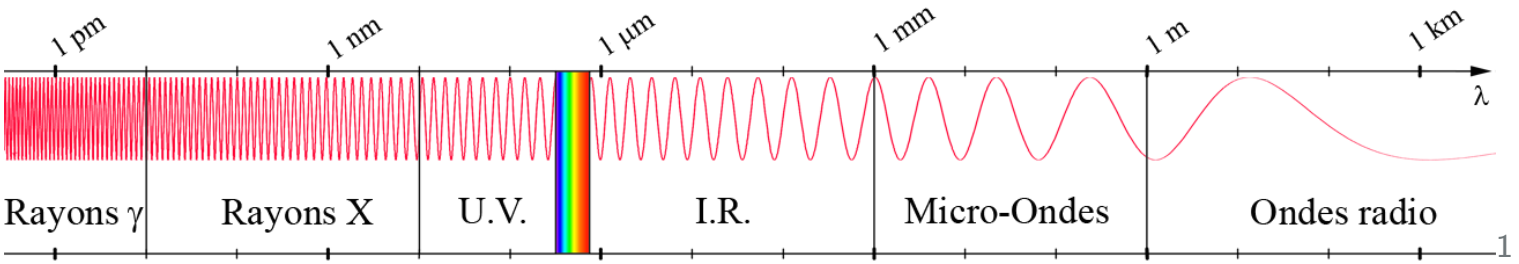
Généralités

Présentation

▶ Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

RADAR

RAdio **D**etection **A**nd **R**anging : on émet des micro-ondes ou des ondes radio (système actif) qui se réfléchissent sur la cible, puis on capte le signal réfléchi.



[1]

De multiples types de RADAR existent :

- Systèmes de **surveillance** des avions et des bateaux;
- Radar **altimètre** : aéronautique, aide au pilotage, océanographie;
- Systèmes **imageurs** (radars à ouverture réelle ou à ouverture synthétique)

Dans ce cours on s'intéresse aux **systèmes radar imageurs** (**à ouverture réelle ou à ouverture synthétique**).

[1] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectre électromagnétique.png

▶Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Émission/Réception

➡**Principe** :

- Envoyer vers la surface terrestre un rayonnement électromagnétique (impulsions dans un faisceau);
- Puis mesurer la **quantité de rayonnement électromagnétique réfléchi**.
- Les signaux de retour sont enregistrés : **amplitude** relative, **temps** mis par l'impulsion pour atteindre l'objet et revenir, **phase** de l'onde.

➡**Caractéristiques/Paramètres de l'acquisition** :

- direction de propagation,
- longueur d'onde,
- polarisation.



Types de radar imageurs

▶ Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

La plupart des RADAR acquièrent une image à partir d'une seule bande de fréquence (**monofréquence**). Elle est différente pour chaque satellite :

Satellite	λ
Terrasar-X	3.1 cm
Radarsat-2, Sentinel-1	5.5 cm
ALOS-PALSAR-2	24 cm
Biomass (2020)	69 cm

La capacité d'interaction des ondes radar avec un objet physique est fonction de la longueur d'onde λ et de la taille de l'objet r.

Bande	**$\Delta\lambda$**	**Exemples d'application**
VHF	1 m - 6 m	pénétration couvert forestier, sol
P-Band	30 cm - 1 m	humidité du sol, biomasse
L-Band	15 cm - 30 cm	foresterie, humidité du sol
C-Band	3.75 cm - 7.5 cm	ocean, agriculture
X-Band	2.5 cm - 3.75 cm	ocean, agriculture, urbain
Ku-Band	1.67 cm - 2.5 cm	glaciologie (couvert neigeux)
Ka-Band	0.75 cm - 1.11 cm	haute résolution radar

Radar vs. Optique

▶ Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Radar vs. Optique

L'information contenu dans une image dépendant de la longueur d'onde utilisée, les images radars sont très différentes des images optiques.



Image optique Sentinel-2

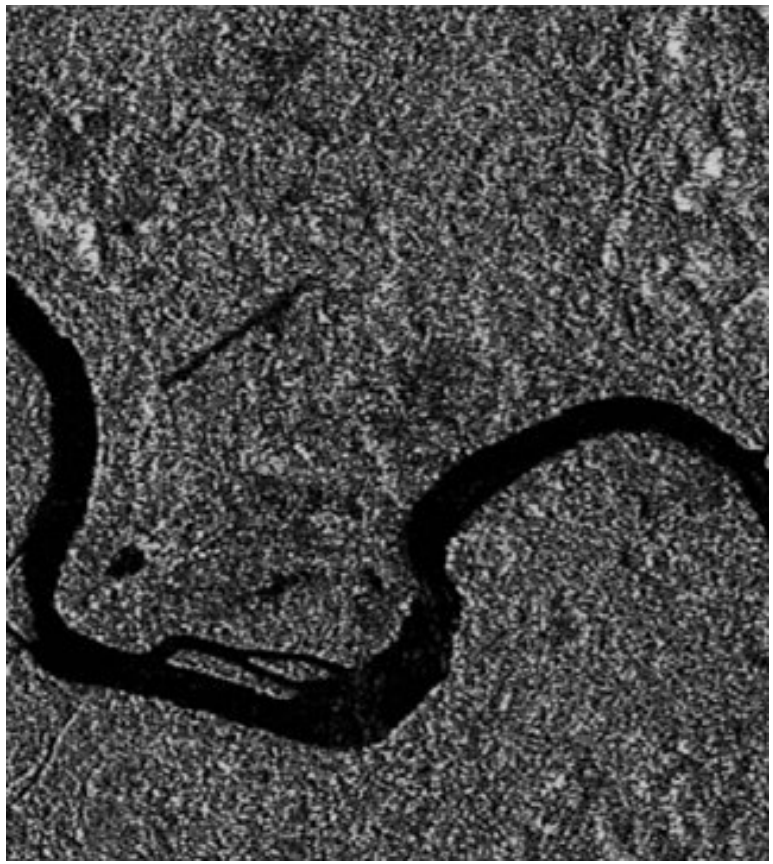


Image radar Sentinel-1

Radar vs. Optique

▶ Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Avantages :

- **Système actif** : permet l'obtention d'images de jour comme de nuit et le contrôle de la radiation électromagnétique émise (puissance, fréquence, polarisation),
- Peut "voir" à travers les nuages,
- Accès à des **paramètres physiques différents** de ceux détectés dans le visible et l'infrarouge.

Inconvénients :

- Speckle = Les images radar sont très "bruitée",
- Difficilement photo-interprétable.

Remarques :

Le choix d'utiliser de l'imagerie radar plutôt qu'optique dépend du phénomène étudié et des contraintes s'appliquant (nuages, luminosité, *etc.*)

Caractéristiques du signal radar

Amplitude et Phase

Le signal étant émis on connaît son amplitude et sa phase d'émission. Elles sont modifiées lorsqu'elles sont réfléchies : connaissance de la nature de la cible.

Généralités

▶ Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Amplitude et Phase

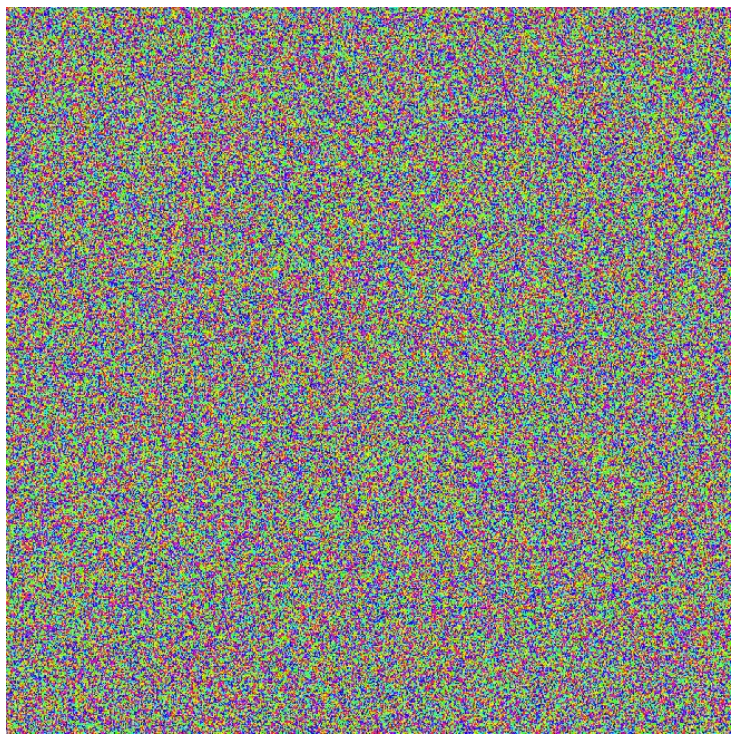
Généralités
▶ Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Le signal étant émis on connaît son amplitude et sa phase d'émission. Elles sont modifiées lorsqu'elles sont réfléchies : connaissance de la nature de la cible.

- **L'amplitude du signal reçu** dépend des propriétés de la cible (le signal est plus ou moins réfléchi, transmis ou diffusé).
- **La phase du signal reçu** dépend de la phase pixellaire (due à la nature du sol et des objets qui y sont présents), et de la phase de trajet, qui ne dépend que de la distance entre le satellite et le sol.



Amplitude $|S_{VV}|$

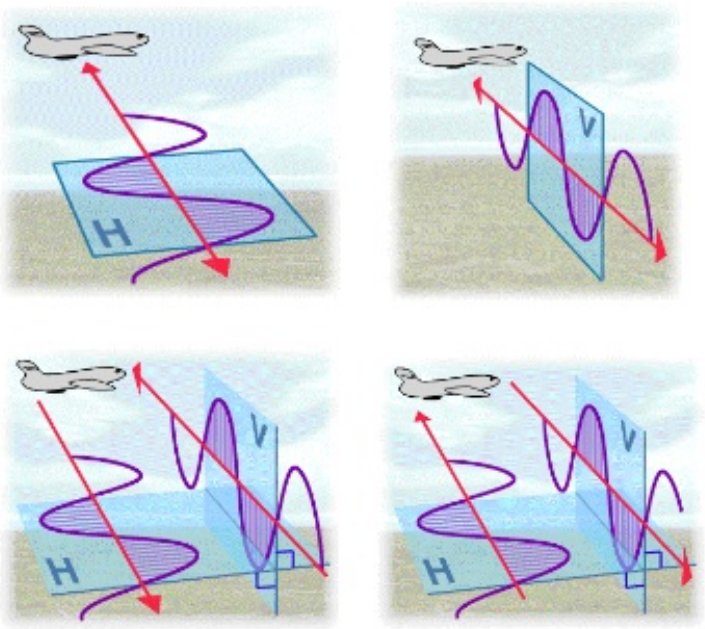


Phase ϕ_{VV}

Polarisation

Généralités
▶ Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

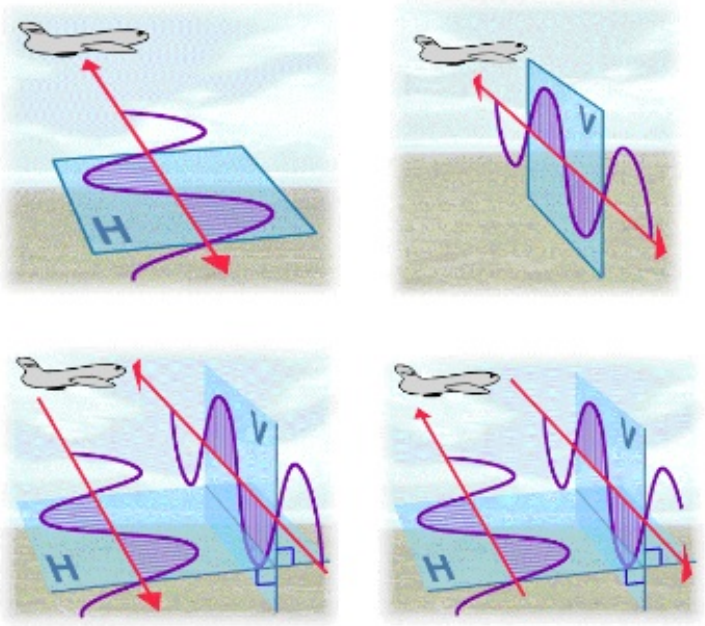
Un système radar peut émettre des signaux de 2 types (polarisation **horizontale** ou **verticale** des ondes EM).
Lorsque le signal se réfléchit sur une cible il peut changer de polarisation ou pas. Le système radar peut également recevoir des signaux de deux types.
On va pouvoir capter **4 images** à correspondant à l'analyse d'un couple polarisation émise / reçu.



Polarisation

Généralités
▶ Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Un système radar peut émettre des signaux de 2 types (polarisation **horizontale** ou **verticale** des ondes EM).
Lorsque le signal se réfléchit sur une cible il peut changer de polarisation ou pas. Le système radar peut également recevoir des signaux de deux types.
On va pouvoir capter **4 images** à correspondant à l'analyse d'un couple polarisation émise / reçu.



Configurations de polarisation des systèmes radar imageurs:

- **HH** : émission horizontale, réception horizontale,
- **HV** : émission horizontale, réception verticale,
- **VV** : émission verticale, réception verticale,
- **VH** : émission verticale, réception horizontale.

Bilan des caractéristiques du signal radar

Généralités

▶ Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Idée générale :

- Le signal radar peut être émis et reçu suivant 2 polarisations pouvant donner jusqu'à 4 configurations une fois réfléchi.
- Pour chacune de ces 4 configurations, on mesure la phase et l'amplitude de l'onde reçue. On a donc jusqu'a 8 images d'une même scène (phase VV, amplitude VV, phase VH, amplitude VH, *etc.*).

Bilan des caractéristiques du signal radar

Généralités
▶ Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Idée générale :

- Le signal radar peut être émis et reçu suivant 2 polarisations pouvant donner jusqu'à 4 configurations une fois réfléchi.
- Pour chacune de ces 4 configurations, on mesure la phase et l'amplitude de l'onde reçue. On a donc jusqu'a 8 images d'une même scène (phase VV, amplitude VV, phase VH, amplitude VH, *etc.*).

Points clés :

Chacune de ces images apportent une information différentes !

- Les objets réfléchissent différemment en fonction de la polarisation.
- L'amplitude renseigne sur la nature des objets.
- La phase renseigne sur la distance.

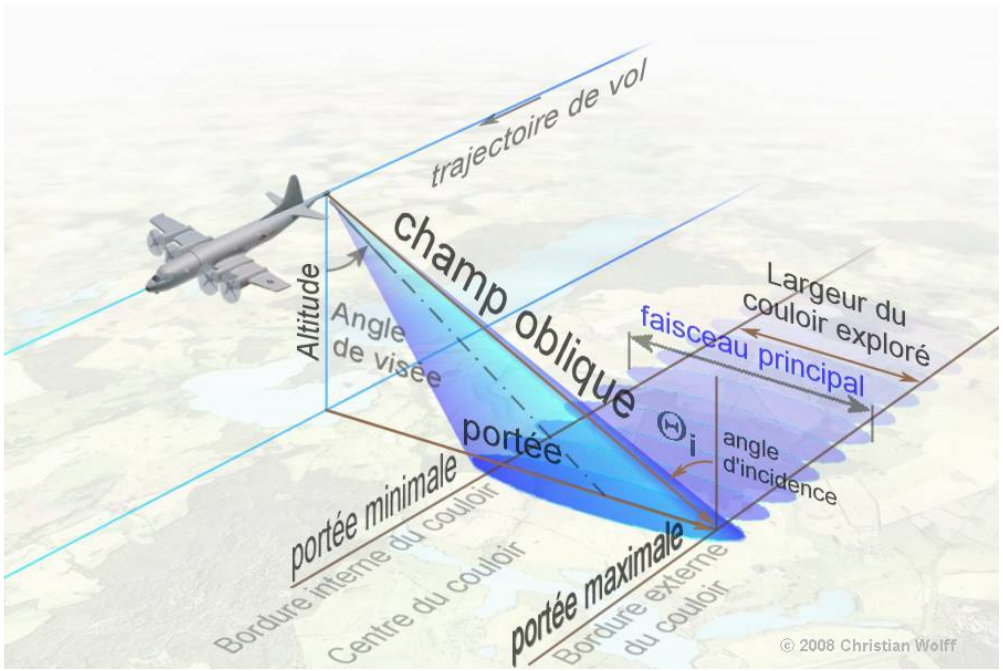
Acquisition d'une image radar

Résolutions spatiales des images radar

Généralités
Caractéristiques du signal radar
▶ Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Dans la géométrie des images radar les résolutions spatiales en *lignes* et *colonnes* ne sont **pas équivalentes** et correspondent à des **méthodes d'échantillonnage différentes**.

- Résolution spatiale **radiale** (*across track*, *range resolution*)
- Résolution spatiale **azimutale** (*along-track resolution*)



[2]

[2] http://www.radartutorial.eu/20.airborne/pic/SLAR-geometry.fr.print.jpg

Résolutions spatiales des images radar

Généralités

Caractéristiques du signal radar

▶ Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

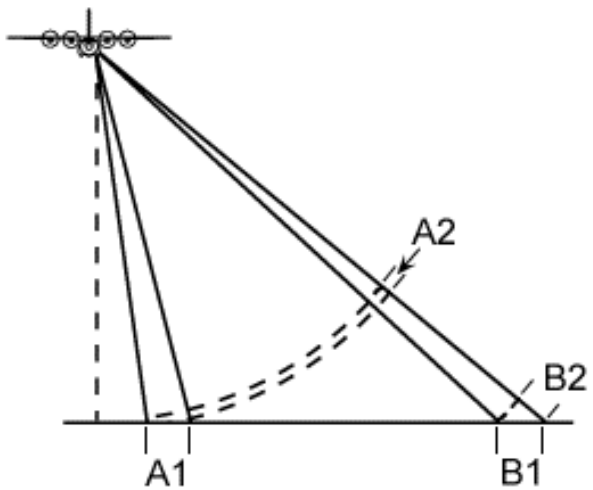
Interférométrie

⚠ Pour distinguer deux objets qui sont proche spatialement, leurs échos doivent être reçus en deux moments différents.

Résolutions spatiales des images radar

⚠ Pour distinguer deux objets qui sont proche spatialement, leurs échos doivent être reçus en deux moments différents.
La **résolution radiale** (oblique) :

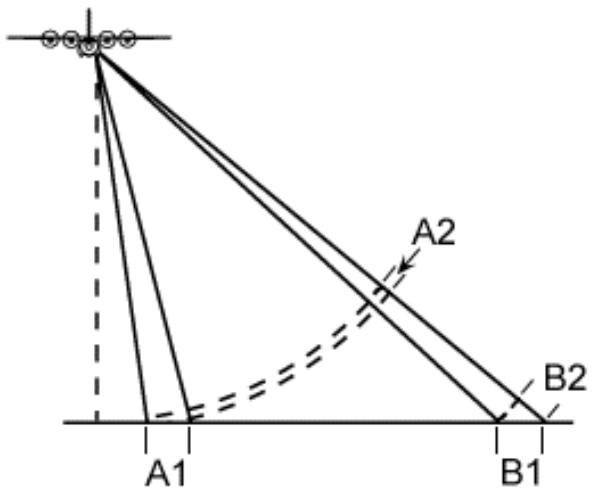
- est déterminée par la durée de l'impulsion;
- **varie à travers la fauchée** en fonction de θ (plus on s'éloigne de l'antenne et plus la résolution augmente).
  $\Rightarrow$ Il existe une distorsion due à l'échelle oblique;
- est **indépendante de la distance entre l'antenne et la cible** pour un θ donné.



Résolutions spatiales des images radar

⚠ Pour distinguer deux objets qui sont proche spatialement, leurs échos doivent être reçus en deux moments différents.
La **résolution radiale** (oblique) :

- est déterminée par la durée de l'impulsion;
- **varie à travers la fauchée** en fonction de θ (plus on s'éloigne de l'antenne et plus la résolution augmente).
  $\Rightarrow$ Il existe une distorsion due à l'échelle oblique;
- est **indépendante de la distance entre l'antenne et la cible** pour un θ donné.



La résolution **azimutale** :

- correspond à la capacité de discriminer deux points voisins alignés parallèlement à la trajectoire de l'antenne;
- dépend uniquement de la largeur du faisceau et donc des dimensions de l'antenne.

Résolutions radiales : slant et ground range

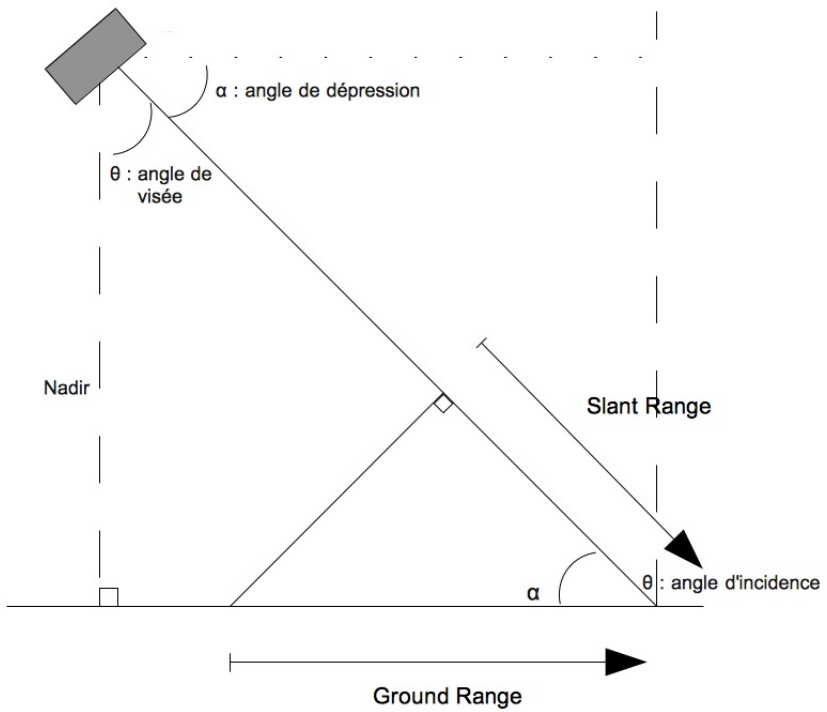
Généralités
Caractéristiques du signal radar
▶Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Résolutions radiales

- Résolution radiale oblique (*slant range*) $\sigma_{sr} = \frac{L}{2} = \frac{c\tau}{2}$,
- Résolution radiale sur le terrain (*ground range*) $\sigma_{gr} = \frac{c\tau}{2\cos\alpha}$.

avec :

- L : longueur aller-retour de l'onde
- c : vitesse de la lumière
- τ : durée de l'impulsion
- α : angle de dépression
- θ : angle de visée



Deux résolutions radiales = deux images !

La résolution radiale est plus grossière en *far range* (points éloignés) qu'en *near range* (points proches).

Généralités

Caractéristiques du signal radar

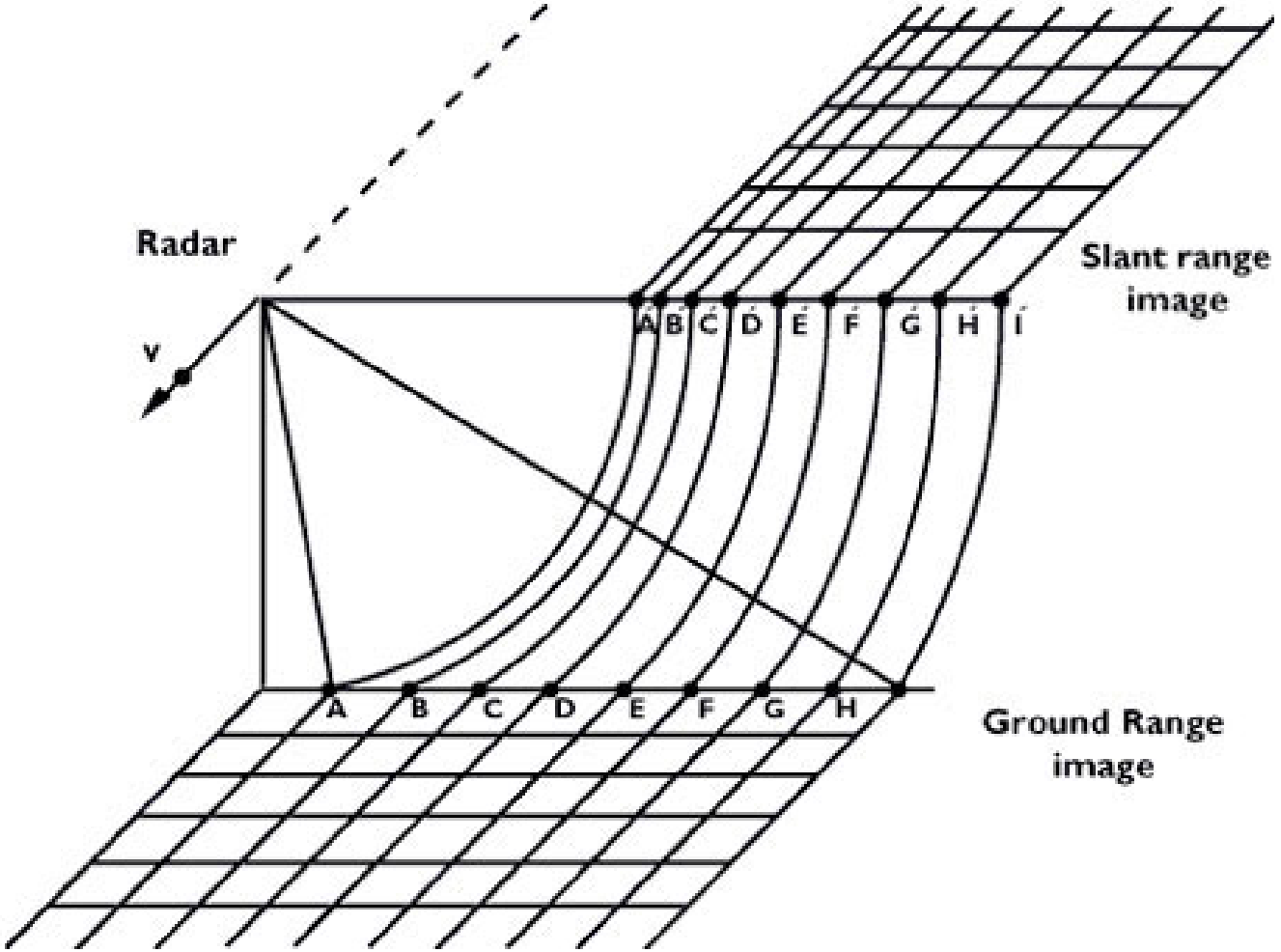
▶ Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

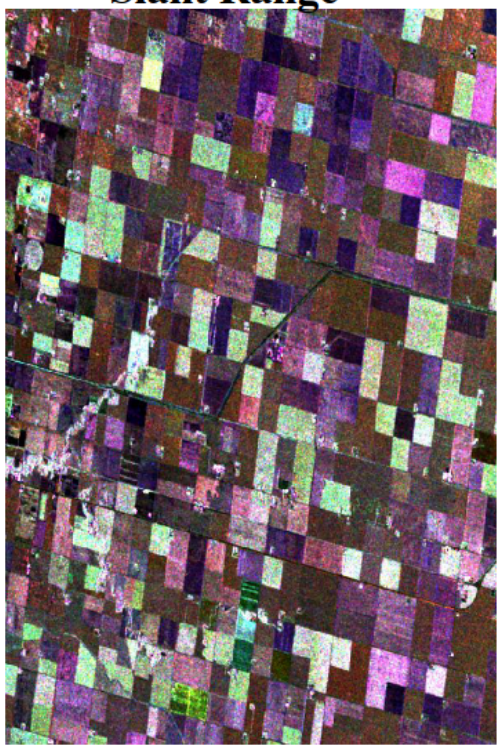
Interférométrie



https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/radar-courses/radar-course-2

Exemple

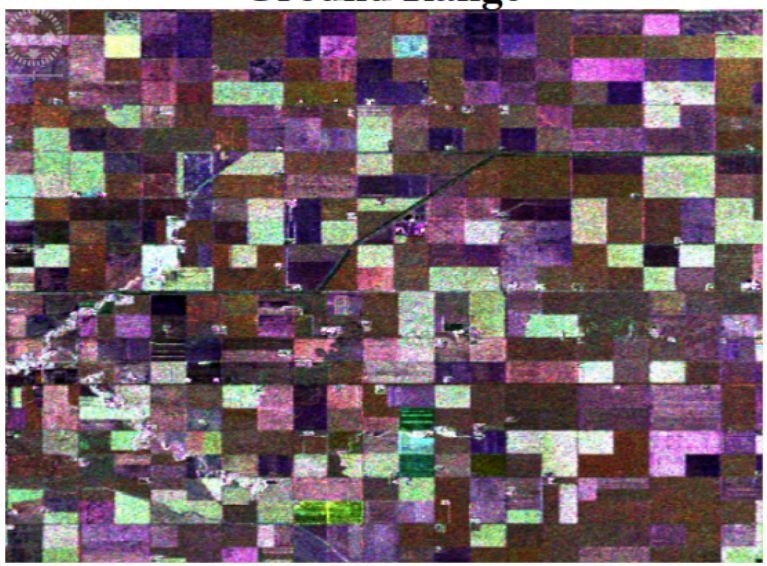
Slant Range



RADARSAT-2 (acquired on July 3, 2016, FQ15W). Slant range image (**R: HH G: HV B:VV**), in which **distances are measured between the antenna and the target**

- Slant range data can be converted to ground range by resampling.
- To do so requires knowledge of the imaging geometry, platform altitude, range delay and terrain elevation.

Ground Range



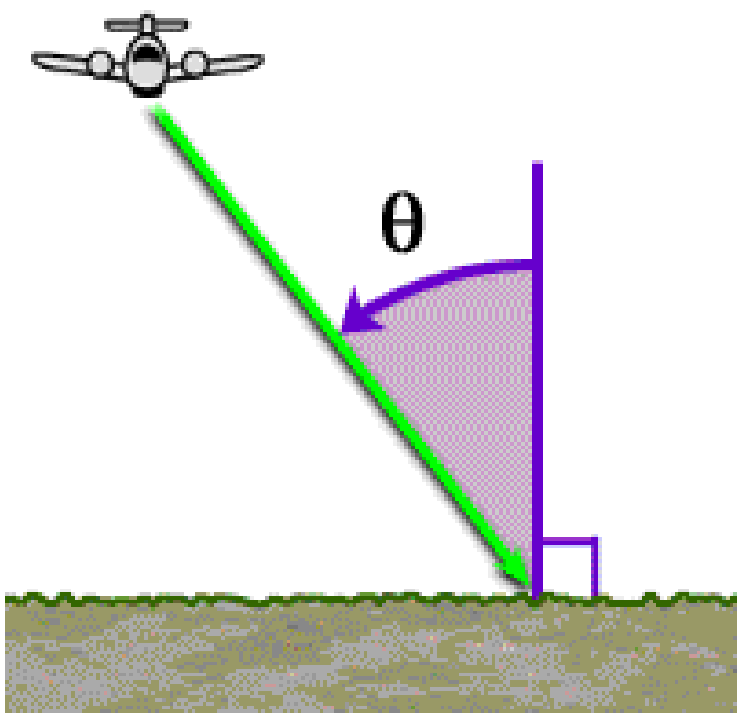
Ground range image, in which **distances are measured between the platform ground track and the target**, and placed in the correct position on the geographic reference plane

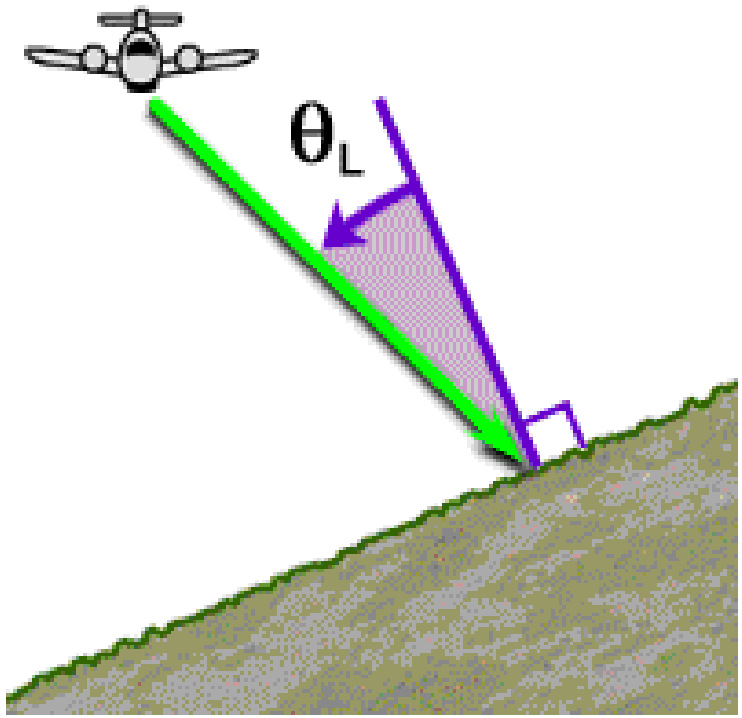
Source : Carleton University

Effets du relief

Généralités
Caractéristiques du signal radar
▶ Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Une pente faisant face au faisceau aura une rétrodiffusion plus élevée (angle d'incidence θ plus petit).





Effets du relief

Des pentes ayant un angle abrupt sont sujettes à des **ombres** portées...

Généralités

Caractéristiques du signal radar

▶ Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Effets du relief

Généralités

Caractéristiques du signal radar

▶ Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

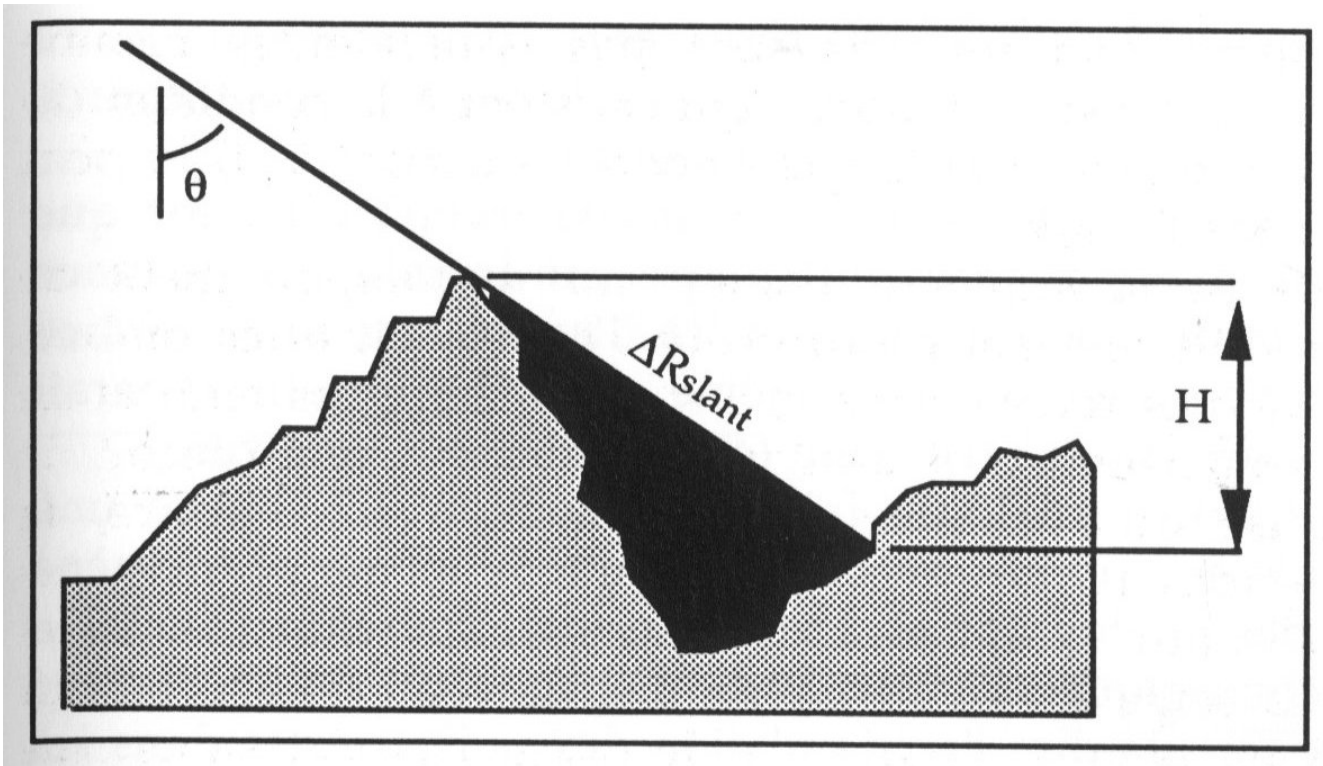
Interférométrie

Des pentes ayant un angle abrupt sont sujettes à des **ombres** portées...
Les ombres sont plus importantes pour les points éloignées (far range) que pour les points rapprochés (near range). Aucune information radiométrique dans les ombres, mais de l'information géométrique.

Effets du relief

Généralités
Caractéristiques du signal radar
▶ Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Des pentes ayant un angle abrupt sont sujettes à des **ombres** portées...
Les ombres sont plus importantes pour les points éloignées (far range) que pour les points rapprochés (near range). Aucune information radiométrique dans les ombres, mais de l'information géométrique.



Effets du relief

Raccourcissement des distances - **Foreshortening**.

➥Raccourcissement des pentes inclinées vers le radar.

Généralités

Caractéristiques du signal radar

▶Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Effets du relief

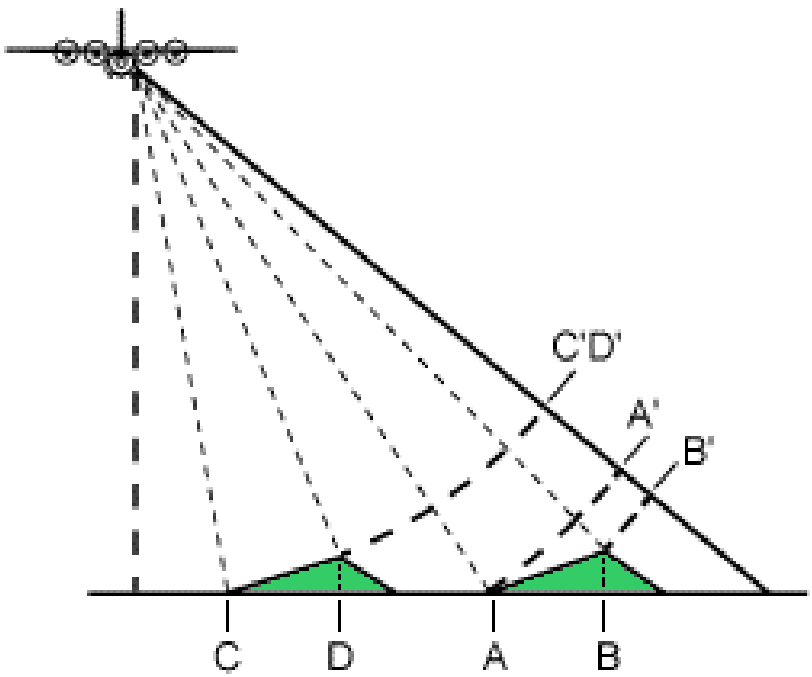
Généralités
Caractéristiques du signal radar
▶Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Raccourcissement des distances - **Foreshortening**.

➡Raccourcissement des pentes inclinées vers le radar.

Comme le radar mesure les distances obliques, la pente (A→B) apparaîtra comprimée et la longueur de la pente sera incorrectement représentée (A'→B'). L'importance du **repliement** variera selon l'angle de la pente. Un maximum de repliement se produit quand le faisceau radar est perpendiculaire à la pente, de manière à ce que la pente, la base et le sommet soient vus simultanément (C→D). La longueur de la pente sera réduite à une longueur effective de zéro dans la distance oblique (C'→D').

Les pentes repliées apparaissent plus brillantes sur l'image.



Effets du relief

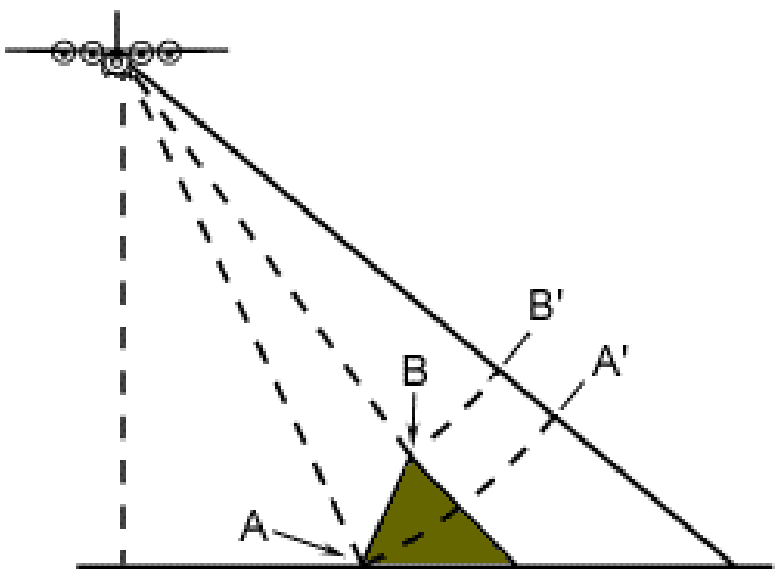
Généralités
Caractéristiques du signal radar
▶Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Basculement du relief - **Layover**.

➡Dans des cas extrêmes, la position des points du relief peut être inversée.

Layover se produit quand le faisceau radar atteint le sommet d'une cible élevée (B) avant d'atteindre sa base (A). Le signal de retour du sommet de la cible sera reçu avant le signal de la base. Il en résulte un déplacement vers le radar du sommet de la formation par rapport à sa vraie position au sol, ce qui a pour effet de le replier sur sa base (B'→A').

Comme pour le foreshortening, le layover est plus important pour de petits angles d'incidence, dans la portée proximale du couloir, et en terrain montagneux.



Exemples de repliement

À votre avis, d'où est prise l'image suivante ? Quels effets observe-t-on ?

Généralités

Caractéristiques du signal radar

▶ Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

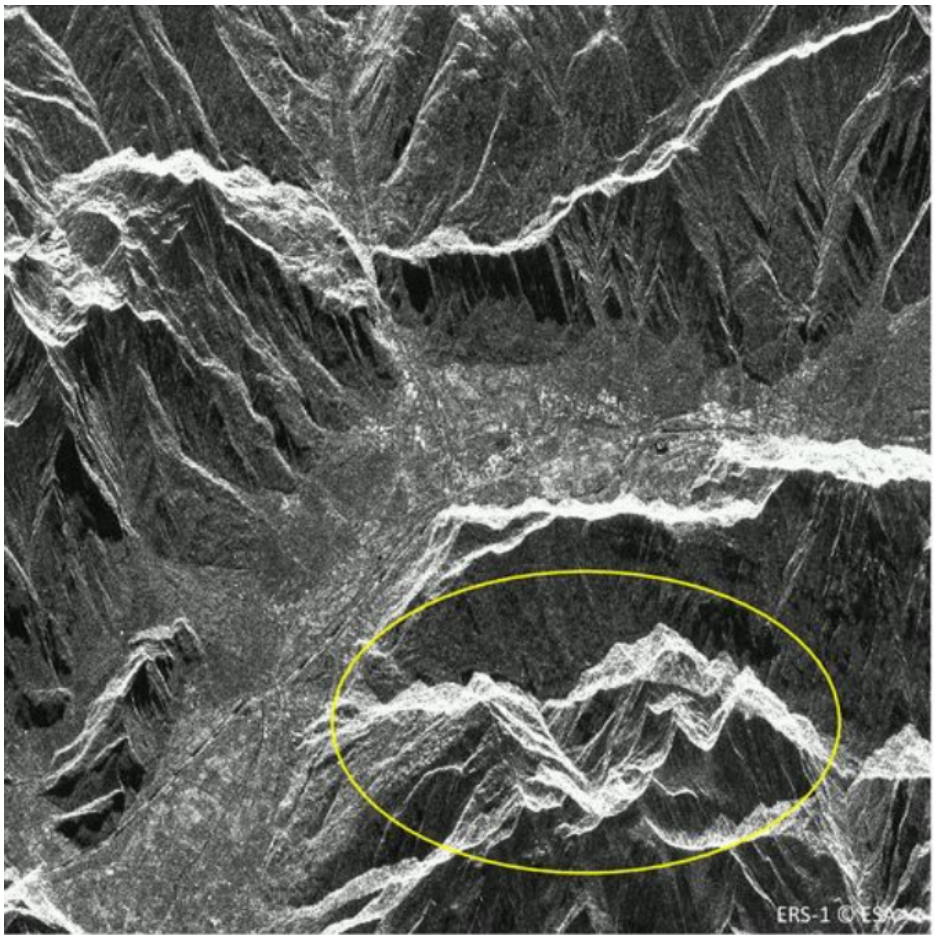


Image ERS-1 en zone montagneuse.
©DLR.

Exemples de repliement

À votre avis, d'où est prise l'image suivante ? Quels effets observe-t-on ?

Généralités

Caractéristiques du signal radar

▶ Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

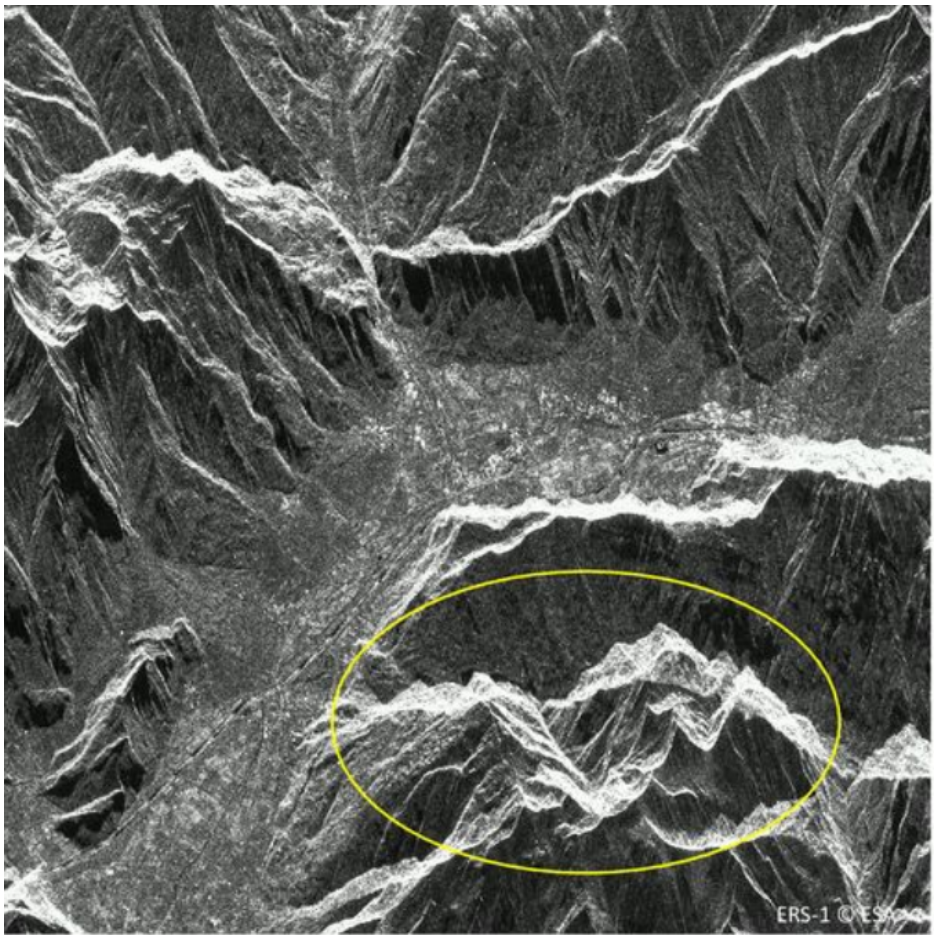
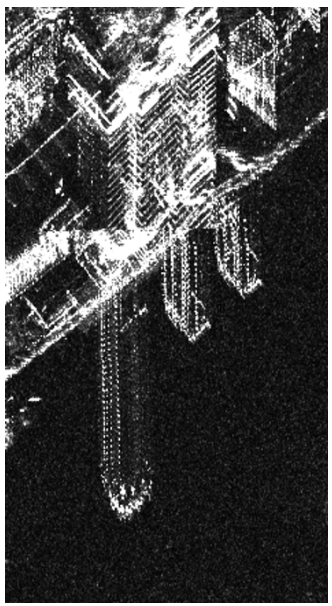


Image ERS-1 en zone montagneuse.
©DLR.



Crédit: Capella Space.

Bilan des caractéristiques de l'acquisition radar :

Généralités
Caractéristiques du signal radar
▶ Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Idée générale :

Une image radar est acquise en visée oblique par un satellite qui émet un signal puis capte ce qui lui est réfléchi (onde EM rétrodiffusée). De par la géométrie d'acquisition (visée oblique), les images radars sont différentes des images optiques.

Points clés :

- Il existe deux types de résolution spatiale pour une image radar : la résolution **radiale** et **azimutale**.
- Le relief influe sur la position finale des objets dans l'image ainsi que sur leur radiométries.

INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

Radiométrie

Coefficient de rétrodiffusion radar

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
▶ Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

σ_0 : **section efficace** de diffusion radar par unité de surface de la cible, **coefficient de rétrodiffusion radar**. Il est sans unité.

Coefficient de rétrodiffusion radar

Généralement exprimé en décibels (de l'ordre de 10^5)

$$\sigma_{0,dB} = 10 \log(\sigma_0)$$

Le coefficient de rétrodiffusion est fonction :

- de la **longueur d'onde**,
- de la **polarisation**,
- de l'**angle d'incidence**,
- des **propriétés géométriques et géophysiques** de la cible.

Calibration radiométrique

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
▶ Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Plusieurs modes de calibrations, à choisir selon l'application :

- **Beta Naught** β_0 : mesure du coefficient de rétrodiffusion radar en *slant range*, sans dimension. Cette mesure du coefficient de rétrodiffusion dépend de la position dans l'image (angle d'incidence, ...) et de la géométrie du terrain (pente) en plus des propriétés de la cible.
- **Sigma Naught** σ_0 : sans dimension, normalisé en unité de surface sur le terrain ($[m^2 \times m^2]$, exprimé généralement en décibel (dB)). σ_0 dépend de l'angle d'incidence local. Les scientifiques tendent à utiliser σ_0 pour interpréter la dispersion, la réflexion et les propriétés de surface.
- **Gamma Naught** γ_0 : **Sigma Naught** normalisé par l'angle d'incidence. plus de dépendance de la visée en distance. Généralement utilisée pour calibrer l'antenne.

Influence de longueur d'onde

Selon la **longueur d'onde** du système radar, le coefficient de rétrodiffusion radar ne traduit pas les mêmes propriétés de la cible.

Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

▶ Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

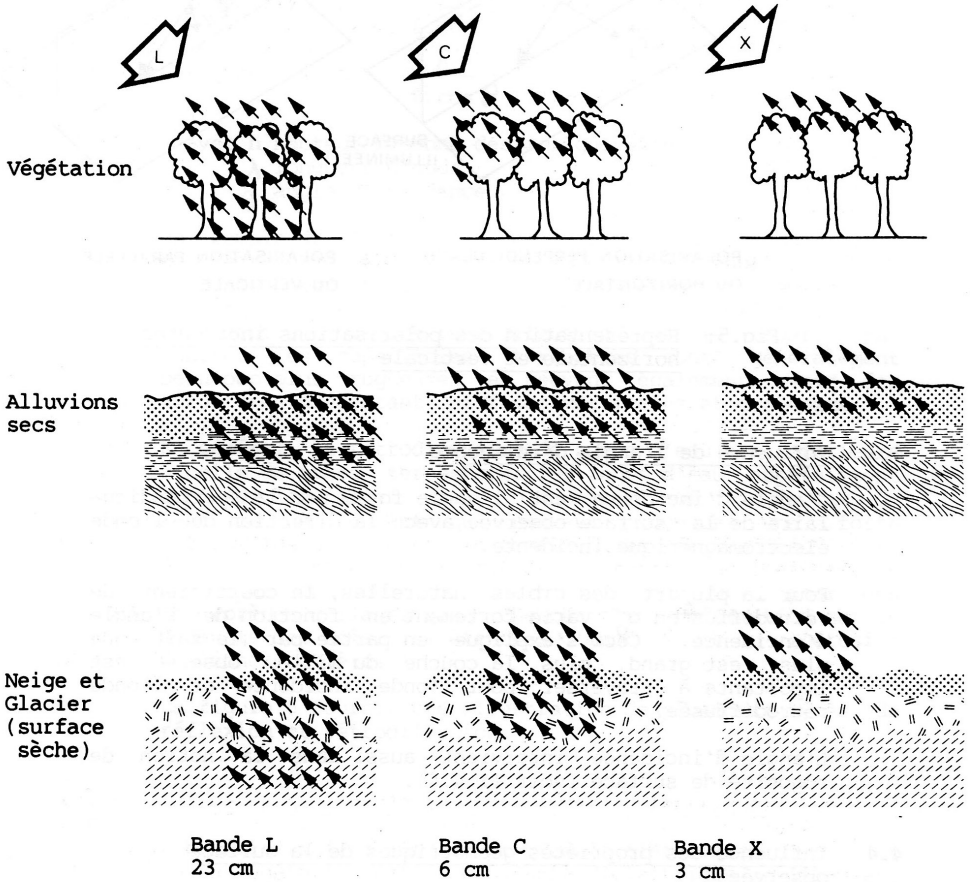


Fig.4: Rétrodiffusion de cibles naturelles en bandes L, C et X (Source: NASA, 1988)

Polarisation

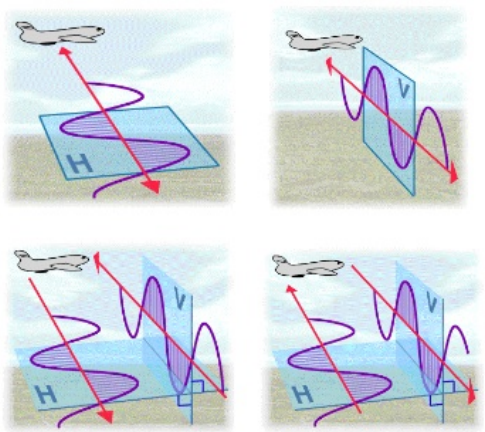
Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
▶ Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Configurations de polarisation des systèmes radar imageurs:

- **HH** : émission horizontale , réception horizontale,
- **HV** : émission horizontale , réception verticale,
- **VV** : émission verticale, réception verticale,
- **VH** : émission verticale , réception horizontale.

Le coefficient de rétrodiffusion radar est différent selon le **canal de polarisation**.

- HH, VV $\sim$ rugosité de surface, humidité,
- HV, VH $\sim$ multi-trajets dans la cible, humidité.



Influence de l'angle d'incidence

Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

▶ Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Le **coefficient de rétrodiffusion radar** d'une cible dépend de l'**angle d'incidence**. L'angle d'incidence est formé par la perpendiculaire de la surface observée avec la direction de l'onde électromagnétique incidente.

Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

▶ Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Rugosité de surface

Le **coefficient de rétrodiffusion radar** est fortement influencé par la **rugosité de surface** de la cible, qui liée à la **longueur d'onde** λ.

Rugosité : variation moyenne des aspérités de la surface par rapport à une surface plane.

Rugosité de surface

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
▶ Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Le **coefficient de rétrodiffusion radar** est fortement influencé par la **rugosité de surface** de la cible, qui liée à la **longueur d'onde** λ.

Rugosité : variation moyenne des aspérités de la surface par rapport à une surface plane.

⚠ une surface sera dite rugueuse si sa structure/superficie est de l'ordre de la longueur d'onde λ.

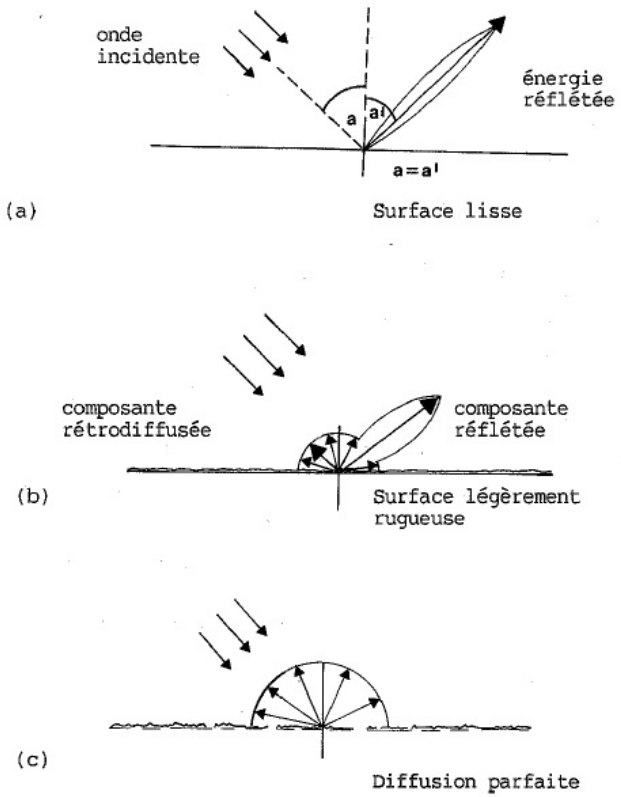


Fig.6: Réflexion et rétrodiffusion de surfaces différentes

Influence de l'humidité

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
▶ Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Le **coefficient de rétrodiffusion radar** est influencé par l'**humidité** des cibles :

- l'humidité influe sur les propriétés électriques du sol (la constante diélectrique de l'eau est très élevée),
- **une surface humide fournira un écho plus fort qu'une surface plus sèche** (coefficient de rétrodiffusion augmente avec l'augmentation de l'humidité),
- la pénétration de l'onde électromagnétique dans le milieu est une fonction inverse de la teneur en eau,
- la polarimétrie ne semble pas si pertinente pour l'estimation de l'humidité.

Bilan sur la radiométrie radar :

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
▶ Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Idée générale :

Le coefficient de rétro-diffusion radar correspond au signal réfléchi par la cible en direction du capteur.
On calibre cette valeur en Beta, Sigma ou Gamma Naught.

Points clés :

Les paramètres influençant le coefficient de rétro-diffusion radar sont nombreux :

- La longueur d'onde λ,
- La ou les polarisation utilisées,
- La nature de l'objet : rugosité, humidité, *etc.*

Le speckle ou chatoiement

Speckle : introduction

Les images radar sont des images marqués par un “bruit” d’aspect poivre et sel appelé *speckle*.

Généralités

Caractéristiques du signal radar

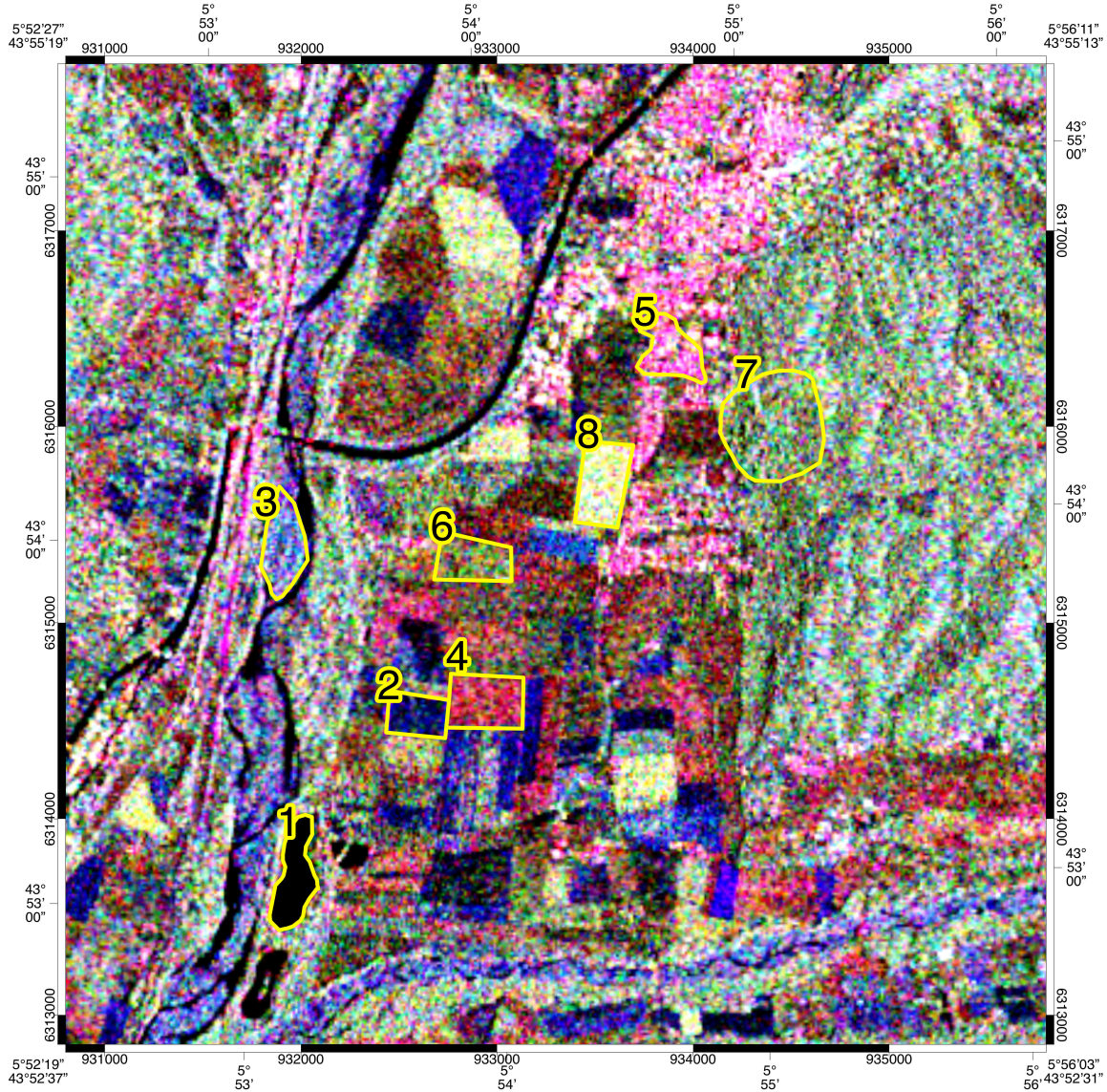
Acquisition d’une image radar

Radiométrie

▶ Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

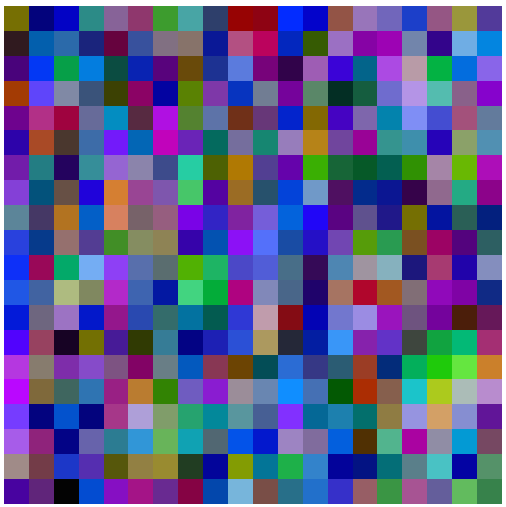
Interférométrie



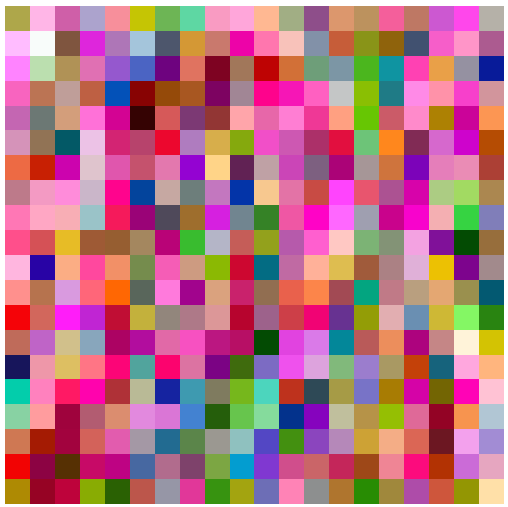
Speckle : introduction

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶ Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

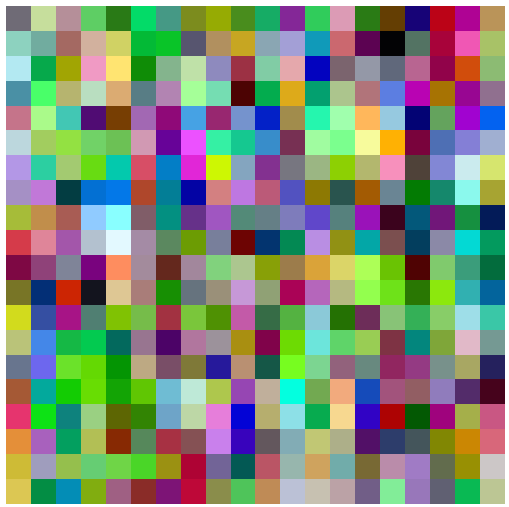
Problème : Ce "bruit" complexifie les approches de télédétection. En effet, les zones homogènes ont une forte variabilité de coefficient de rétrodiffisuion alors qu'il devrait être identique. Il est très difficile de faire une classification ou une segmentation correcte en l'état.



Extrait type 2



Extrait type 4



Extrait type 8

Trois zones homogènes en occupation du sol issue de l'image précédente. Sans speckle l'image de gauche devrait être d'un bleu uniforme, celle du milieu rose et celle de droite verte.

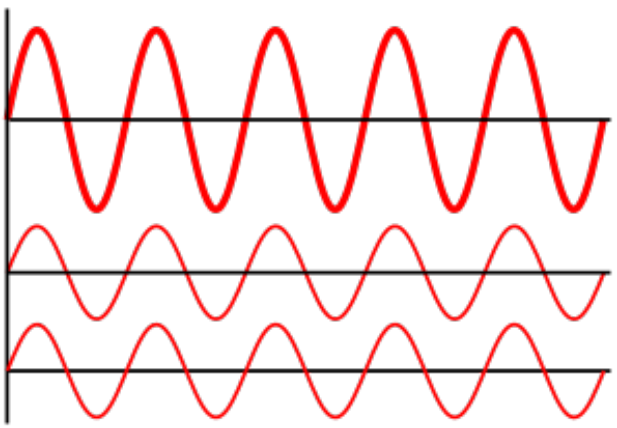
Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

D'où vient le speckle ?

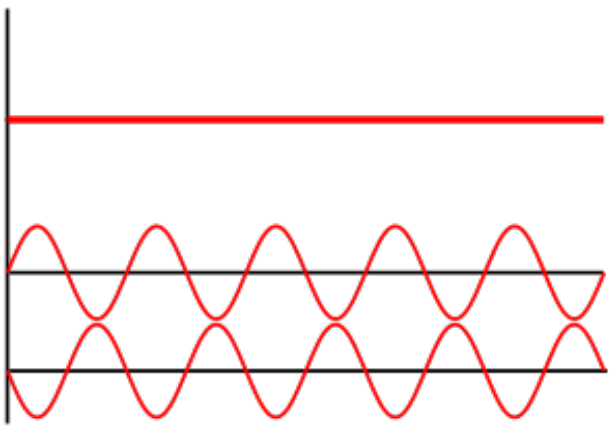
Pour bien comprendre l'origine du speckle, nous allons suivre étape par étape le parcours de l'onde radar.

- Le système radar émet une onde cohérente.
- Lorsque l'onde arrive dans une **cellule de résolution**, elle est réfléchie sur tous les **réflecteurs élémentaires** qui la compose.
- Chaque réflecteur reflète alors le signal avec un léger **déphasage**.
- Les signaux de chaque réflecteur vont être "sommés" au sein d'une cellule de résolution ce qui va provoquer des **interférences constructives** (signal amplifié = pixel trop lumineux) et **destructives** (signal diminué = pixel trop sombre).

Interférences constructives



Interférences destructives



original version: Haade; vectorization: Wjh31, Quibik [CC BY-SA].

Speckle : un bruit ?

Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

Radiométrie

▶ Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie

Le speckle n'est pas un bruit à proprement parler puisqu'il contient une information sur chaque réflecteur élémentaire. Toutefois cette information étant très difficilement utilisable et complexifiant les approches de télédétection on le considère souvent comme tel.

Speckle : modélisation

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶ Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Dans les années 1970, Goodman modélise statistiquement le speckle. Pour ce faire il pose des conditions (beaucoup de réflecteurs aléatoirement déphasés et uniformément distribués...), qui lorsqu'elles sont réunies (ce qui est généralement le cas) permettent de connaitre les statistiques de répartition du speckle. On appelle le speckle respectant ces conditions "speckle pleinement développé".

Modélisation de Goodman

Si l'on s'intéresse au speckle dans une image en intensité I (image d'amplitude au carré) on montre qu'il se modélise comme un bruit multiplicatif suivant une loi Gamma $\Gamma(k, \theta)$.

➦On peut modéliser le speckle dans une image I en multipliant cette image sans bruit I' par une image de bruit S :

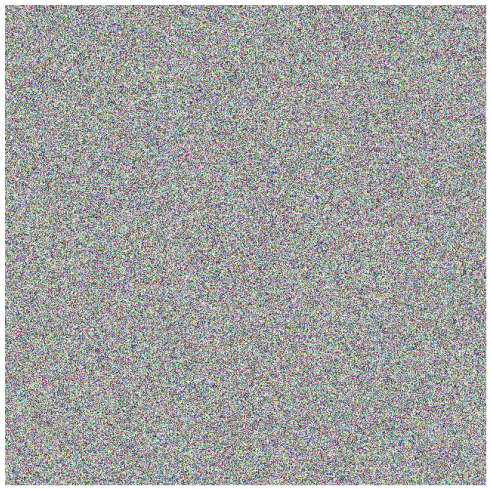
$$I = I' * S$$

Speckle : modélisation

On peut simuler le speckle pleinement développé sur une image optique en la multipliant par un speckle qui suivrait une loi gamma.

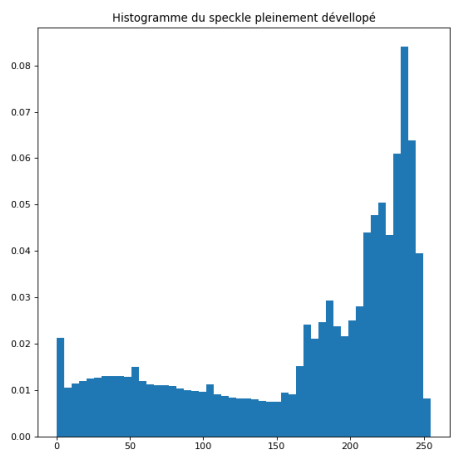
Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶ Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

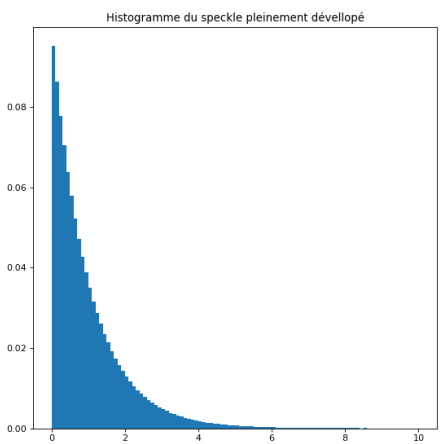


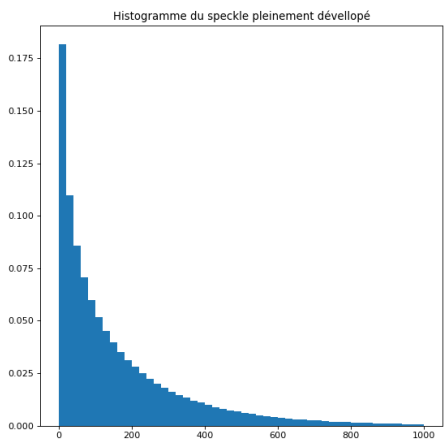




3







[3] Gundula Vogel de Pixabay modifié pour ce support (speckle + redimensionnement)

Speckle : pourquoi le modéliser ?

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶ Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

- L'intérêt de la modélisation de Goodman est que la loi Gamma est une loi dont on connaît l'espérance $\mathbb{E}$ et la variance $\mathbb{V}$;
- On peut montrer que la moyenne des pixels d'une zone homogène est égale à la valeur du coefficient de rétrodiffusion !

Speckle : pourquoi le modéliser ?

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶ Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

- L'intérêt de la modélisation de Goodman est que la loi Gamma est une loi dont on connaît l'espérance $\mathbb{E}$ et la variance $\mathbb{V}$;
- On peut montrer que la moyenne des pixels d'une zone homogène est égale à la valeur du coefficient de rétrodiffusion !

Pour diminuer le speckle "il suffit" donc de le moyenner sur une zone homogène. Il existe deux familles de façon de le faire :

Speckle : pourquoi le modéliser ?

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶ Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

- L'intérêt de la modélisation de Goodman est que la loi Gamma est une loi dont on connaît l'espérance $\mathbb{E}$ et la variance $\mathbb{V}$;
- On peut montrer que la moyenne des pixels d'une zone homogène est égale à la valeur du coefficient de rétrodiffusion !

Pour diminuer le speckle "il suffit" donc de le moyenner sur une zone homogène. Il existe deux familles de façon de le faire :

- Les **filtres spatiaux** : on moyenne la valeur de chaque pixels avec les pixels qui lui sont proches spatialement ou radiométriquement (filtre de Lee, NL-SAR, *etc.*)
- Les **filtres temporels** : on prend plusieurs images de la même scène et on les moyenne pixel à pixel (moyenne temporelle, méthode Rabasar, *etc.*)

Dans 99 % des cas, il faut filtrer le speckle avant d'analyser une image radar.

Exemple de filtrage temporel pour la réduction du speckle

Généralités

Caractéristiques du signal radar

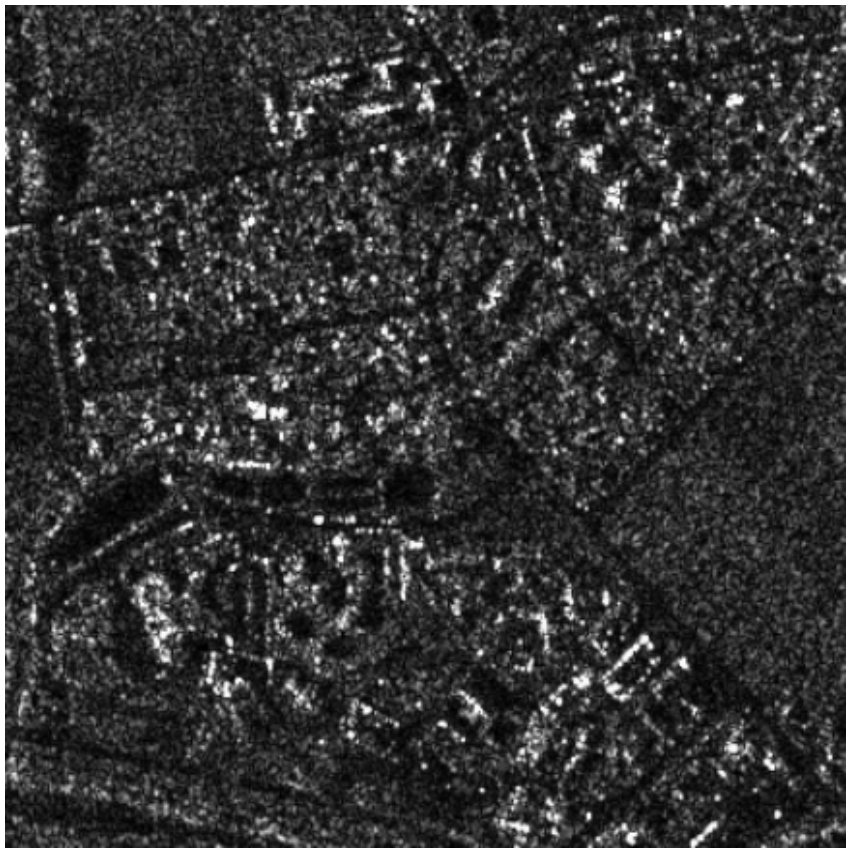
Acquisition d'une image radar

Radiométrie

▶ Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

Interférométrie





Cours de J.-M. Nicolas, crédit : DLR.

Bilan sur le speckle :

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
▶ Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
Interférométrie

Idée générale :

Le speckle n'est pas un bruit à proprement parler puisqu'il comporte une information. Il est lié à la cohérence de l'onde et peu généralement être modélisé comme un bruit multiplicatif suivant une loi Gamma.

Points clés :

Il complique cependant l'analyse/interprétation : on cherche à s'en débarrasser à l'aide de différents filtres (spatiaux ou temporels). Ces filtres s'appuient sur la connaissance des statistiques du speckle modélisé pour débruiter les images.

Polarimétrie radar

Matrice de diffusion

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
▶ Polarimétrie radar
Interférométrie

On parle de **polarimétrie radar** quand on dispose de tous les canaux de polarisations (4 combinaisons). Dans ce cas on peut retrouver toutes les informations concernant la **forme** de la cible.

Matrice de diffusion $[S]$

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

- E : champ électrique d'onde,
- S : diffusion,
- $< i >$: onde incidente,
- $< s >$: onde diffusée (scattered),
- chaque élément : amplitude et phase mesurées par les canaux du radar polarimétrique,
- radar monostatique : $S_{HV} = S_{VH}$, [S] symétrique.

Décomposer pour comprendre : Pauli

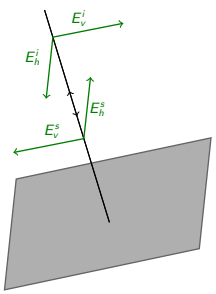
Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
▶ Polarimétrie radar
Interférométrie

Décomposition de [S] sur une base simple (matrices de Pauli)

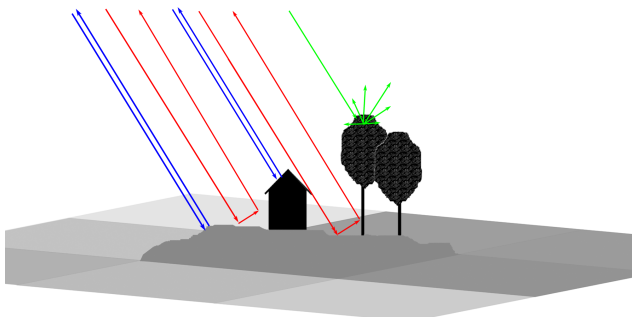
Dans le cas monostatique ($S_{HV} = S_{VH}$) :

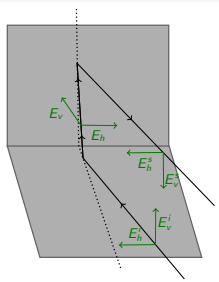
$$\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{HV} \end{bmatrix} = \frac{S_{HH}+S_{VV}}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{S_{HH}-S_{VV}}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + S_{HV}\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- Diffusion de surface $\approx (|S_{HH}+S_{VV}|^2)$
- Diffusion dièdrique, de doubles rebonds $\approx (|S_{HH}-S_{VV}|^2)$
- Diffusion de volume $\approx (|S_{HV}|^2)$



Réflexion de surface (simple interaction)

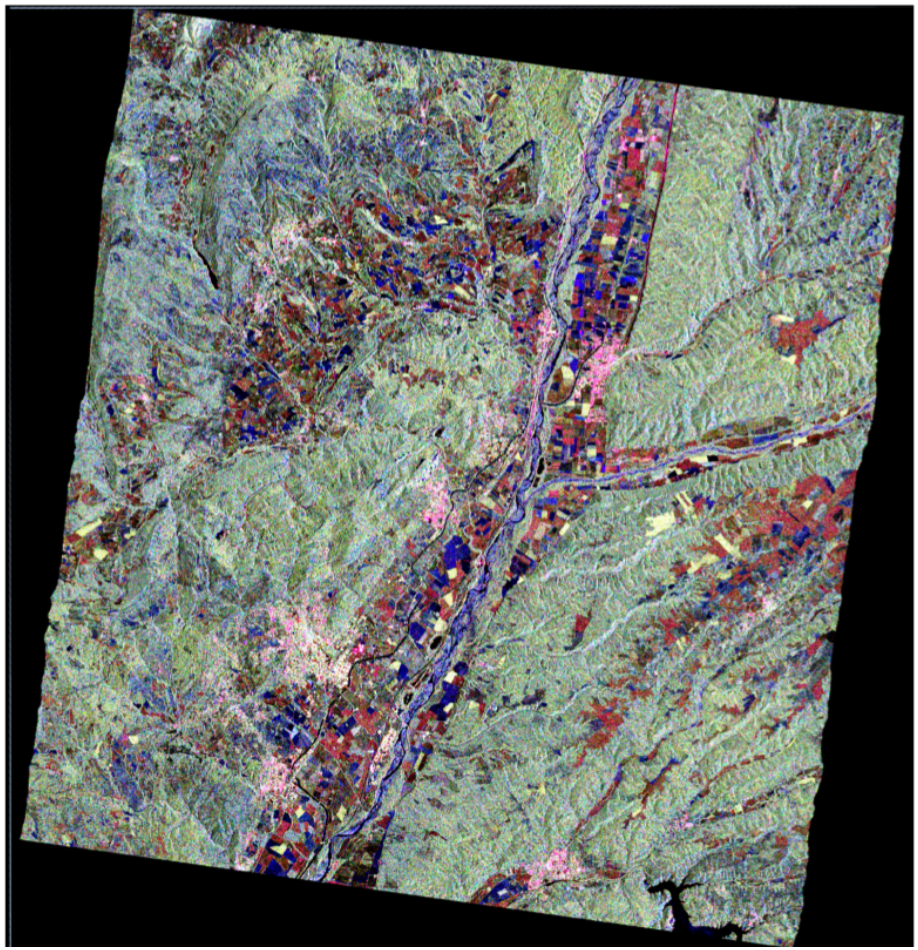




Réflexion de doubles rebonds (deux interactions)

Polarimétrie Radar - Décomposition de Pauli, Radarsat-2

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
▶ Polarimétrie radar
Interférométrie





Diffusion de surface, de volume et doubles rebonds
taille pixel terrain $\approx 4,7$ m $\times\ 7,5$ m en *slant range*

Images radar polarimétrique

Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

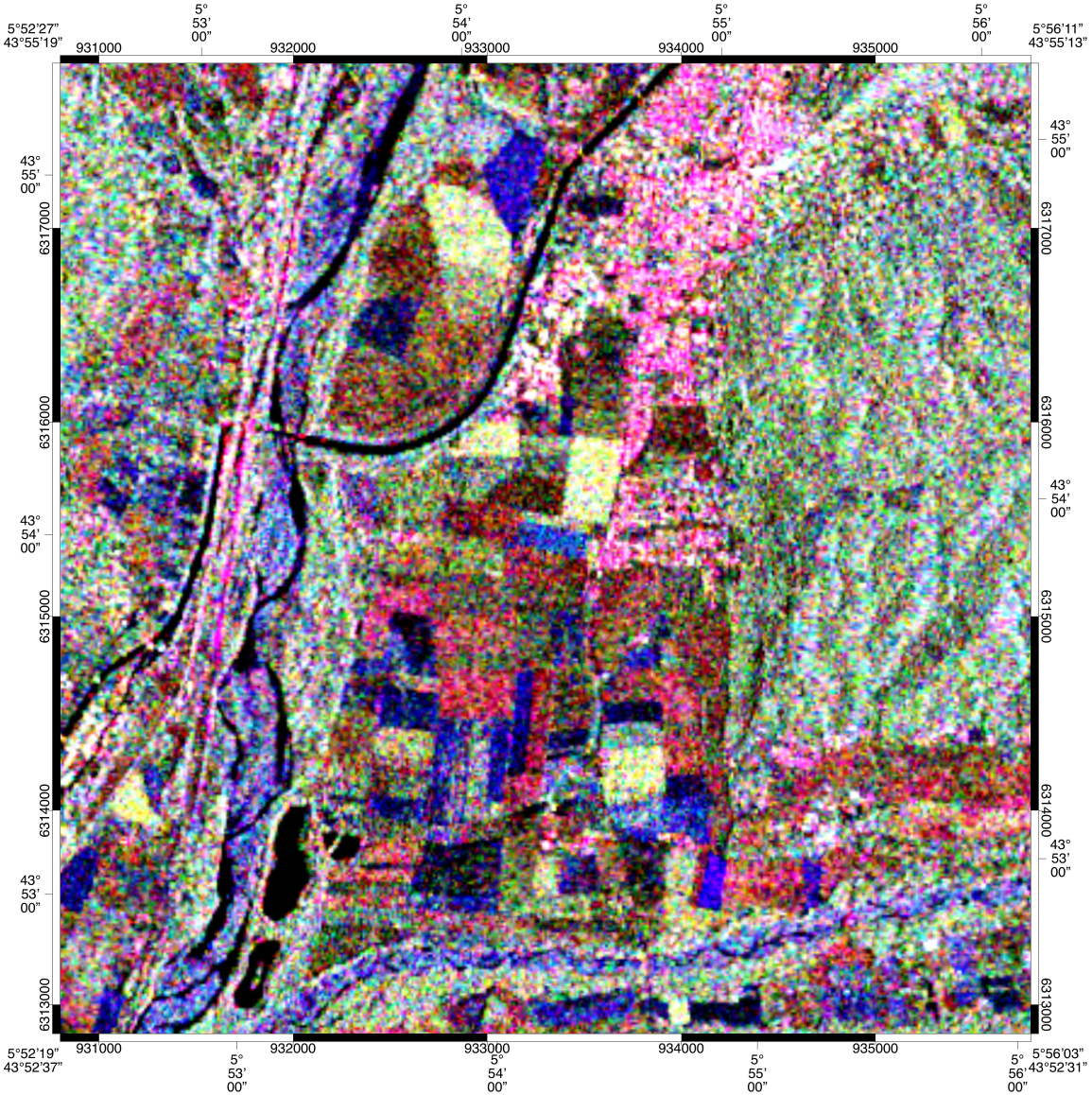
Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

▶ Polarimétrie radar

Interférométrie

résolution spatiale



- Slant Range
  $[7,48\ \text{m} \times 4,74\ \text{m}]$
- Ground Range
  $[4,74\ \text{m} \times 4,74\ \text{m}]$

Images radar polarimétrique

résolution spatiale, speckle

Généralités

Caractéristiques du signal radar

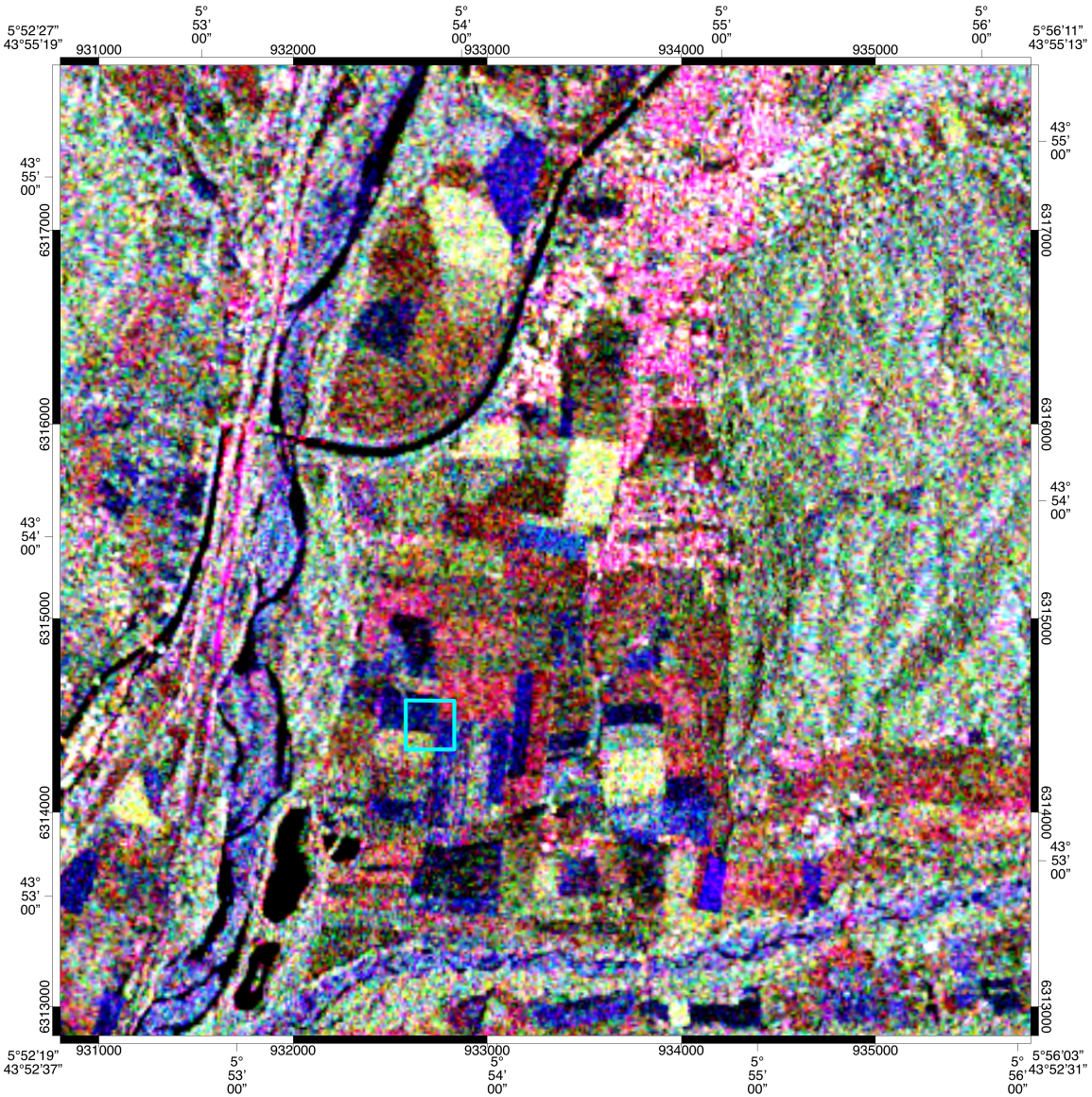
Acquisition d'une image radar

Radiométrie

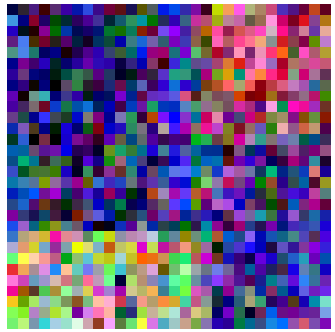
Le speckle ou chatoiement

▶ Polarimétrie radar

Interférométrie



- Ground Range $[4,74\ \text{m} \times 4,74\ \text{m}]$
- *1-look*



Images radar polarimétrique

Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

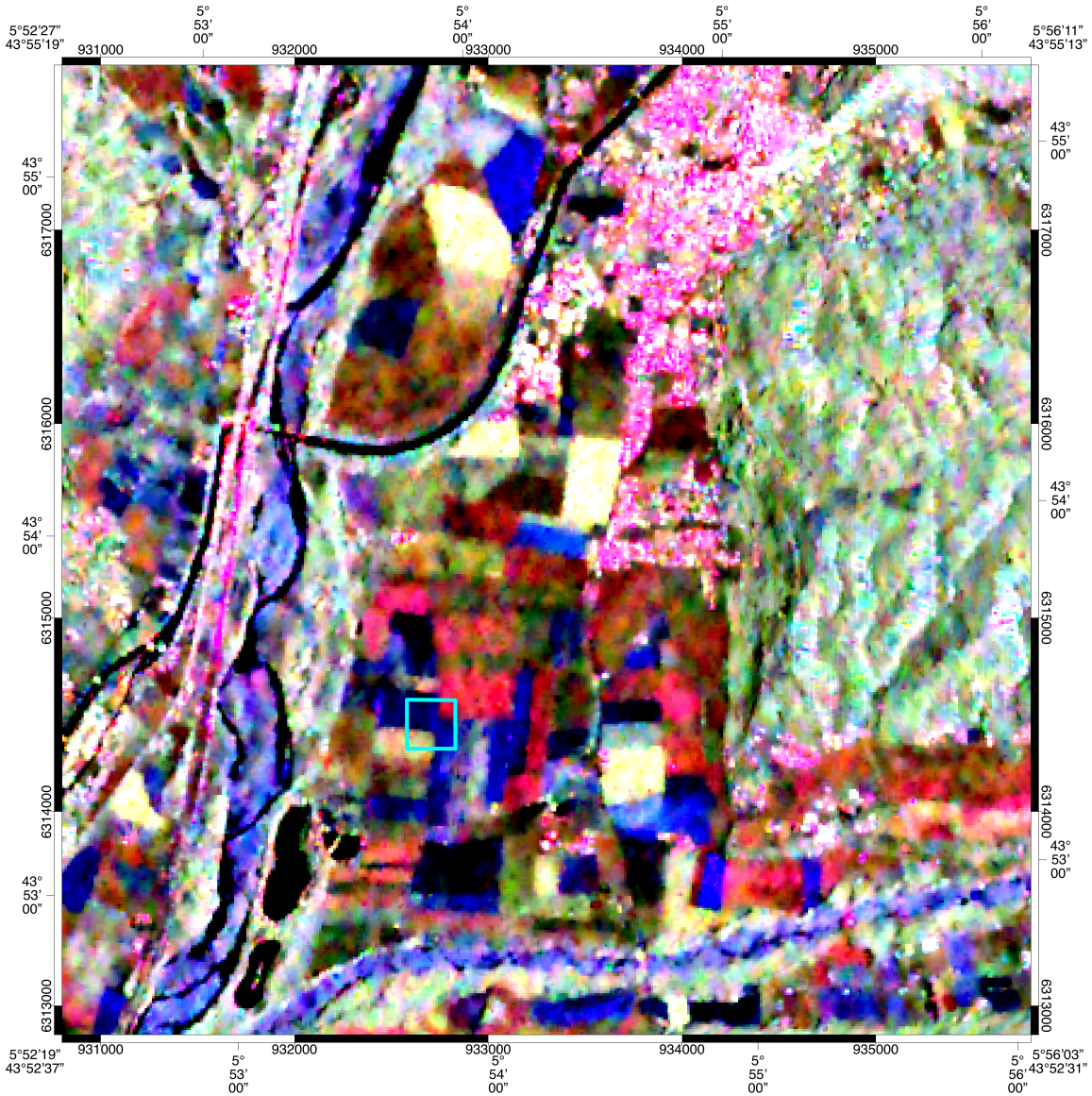
Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

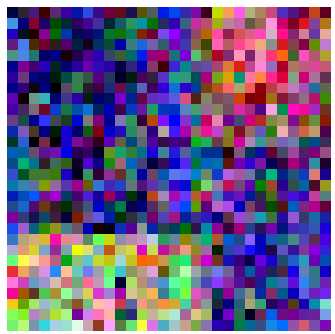
▶ Polarimétrie radar

Interférométrie

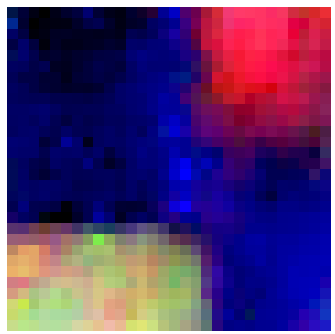
résolution spatiale, speckle



- Ground Range $[4,74\ \mathrm{m} \times 4,74\ \mathrm{m}]$
- *1-look*



- *81-looks*

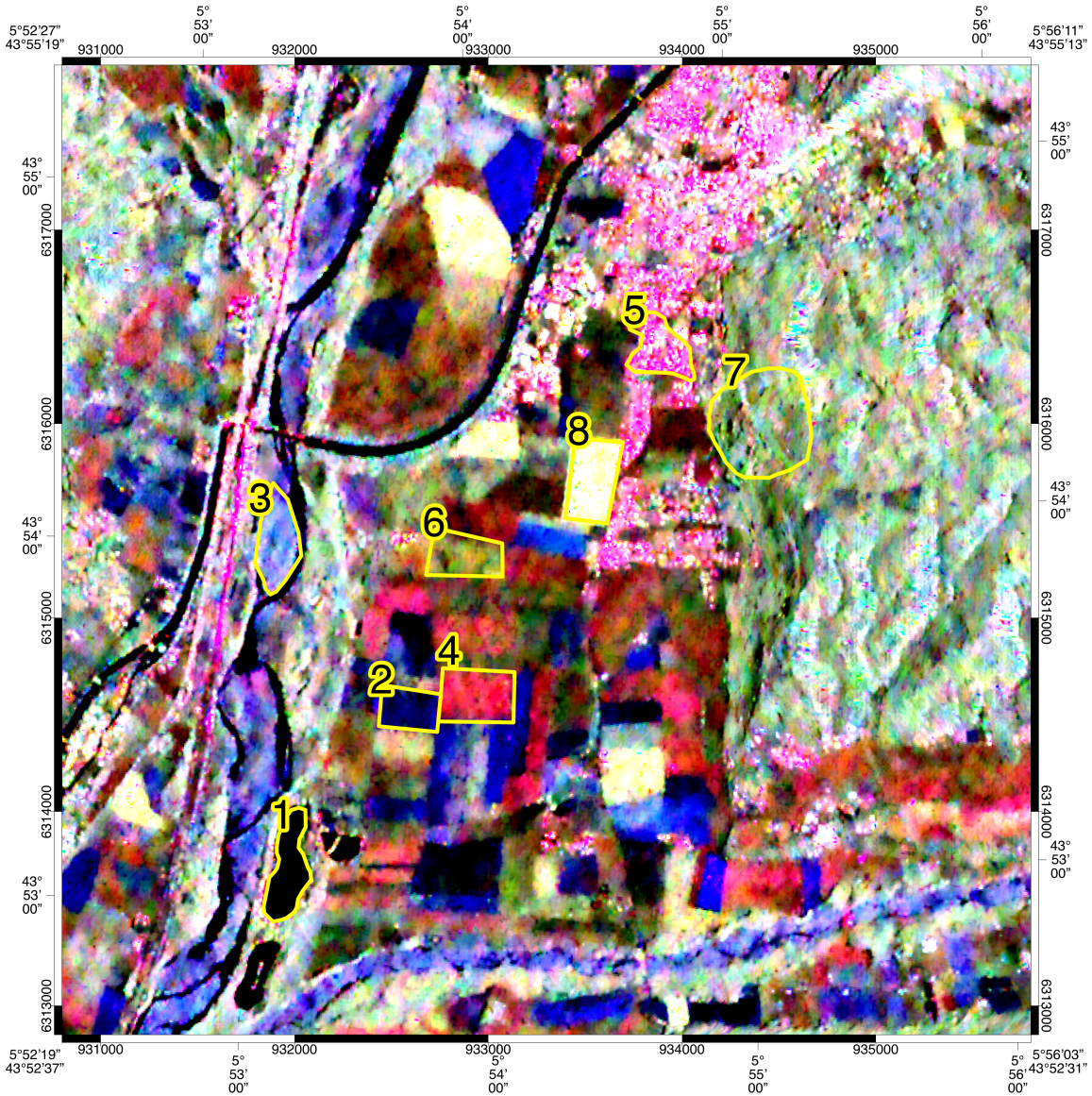


Lee Sigma Filter

Images radar polarimétrique

résolution spatiale, speckle, mécanismes de rétrodiffusion

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
▶ Polarimétrie radar
Interférométrie



- Ground Range $[4,74\ \mathrm{m} \times 4,74\ \mathrm{m}]$
- Nomenclature

1	*plan d'eau*
2	*jeune mais*
3	*galets*
4	*orge*
5	*urbain*
6	*sainfoin*
7	*foret*
8	*colza*

Interférométrie

Interférométrie : introduction

Généralités

Caractéristiques du signal radar

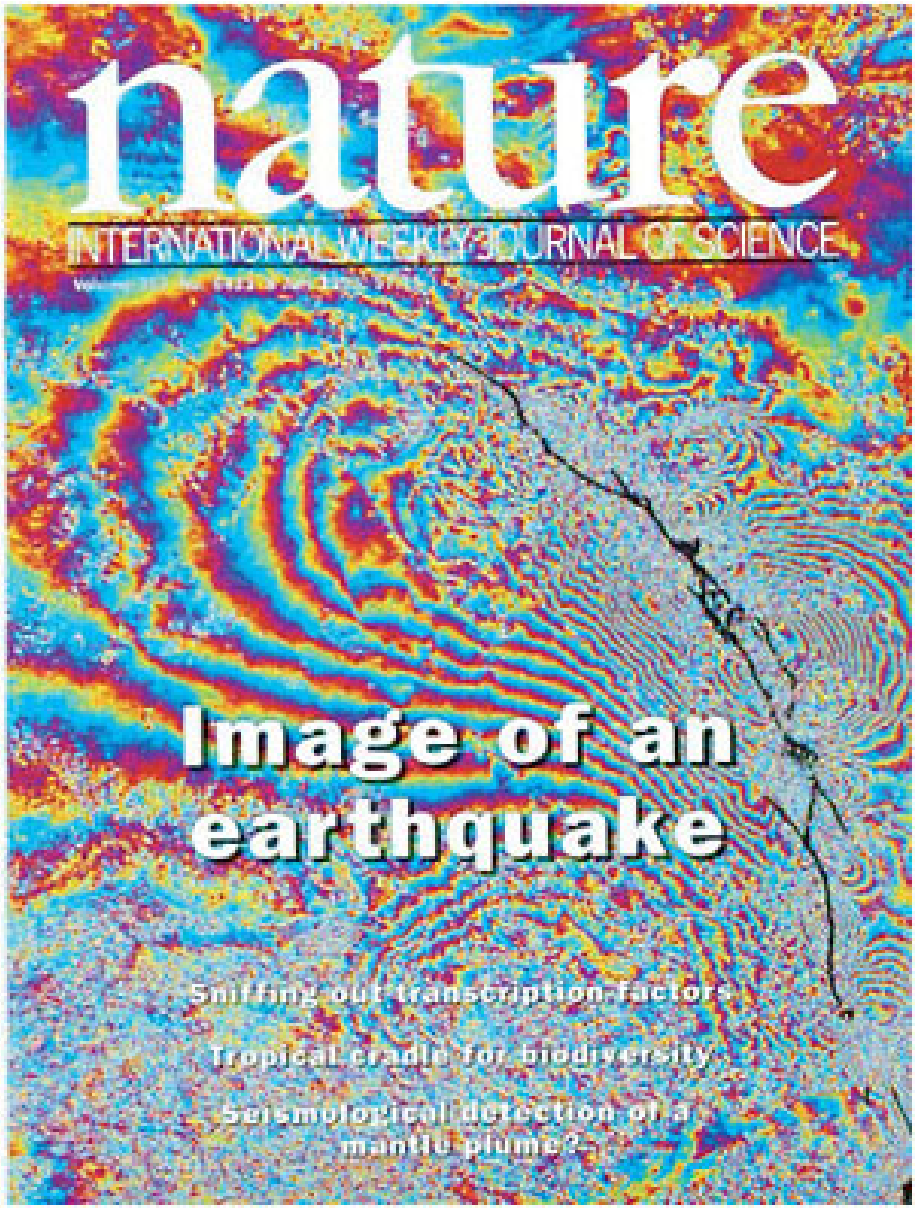
Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

▶ Interférométrie



Généralités

Caractéristiques du signal radar

Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

▶ Interférométrie

Interférométrie

L'interférométrie radar produit deux types d'information

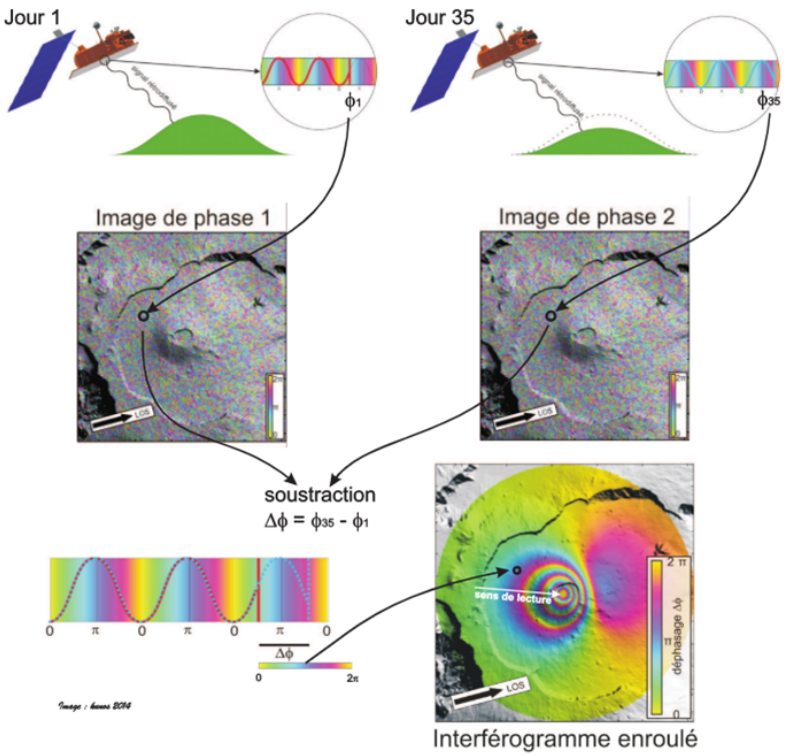
- information topographique : **mesurer l'élévation**
- interférométrie de déplacement : **mesurer le mouvement**

Principe

- Interférométrie radar est obtenue depuis un couple d'images acquises d'un avion, d'une navette spatiale, d'un satellite.
- On calcule une différence de phase entre les deux images.

Principe

Généralités
Caractéristiques du signal radar
Acquisition d'une image radar
Radiométrie
Le speckle ou chatoiement
Polarimétrie radar
▶ Interférométrie



Interférométrie

En mesurant la différence de phase entre 2 dates, on peut mesurer des déformations de surfaces de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la bande utilisée. Attention, cela suppose de prendre en compte tous les facteurs externes comme :

- la position des satellites,
- les conditions atmosphériques,
- le bruit.

Exemple

Généralités

Caractéristiques du signal radar

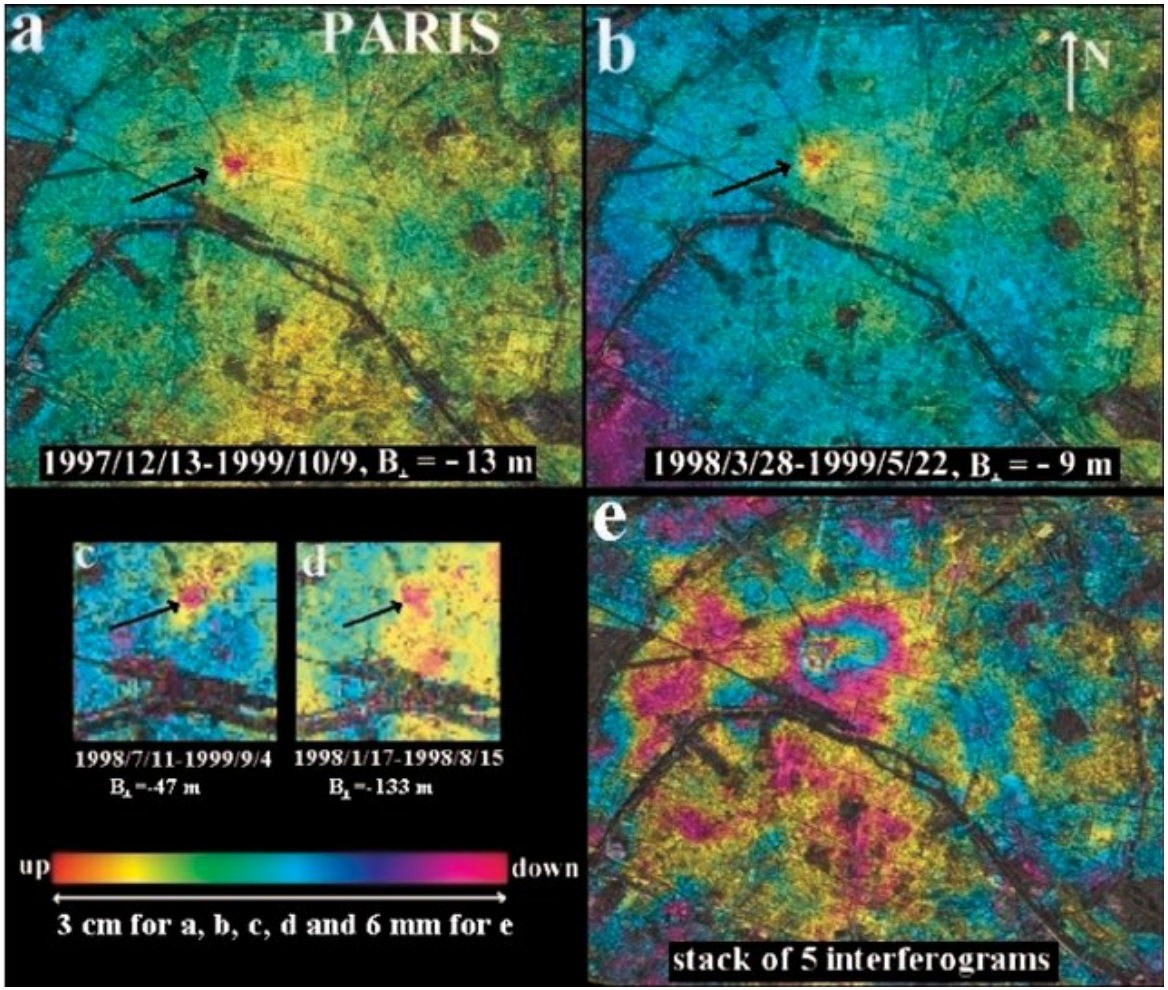
Acquisition d'une image radar

Radiométrie

Le speckle ou chatoiement

Polarimétrie radar

▶ Interférométrie



Mise en évidence d'un soulèvement au sud de la gare St-Lazare à Paris en 1998. (Le Mouélic et al., GRL 2002) [4]

[4] http://www.sciences.univ-nantes.fr/lpgnantes/

ENSG Géomatique

ÉCOLE NATIONALE
DES SCIENCES
GÉOGRAPHIQUES



Merci pour votre attention

Question(s) ?

alexandre.hippert-ferrer@ign.fr