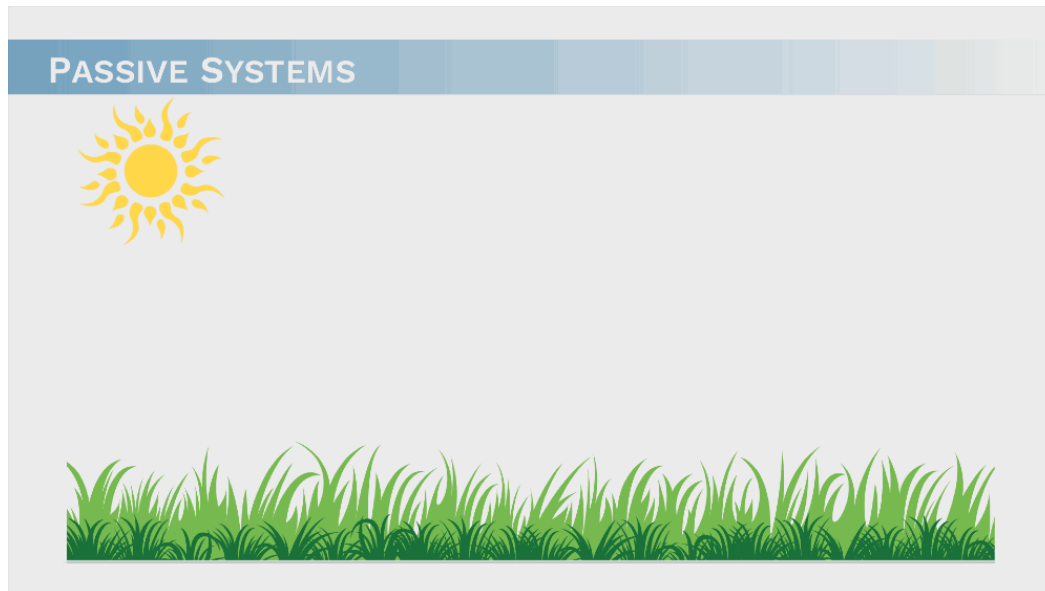


Téledétection radar

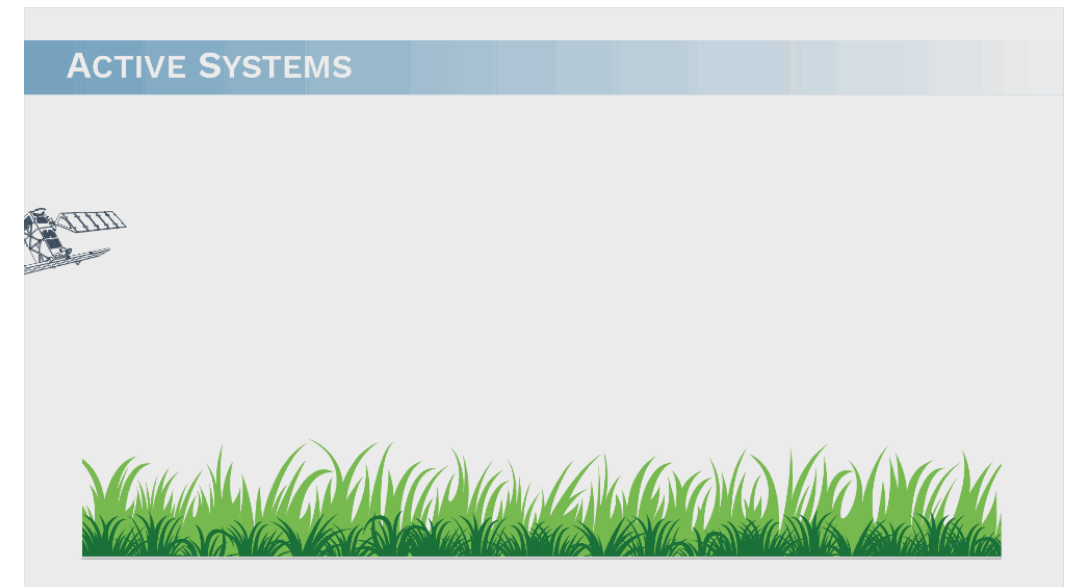
Télédétection passive

- Le soleil illumine la surface terrestre dans tout son spectre de longueur d'onde
- Le sol rétrodiffuse une partie de l'énergie reçue
- Le satellite capte le signal rétrodiffusé et enregistre l'intensité lumineuse selon le spectre sensible du capteur



Télédétection active

- Le satellite génère son propre rayonnement, ayant une certaine fréquence/polarisation, qui illumine la surface terrestre
- Le sol rétrodiffuse une partie de l'énergie reçue
- Le satellite capte le signal rétrodiffusé (selon une polarisation)

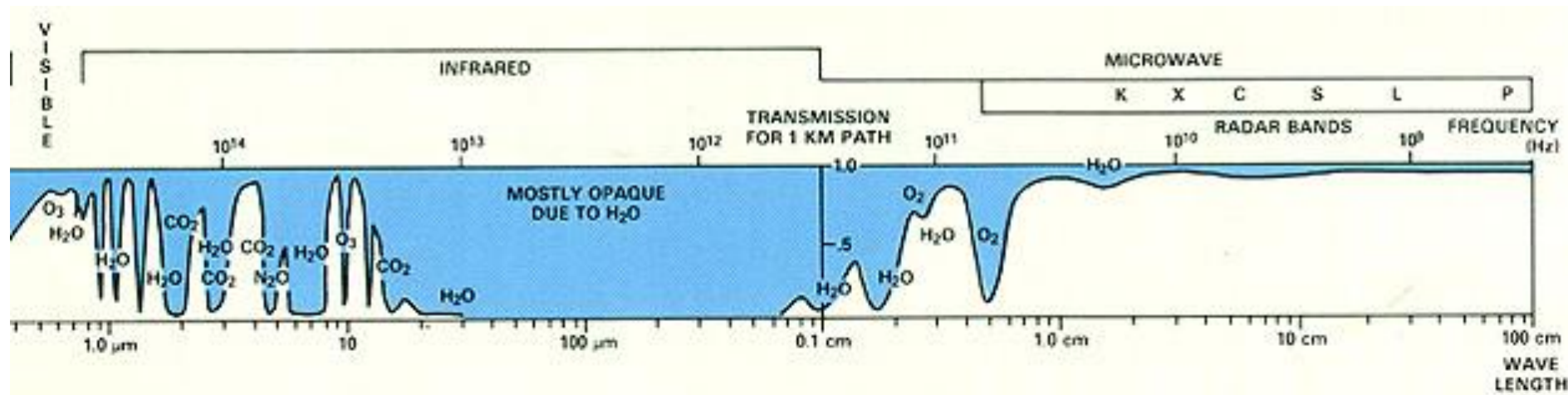
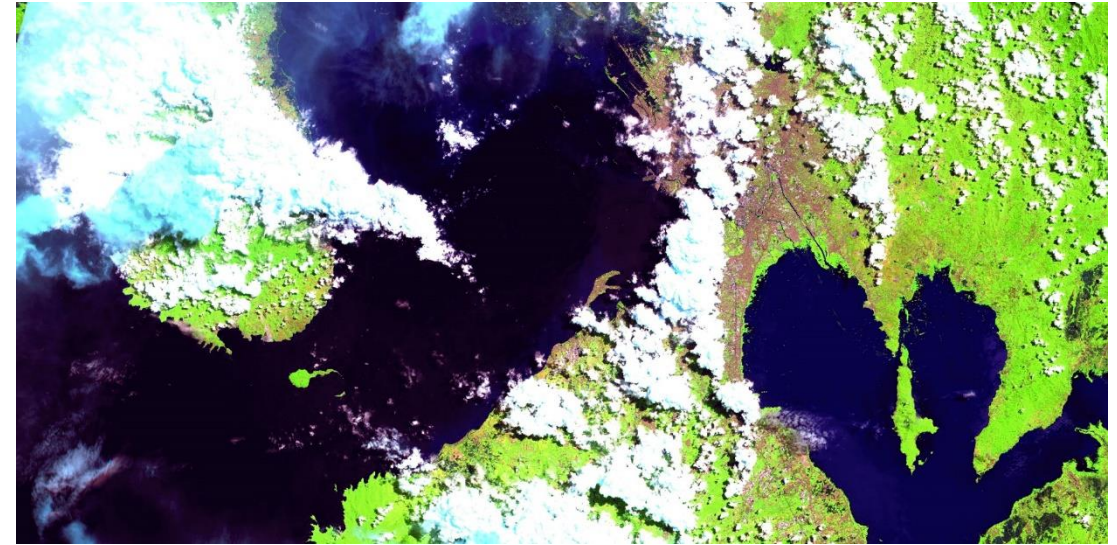


Sources : *Echoes In Space – EO College*

Avantages de l'imagerie RADAR

- Observations de nuit comme de jour
- Pénétration de l'atmosphère / nuages
- Choix de la fréquence et polarisation

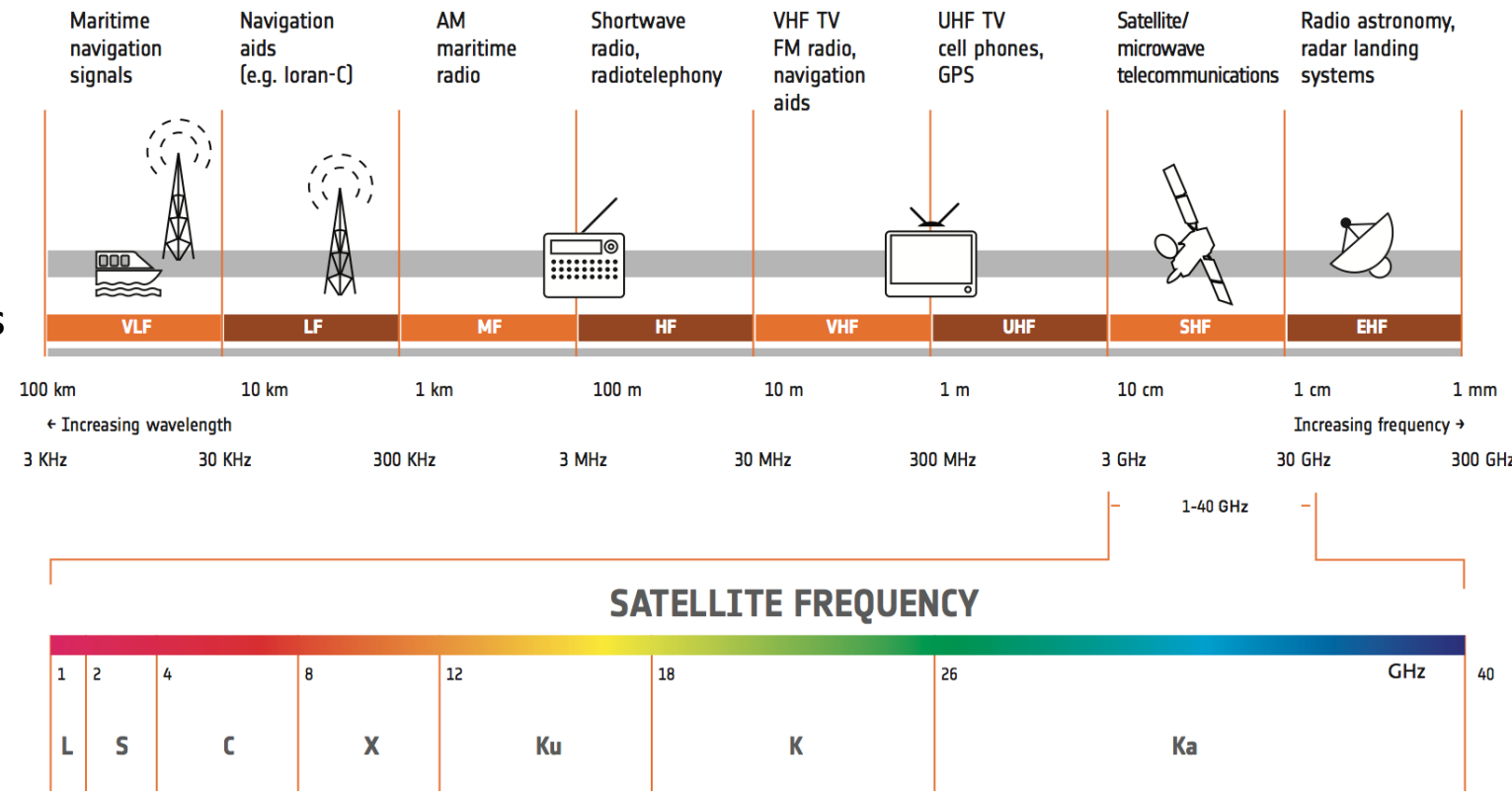
-> Augmentation du nombre d'acquisitions par un facteur 8
en Belgique (par rapport aux images optiques)



Sources : Remote Sensing – Christian Barbier

Les bandes de fréquence en RADAR satellitaire

- Entre 1 et 40 GHz
- Nomenclature confuse
- Chaque bande dispose de propriétés qui déterminent les applications possibles (topographie, glaciologie, biomasse,)
- D'une manière générale un signal réagit fort avec des géométries de taille comparable à la longueur d'onde employée

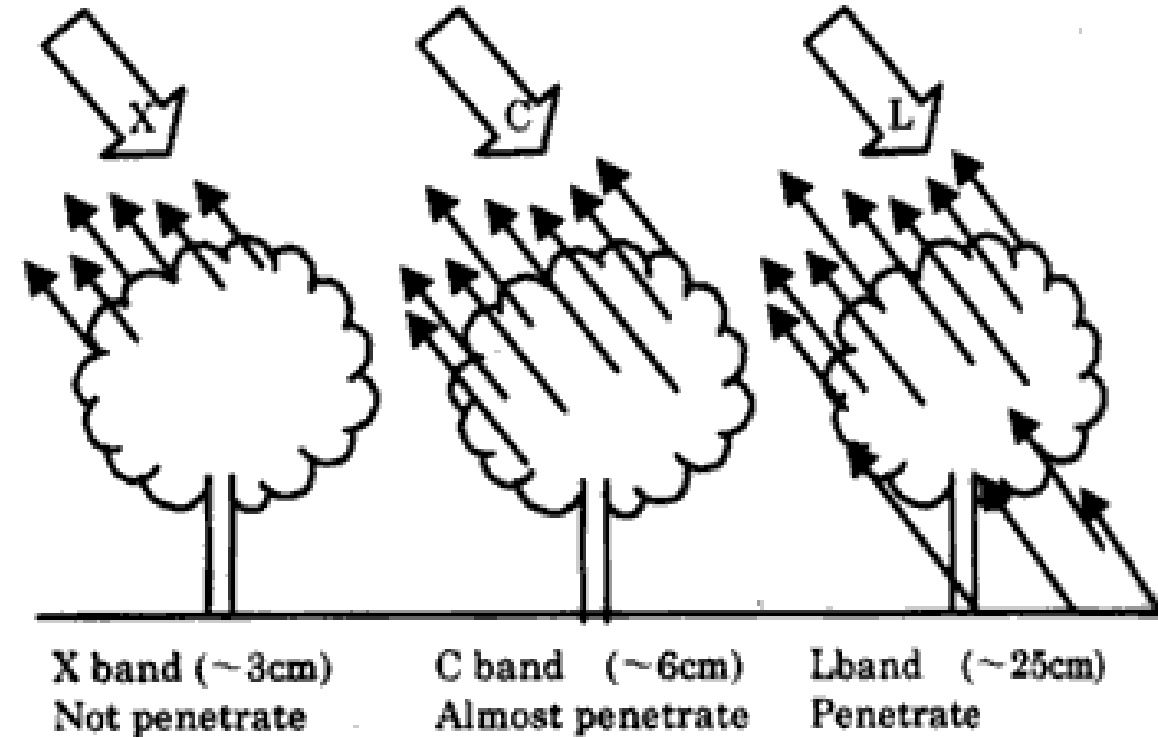


Sources : Echoes In Space – EO College

Les bandes de fréquence en RADAR (exemple)

- Les petites longueurs d'onde vont être bloquées très rapidement par la canopée
- Les grandes longueurs d'onde traversent la canopée et interagissent avec le sol

(dépend également des conditions d'humidité)

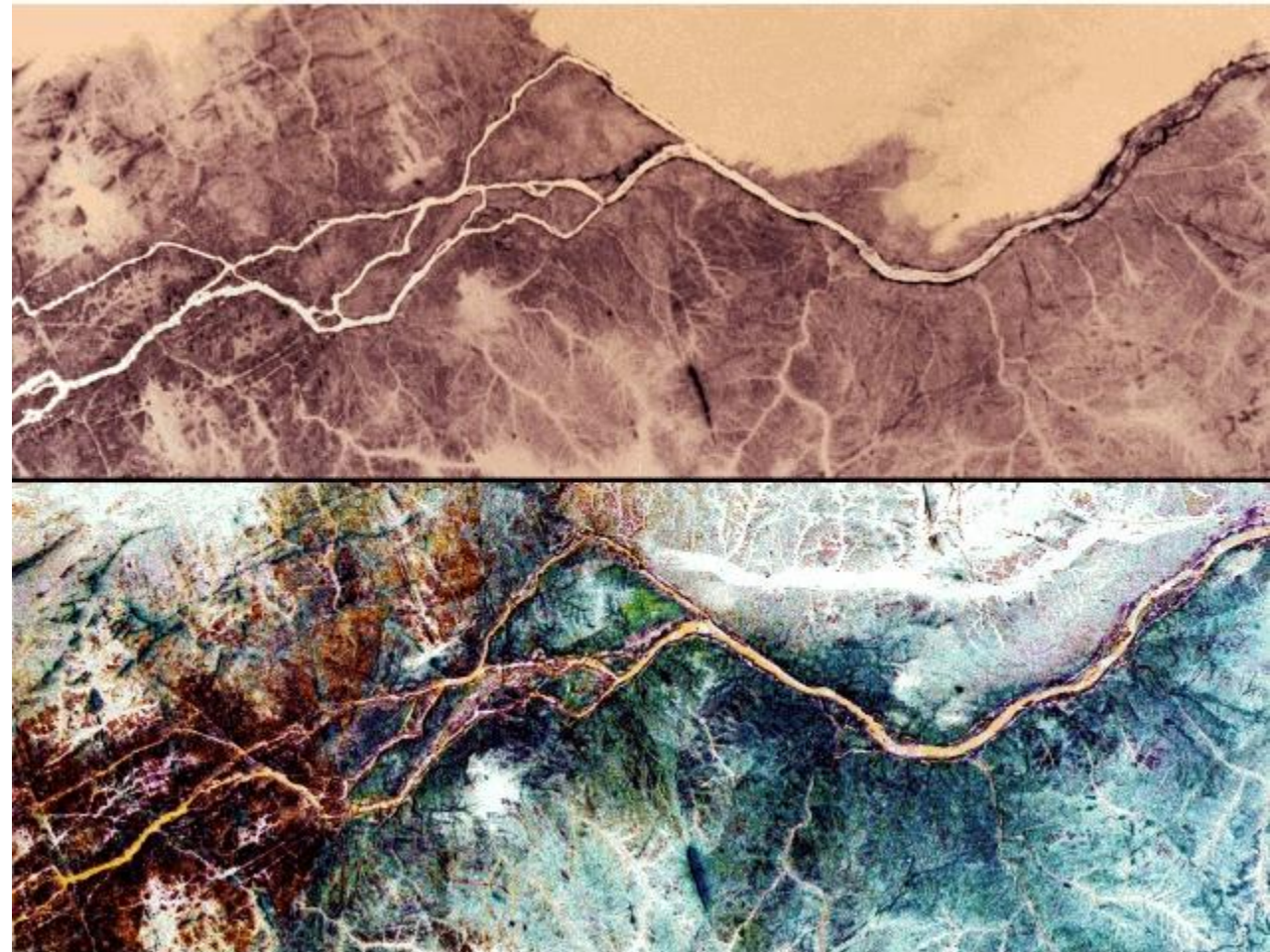


Sources : Remote Sensing – Christian Barbier

Les bandes de fréquence en RADAR (exemple 2)

- Les fréquences employées en Radar sont capables de pénétrer dans le sol
- Les capacités de pénétration sont liées à la longueur d'onde employée et à l'humidité du sol
- En employant la bande-C et en travaillant en climat très aride, on peut observer l'ancien bassin du Nil (Soudan)
 - Le Radar permet d'apporter un nouveau regard sur des éléments physiques

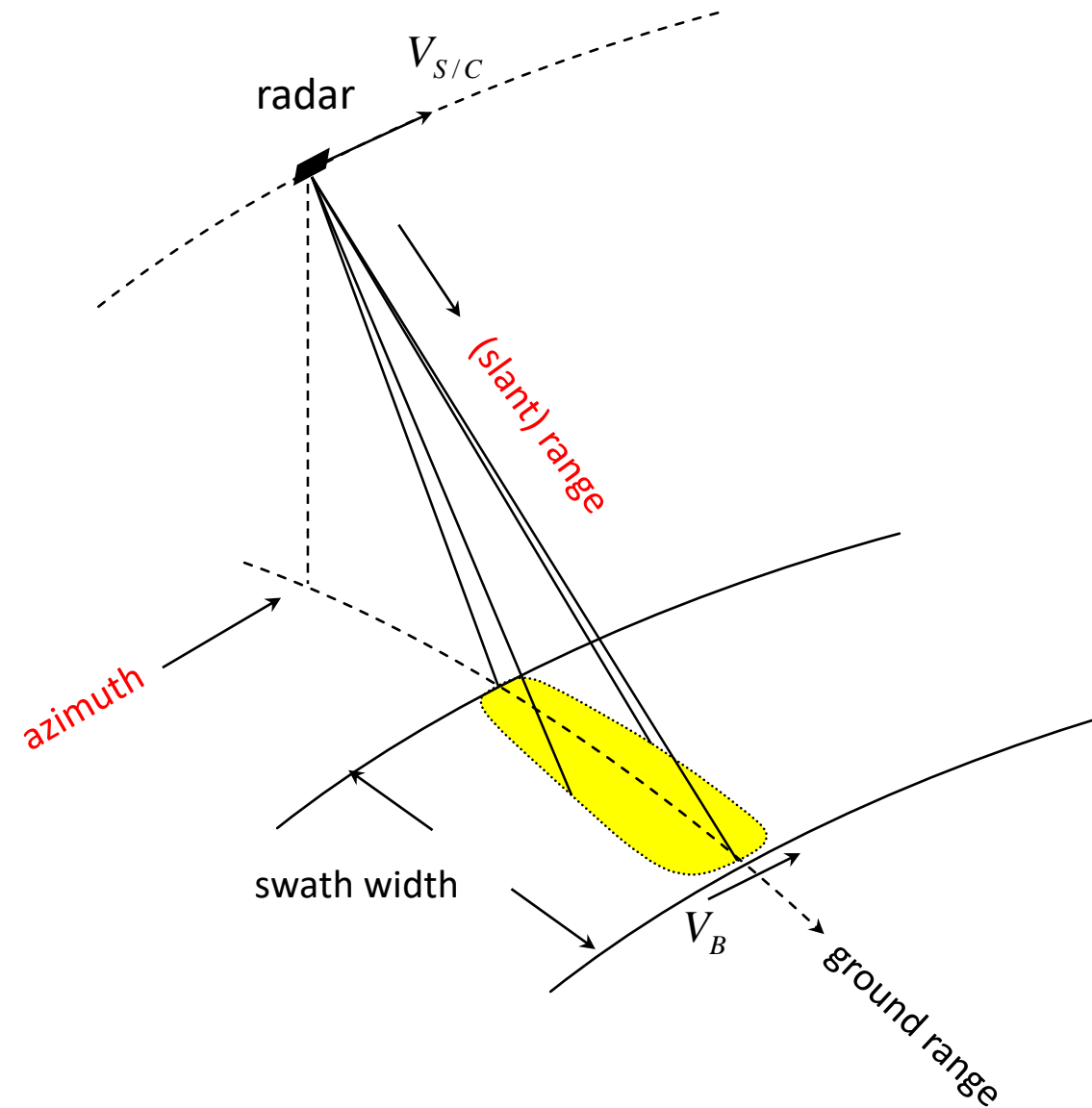
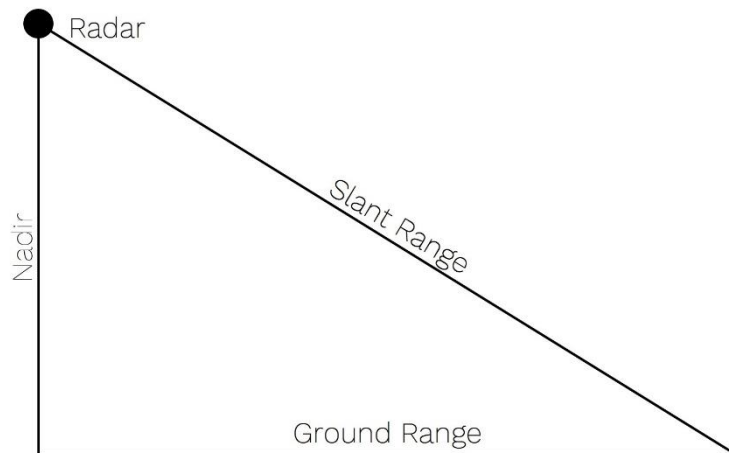
Image optique (haut) vs image SAR-C (bas)



*Sources : Introduction to the Physique and
Techniques of Remote Sensing – C. Elachi*

Géométrie d'acquisition

- Le satellite se déplace en illuminant un de ses côtés (side-looking)
- Les coordonnées images correspondent à une géométrie dite azimuth/slant-range
- L'axe slant-range correspond donc à une distance au satellite (et non une distance au sol)



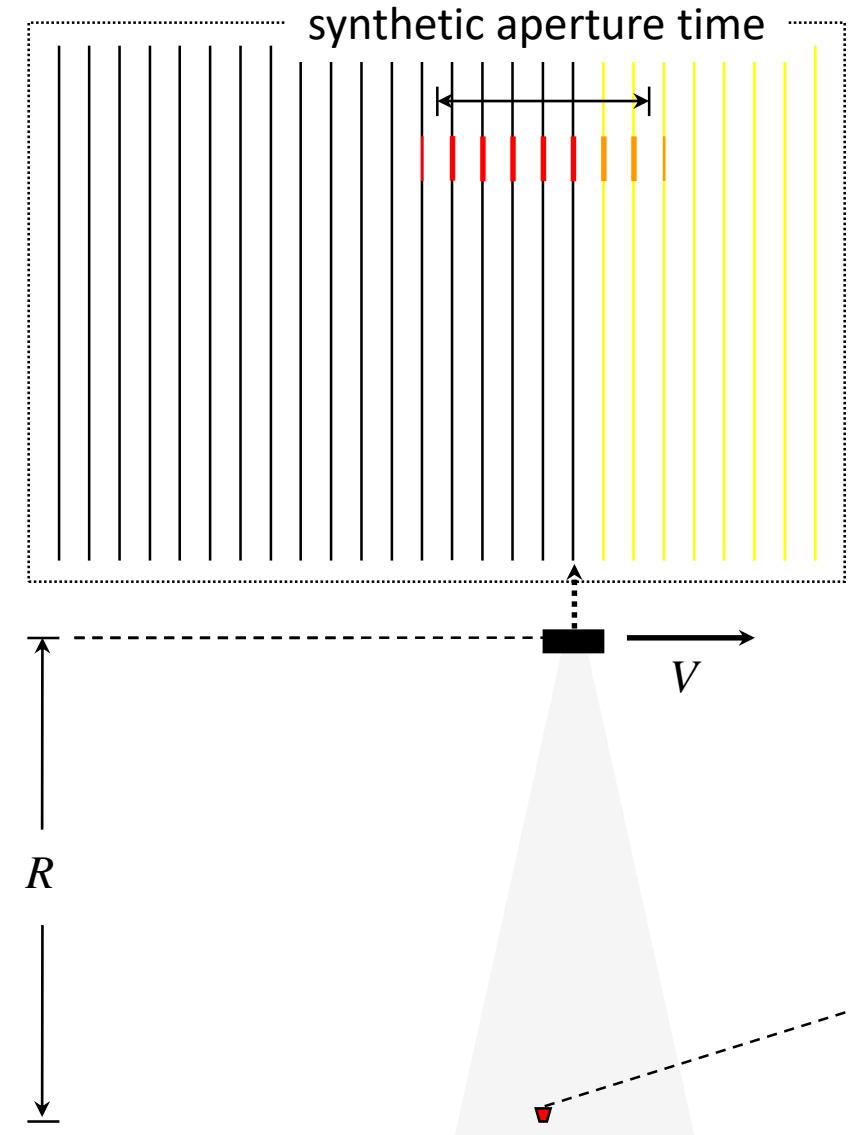
Sources : SAR Imaging - SAREDU

Le soucis de la résolution en micro-ondes

- La résolution d'image est dépendante de la longueur d'onde

$$\Delta x = \frac{r\lambda}{L}$$

- Pour ERS, résolution de quasiment 5KM !
- Solution : synthèse d'ouverture
 - Synthetic Aperture Radar (SAR) (non-étudié ici)
 - Résolution ~décamétrique



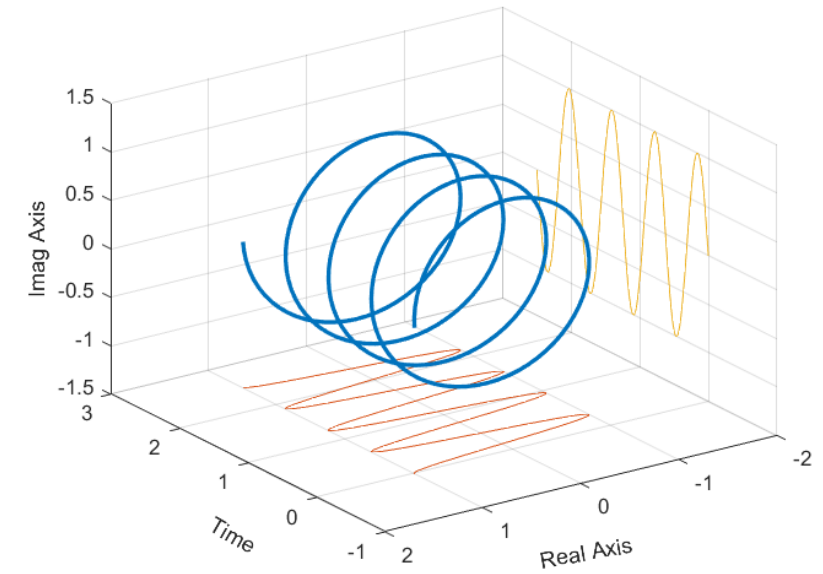
Sources : SAR Imaging - SAREDU

Image SAR

- Image complexe au sens mathématique du terme
- L'image u est un signal complexe formé d'une amplitude A et d'une phase θ

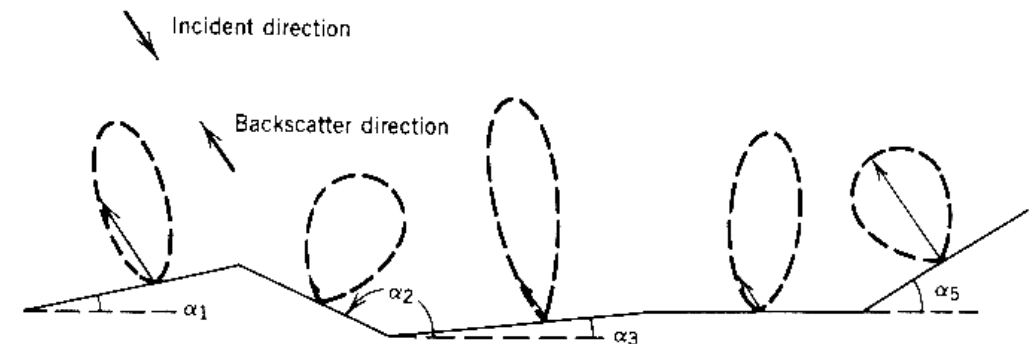
$$u = A e^{j\varphi} = A \cos \varphi + j A \sin \varphi$$

- En imagerie visible, on utilise principalement l'amplitude
- En SAR, on utilise l'amplitude pour une série d'applications, mais la phase peut s'avérer extrêmement utile (cf. interférométrie SAR)



Amplitude

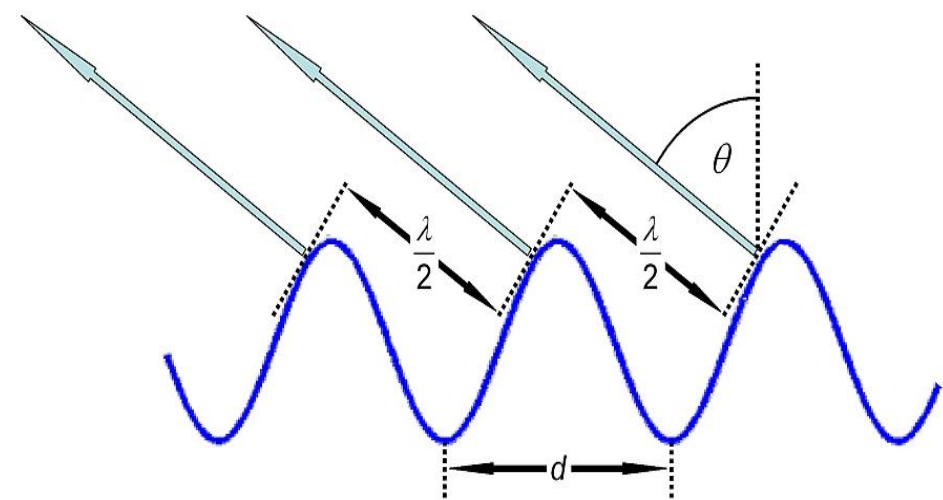
- L'amplitude dépend des mécanismes de rétrodiffusion intrinsèques aux propriétés moyennes de la zone éclairée
- Typiquement, l'amplitude du signal rétrodiffusé est liée à deux paramètres propres à l'objet :
 - La rugosité
 - L'humidité
- De plus, il est affecté par la géométrie d'acquisition, en particulier, l'angle entre la normale à la pente et la direction du capteur



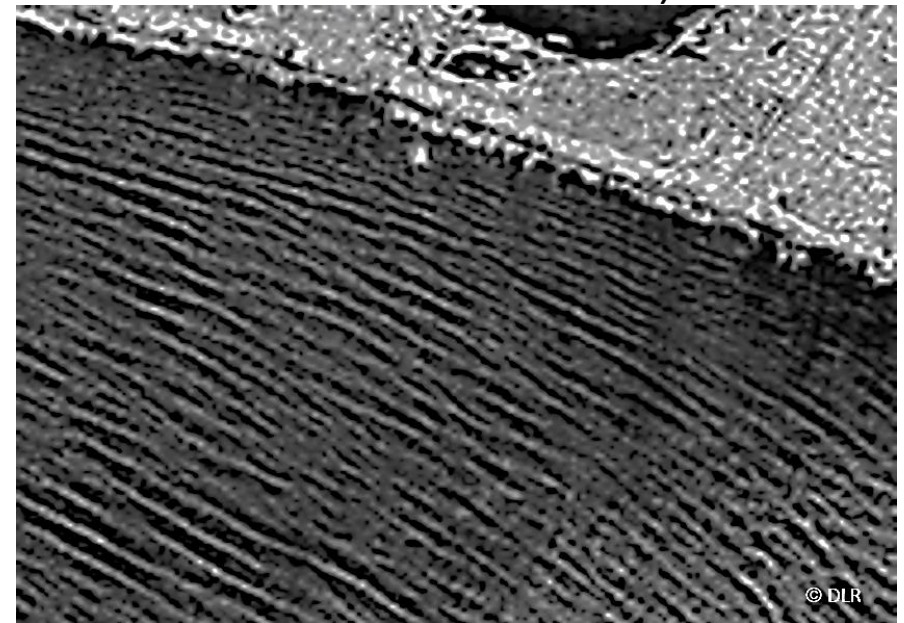
Sources : Spaceborne Radar
Remote Sensing– C. Elachi

Application directe de l'amplitude

- La surface des océans constitue une surface agissant comme un miroir pour les micro-ondes (réflexion spéculaire)
- Lors de vents calmes, la surface est noire car le signal n'est pas renvoyé vers le capteur
- Lors de vents modérés, les vagues en surface forment périodiquement des pentes perpendiculaires à la ligne de visée du satellite
- Lors de vents forts, l'océan agit comme une surface rugueuse régulière



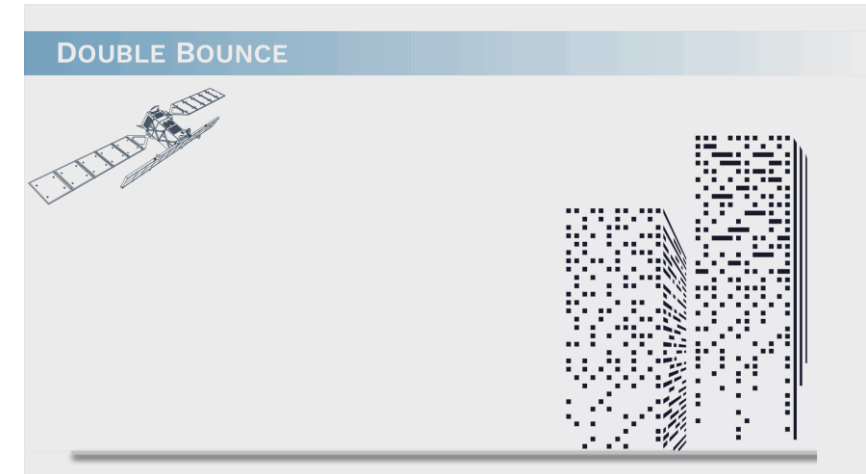
Vents estimés de 3.25 m/s



Sources : Echoes In Space – EO College

Application directe de l'amplitude

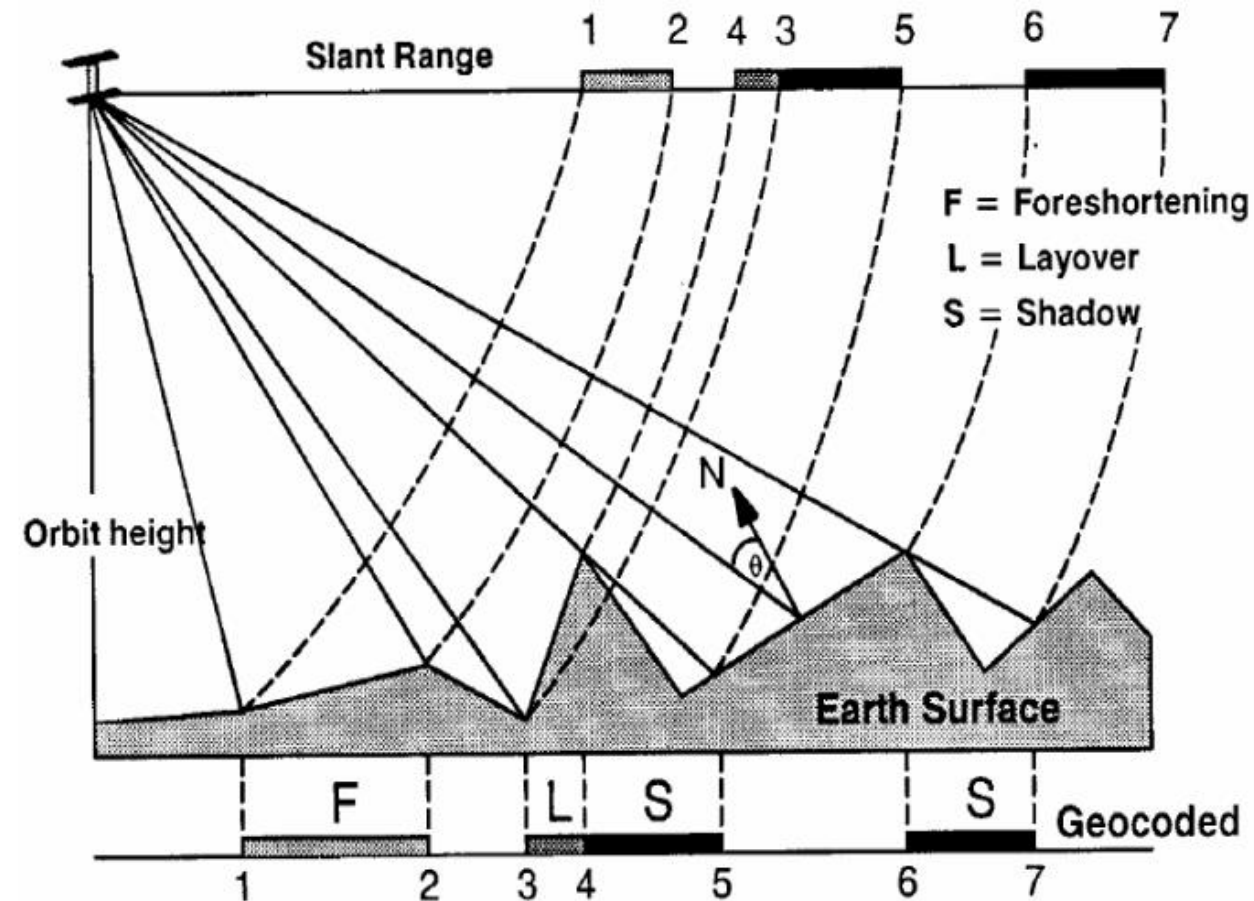
- Lorsque le signal radar rencontre deux surfaces lisses et perpendiculaires, le signal rétrodiffusé conserve une amplitude très importante
- Effet de « double bounce »
- Effet très courant en zone urbaine



Sources : *Echoes In Space – EO College*

Distorsions géométriques (topographie)

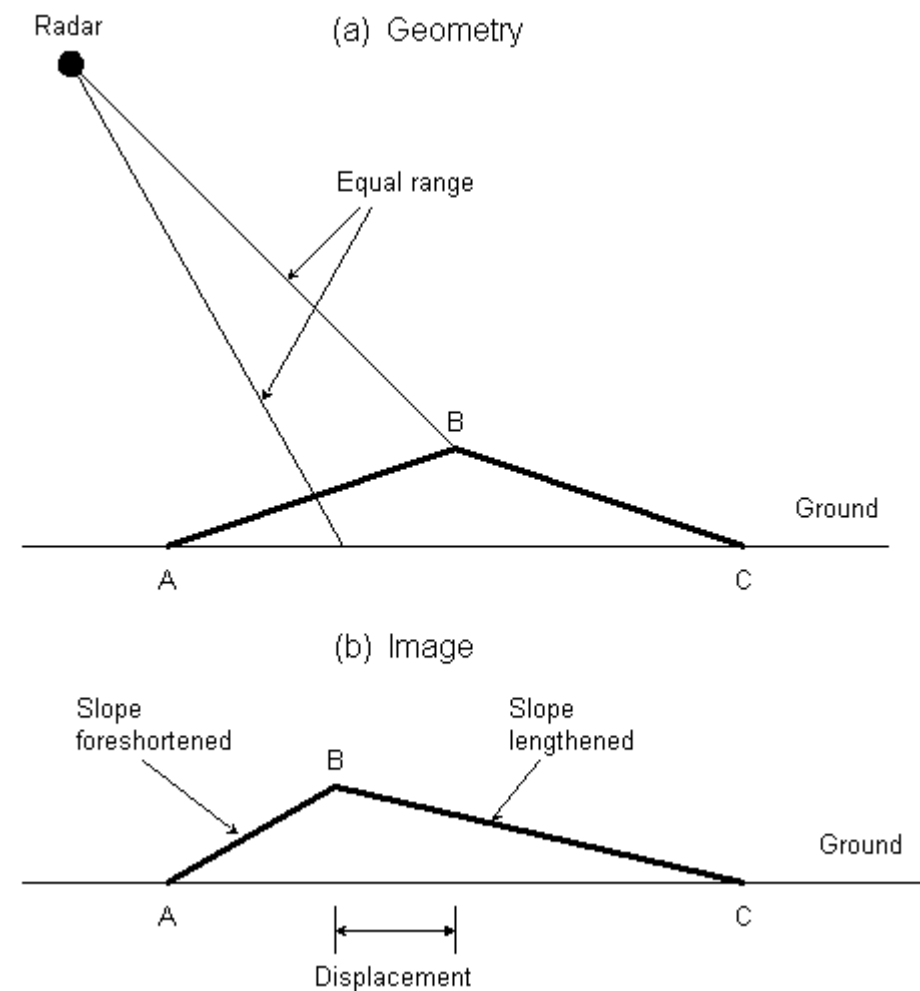
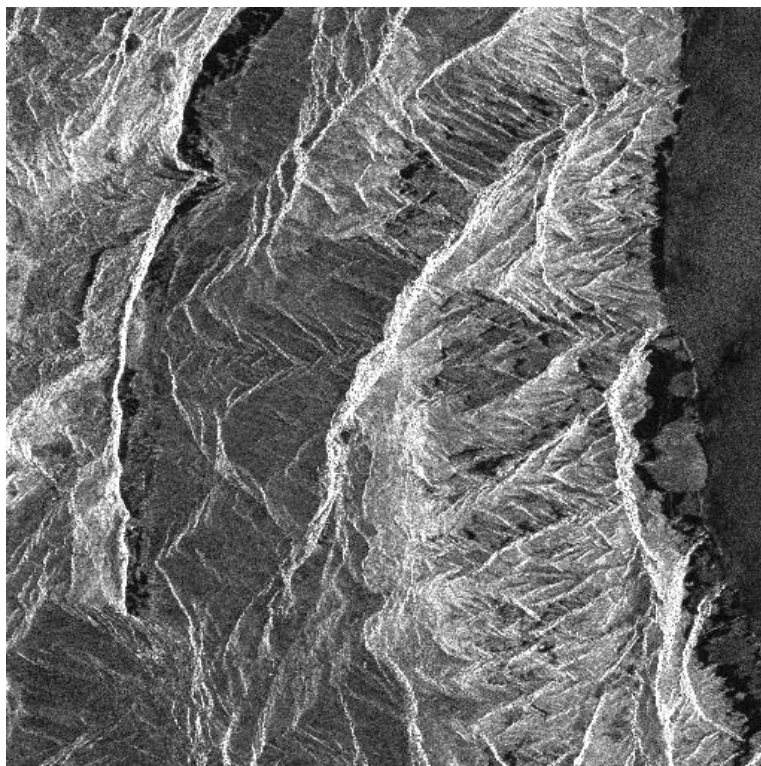
- Le radar mesure des distances, non des angles. La géométrie d'acquisition introduit donc des déformations liées à la topographie du sol
 - Foreshortening
 - Layover
 - Shadowing
- Ces déformations sont d'autant plus visibles que l'angle de visée du satellite est grand



Sources : Spaceborne Radar
Remote Sensing– C. Elachi

Foreshortening

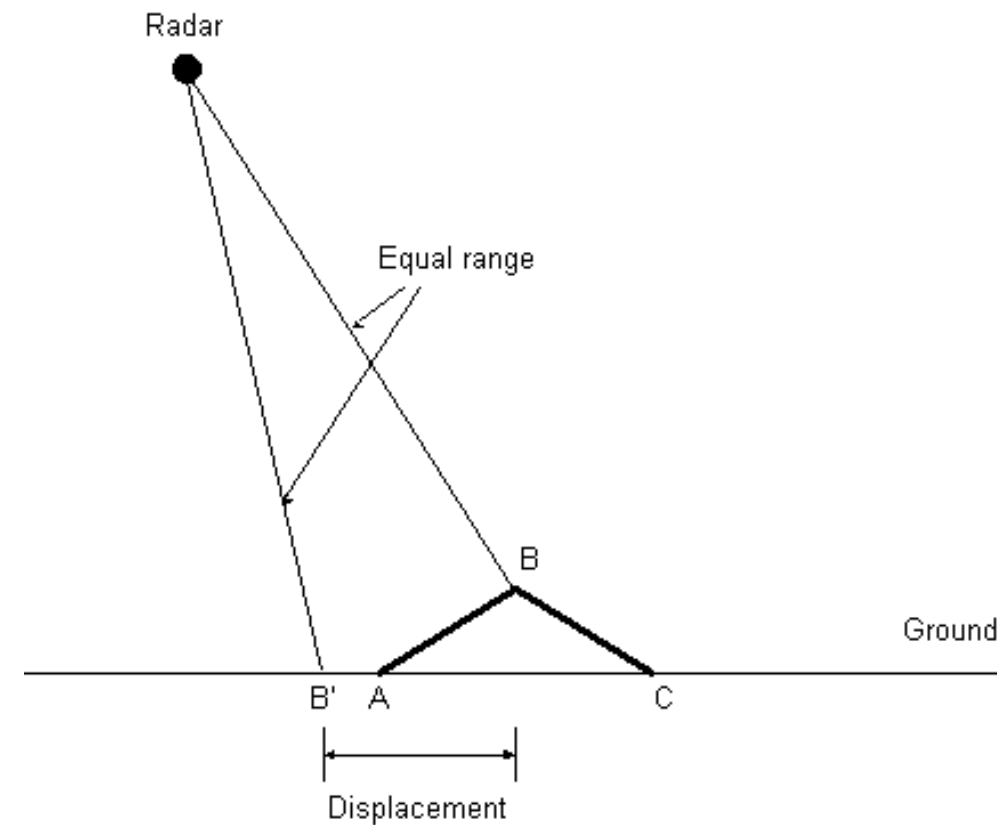
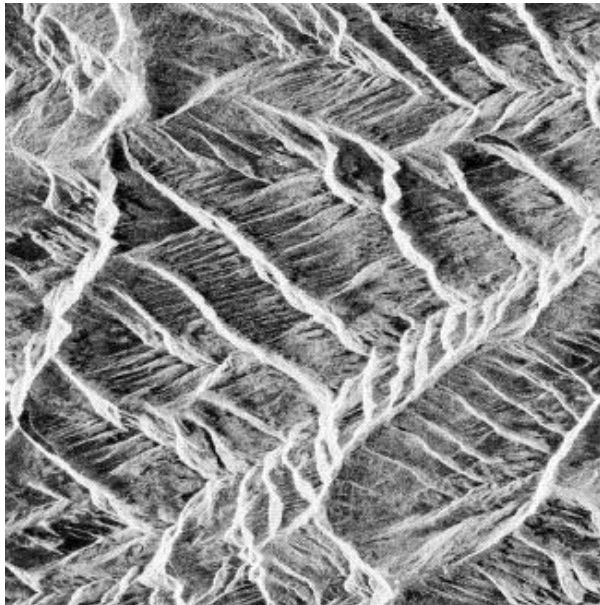
- Des altitudes plus hautes sont plus proches du capteur; elles apparaissent donc plus tôt dans l'image



Sources : *Echoes In Space* – EO College

Layover

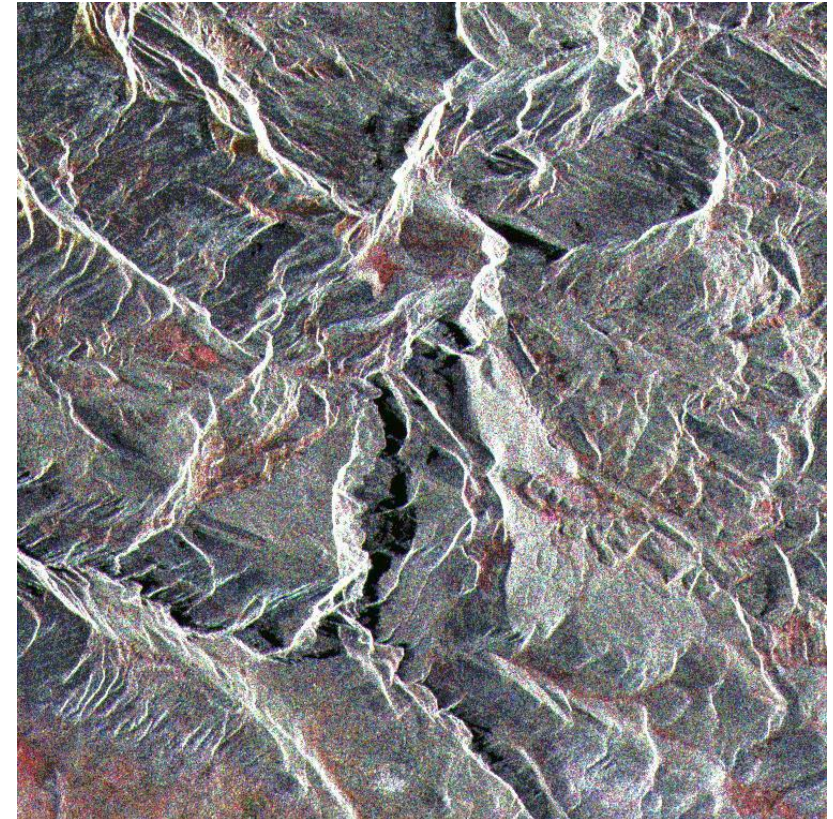
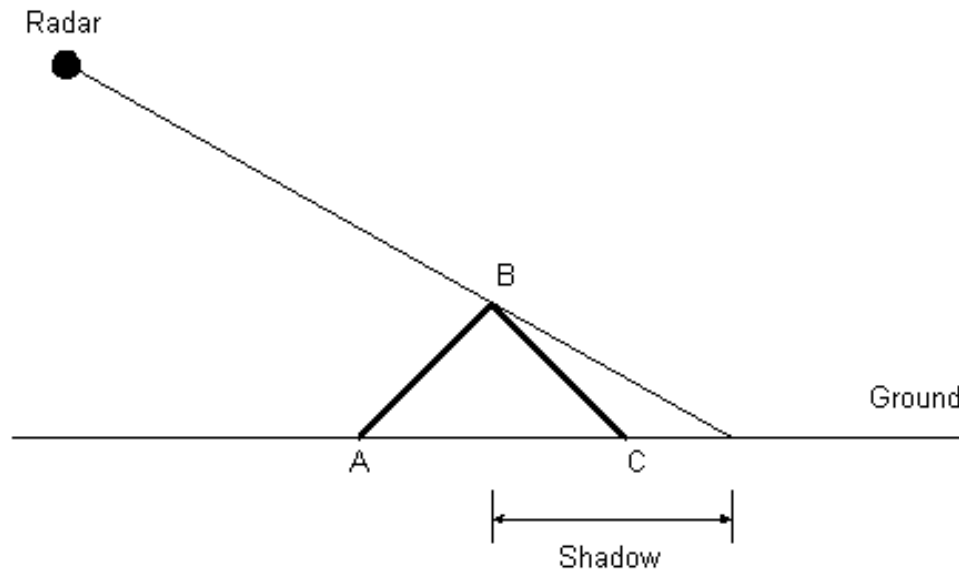
- Cas extrême du foreshortening
- Le sommet de la montagne est vu AVANT son pied. Il apparaît donc avant dans l'image SAR
- Les montagnes sont vues la « tête à l'envers »



Sources : *Echoes In Space – EO College*

Shadowing

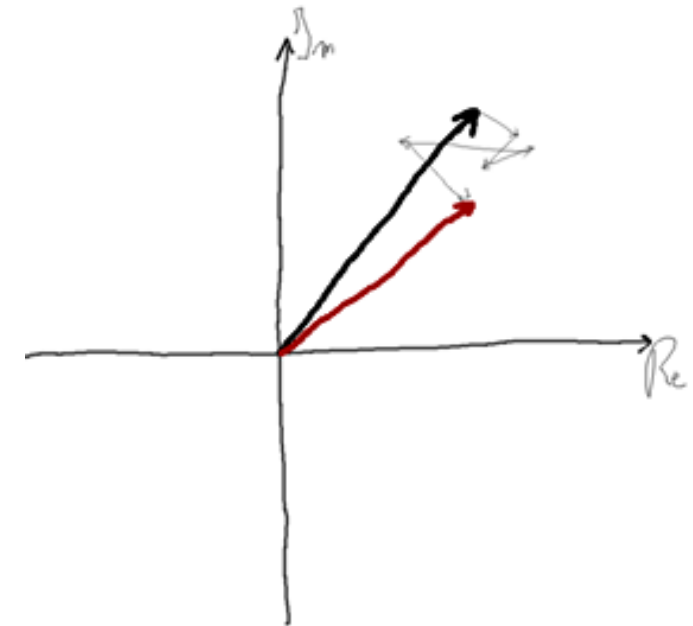
- La topographie cache littéralement une partie de la zone d'étude
- Les pixels cachés apparaissent noirs, puisque pour une distance donnée, aucun retour n'est enregistré



Sources : *Echoes In Space – EO College*

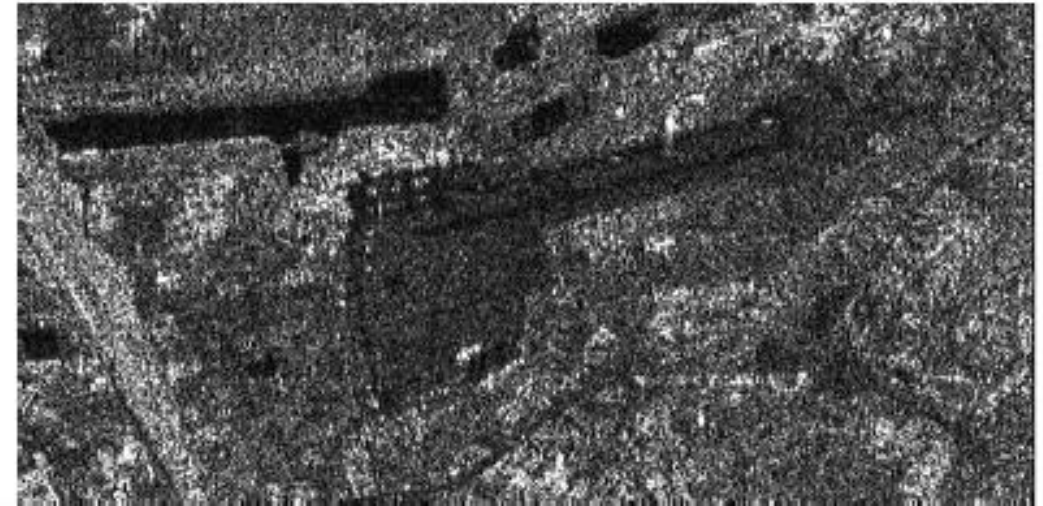
Speckle

- Le signal de retour contient une amplitude et une phase. Il peut être représenté dans le plan complexe
- Mais le signal de retour contient également un terme de reconstruction qui est témoin de la contribution de chacun des diffuseurs au sein du pixel
- Cette phase de reconstruction modifie sensiblement l'amplitude et la phase du signal rétrodiffusé, produit un bruit déterministe appelé « speckle »



Multilooking

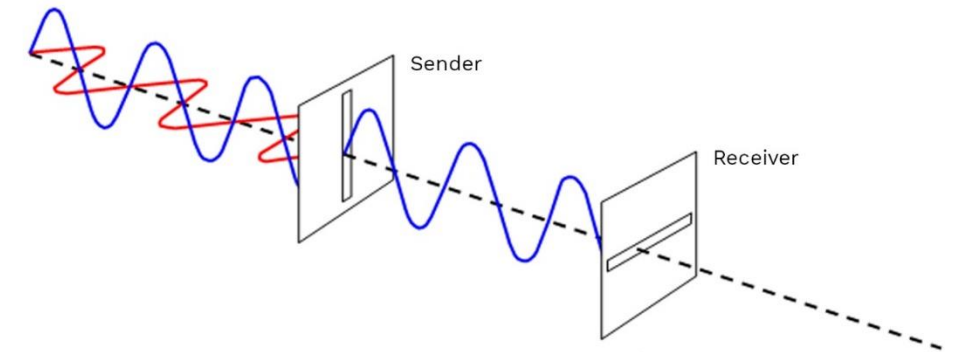
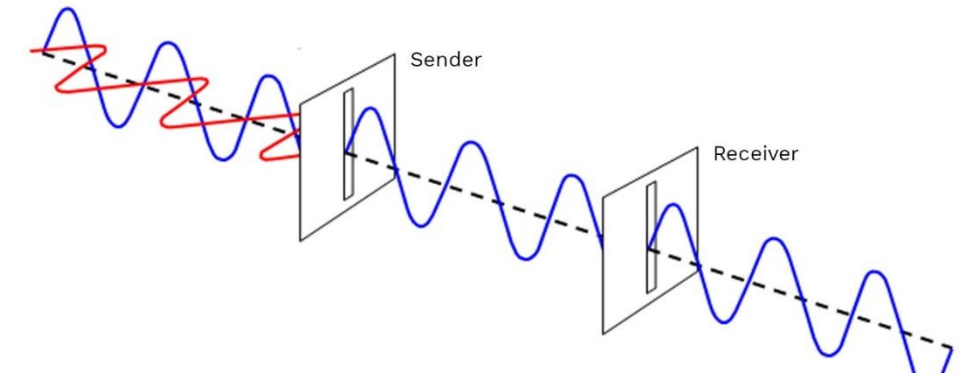
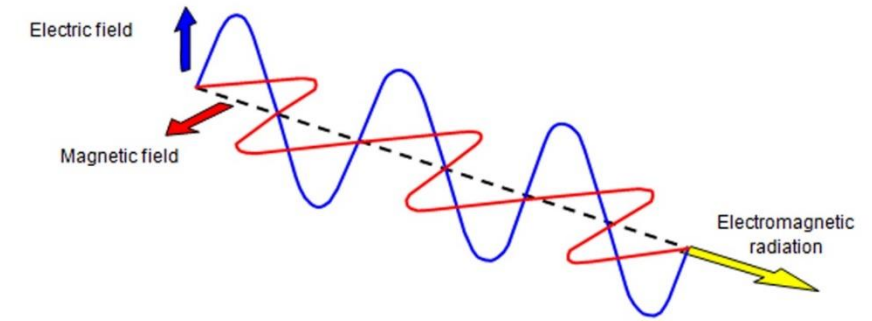
- Statistiquement, le speckle possède une espérance nulle.
- Un moyennage spatial et/ou temporel permet une réduction de cet effet
- Cette technique est appelée multilooking



*Sources : Spaceborne Radar
Remote Sensing– C. Elachi*

Polarisation

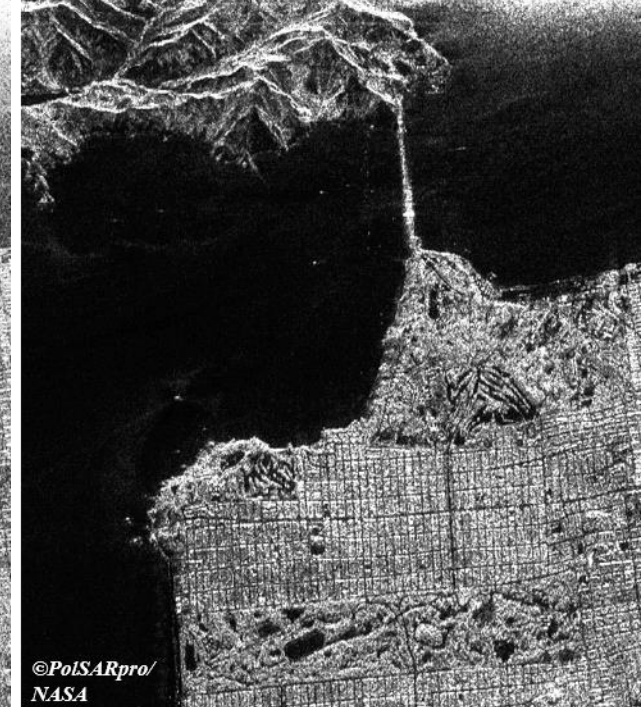
- Le satellite envoie une onde électromagnétique (oem) pulsée
- Il est possible de contrôler la polarisation de l'oem lors de l'envoi
- En SAR, nous travaillons avec une polarisation linéaire
- Il est également possible de contrôler dans quelle polarisation le capteur capte le retour
- Exemple :
 - VV : vertical transmit, vertical receive
 - VH : vertical transmit, horizontal receive



Sources : Echoes In Space – EO College

Polarisation (exemples)

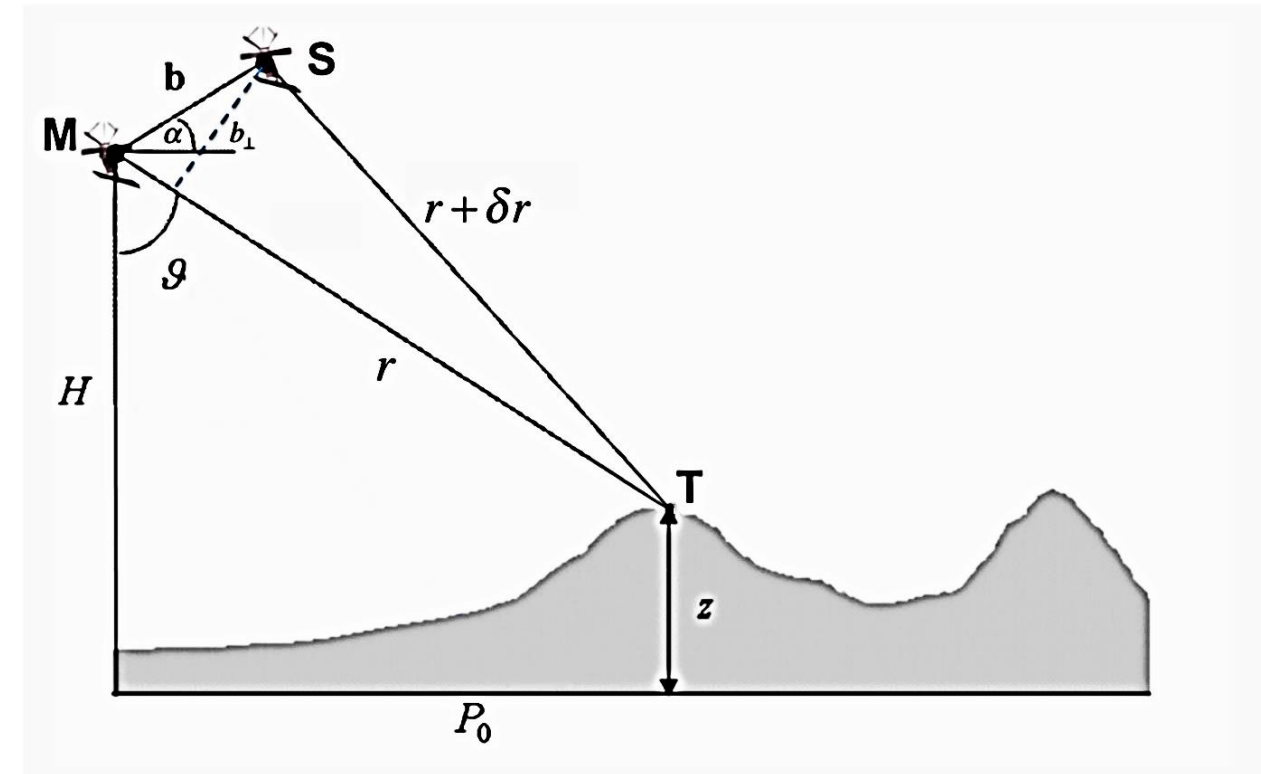
- La difference d'intensité entre les signaux reçus de polarization différente permet de discriminer des classes au sol
- Les éléments anthropiques ont tendance à renvoyer un signal qui ne dépolarise pas le signal
- Les structures végétales ont tendance à dépolariser le signal
- La glace de mer a une rétrodiffusion forte en HH mais faible en HV
- ...



Sources : Echoes In Space – EO College

Interférométrie SAR : Principes

- Une image SAR contient une information d'amplitude **et** une information de phase
- Le terme de phase est proportionnelle au chemin parcouru (aller/retour)
- Sur base de deux images SAR prises à partir de deux points de vue similaires mais ayant des angles de vue légèrement différents, il est possible de retrouver la topographie du lieu
- La première image est à une distance r de la cible
- La seconde est à une distance $r + \delta r$



Sources : A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements

Interférométrie SAR

- Image 1 (Maîtresse) :

$$M = A_M e^{j\varphi_M}$$

- Image 2 (Esclave) :

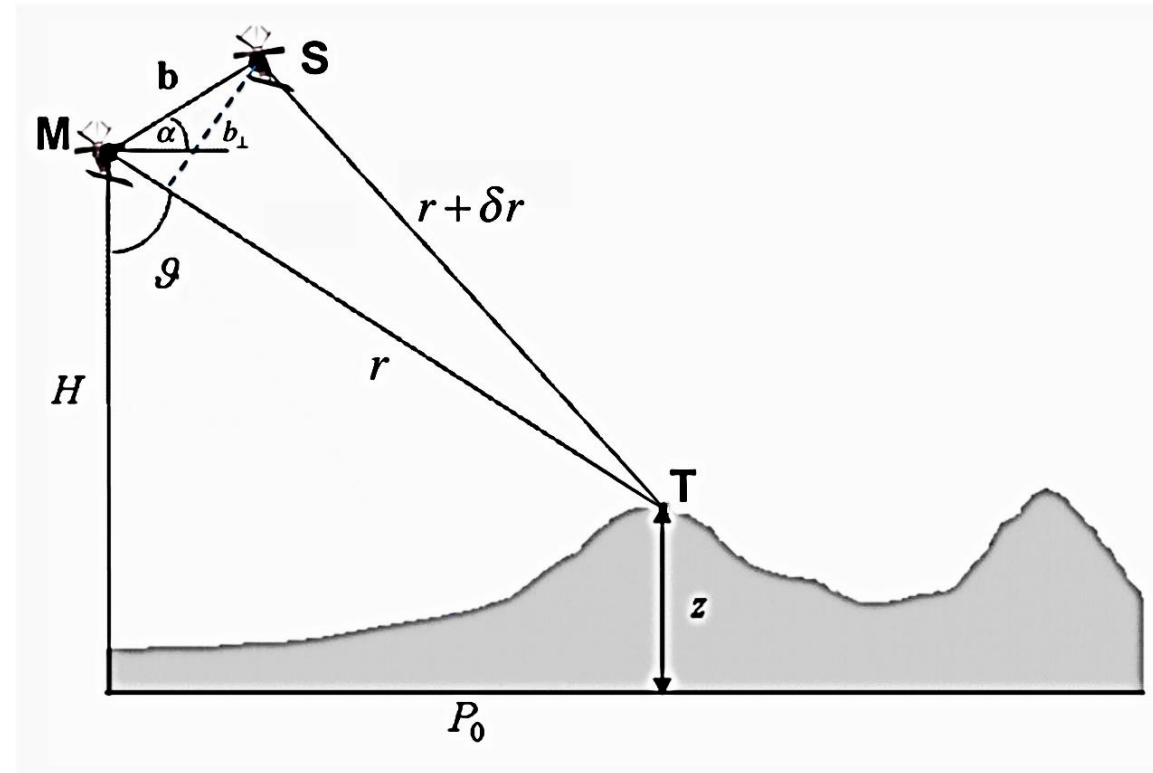
$$S = A_S e^{j\varphi_S}$$

- Interférogramme :

$$\text{Intf} = M \cdot S^* = A_M A_S e^{j(\varphi_M - \varphi_S)}$$

- Cette différence de phase est appelée *phase interférométrique* et est proportionnelle à la différence de chemin parcouru entre les deux images

$$\varphi_{\text{intf}} = \varphi_M - \varphi_S = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r$$

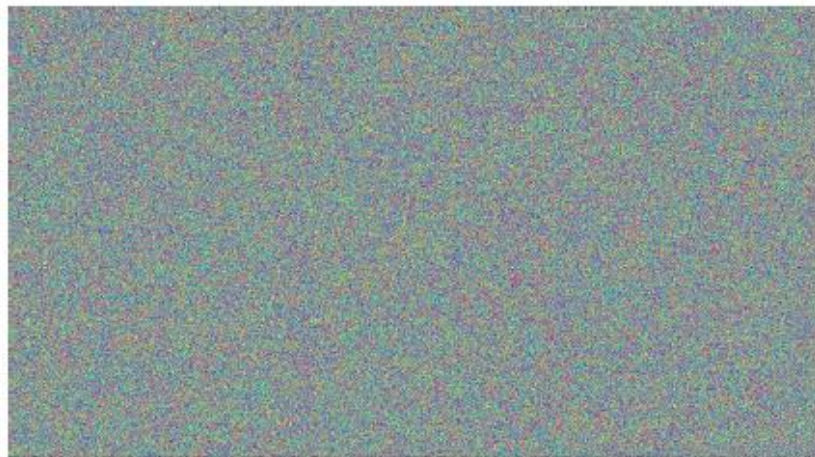


Sources : A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements

Interférométrie SAR

$$\varphi_{intf} = \varphi_M - \varphi_S$$

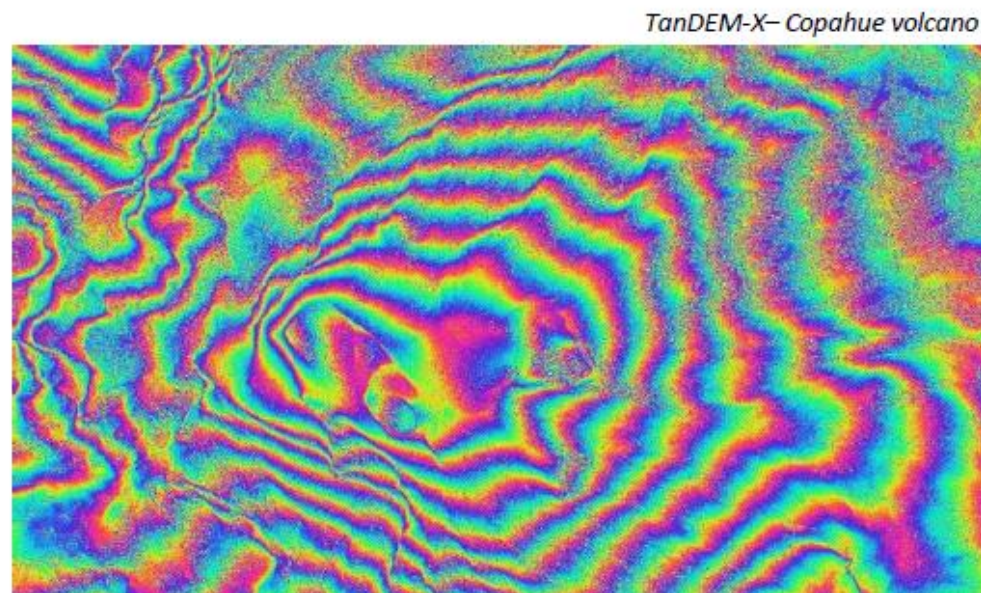
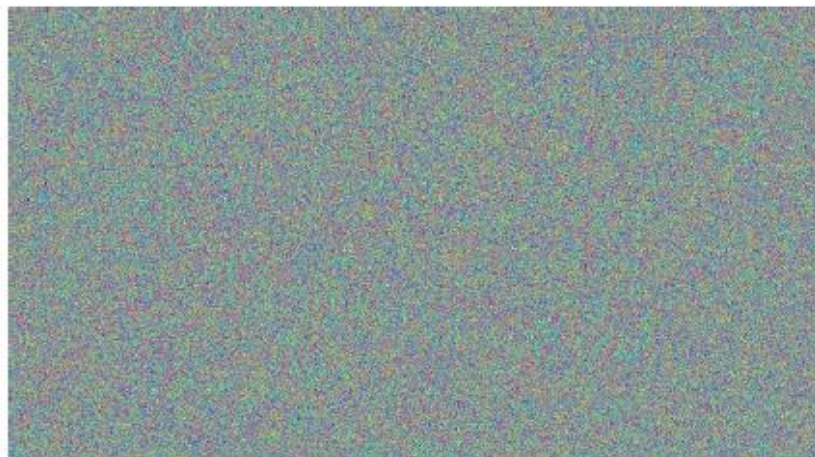
Phase
Master



-

=

Phase
Slave



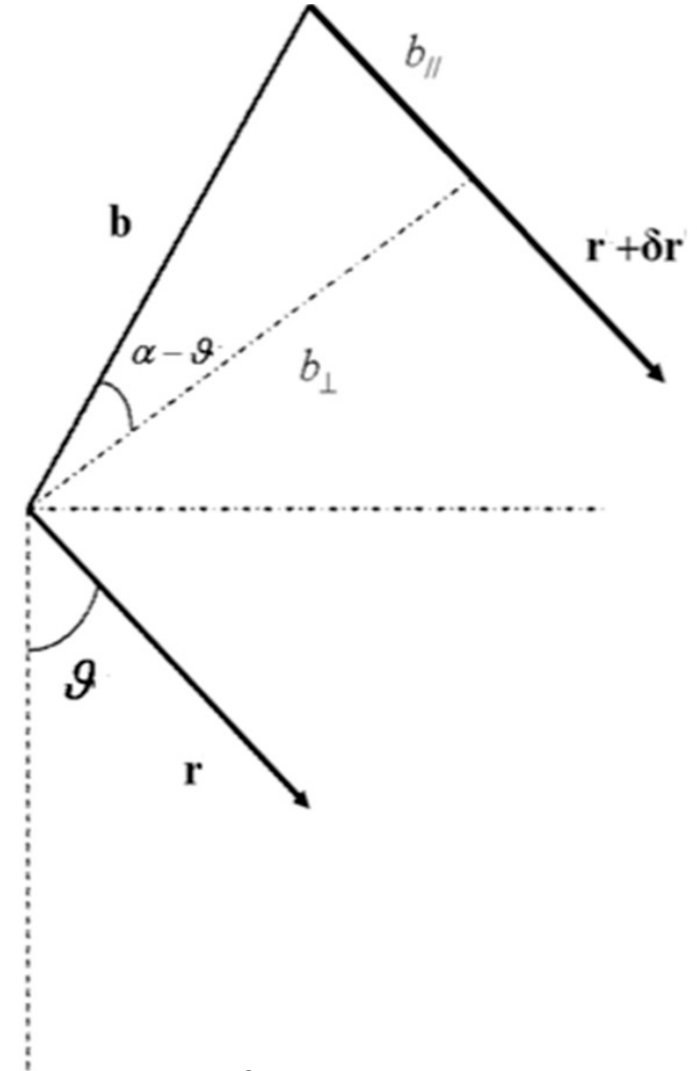
Sources : Fabspace2.0 , Radar Remote
Sensing – Ludivine Libert (2018)

Interférométrie SAR

- Dans le cas d'un radar satellitaire, l'hypothèse de champ de vision lointain est vérifiée et on peut écrire

$$\varphi_{intf} = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r \sim - \frac{4\pi}{\lambda} b \sin(\theta - \alpha) = \frac{4\pi}{\lambda} b_{parallèle}$$

- Puisque cette phase dépend de l'angle d'incidence, nous observons une variation de la phase même en l'absence de topographie. Il s'agit de la phase *orbitale*, dont la contribution peut être modélisée et soustraite
- La topographie elle-même modifie la différence de distance, et donc la phase interférométrique



Sources : A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements

Contenu de la phase interférométrique

- La phase interférométrique contient une multitude de termes

$$\varphi_{intf} = \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{mvt} + \varphi_{atm} + (\varphi_{noise})$$

- Les trois premiers termes peuvent être déterminés géométriquement par

$$\varphi_{orb} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta}$$

$$\varphi_{topo} = -\frac{h}{\sin \theta} \frac{B_n}{R_0} \frac{4\pi}{\lambda}$$

$$\varphi_{mvt} = \frac{4\pi}{\lambda} displ$$

- L'atmosphère est soit négligée (pas toujours possible) soit corrigée (stacking, split-band, ...)

Hauteur d'ambiguïté

- La phase interférométrique est comprise entre $-\pi$ et $+\pi$.
- La hauteur d'ambiguïté est la différence d'altitude produisant un changement de 2π
- Sa formulation est déterminée par

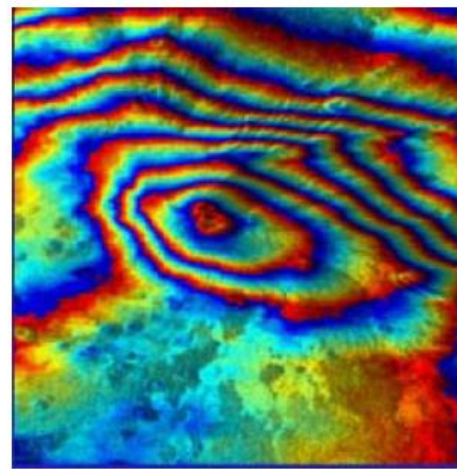
$$h_a = -\frac{\lambda r \sin \theta}{2b_{\text{perp}}}$$

Interférométrie SAR

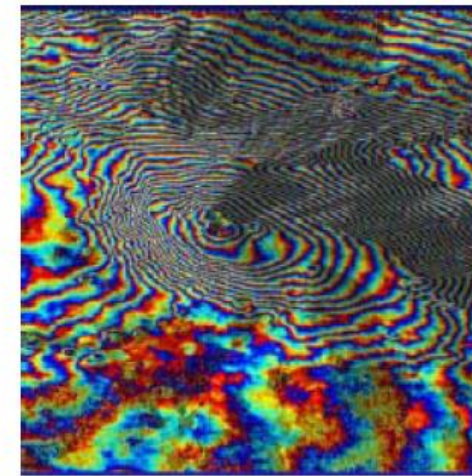
- L'expression de la phase topographique est reliée à :

$$h_a = - \frac{\lambda r \sin \theta}{2 b_{\text{perp}}}$$

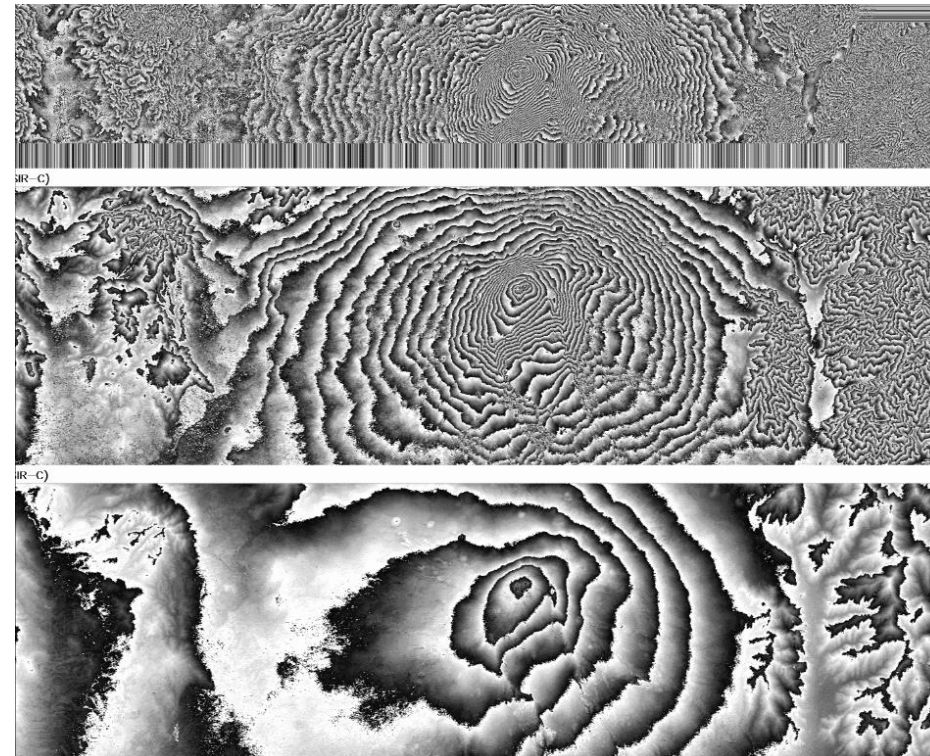
- la ligne de base entre les deux points de vue des images
- La longueur d'onde employée (ci-contre bandes X, C et L)



B = 12m



B = 60m



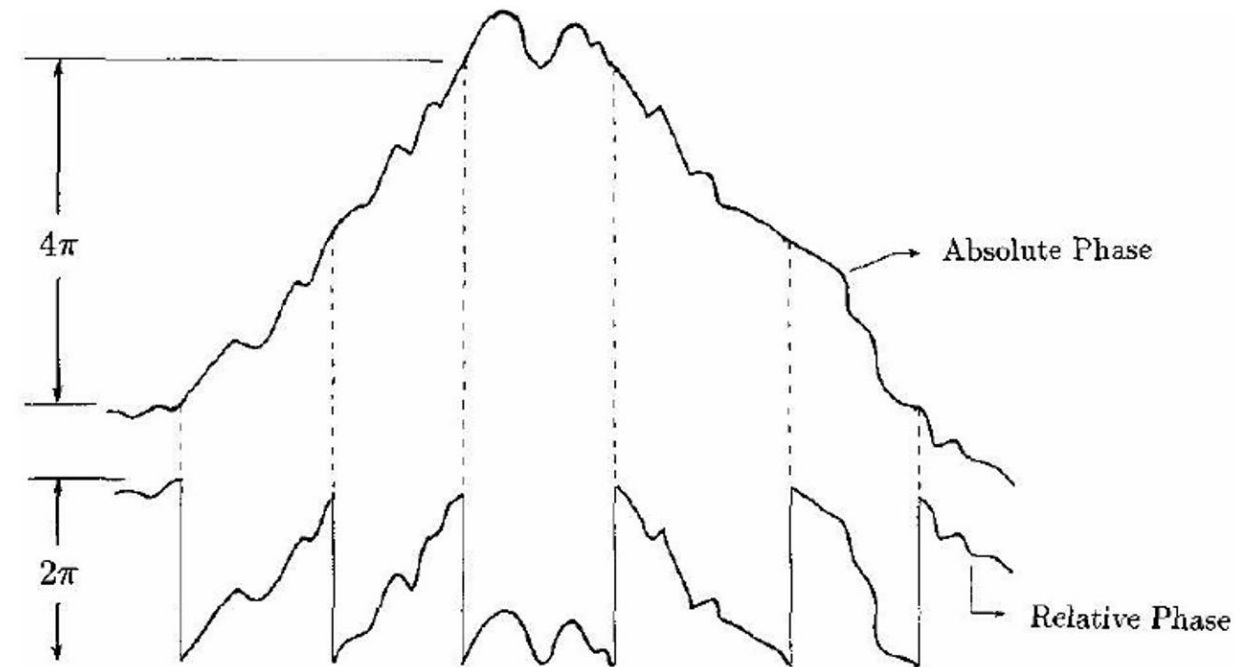
Sources : Remote Sensing
– Christian Barbier

Le déroulage de phase

- La phase interférométrique est ambiguë. Elle n'est connue que modulo 2π . La phase absolue est donnée par

$$\Phi = N * 2\pi + \varphi$$

- Il faut donc déterminer un algorithme capable de déterminer ce N pour déterminer la phase interférométrique absolue, reliée à la topographie



Sources : Remote Sensing – Christian Barbier

Le déroulage de phase (exemple pratique)

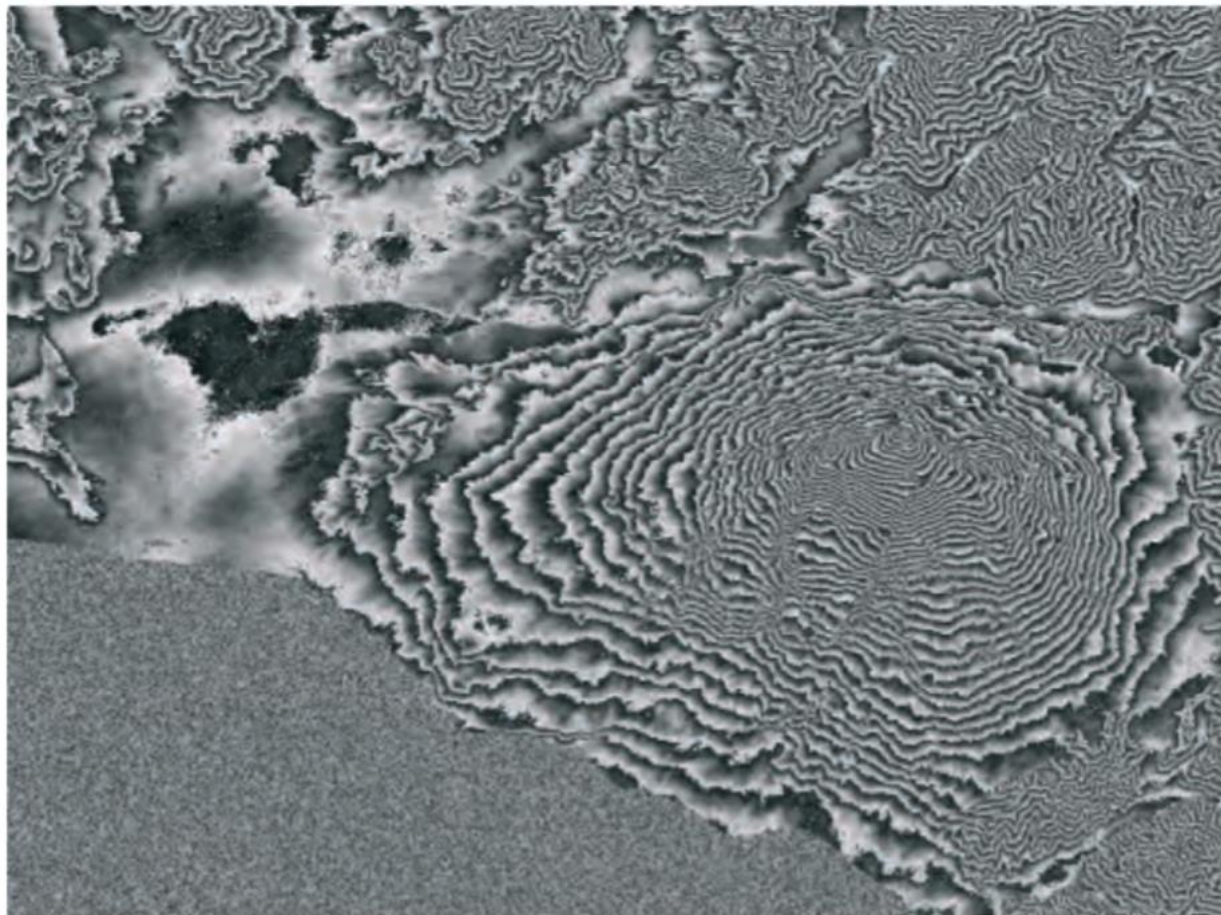


Figure 2-5: Flattened interferogram of Mount Etna generated from ERS tandem pairs. The perpendicular baseline of 115 metres generates an altitude of ambiguity of about 82 metres.

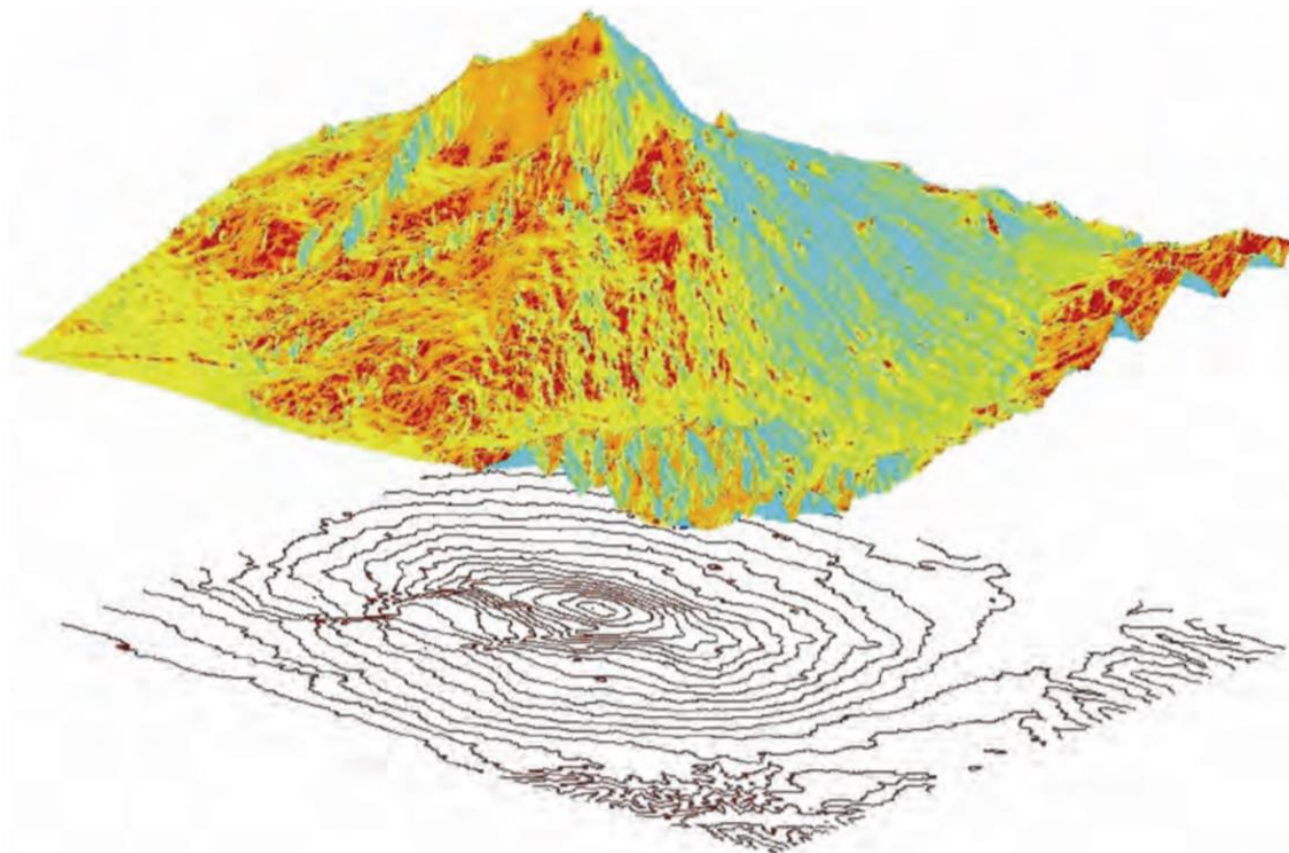
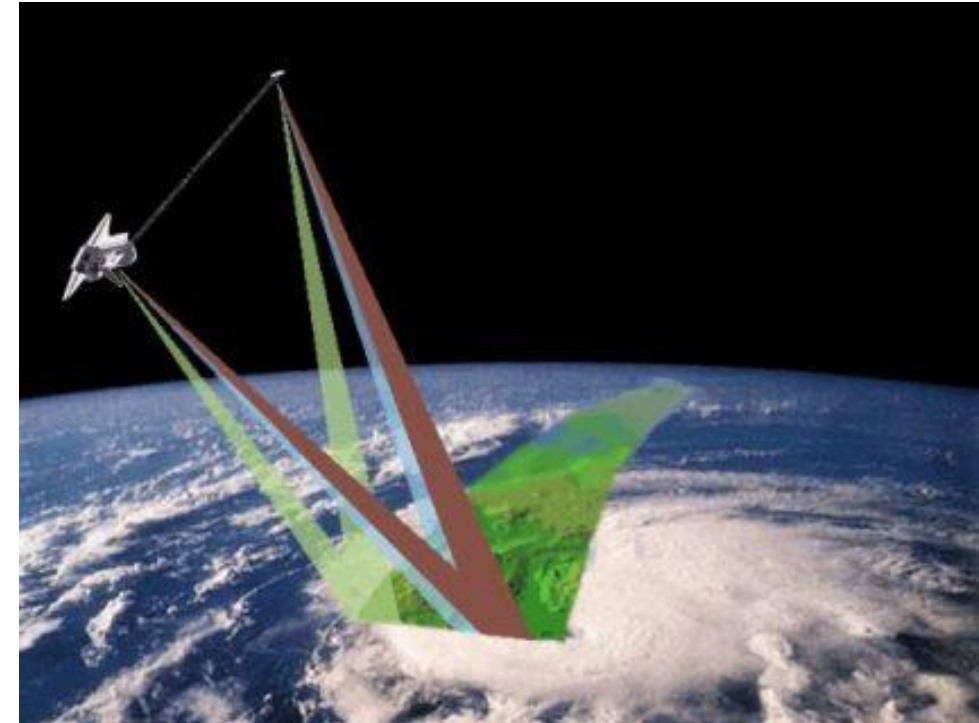


Figure 2-6: Perspective view of Mount Etna as seen from the Northeast. The DEM of Mount Etna has been generated by unwrapping and re-sampling the flattened interferogram of Figure 2-5: The estimated vertical accuracy is better than 10 metres. Contour lines are shown below the DEM.

Sources : InSAR Principles – ESA

Exemple : Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

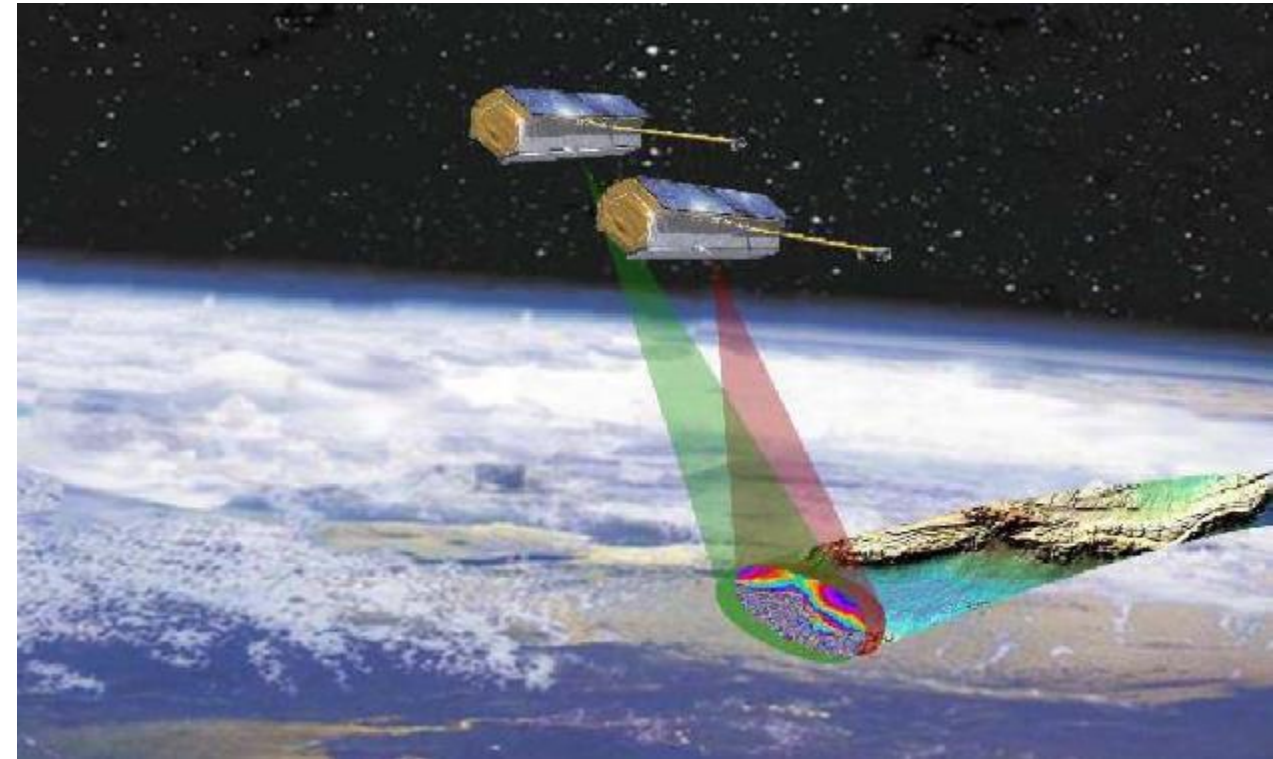
- Interférométrie SAR en prenant deux acquisitions simultanées à chaque extrémités d'un bras mécanique de 60 mètres
- Permet de négliger la phase de mouvement et la phase atmosphérique
- A permis de créer un DEM global de la TERRE (de -60 à +60 degrés de latitude)



Sources : Digital Geography

Exemple 2 : TanDEM-X

- Constellation de 2 satellites TerraSAR-X
- Mêmes avantages que le SRTM
- Permet d'avoir une couverture des poles et / ou des DEM récents (si vous en avez les moyens \$\$\$\$\$)



Sources : *The TanDEM-X Mission Concept – Zink (2006)*

Cohérence

- La cohérence est une mesure de qualité de l'interférogramme.
- Il s'agit de la corrélation complexe entre l'image maîtresse et l'image esclave

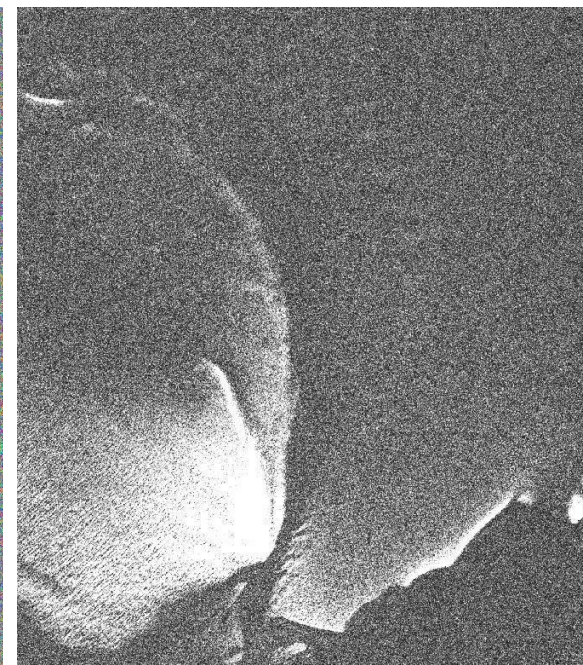
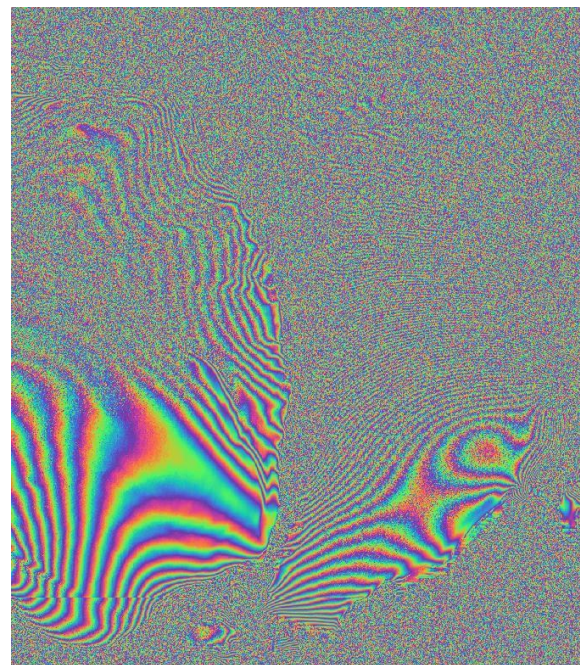
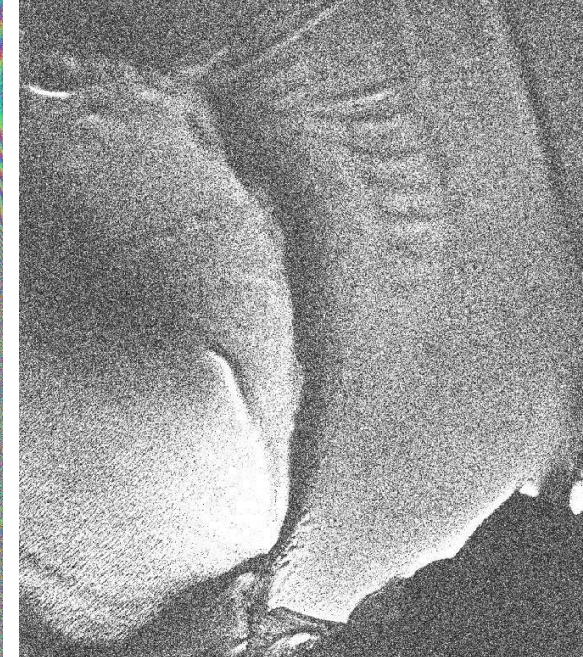
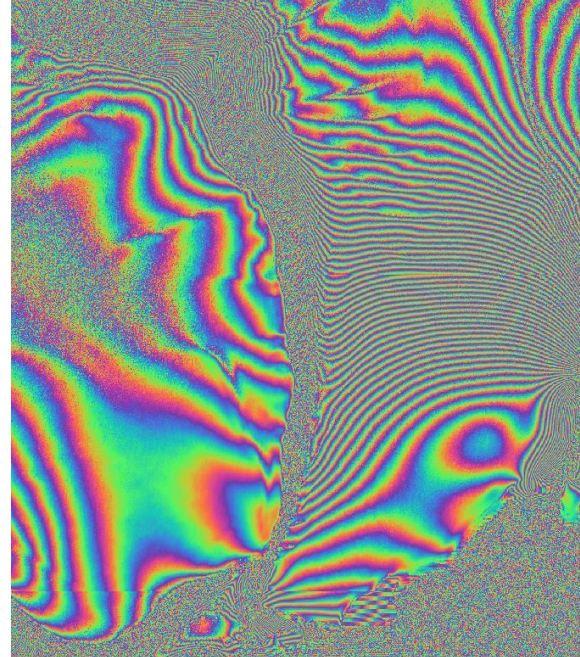
$$\gamma = \frac{|\sum_W M \cdot S^*|}{\sqrt{\sum_W |M|^2 * \sum_W |S|^2}}, \in [0,1]$$

Où W est une fenêtre autour du pixel (par exemple 5x5)

- Une corrélation de 1 signifie une cohérence parfaite entre les images, avec de belles franges parfaitement déroulables
- Une corrélation nulle signifie un changement de l'état du sol entre les deux acquisitions, entraînant une perte de cohérence. Le signal n'est pas utilisable pour de l'InSAR

Cohérence et interférogramme

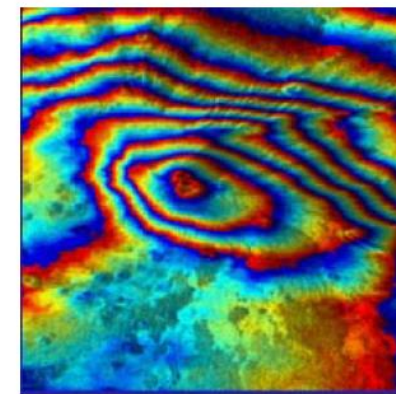
- Effet d'une augmentation de l'intervalle de temps entre deux images sur la coherence
- Image Esclave prise après 12 (haut) et 24 jours (bas)
- Domaine de recherche : glaciologie



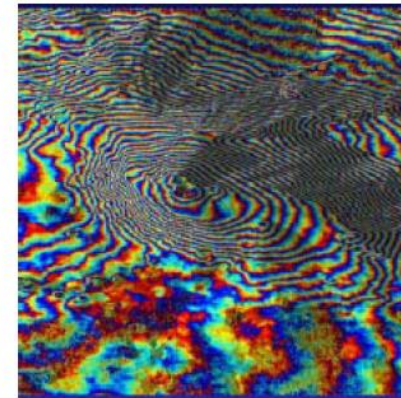
Les sources de décorrélation

- Il existe toute une série de facteurs qui influencent la qualité de l'interférogramme
 - La première est la décorrélation temporelle. Au plus l'intervalle de temps entre deux images est long, au plus la zone éclairée est sujette à changements
 - Le second, non-contrôlable par l'utilisateur, est le bruit thermique introduit par le senseur
 - Le troisième est une décorrélation liée à la géométrie d'acquisition. Au plus nos points de vue sont éloignés, au plus le taux de frange sera élevé et donc au plus on sera sensible au bruit
 - Le quatrième est l'influence d'une erreur de coregistration
- Ces sources de décorrélation se multiplient entre elles

$$\gamma = \gamma_{temp} * \gamma_{therm} * \gamma_{geom} * \gamma_{coreg}$$



B = 12m



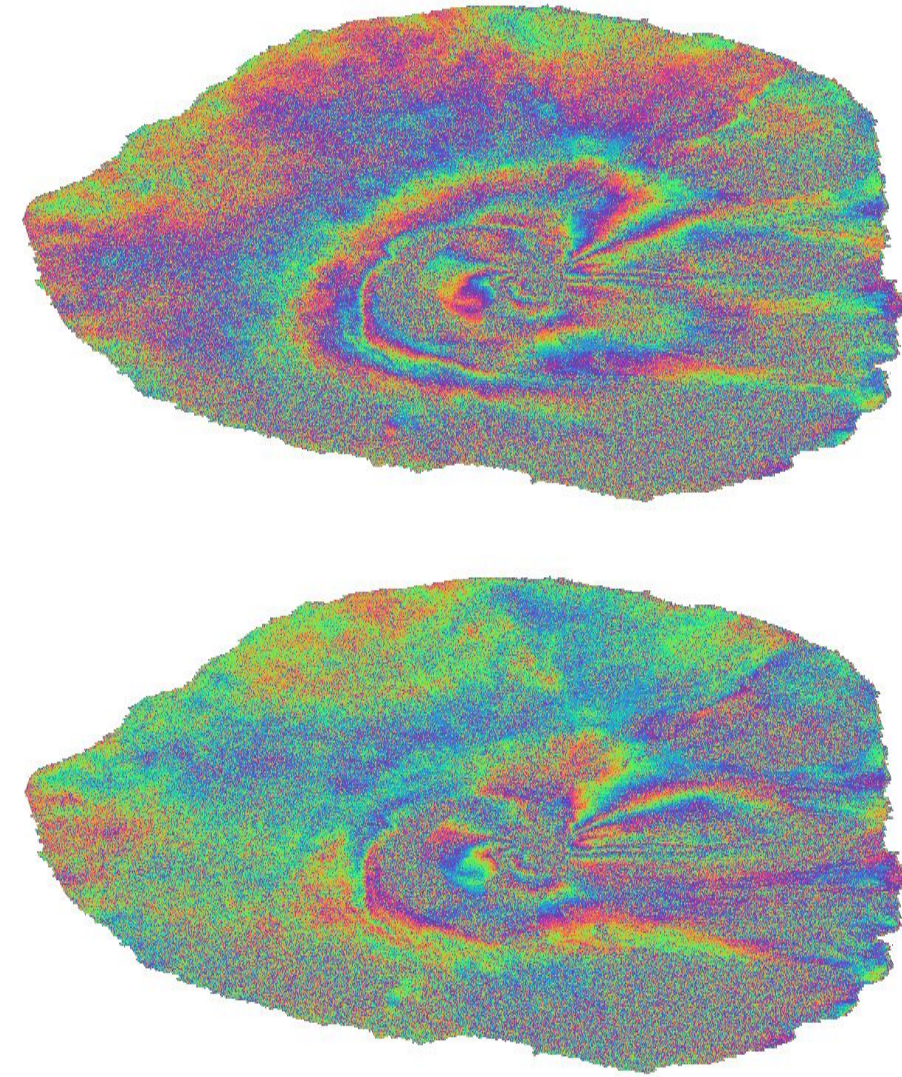
B = 60m

La cohérence en tant que variable du sol

- La corrélation est une mesure de la cohérence entre 2 images
- Une faible cohérence est souvent signe de changements
- La cohérence est donc également une mesure de la stabilité de l'affectation du sol

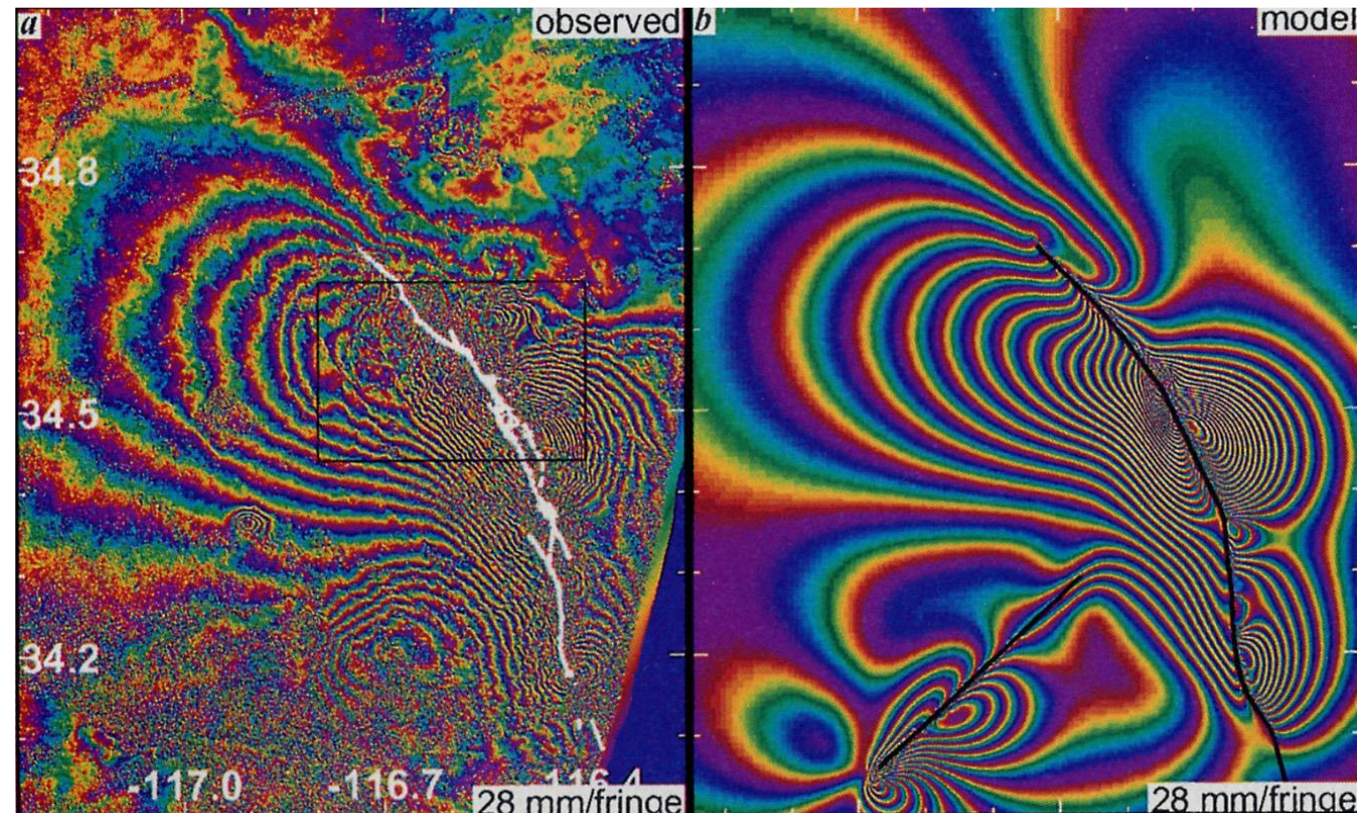
Interférométrie SAR différentielle

- Nous avons vu que nous pouvions obtenir la topographie d'une zone sur base de la phase interférométrique
- Si nous connaissons la composante topographique, il est également possible de déterminer un mouvement selon la ligne de visée du satellite
- Pour ce faire, il suffit de retirer la phase topographique à la phase interférométrique
- Pour peu que l'influence atmosphérique soit négligeable (ou corrigeable), nous pouvons traduire ce terme de phase résiduel en mouvement



Interférométrie SAR différentielle

- La phase interférométrique est extrêmement sensible aux déplacements. Des déplacements de l'ordre du centimètre sont mesurables
- Par contre l'intervalle de temps entre les deux images doit être suffisamment long pour que le mouvement soit détectable
- Exemple : le tremblement de terre de Landers
- L'interférométrie différentielle est la raison même du "boum" du radar



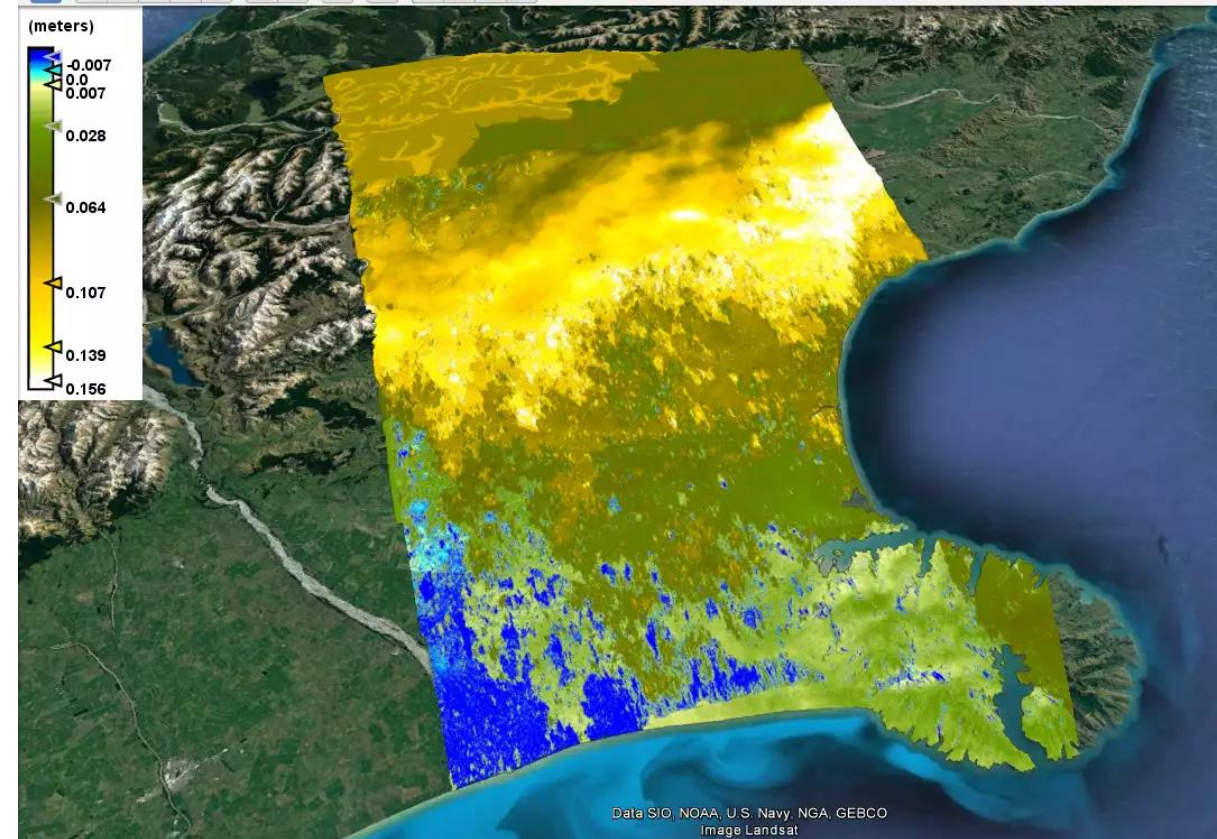
Sources : Fabspace2.0, Radar Remote Sensing – Ludivine Libert (2018)

Interférométrie SAR différentielle

- Une fois déroulée, la phase peut être convertie en unités métriques à partir de la formule

$$\varphi_{mvt} = 2 \frac{2\pi}{\lambda} displ$$

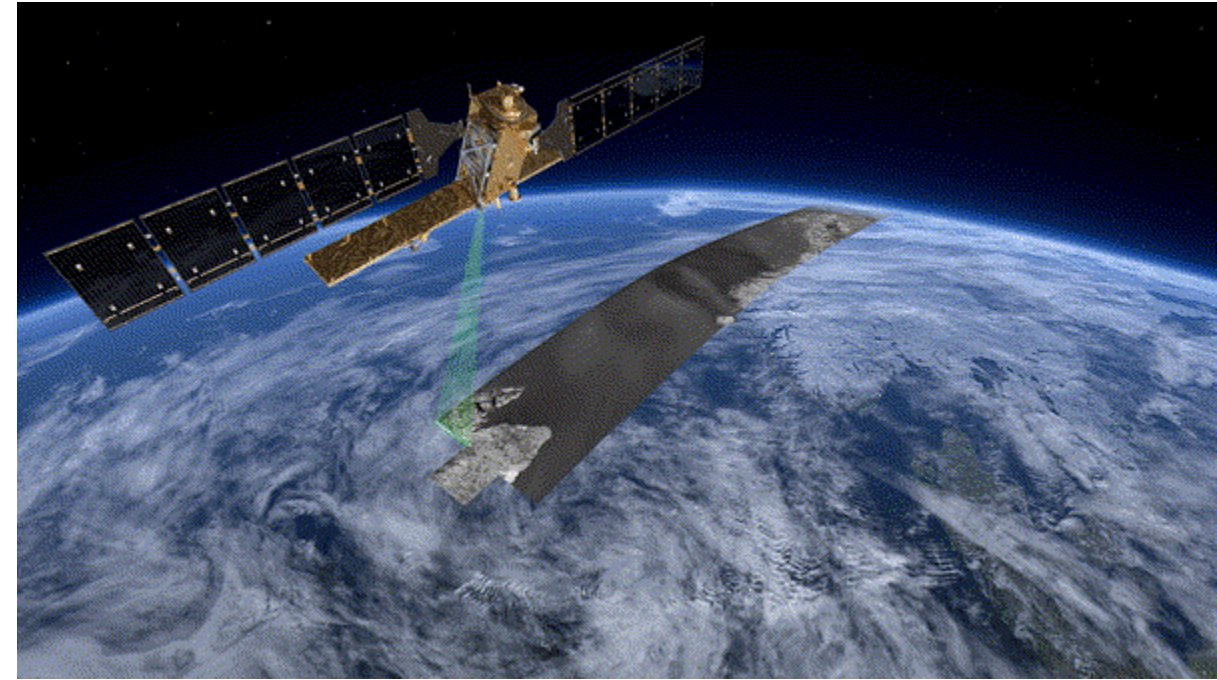
- Et les résultats peuvent être projetés au sol puis géoréférencés



Sources : STEP forum - ESA

Satellites SAR actuels

- Sentinel-1 A/B
 - 2014 (S1-A) et 2016 (S1-B)
 - Bande C : 5.56cm
 - Polarisation HH, HH+HV, VV, VV+VH
 - Repeat pass de 12 jours (6 en combinant S1-A et S1-B)
 - Résolution : 5x20 m²
- But : monitoring environnemental (sens large) dans le domaine du micro-onde, intégré à la constellation de satellites du projet Copernicus
- Les images sont gratuites, faciles d'accès et il existe un outil simple d'utilisation mis au point par l'Agence Spatiale Européenne (SNAP)



Sources : eoPortal

Satellites SAR actuels

- TerraSAR / TanDEM-X
 - 2007 et 2010
 - Bande X : 3.1cm
 - Polarisation HH/VV/HV/VH (single/dual)
 - Repeat pass de 11 jours (0 grace à TanDEM-X)
 - Résolution : $3 \times 3 \text{ m}^2$
- But : Produire des DEM sur demande à haute precision (2m). La phase de déplacement et la phase atmosphérique sont compensés dans cette configuration de vol
- \$\$\$
- Traitables avec SNAP également



Sources : eoPortal

Satellites SAR actuels

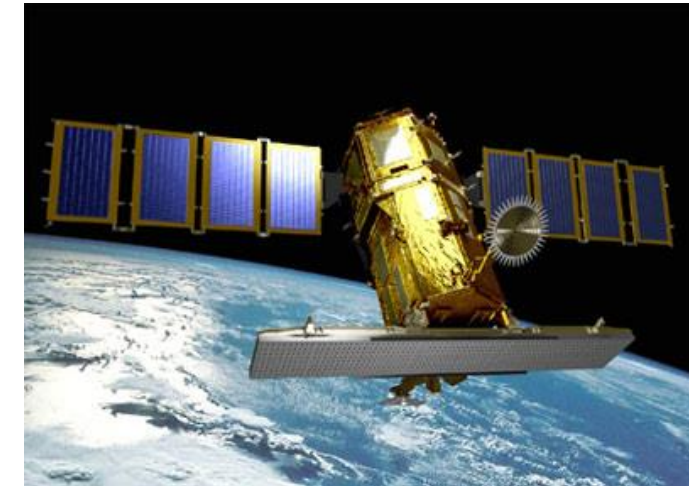
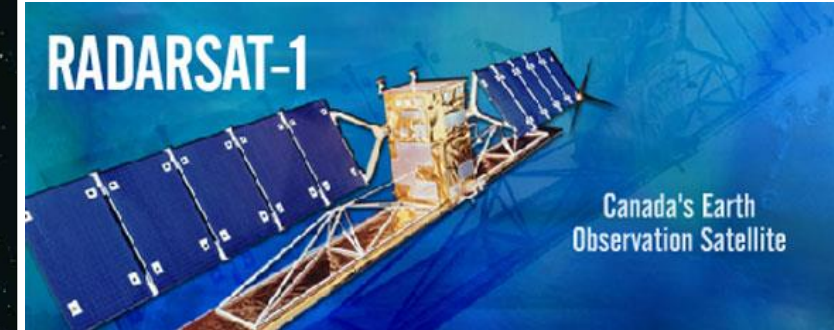
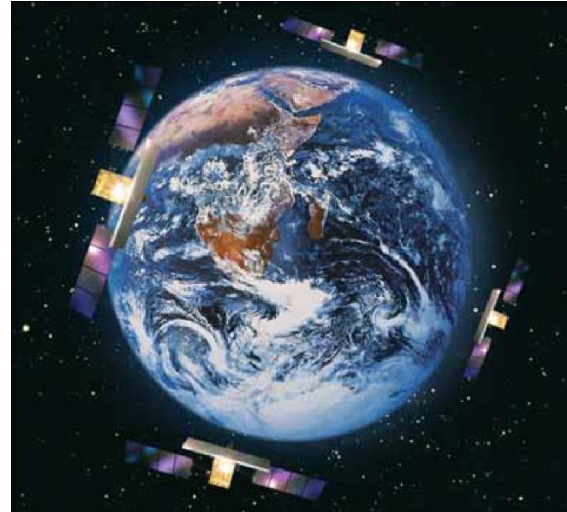
- ALOS-2
 - 2014
 - Bande L : 22.9cm
 - Polarisation (single/dual/full)
 - Repeat pass de 14 jours
 - Résolution : 3x3 m²
- But : continuité de ALOS-1, monitoring environnemental et gestion de risques
- Traitables avec SNAP également



Sources : eoPortal

Satellites SAR actuels

- Mais également
 - Cosmo-Skymed (bande X)
 - RadarSat (bande C)
 - Saocom (bande L)
 - KompSAT-5 (bande X)
 - ...



Sources : eoPortal