

Le radar en observation terrestre : nouvelles perspectives

Elise Colin

IPGP, 5 décembre 2025

Qui suis-je?

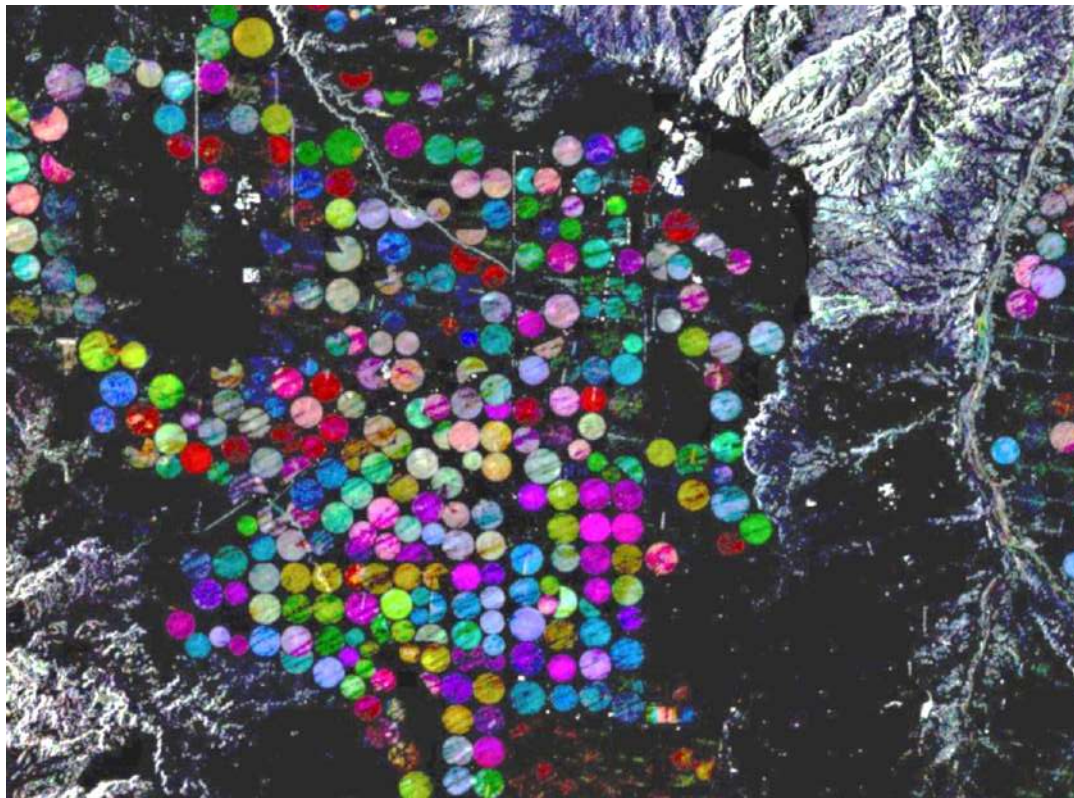
Elise Colin

Chercheuse à la croisée de la physique et de la science des données, spécialisée dans la polarimétrie et le speckle à différentes échelles.

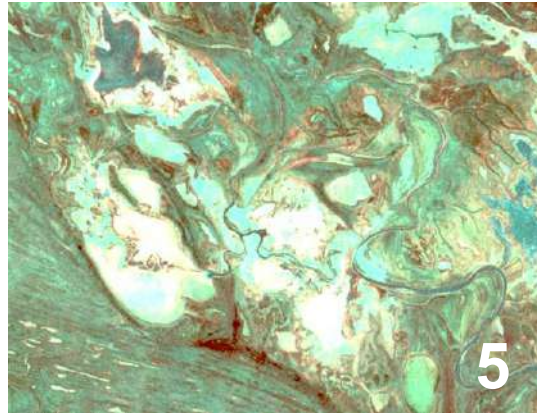
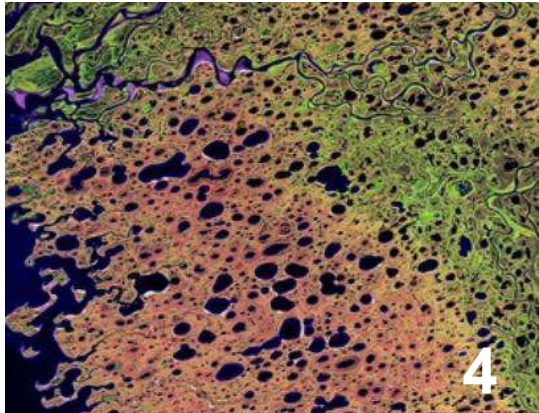
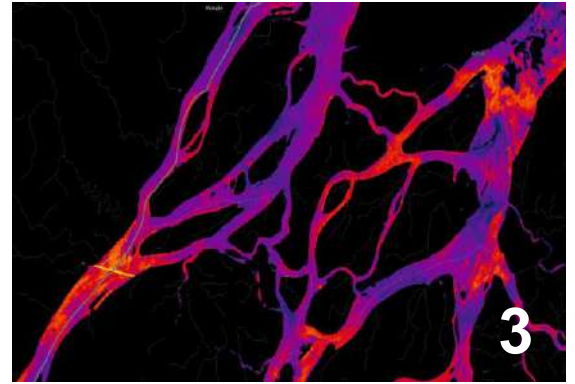
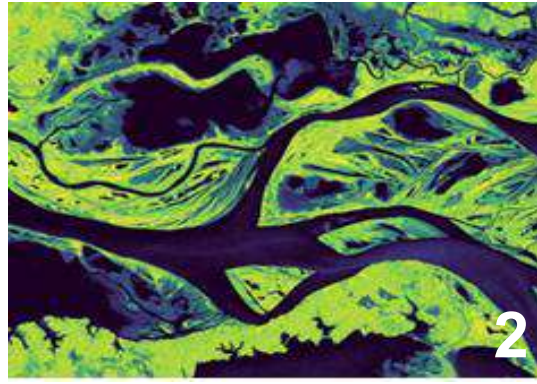
Également artiste et écrivain, j'explore les résonances entre science et création.

✉ Email : elise.colin@onera.fr

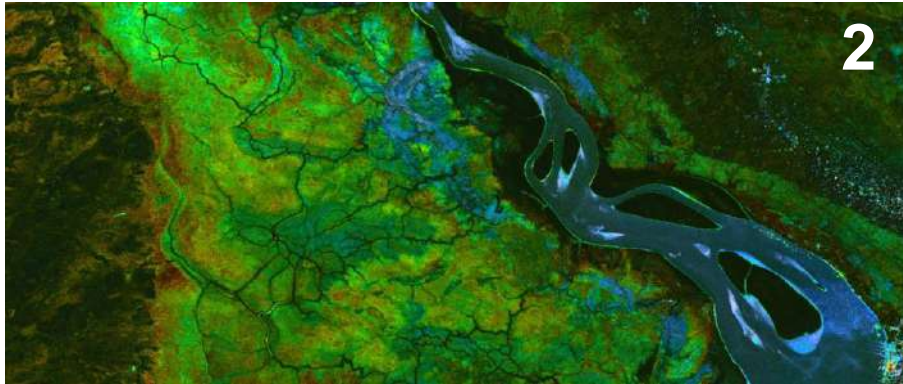
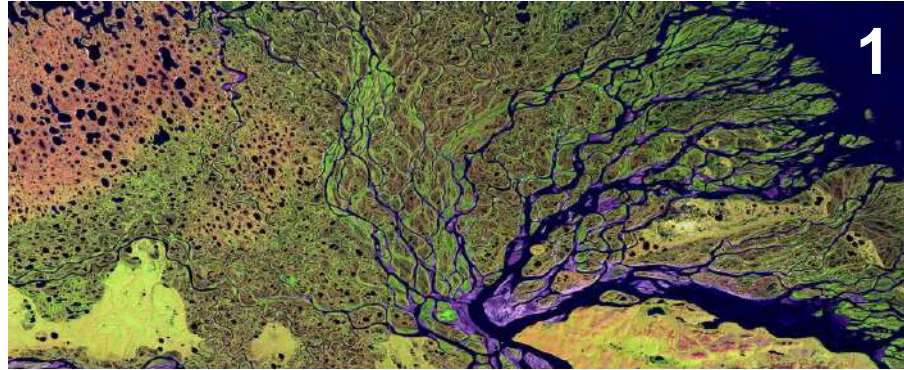
🌐 ONERA (France)



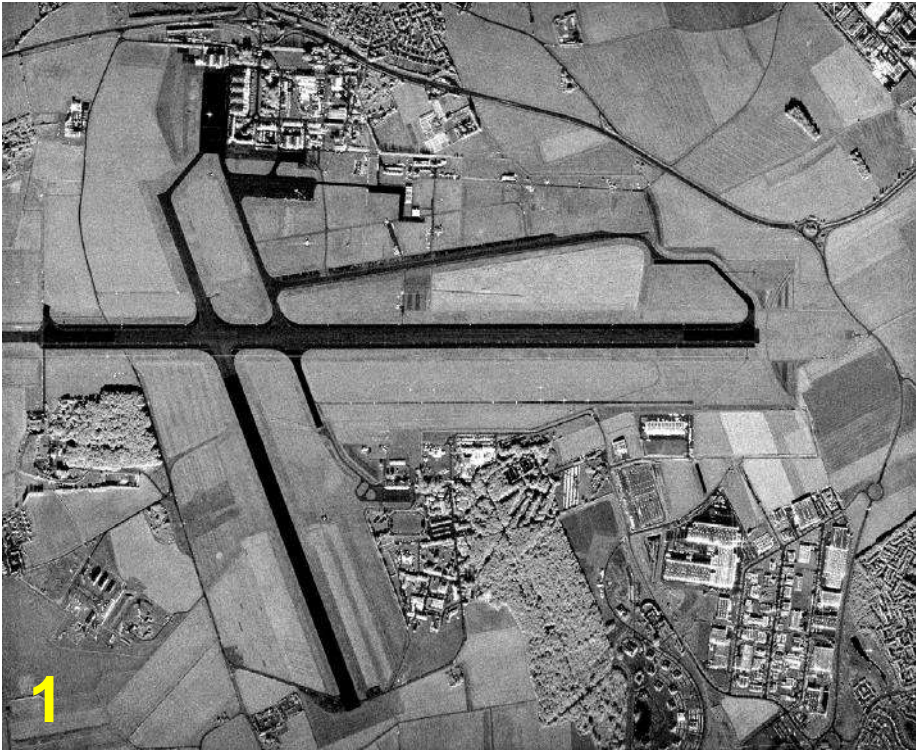
Savez vous reconnaître une image de la terre ?



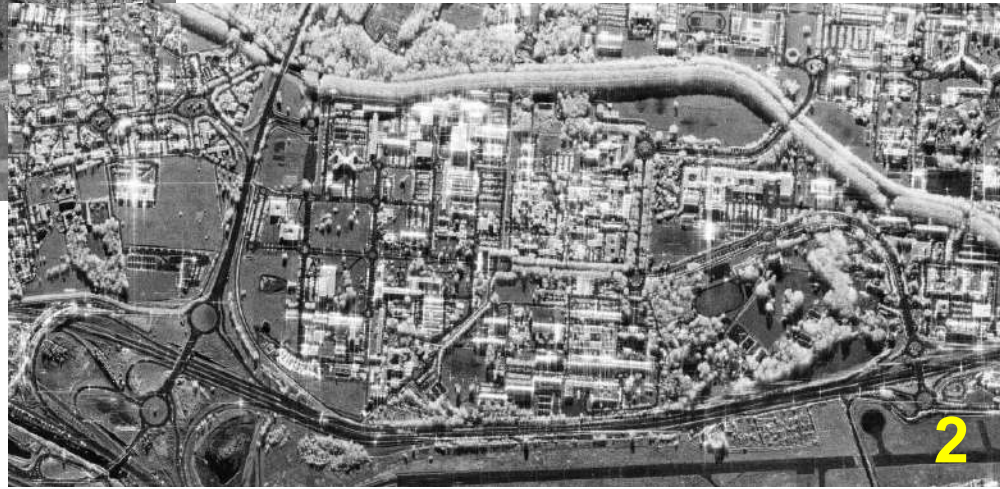
Savez vous reconnaître une image radar ?



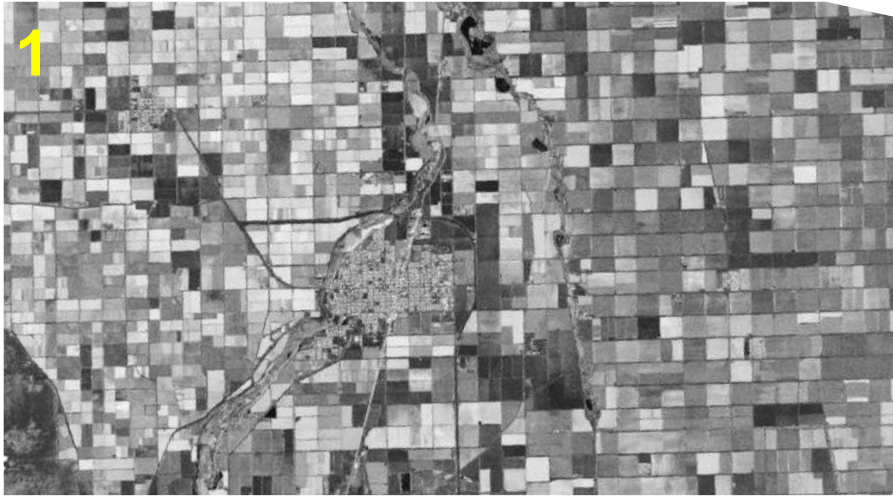
Savez vous reconnaître une image radar ?



Savez vous reconnaître une image radar ?



Savez vous reconnaître une image radar ?



Retour historique sur l'évolution de l'imagerie radar

Qu'est ce qui distingue une image radar d'une image optique

Enjeux et défis. Les séries temporelles



Une petite histoire du radar

Des origines militaires à l'imagerie (années 1930–1960)

Naissance du radar dans un contexte militaire :
Détection, surveillance, premières antennes.

Transition vers l'imagerie : premières tentatives pour « voir »
avec un radar.

Limites initiales : résolution faible,
contraintes technologiques fortes.

- **ONERA: naissance en 1946**

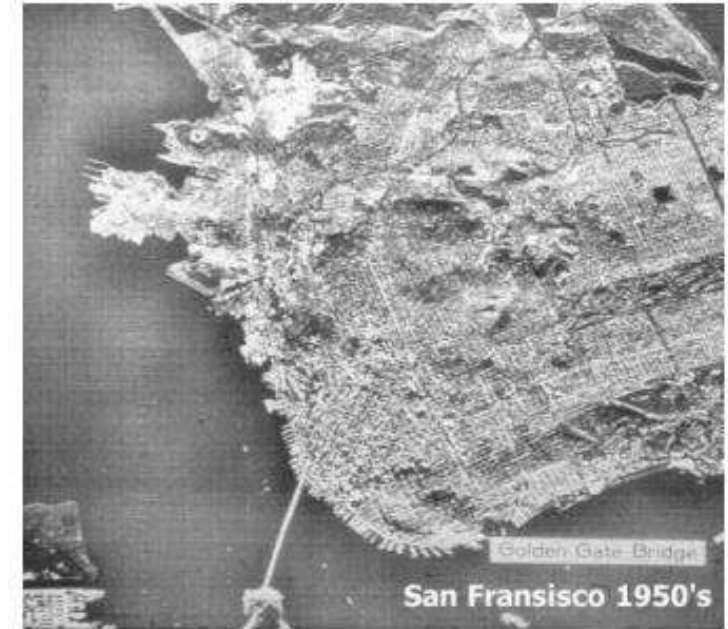


Premières images aéroportées : du RAR au SAR

Systèmes RAR (Real Aperture Radar)
→ résolution directement liée à la
taille de l'antenne.

Premières campagnes NASA/USAF.

Invention du SAR : synthèse
d'ouverture, saut majeur en résolution.

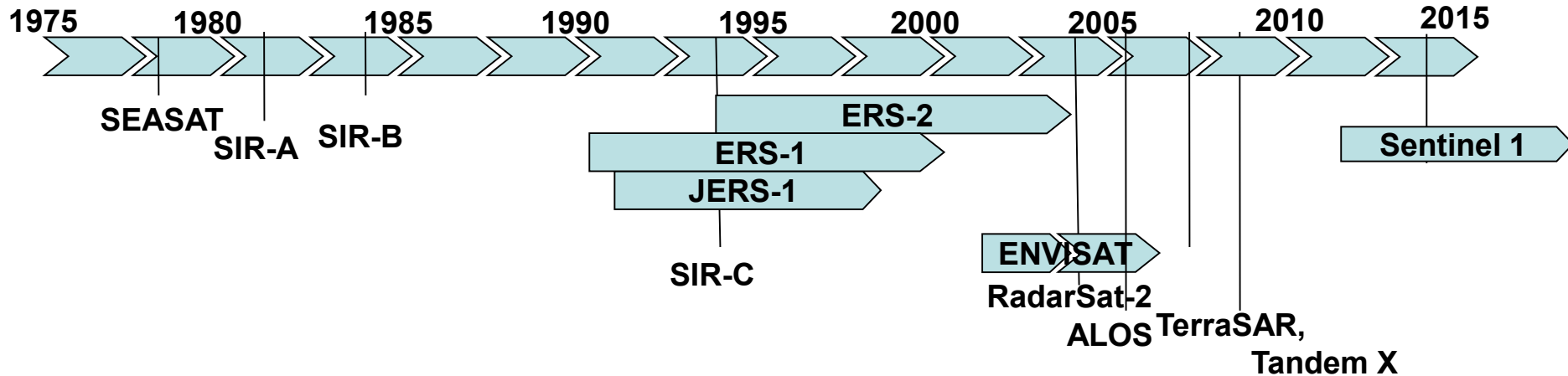


**Première image radar « RAR »
(Real Aperture Radar)**

L'aventure spatiale commence (années 1970–1990)

Seasat (1978) : première mission SAR spatiale réellement opérationnelle.
Programmes SIR-A/B/C depuis la navette : expérimentations multi-paramètres.
Émergence progressive d'une vision globale de la Terre.

Mission spatiales civiles



Maturation des missions publiques (1990–2010)

- ERS-1/2, RADARSAT, Envisat : systèmes plus robustes et plus réguliers.



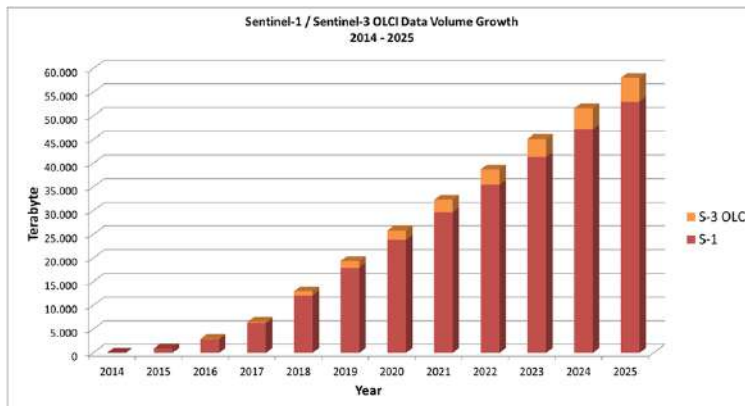
- Naissance de l'InSAR spatiale : déformation du sol, volcanologie, glaciologie.



- Transition vers des archives volumineuses mais encore analytiquement gérables.
- **ONERA: système expérimental RAMSES, puis SETHI**

2014 : Sentinel-1 et le basculement vers le big data

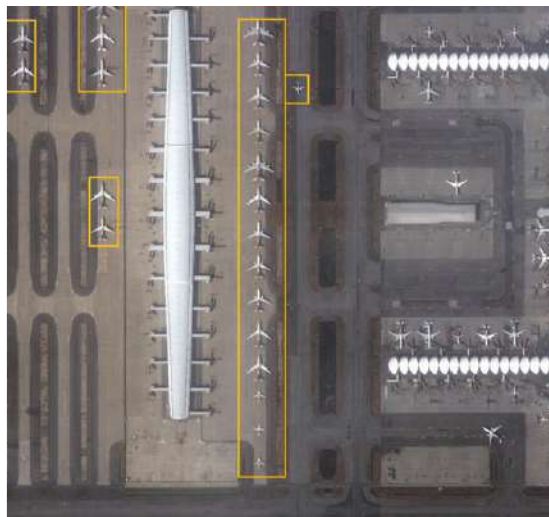
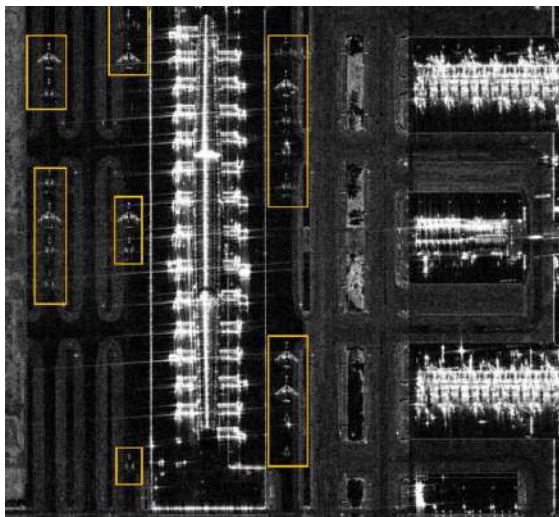
- Acquisition continue, revisite dense, données ouvertes → explosion du volume.
- Standardisation des produits et démocratisation de l'accès.
- Besoin de nouveaux outils : automatisation, plateformes cloud, premières approches d'IA.



- **ONERA : Projet de recherche « MESUSE » pour la télédétection et le big data (2016-2019)**

2015–2025 : deep learning et constellations commerciales

- Deep learning pour la classification, le débruitage, l'InSAR opérationnelle.
- Constellations VHR : ICEYE, Capella, Umbra → cadence élevée + résolution métrique.
- Arrivée de nouveaux usages civils à haute fréquence temporelle.



2025 : entrée dans un nouveau “Golden Age” du radar

Convergence missions publiques majeures
(NISAR, BIOMASS, ROSE-L) + constellations privées.

Observations quasi-continues, capteurs multiples, séries
temporelles denses.

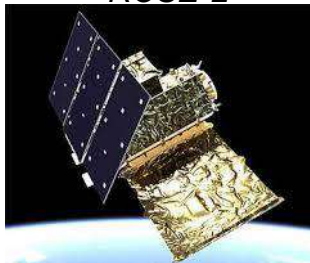
NISAR,



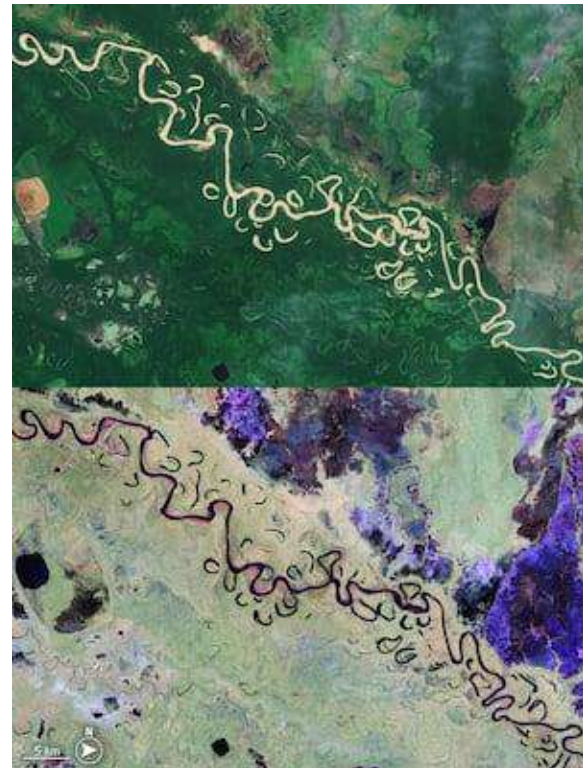
BIOMASS,



ROSE-L



Le radar, longtemps perçu comme un instrument complexe,
devient une plateforme incontournable pour comprendre les
dynamiques de la surface terrestre.

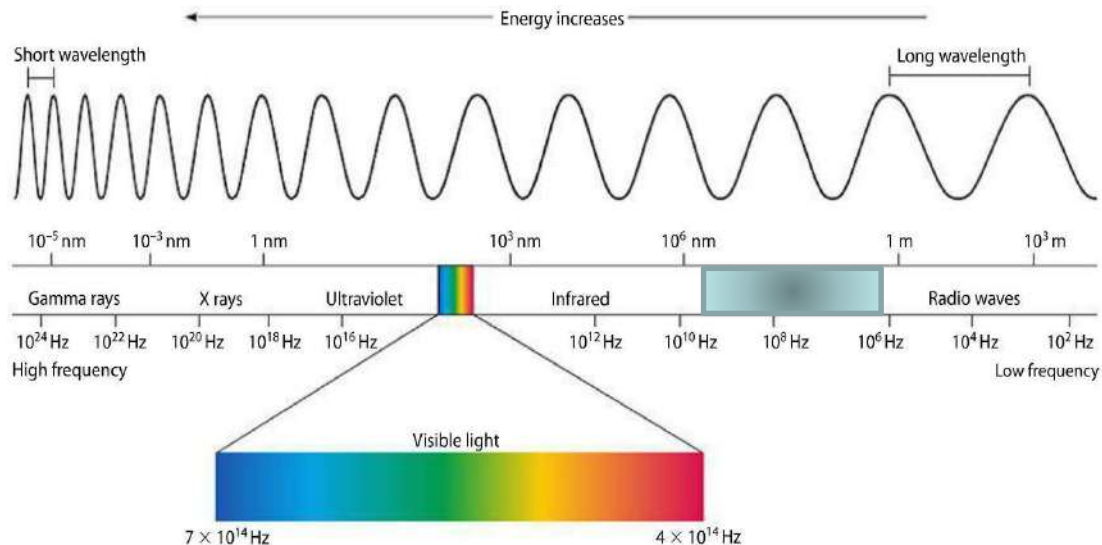




Ce qui distingue une image radar d'une image optique

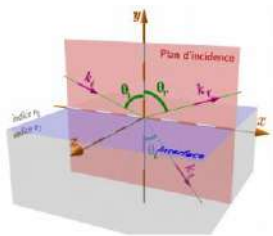
1 - Il utilise une partie différente du spectre.

Le radar utilise des micro-ondes (cm-m), tandis que les capteurs optiques utilisent la lumière visible (centaines de nm).



Conséquence : propriétés des matériaux différentes que dans le visible

Pour un matériau et une fréquence donnés, nous pouvons associer une constante diélectrique complexe (relative).



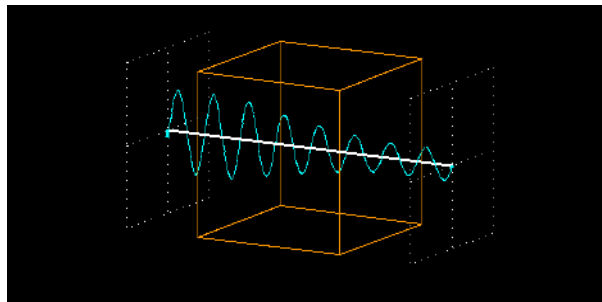
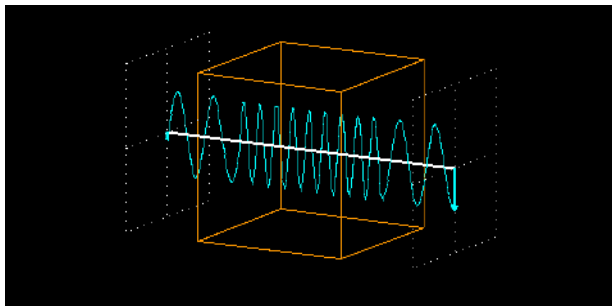
$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon'(\omega) - j \epsilon''(\omega)$$

$$\epsilon' = n^2$$

Cela contrôle la manière
dont les ondes pénètrent
ou s'atténuent dans le
milieu.

Indice de réfraction
Vitesse de propagation

pertes, atténuation

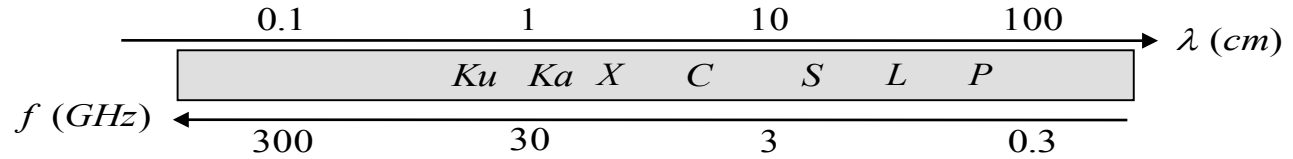


Metal :

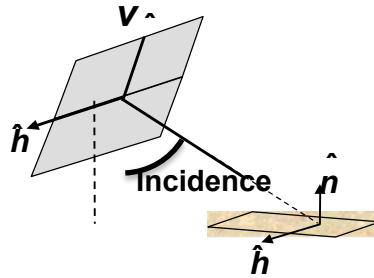
$$\epsilon_r''(\omega) = 1 - j \infty$$

Il peut opérer dans différentes polarisations / fréquences

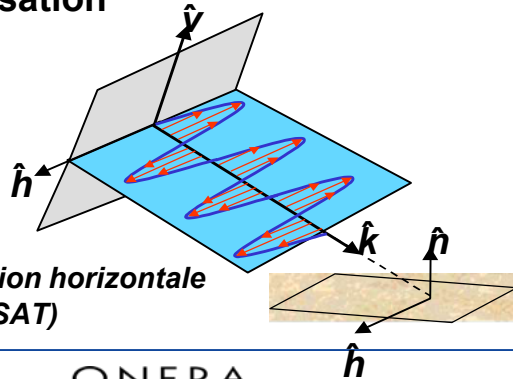
Fréquence porteuse



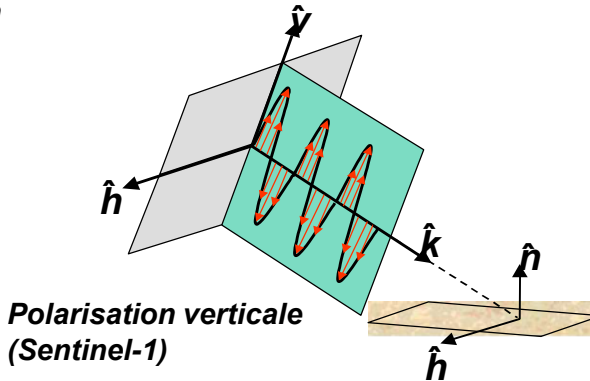
Incidence



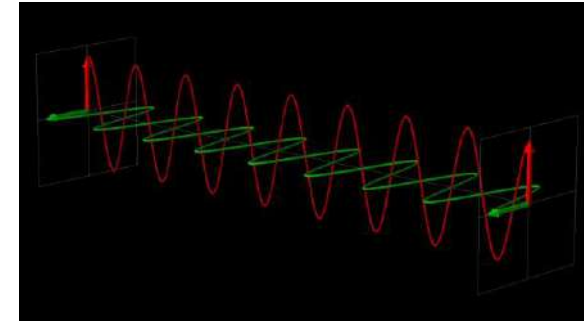
Polarisation



Polarization horizontale
(RADARSAT)



Polarisation verticale
(Sentinel-1)



Conséquence : l'image dépend de nombreux paramètres

Le capteur

La scène

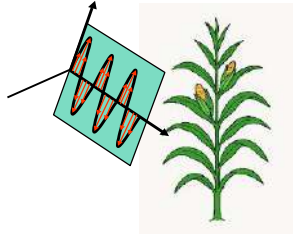
La fréquence

L'angle d'incidence

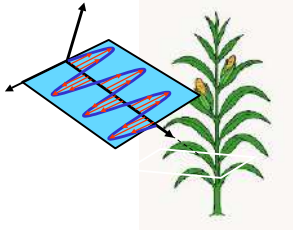
La polarisation

La géométrie

La constante diélectrique



humide



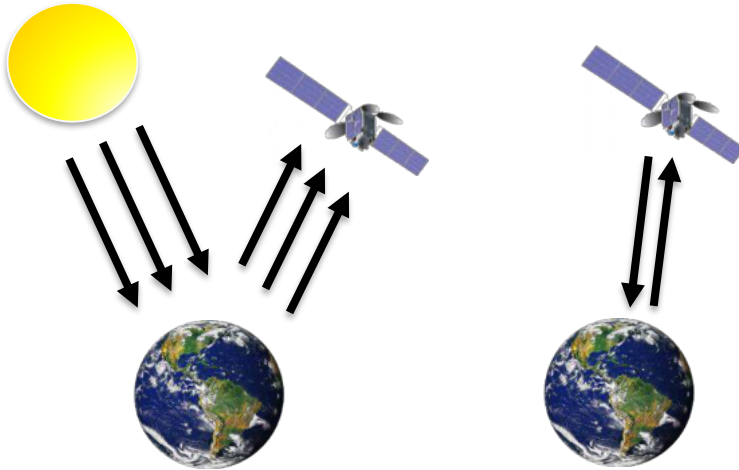
Effets
d'orientation ;
Rebonds,
diffusion
multiples, au
premier ordre...



sec

2 - C'est un capteur actif

Les capteurs optiques sont passifs : ils enregistrent la lumière solaire réfléchiée par la surface. Le radar est un capteur actif : il illumine la scène avec son propre signal.



Conséquences :

- le radar peut fonctionner de jour comme de nuit, indépendamment de la lumière solaire.
- Meilleure stabilité temporelle : indépendant des conditions d'illuminations !

Conséquence : d'autres grandeurs physiques

SER (Surface Equivalente Radar), ou RCS (Radar cross section)

pour des cibles ponctuelles

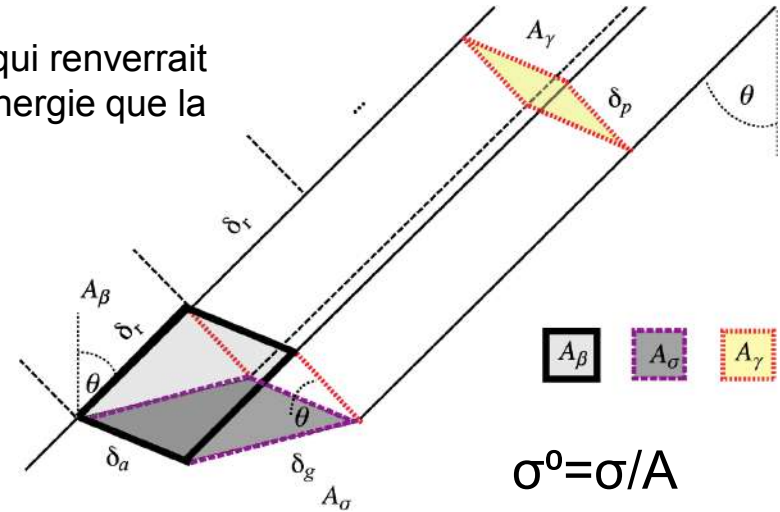
$$\sigma = \frac{(4\pi)R^2 P_r}{P_i}$$

surface d'une sphère parfaite qui renverrait au radar la même quantité d'énergie que la cible observée.

Coefficient de rétrodiffusion

pour les cibles naturelles :

β_0 , σ_0 ou γ_0 se rapportent à la zone de référence utilisée pour normaliser la rétrodiffusion.

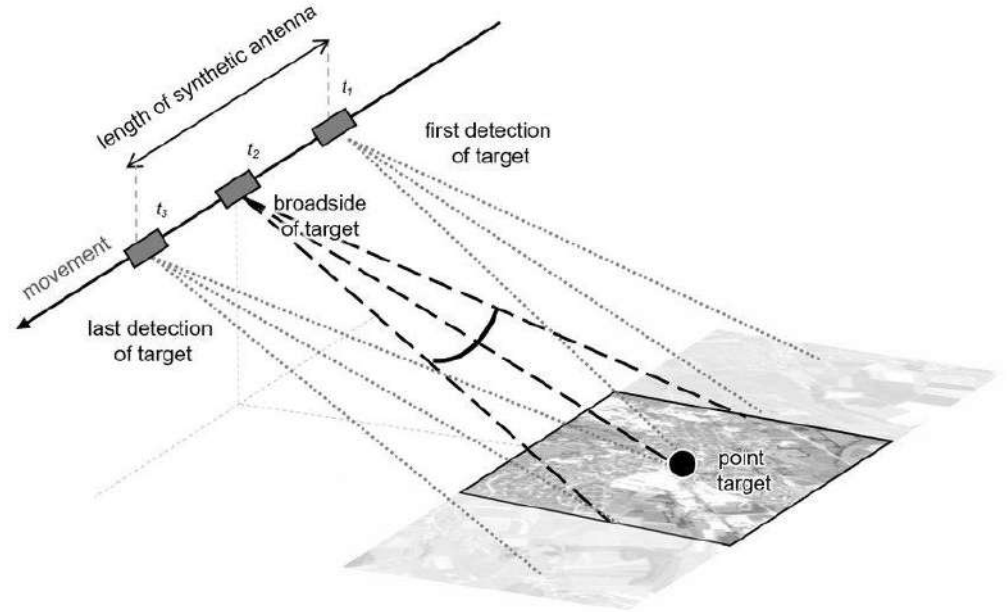


<https://medium.com/@elisecolin/what-are-the-physical-quantities-in-a-sar-image-c788a8265abd>

3 - L'image est synthétisée à partir d'un algorithme.

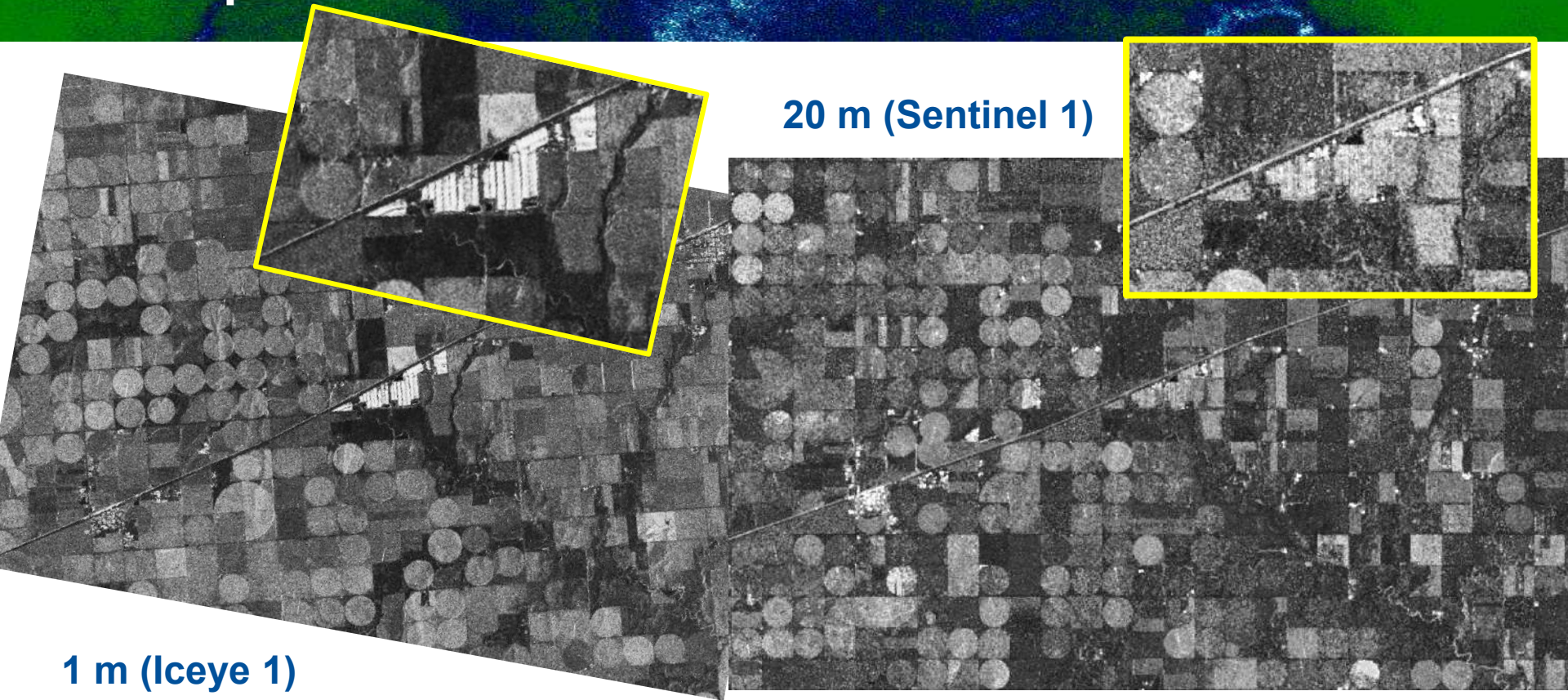
Une image SAR est **synthétisée**, elle n'est pas prise comme une photo.

- La résolution spatiale dépend des paramètres du radar (fréquence, bande passante, longueur de la trajectoire), et non de la taille physique de l'objectif d'un appareil photo.
- Il faut du mouvement entre scène et capteur pour former une image !



Source: [Braun, A. \(2019\)](#)

Conséquence : influence de la résolution



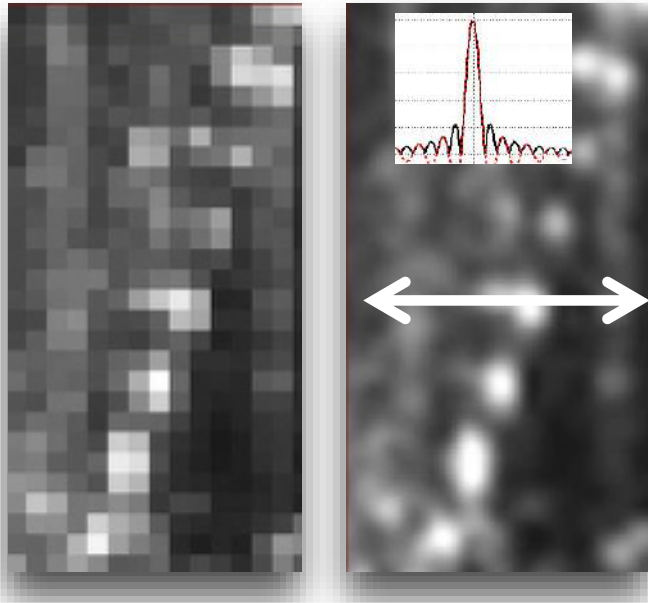
1 m (Iceye 1)

20 m (Sentinel 1)

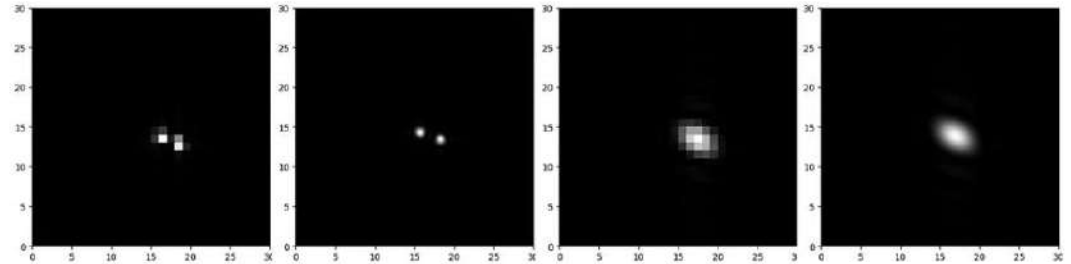
Attention : résolution spatiale n'est pas taille de pixel



Pour une même résolution on peut avoir des tailles de pixel différentes



Deux diffuseurs séparés de 2.7m



Résolution 1m
Taille pixel 1m

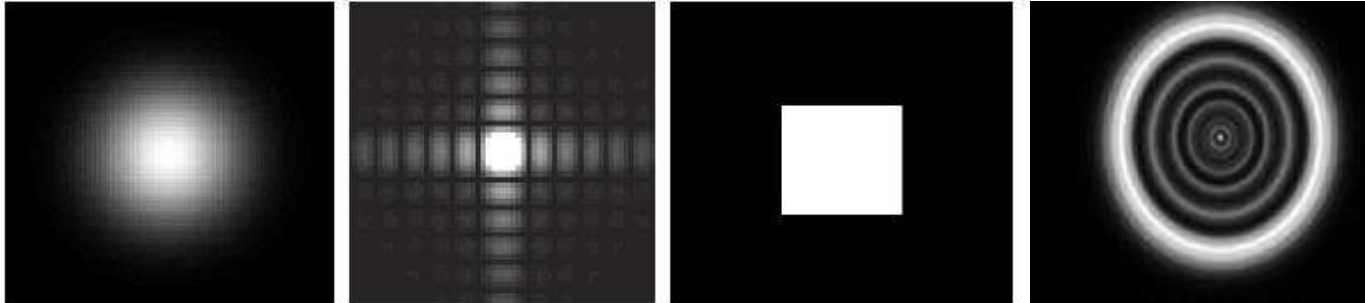
Résolution 1m
Taille pixel 1/16 m

Résolution 3m
Taille pixel 1 m

Résolution 3m
Taille pixel 1/16 m

Autre conséquence de l'algorithme SAR

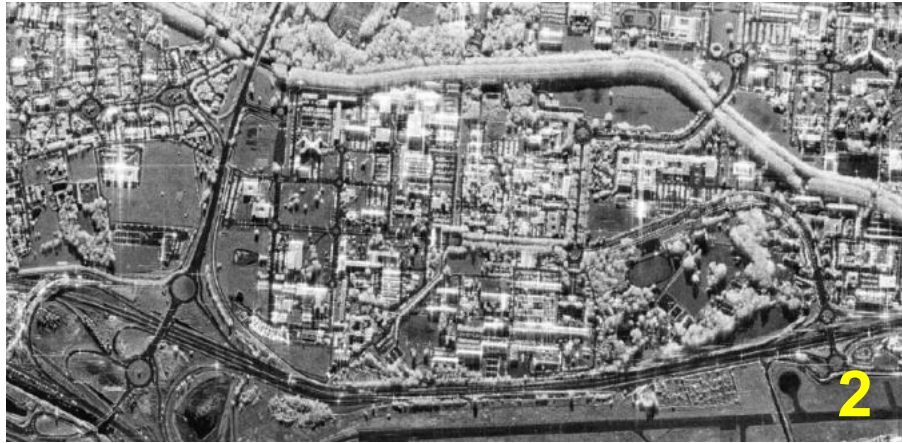
La réponse impulsionnelle (le point parfait) du capteur n'est pas une tache classique...



<https://elisecolin.medium.com/i-dont-understand-squinted-radar-geometry-b95f24c2f850>



Savez vous reconnaître une image radar ?

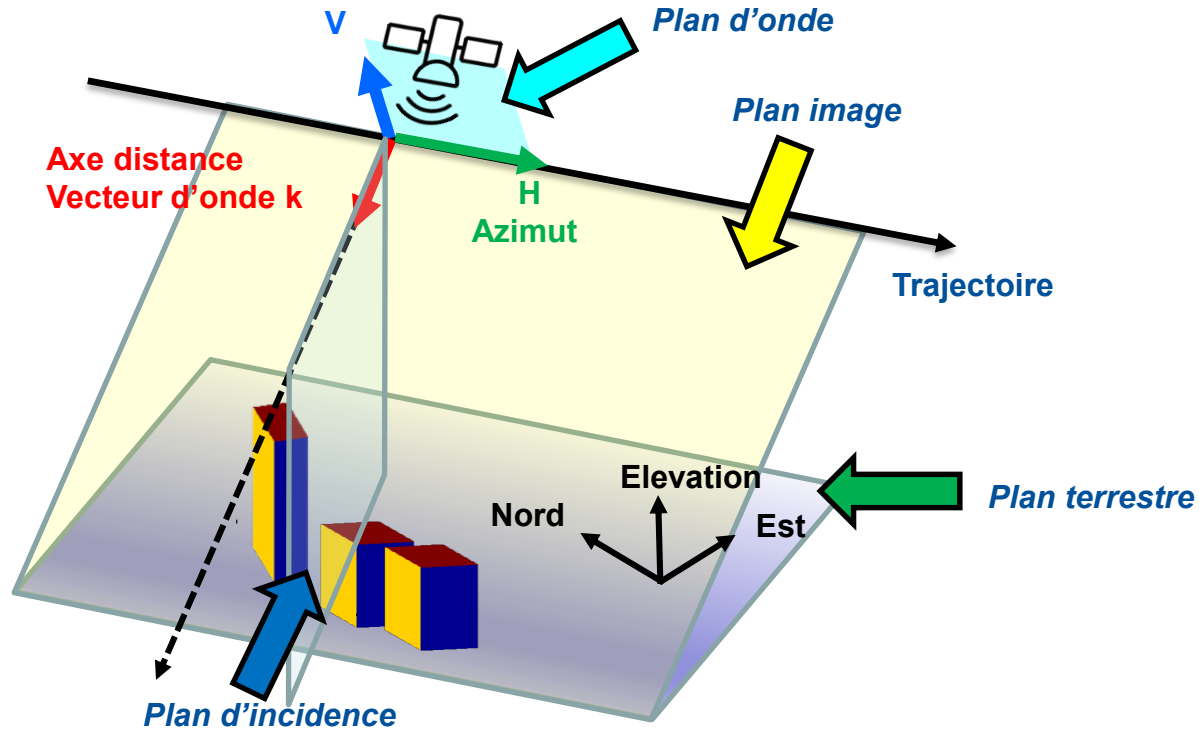


4 - La géométrie du radar est particulière

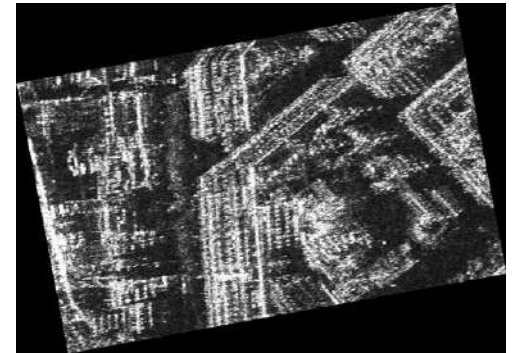
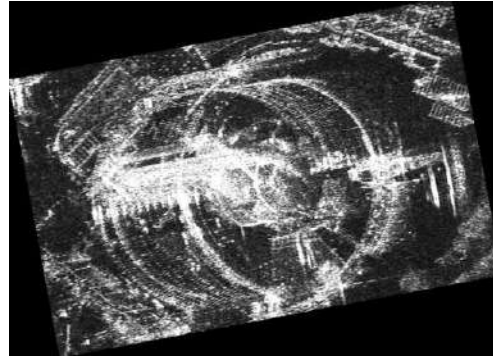
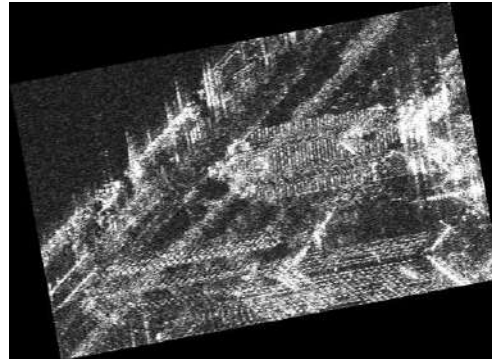
La géométrie des images radar est inhabituelle :

- les distances sont mesurées en distance oblique,
- **Le plan de l'image n'est pas le plan d'onde de l'antenne**

Cela provoque des distorsions (décalage, raccourcissement, ombre) spécifiques au SAR.



Conséquence : bonne chance pour interpréter la géométrie

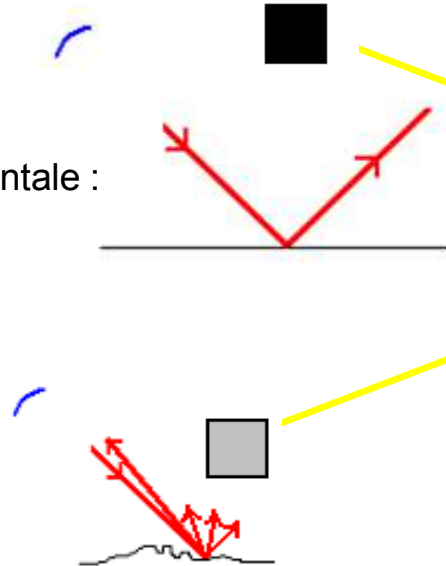


La géométrie du radar est particulière...

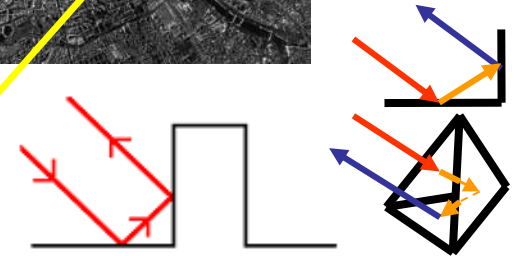
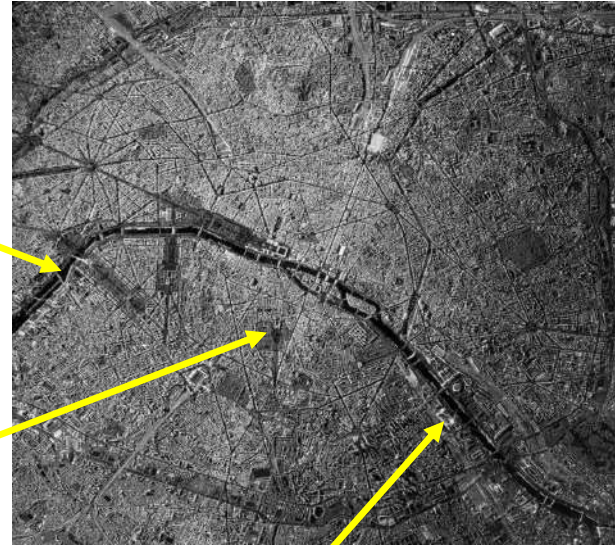
Autre conséquence : une radiométrie typique du radar :

Surface plane horizontale :
sombre (spéculaire)

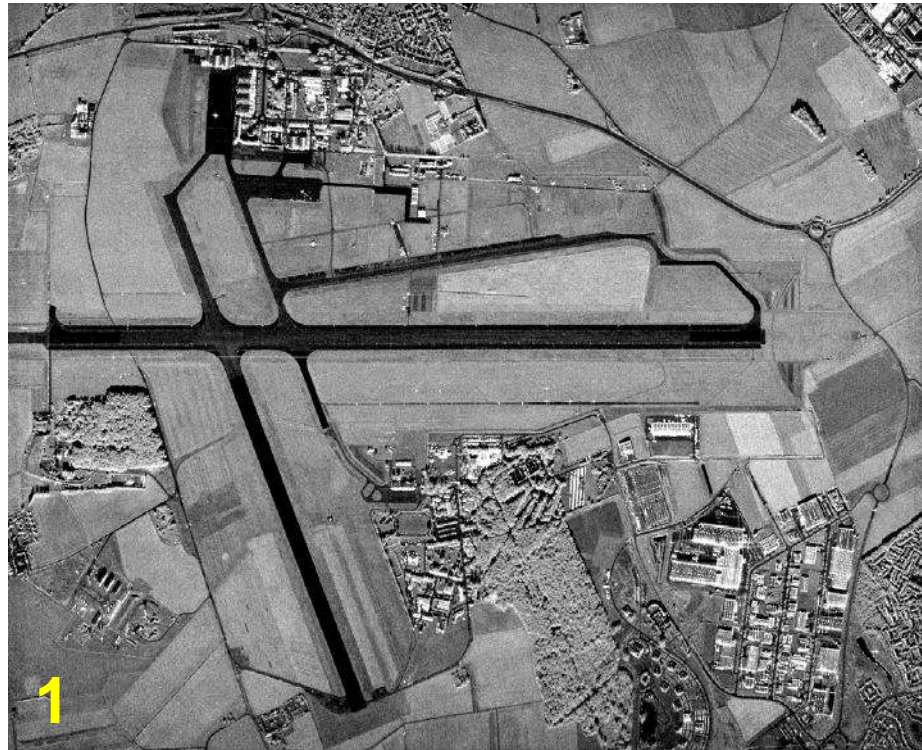
diffusion



Des points brillants



Savez vous reconnaître une image radar ?



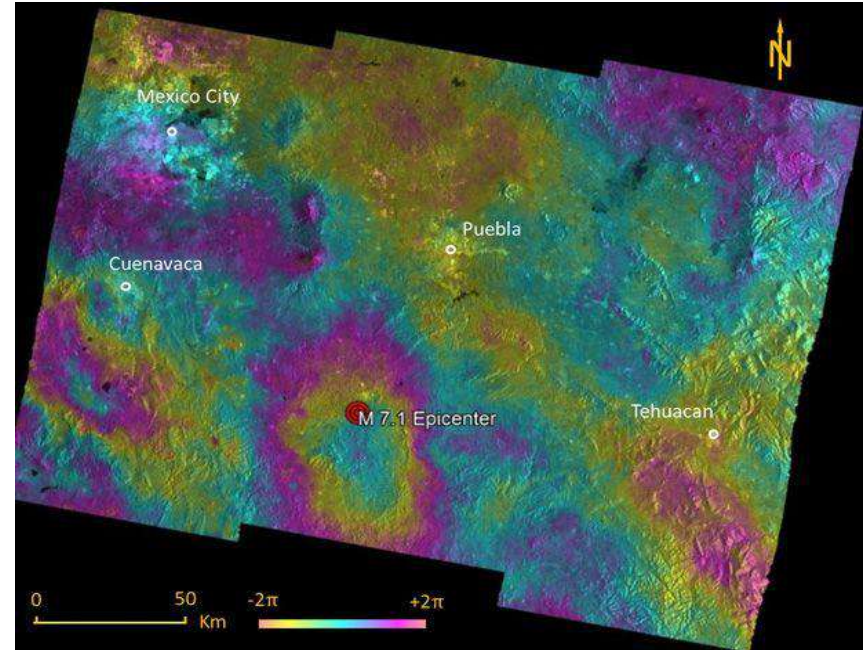
5 - C'est un capteur cohérent

Contrairement aux images optiques, le radar mesure un champ complexe (amplitude + phase).

Conséquence :

La phase seule n'est peut-être pas directement utile,

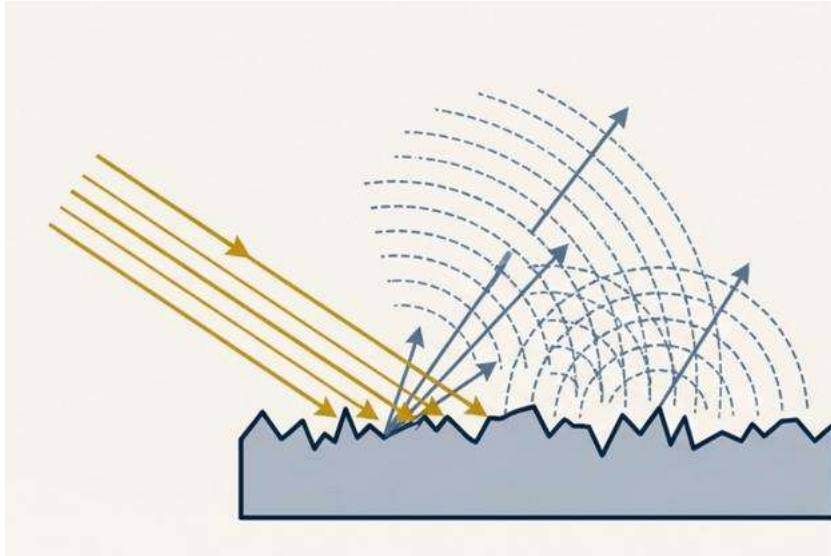
mais elle contient des informations cachées qui peuvent être exploitées ultérieurement par combinaison (par exemple, l'interférométrie, la polarimétrie).



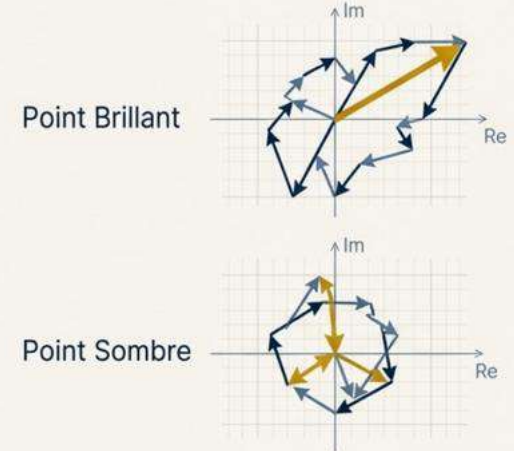
Une conséquence : le speckle

En éclairage
cohérent :

les échos
provenant de
nombreux
diffuseurs
interfèrent de
manière
constructive ou
destructive



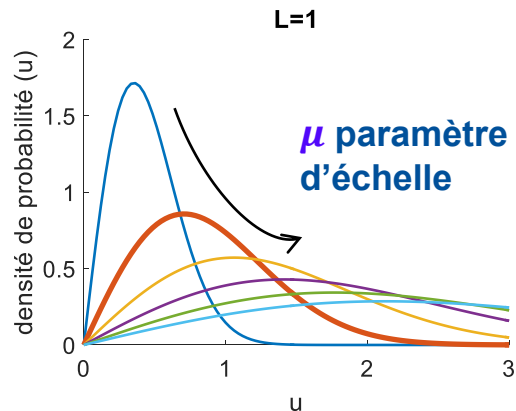
Marche aléatoire de phaseurs



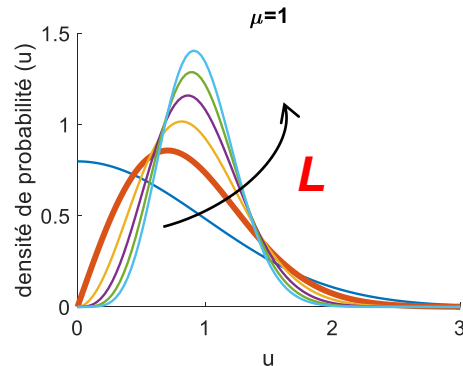
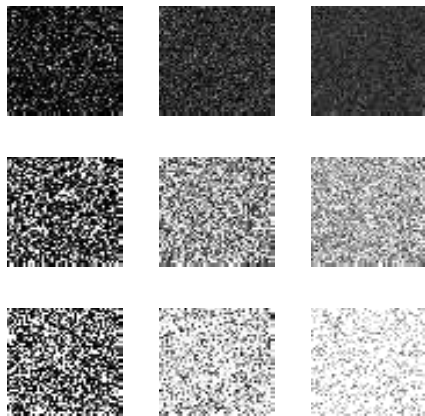
Des statistiques particulières

Amplitude de speckle: Rayleigh Nakagami (μ , L)

Intensité de speckle : Gamma(μ , L)



L paramètre de forme

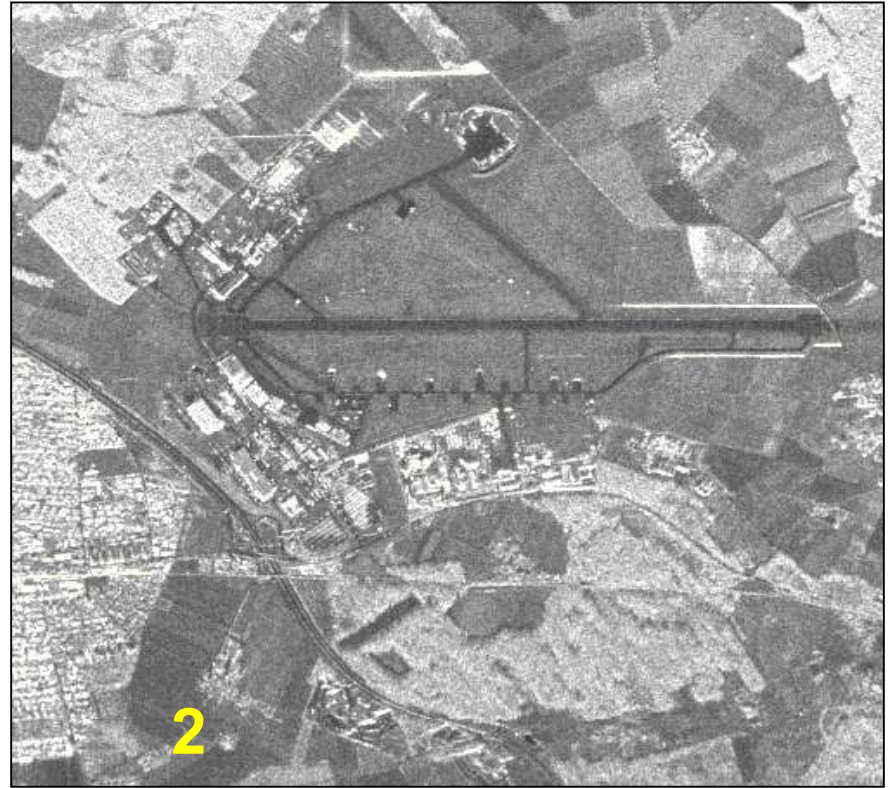


L est appelé ENL ou
« Equivalent Number of Looks »

Pour une image SLC
 $L=1$

Pour une image GRD Sentinel-1
 $L \sim 4.7$

Bande L ($\lambda=5\text{cm}$) ou bande X ($\lambda= 3\text{cm}$) ?





Enjeux, défis : les séries temporelles

Les séries temporelles : atout majeur du radar

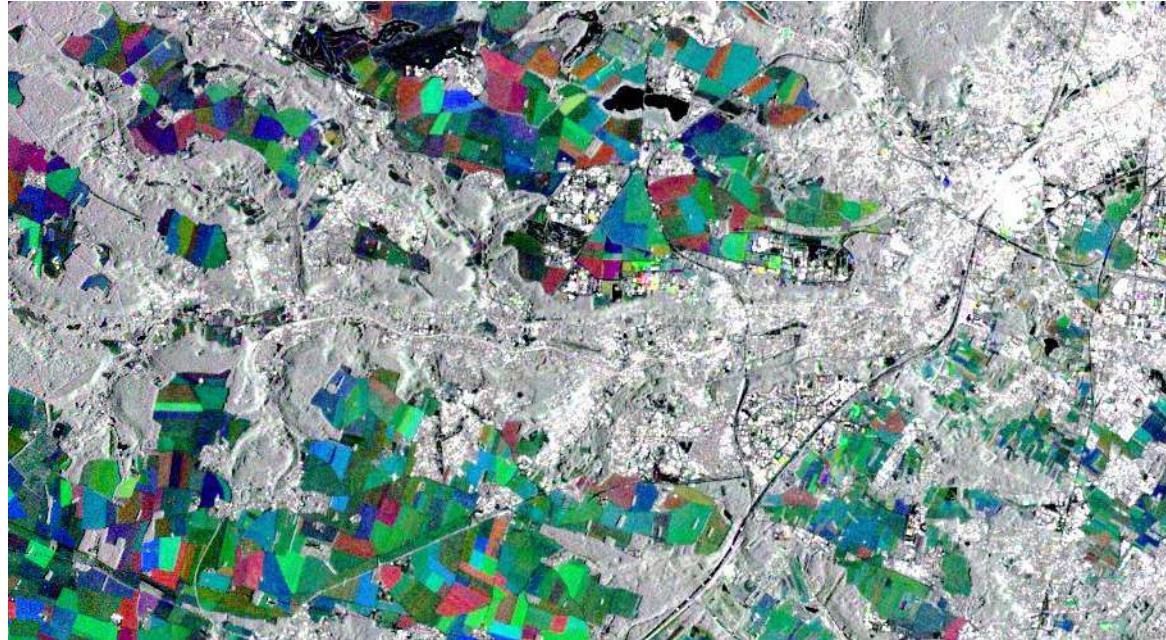
Echantillonnage régulier (pas de problème de nuage)

Stabilité du signal : capteur actif



Comment visualiser les changements ?

Date 1 Date 2
Date 3



Généralisation à N dates ?

On va raisonner dans un autre espace colorimétrique : HSV

L'espace HSV

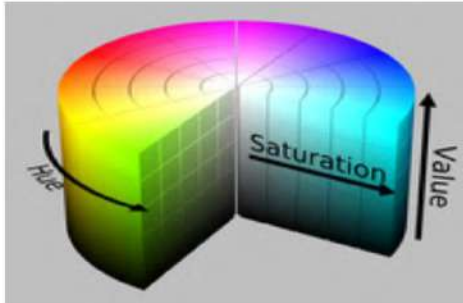


Espace RGB : R, G, B



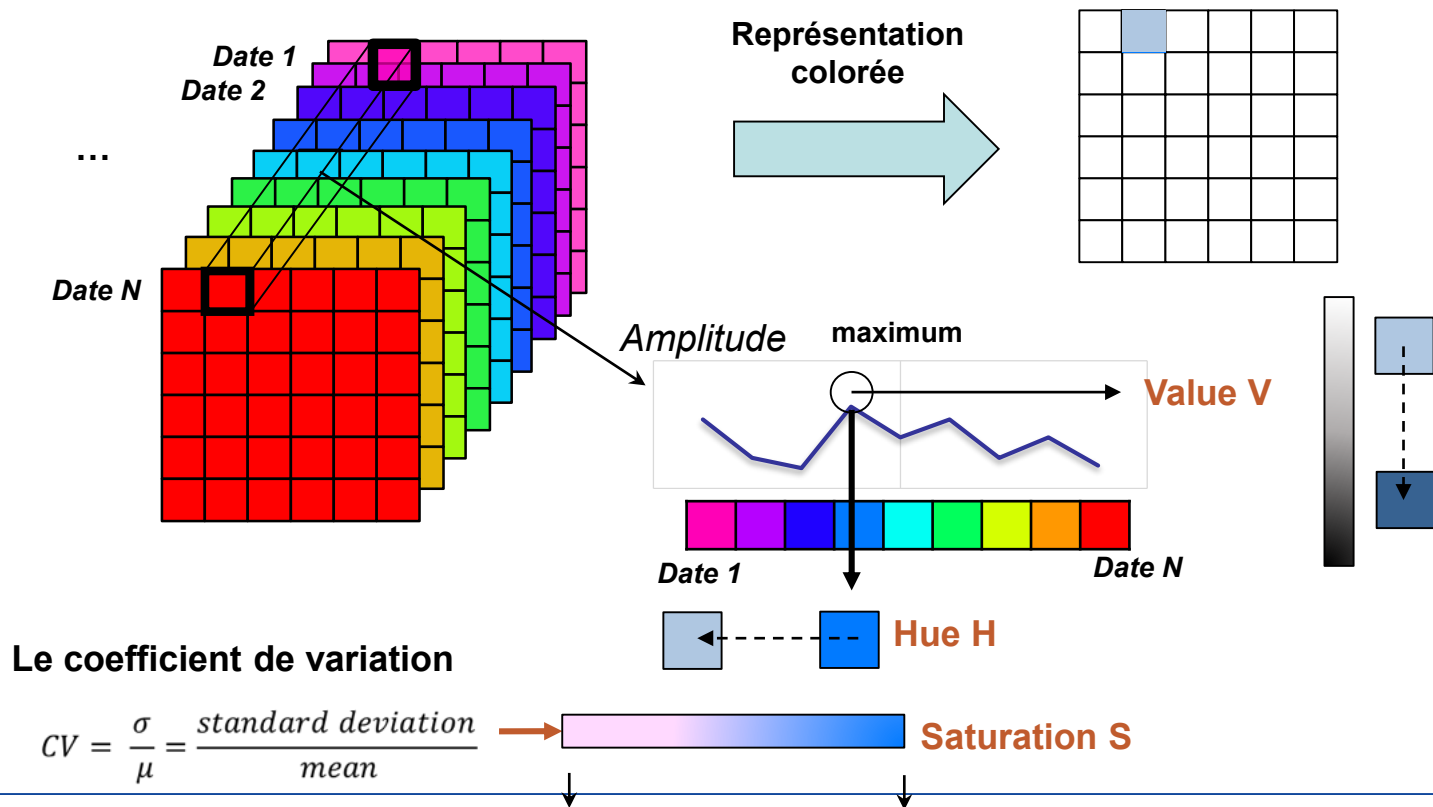
La conversion est possible

Espace : H, S, V



HSV Cylinder





Pourquoi ca marche ? A cause des propriétés du CV

Le coefficient de variation

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\text{standard deviation}}{\text{mean}}$$



Coefficient de variation
croissant

Processus non
stationnaire

Processus stationnaire



Change



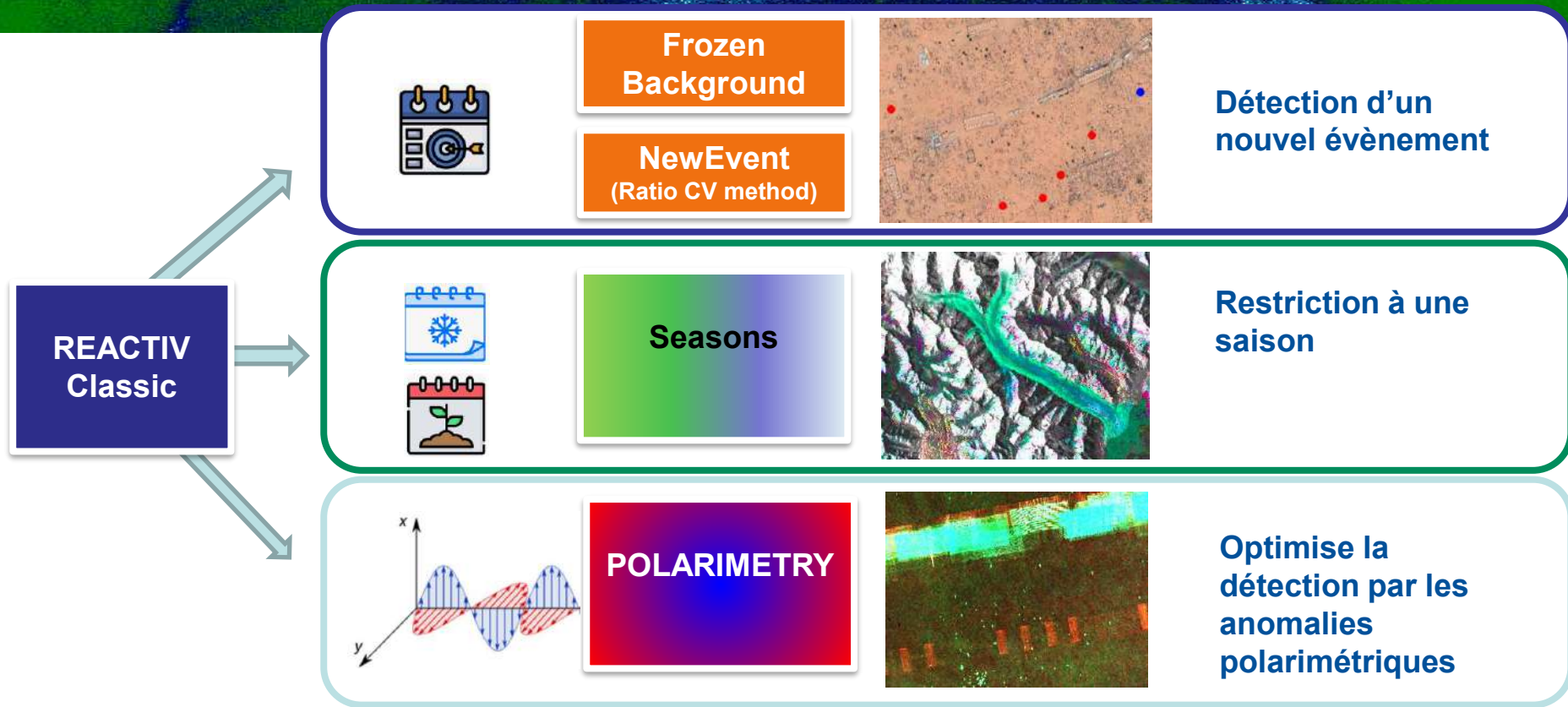
Speckle



« Permanent
Scatterer »

Rice Law

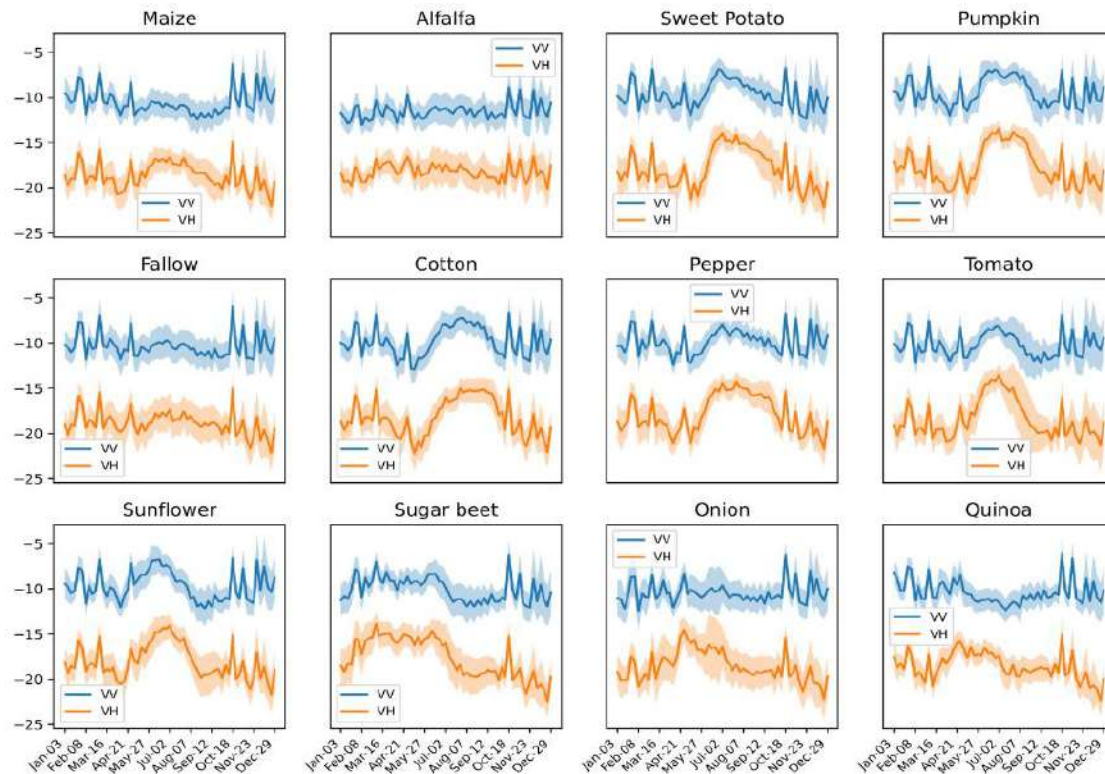
Extensions récentes



Autoencodage

Aller plus loin

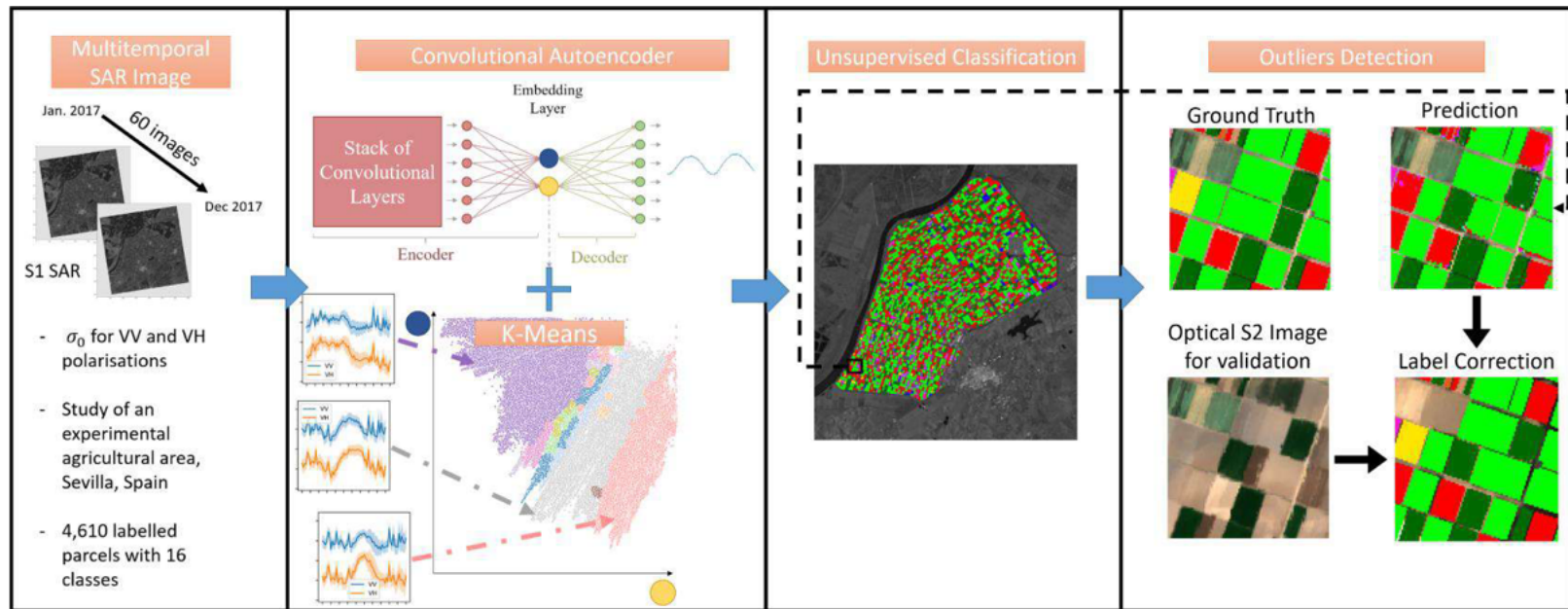
Di Martino et al.



Autoencodage : application à la correction de labels

Application : classification non supervisée et à la détection des erreurs d'étiquetage : méthode FARMSAR

Objectif : détecter et corriger les parcelles agricoles mal étiquetées à l'aide des séries temporelles Sentinel-1.



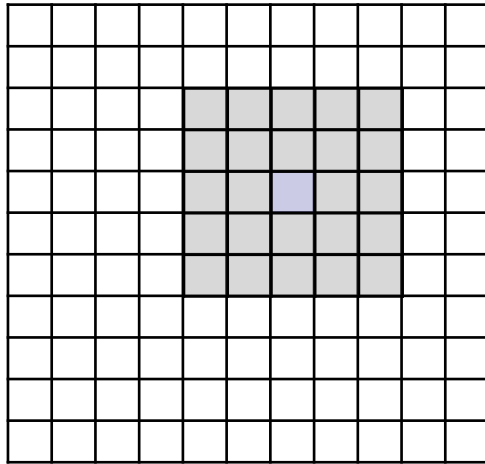
Une revisite de la polarimétrie : vers l'estimation temporelle

En polarimétrie, on a

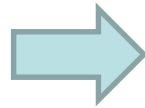
- Des paramètres du premier ordre : $|HH|$, $|VV|$, $|HV|$, $|HH-VV|$

...

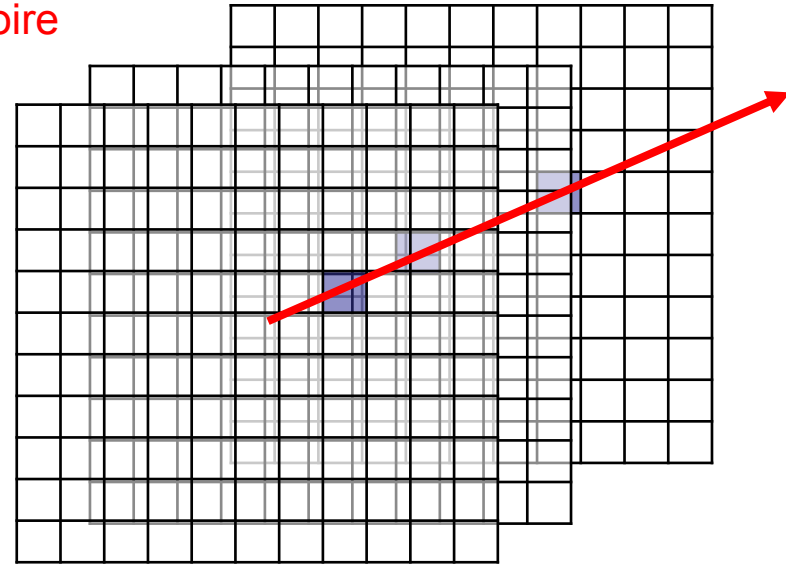
- Des paramètres du second ordre : coherence, $\langle HH \ HV^* \rangle$, entropie polarimétrique,pour mesurer le degré aléatoire



$$\mathbf{T} = \langle \mathbf{k} \mathbf{k}^\dagger \rangle$$



Passer d'une estimation
spatiale
A une estimation
temporelle



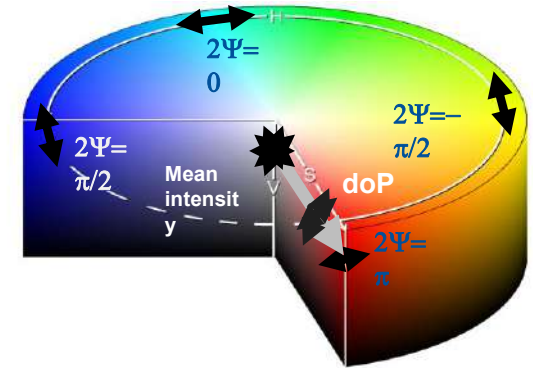
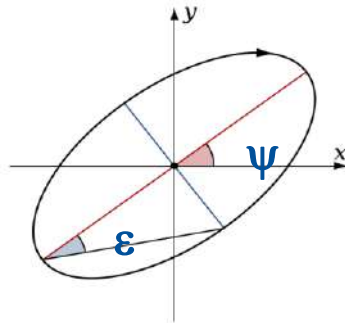
Ce qu'on peut faire avec Sentinel-1

$$S = \begin{pmatrix} S_{Hh} & S_{Vh} \\ S_{Hv} & S_{Vv} \end{pmatrix} \quad \text{Sentinel-1}$$

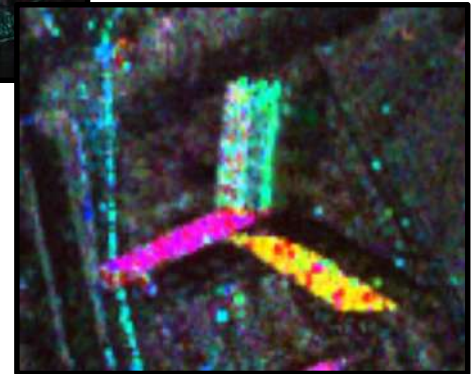
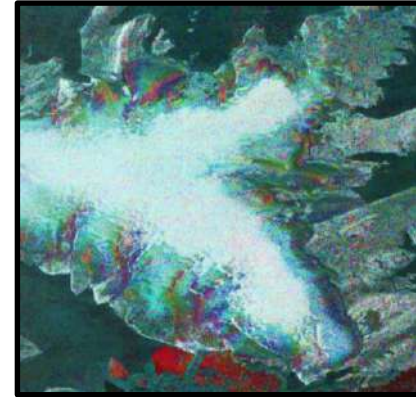
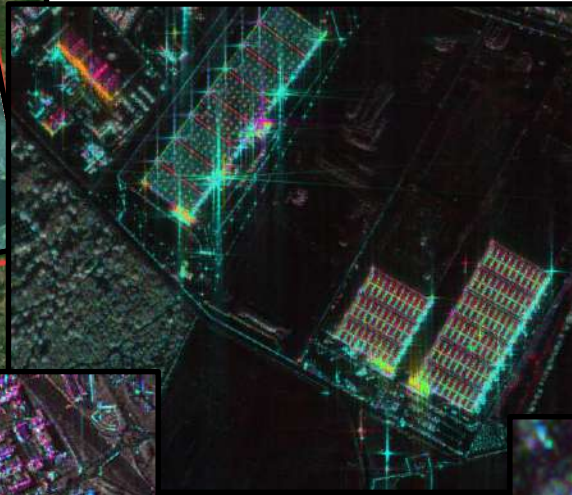
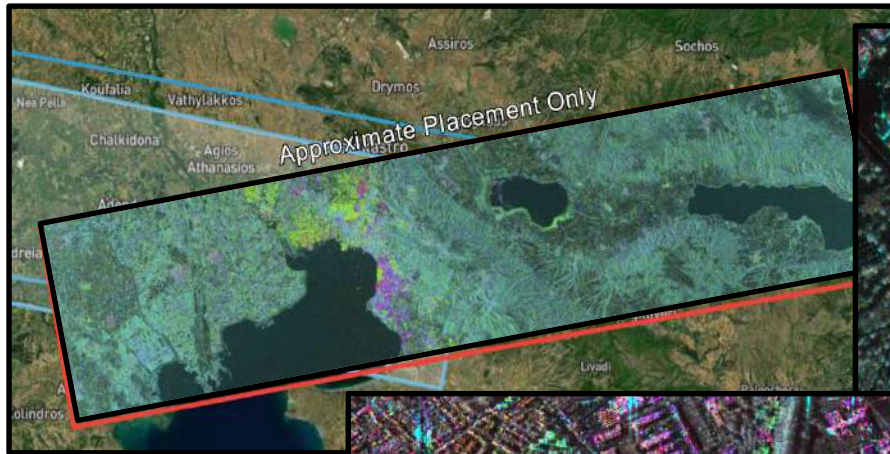
Décrire l'ellipse de polarisation pour une émission Verticale fixée

Degré de polarisation (DoP):
$$doP = \frac{\sqrt{(\langle S_{VV}S_{VV}^* \rangle - \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle)^2 + 4|\langle S_{VV}S_{HV}^* \rangle|^2}}{\langle S_{VV}S_{VV}^* \rangle + \langle S_{HV}S_{HV}^* \rangle}$$

Orientation, ellipticité de l'état polarimétrique diffusé



Angles d'orientation polarimétriques



Ce qu'on peut faire avec les phases temporelles

January 2017



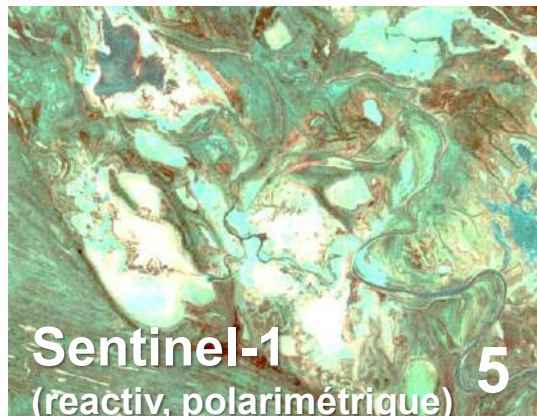
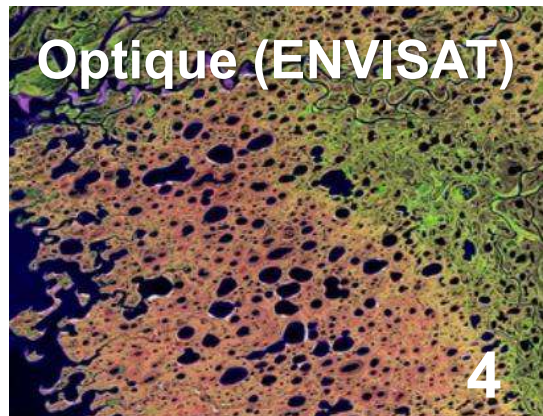
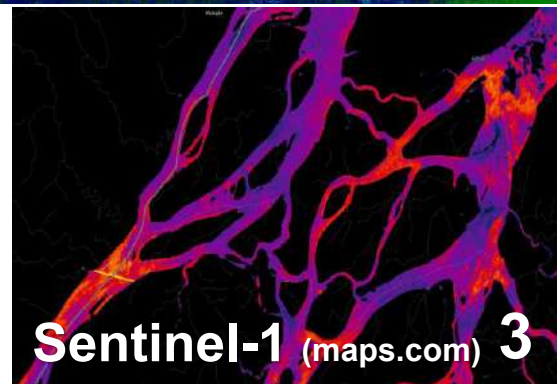
La cohérence interférométrique est sensible à la croissance des cultures :

- elle diminue pendant la saison de croissance (changements structuraux dans la canopée),
- elle augmente à nouveau hors saison, lorsque les champs sont nus ou stables.

La cohérence peut améliorer la classification/détection

Série chronologique annuelle de données provenant de paires d'images Sentinel-1 combinées de 2017 d'une zone agricole à Séville, en Espagne.

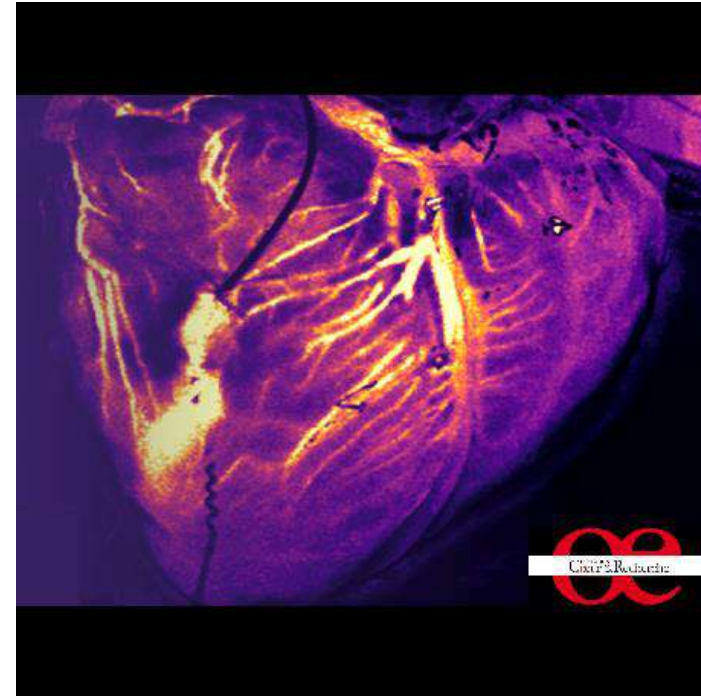
Savez vous reconnaître une image de la terre ?



Comment on passe de l'observation terrestre au médical ?

Cohérence de la lumière, de notre planète à
la vascularisation | TEDxSaclay

https://youtu.be/6_rR3DDTGjU?si=mu3aEocE5bJl-8-e



Pour Noël

