

# 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.

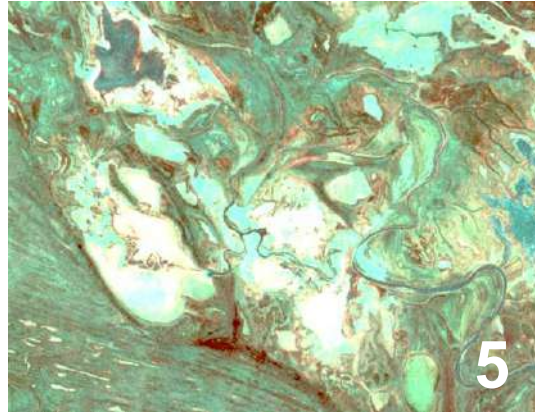
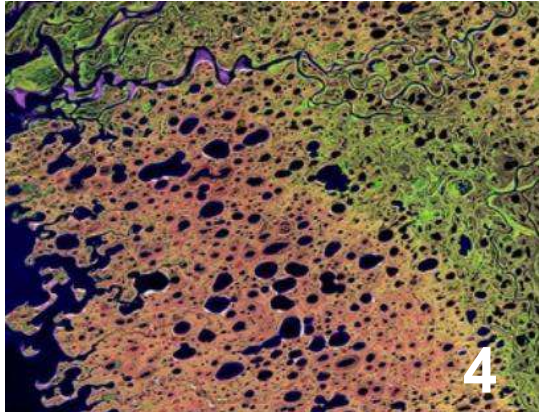
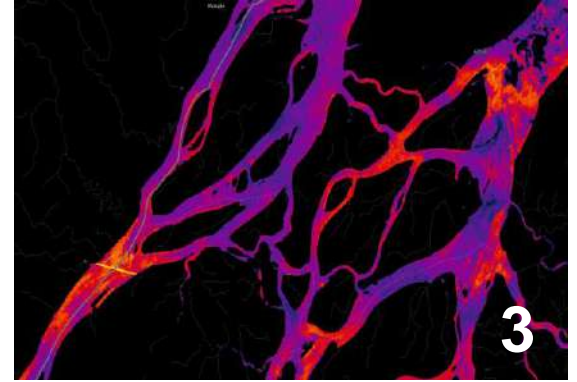
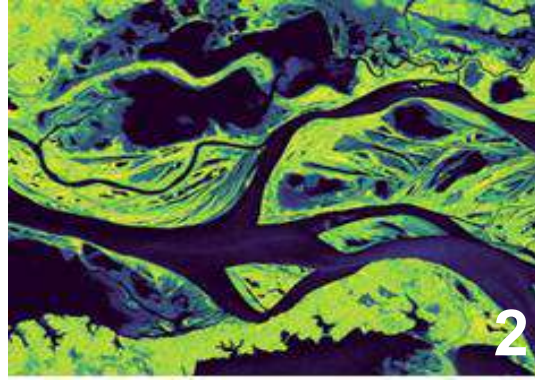
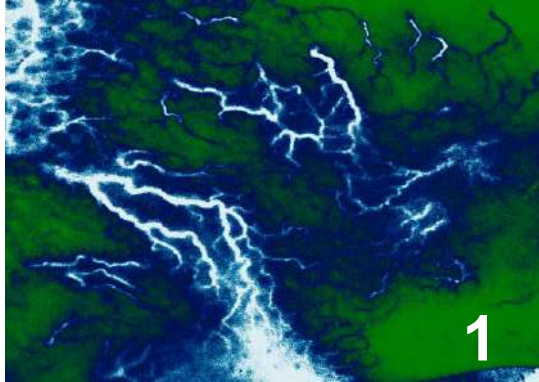
✉ Email : [elise.colin@onera.fr](mailto:elise.colin@onera.fr)

🌐 ONERA (France)



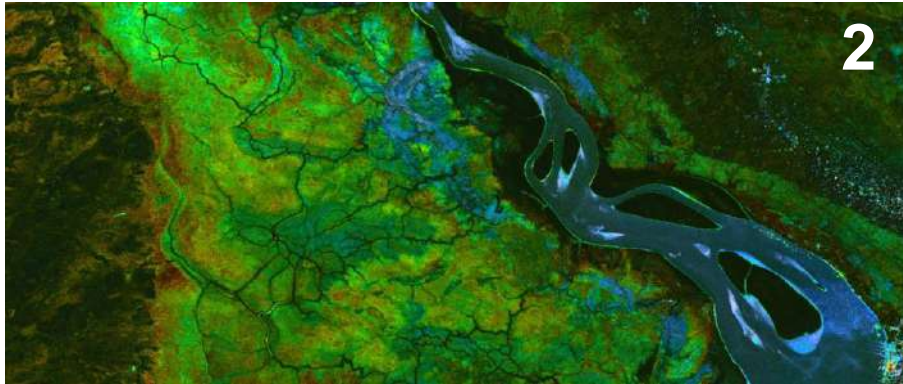
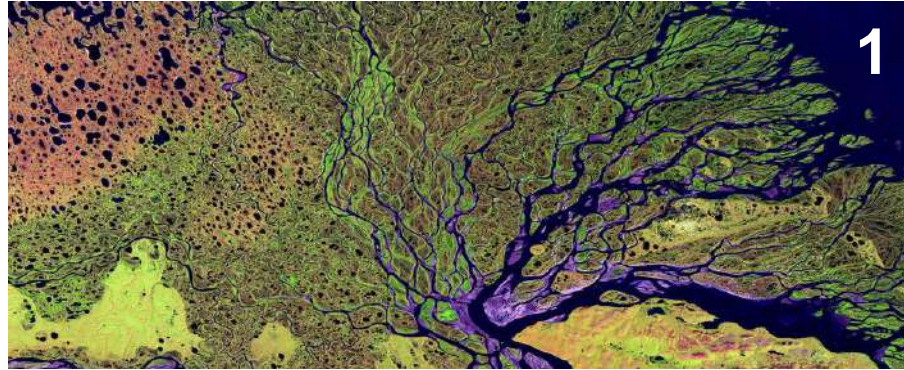


# Savez vous reconnaître une image de la terre ?

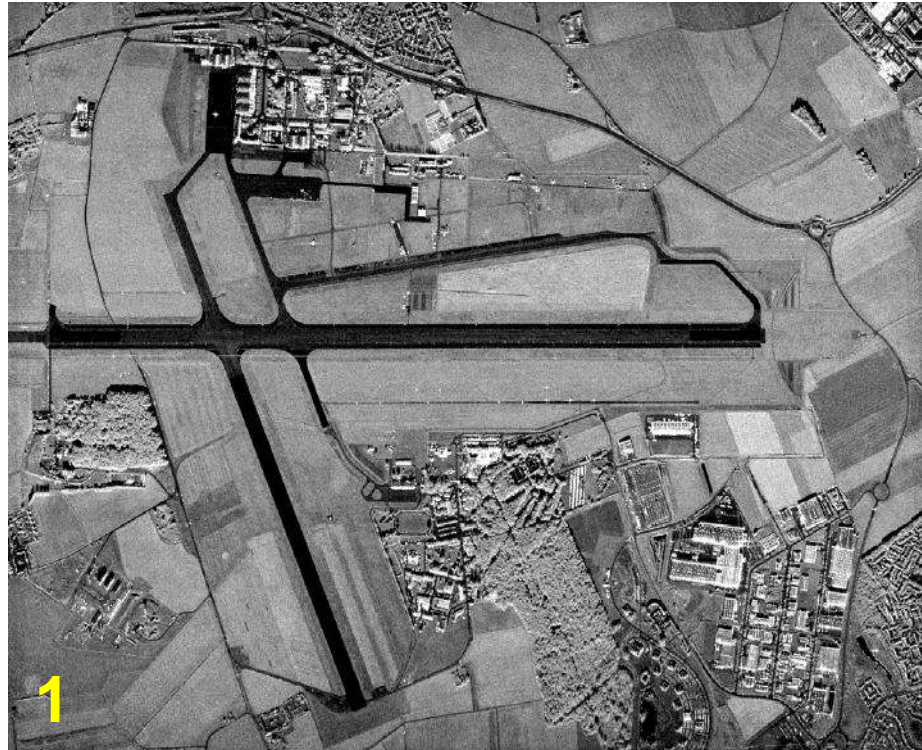




# Savez vous reconnaître une image radar ?

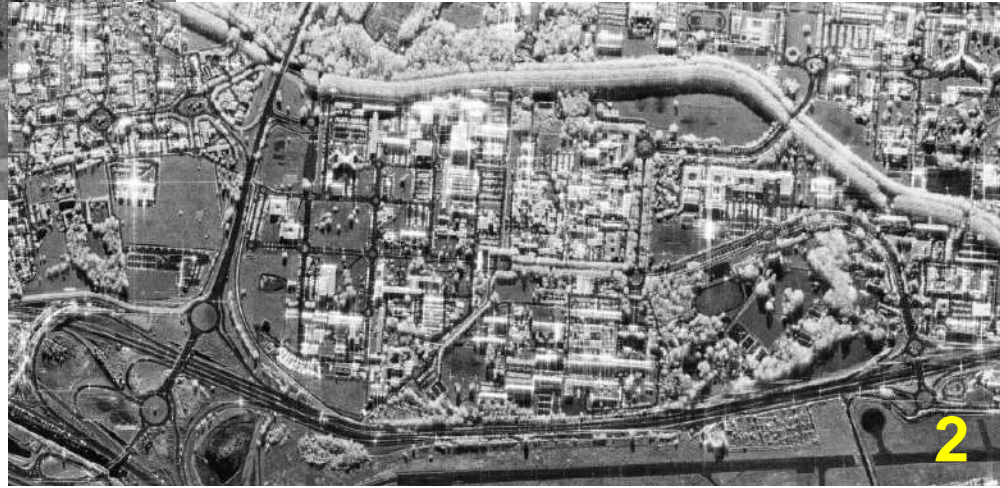


# Savez vous reconnaître une image radar ?

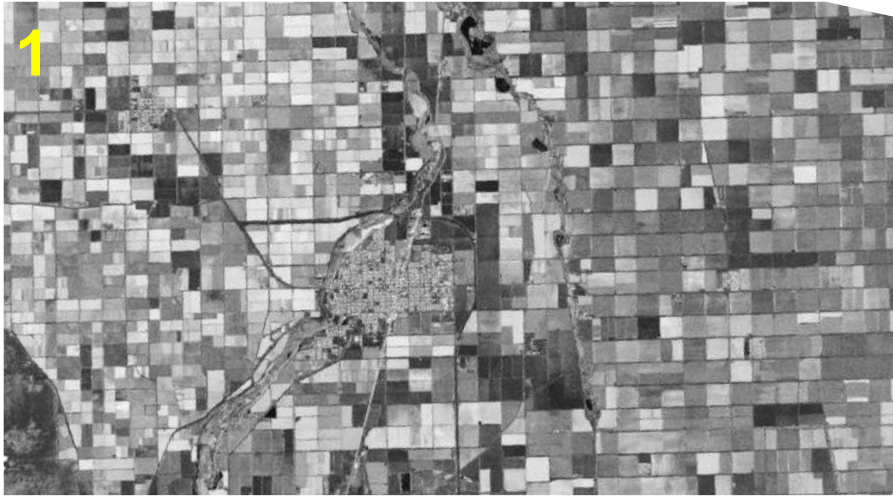




# Savez vous reconnaître une image radar ?



# 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

---

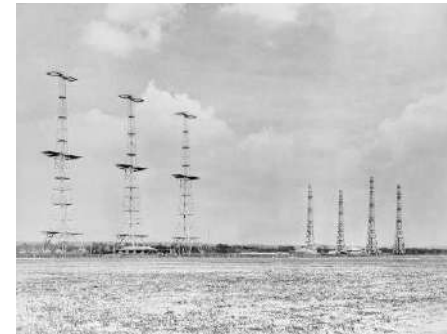
# Des origines militaires à l'imagerie (années 1930–1960)

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**



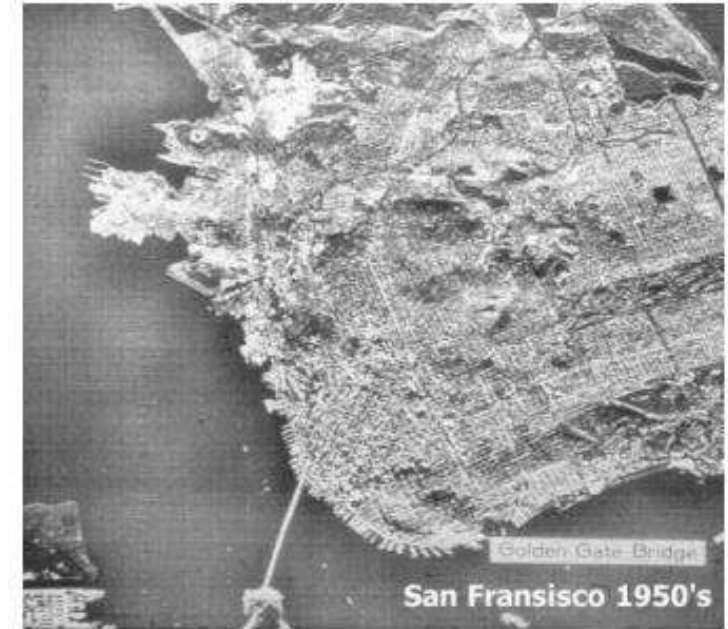


# Premières images aéroportées : du RAR au SAR

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.

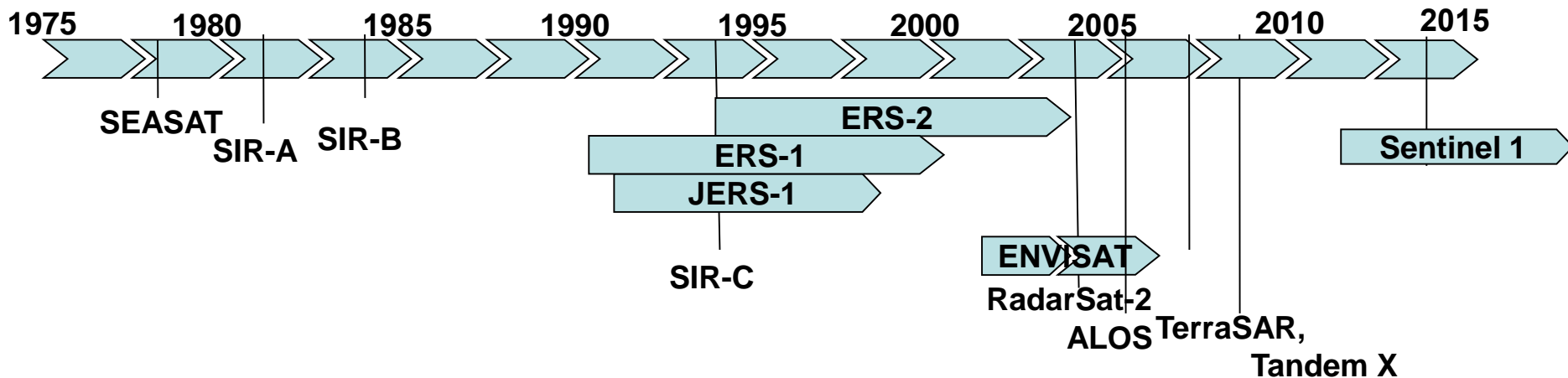


**Première image radar « RAR »  
(Real Aperture Radar)**

# 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.



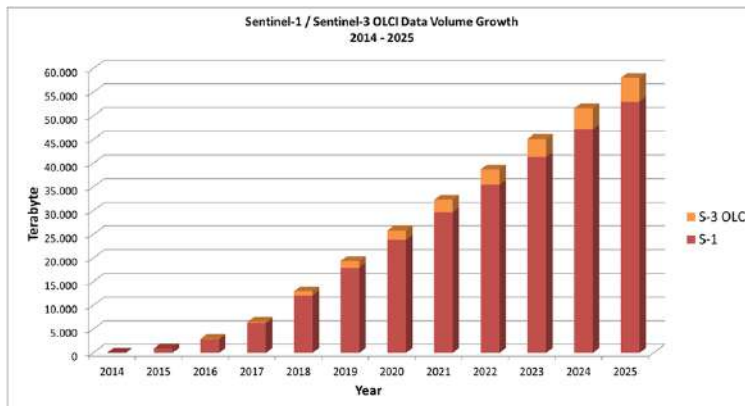
- Naissance de l'InSAR spatiale : déformation du sol, volcanologie, glaciologie.



- 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.

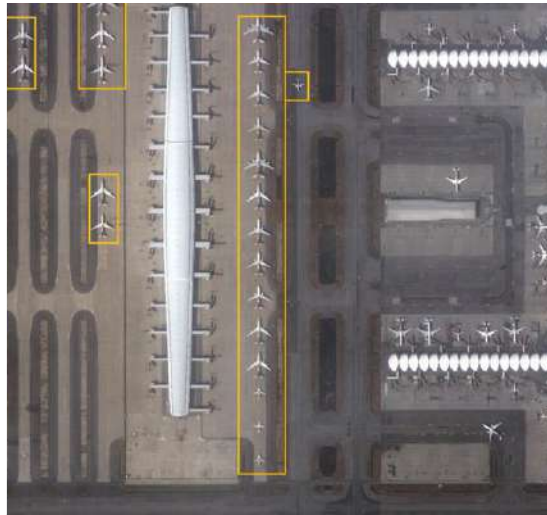
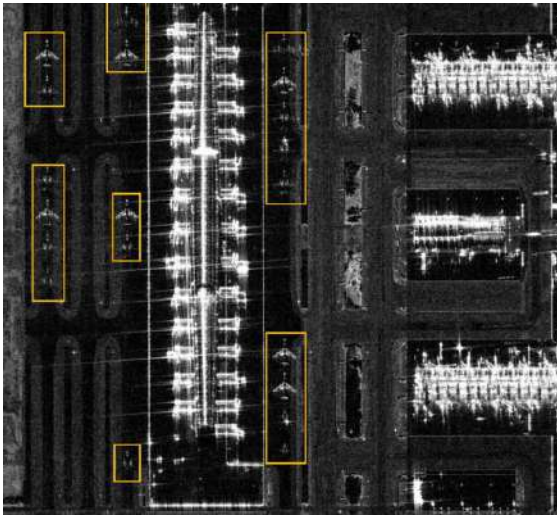


- **ONERA : Projet de recherche « MESUSE » pour la télédétection et le big data (2016-2019)**



# 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.

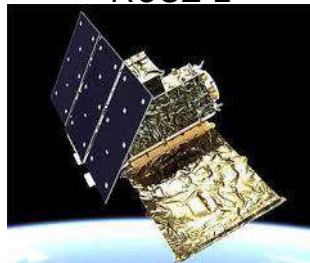
*NISAR,*



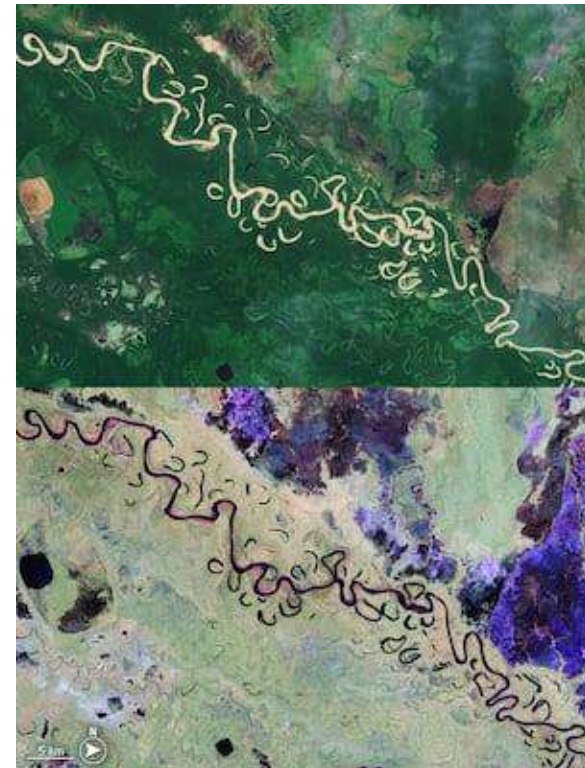
*BIOMASS,*



*ROSE-L*



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





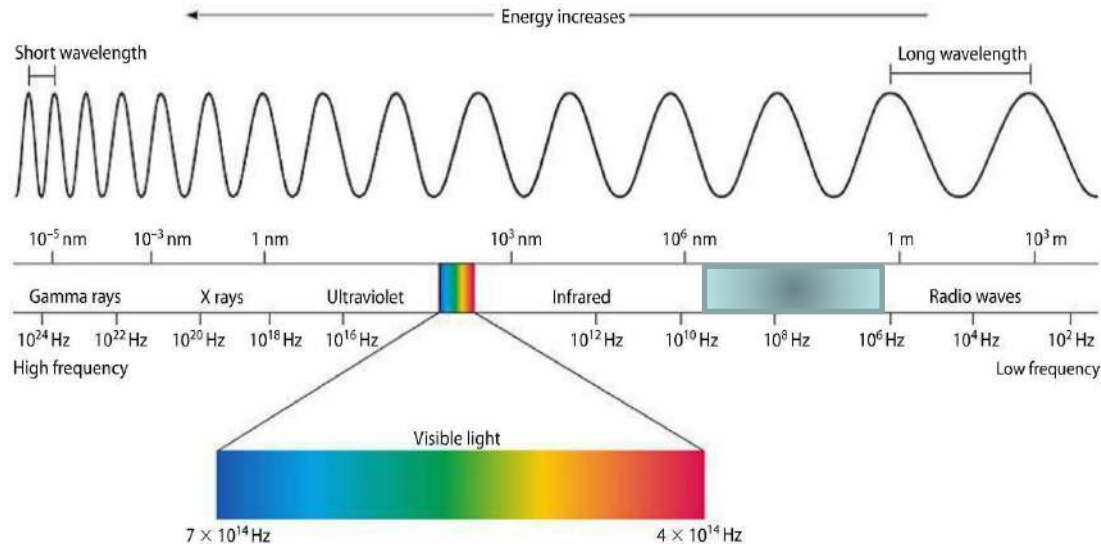


# Ce qui distingue une image radar d'une image optique

---

# 1 - Il utilise une partie différente du spectre.

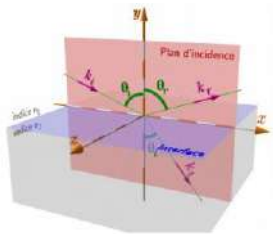
Le radar utilise des micro-ondes (cm-m), tandis que les capteurs optiques utilisent la lumière visible (centaines de nm).





# Conséquence : propriétés des matériaux différentes que dans le visible

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

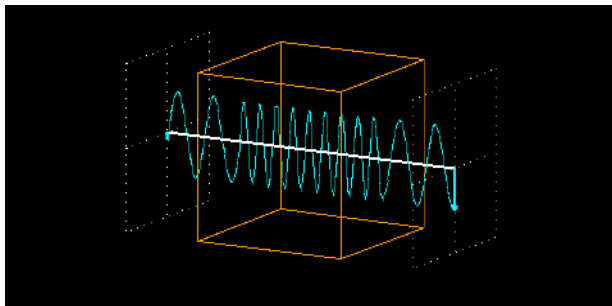


$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon'(\omega) - j \epsilon''(\omega)$$

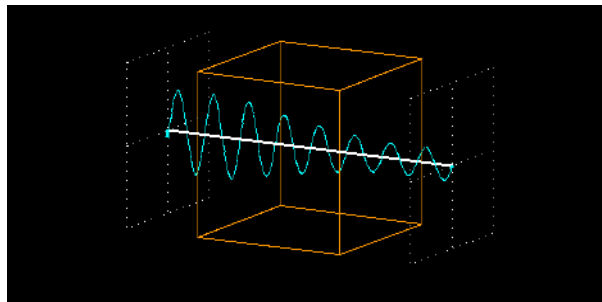
$$\epsilon' = n^2$$

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

Indice de réfraction  
Vitesse de propagation



pertes, atténuation

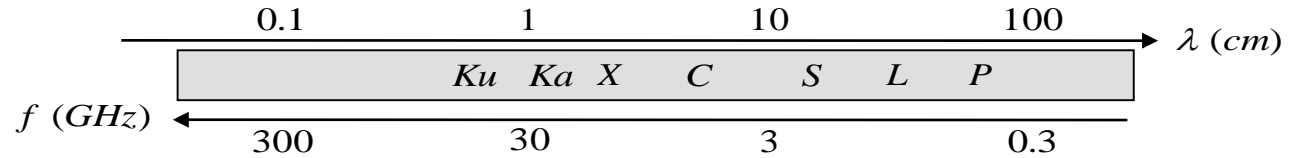


**Metal :**

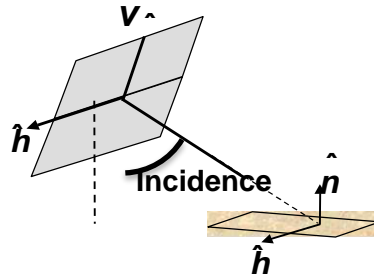
$$\epsilon_r''(\omega) = 1 - j \infty$$

# Il peut opérer dans différentes polarisations / fréquences

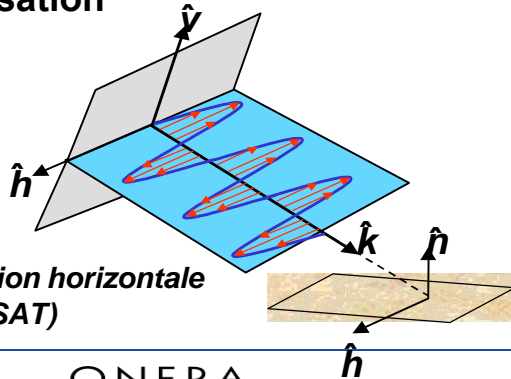
Fréquence porteuse



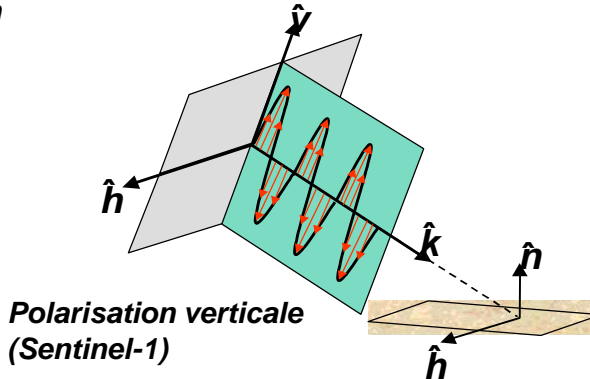
Incidence



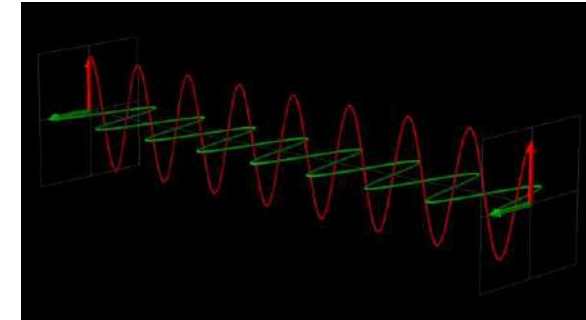
Polarisation



Polarization horizontale  
(RADARSAT)



Polarisation verticale  
(Sentinel-1)





# Conséquence : l'image dépend de nombreux paramètres

## Le capteur

## La scène

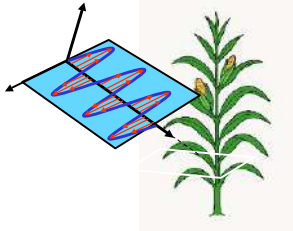
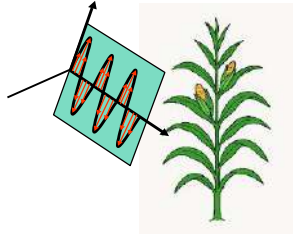
La fréquence

L'angle d'incidence

La polarisation

La géométrie

La constante diélectrique



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



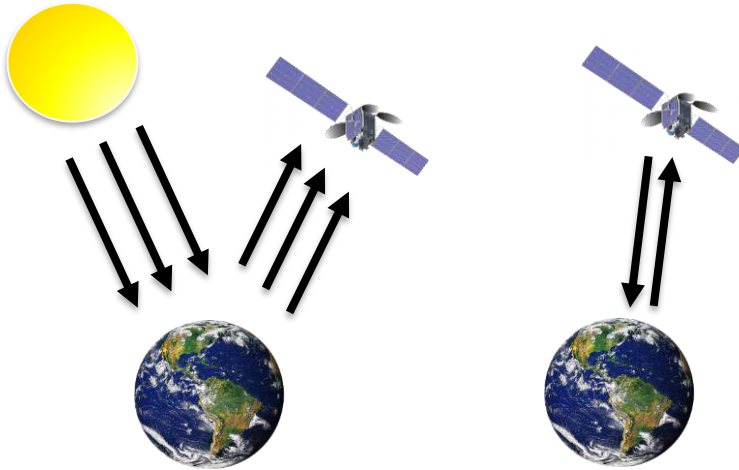
humide



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

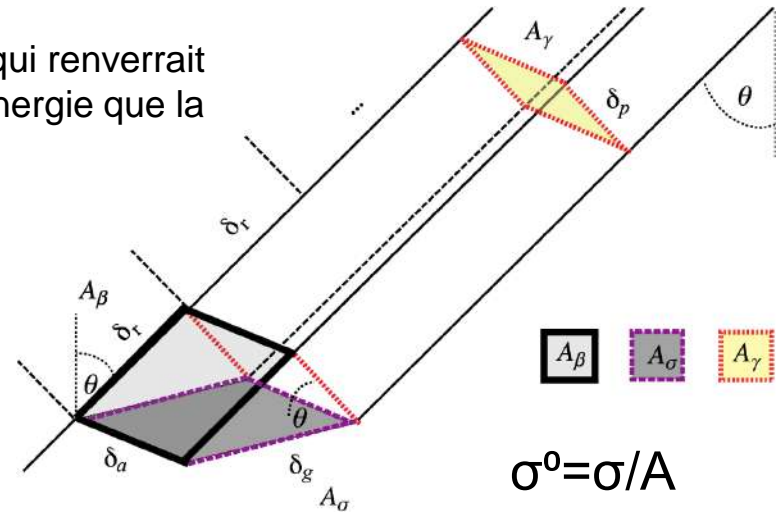
$$\sigma = \frac{(4\pi)R^2 P_r}{P_i}$$

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 :

$\beta_0$ ,  $\sigma_0$  ou  $\gamma_0$  se rapportent à la zone de référence utilisée pour normaliser la rétrodiffusion.

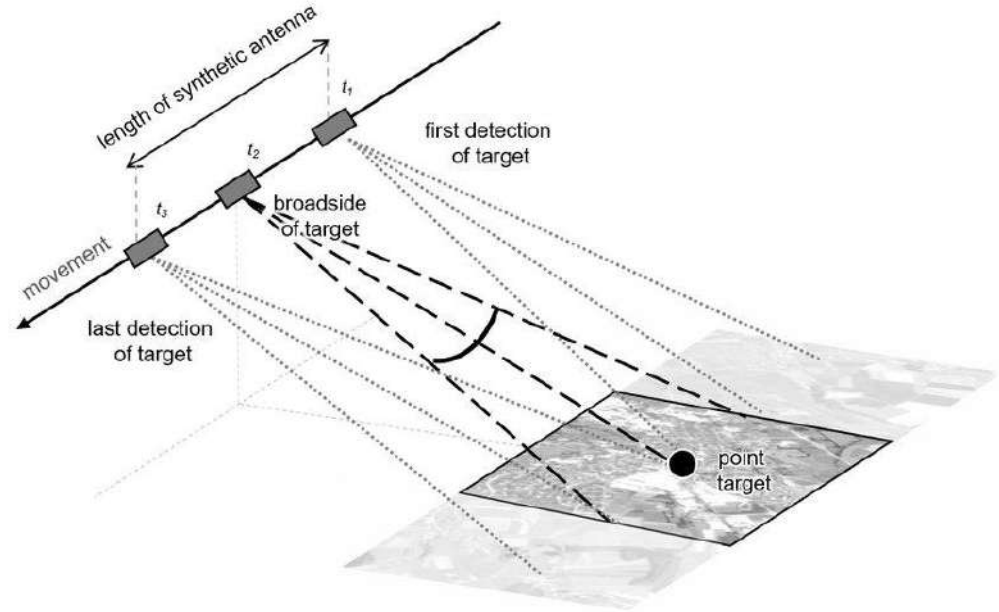


<https://medium.com/@elisecolin/what-are-the-physical-quantities-in-a-sar-image-c788a8265abd>

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

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

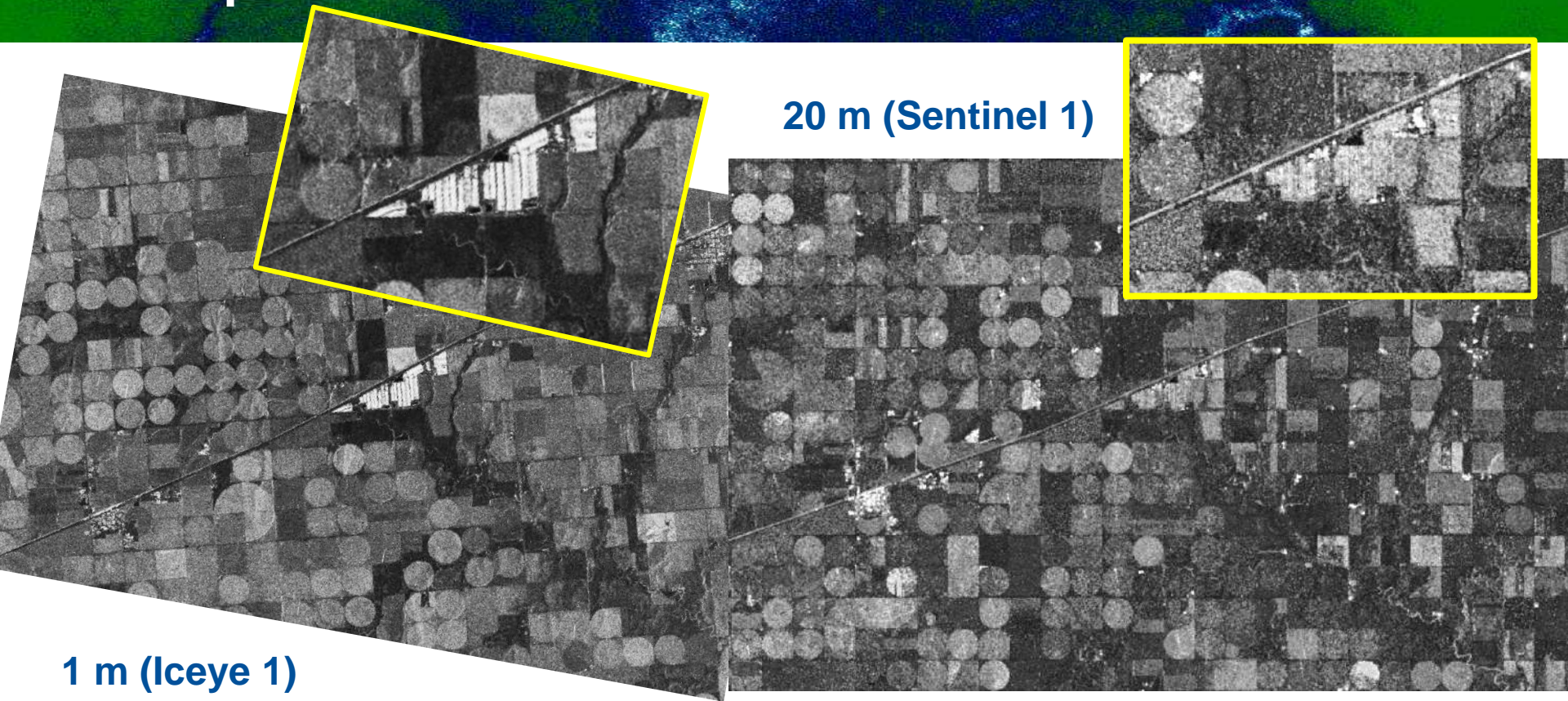
- La résolution spatiale dépend des paramètres du radar (fréquence, bande passante, longueur de la trajectoire), et non de la taille physique de l'objectif d'un appareil photo.
- Il faut du mouvement entre scène et capteur pour former une image !



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



# Conséquence : influence de la résolution



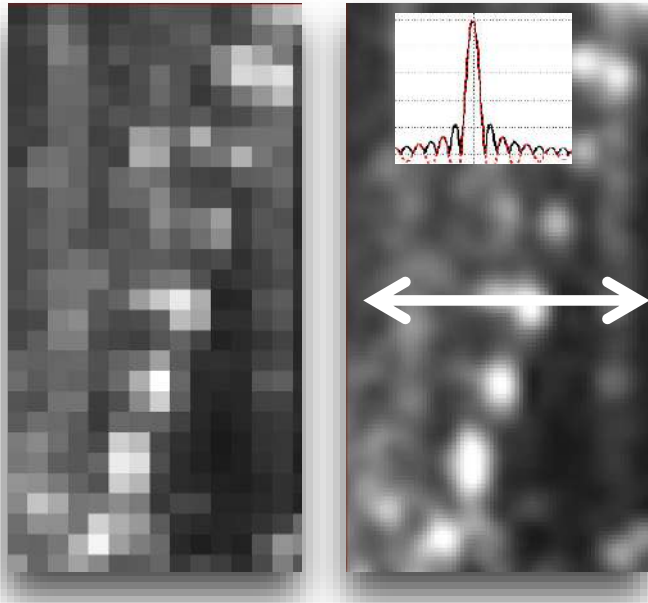
20 m (Sentinel 1)

1 m (Iceye 1)

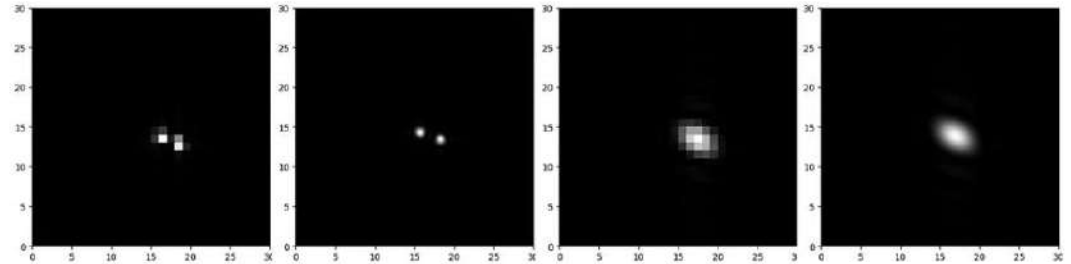
# Attention : résolution spatiale n'est pas taille de pixel



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

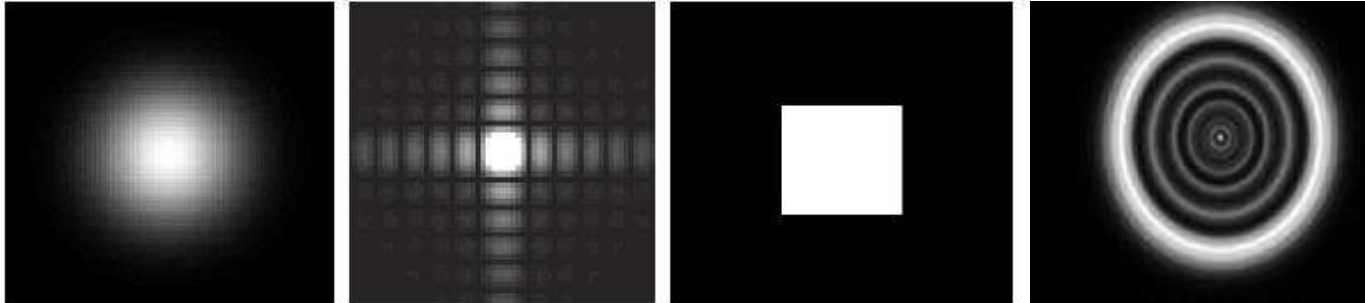
Résolution 3m  
Taille pixel 1 m

Résolution 3m  
Taille pixel 1/16 m



# Autre conséquence de l'algorithme SAR

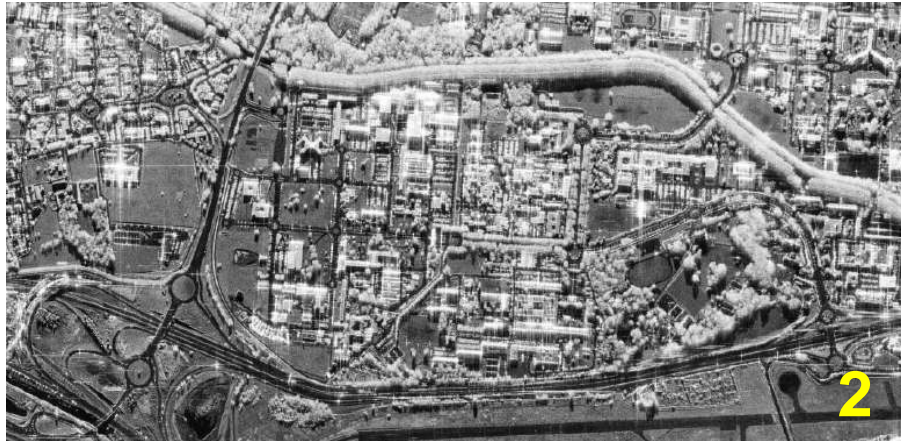
La réponse impulsionnelle (le point parfait) du capteur n'est pas une tache classique...



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



# Savez vous reconnaître une image radar ?



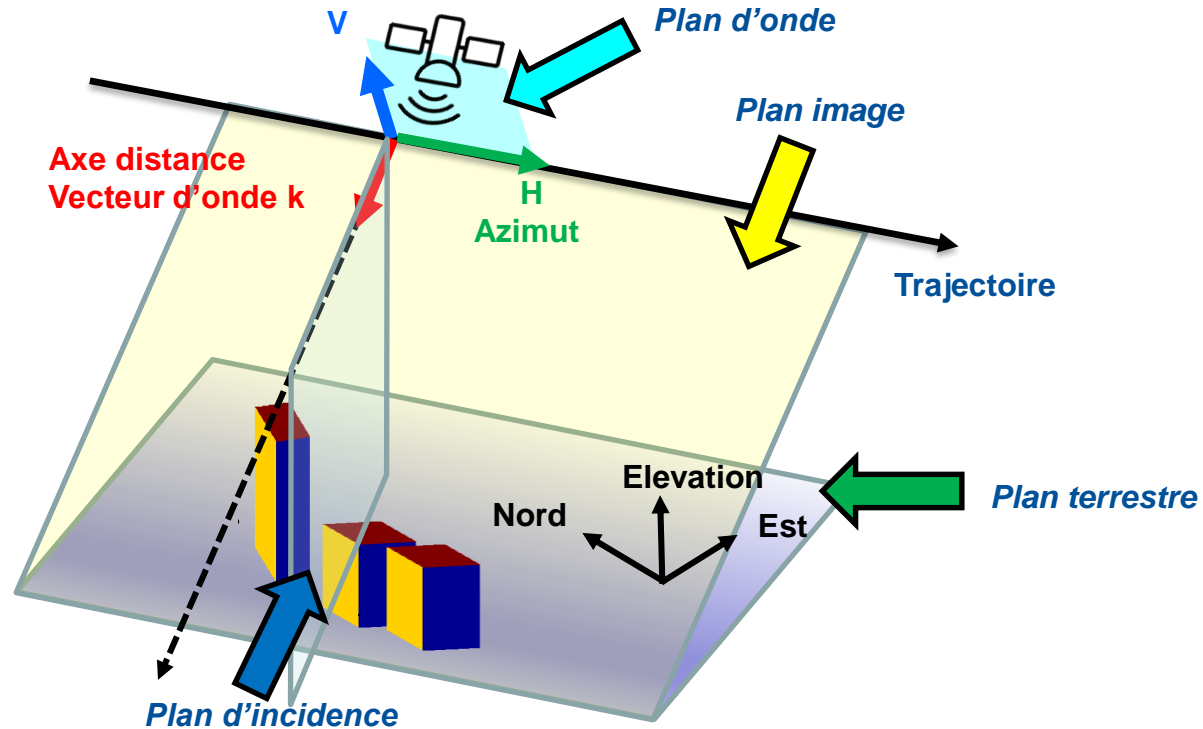


# 4 - La géométrie du radar est particulière

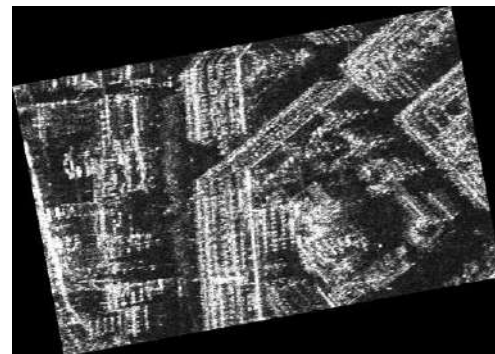
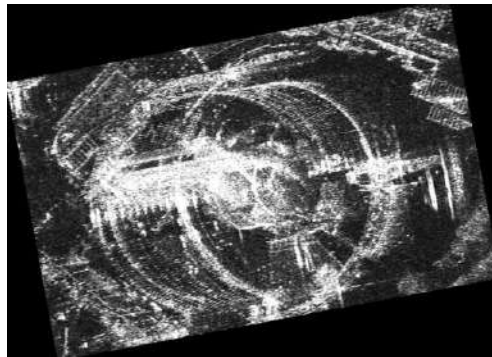
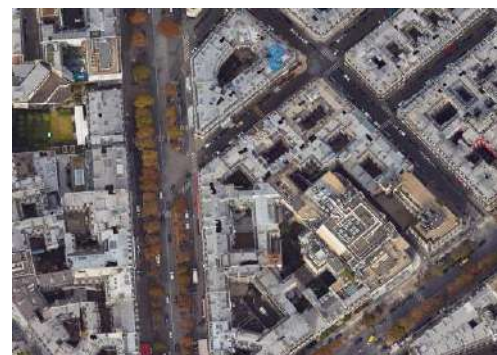
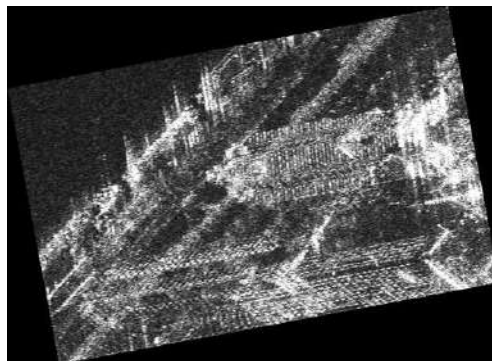
La géométrie des images radar est inhabituelle :

- 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



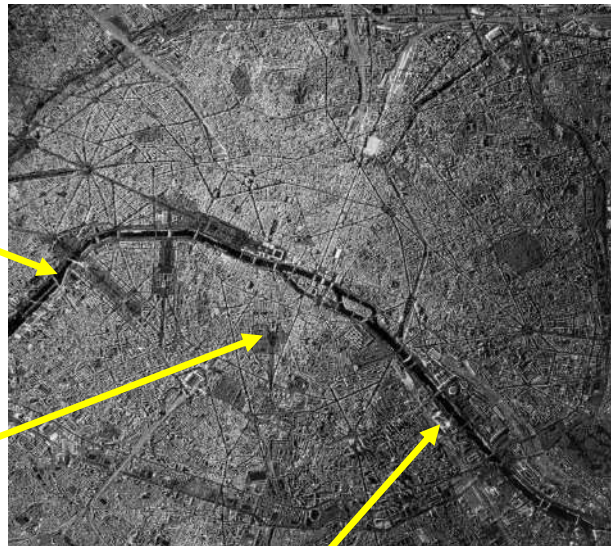
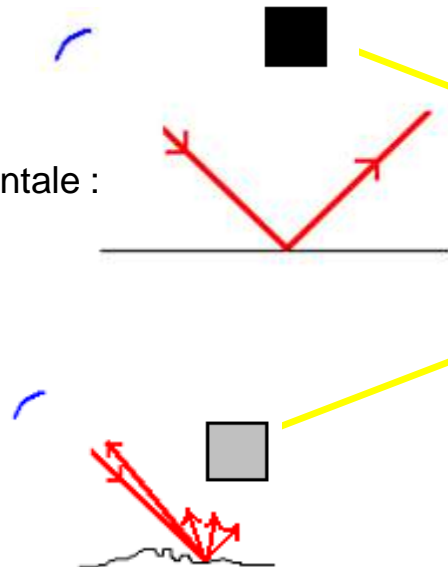


# La géométrie du radar est particulière...

Autre conséquence : une radiométrie  
typique du radar :

Surface plane horizontale :  
sombre (spéculaire)

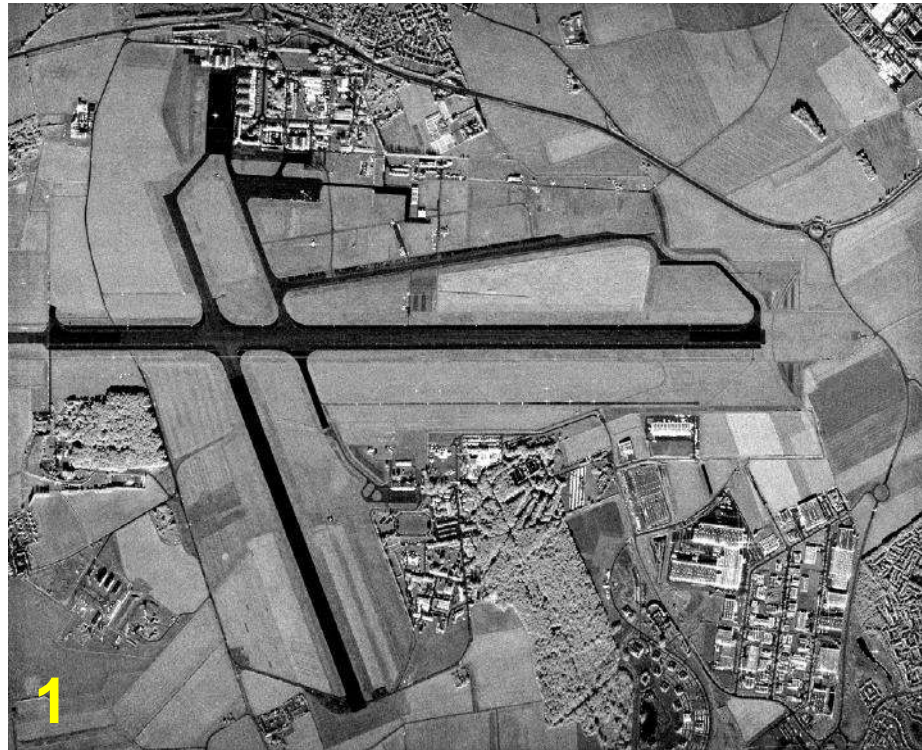
diffusion



Des points brillants



# Savez vous reconnaître une image radar ?





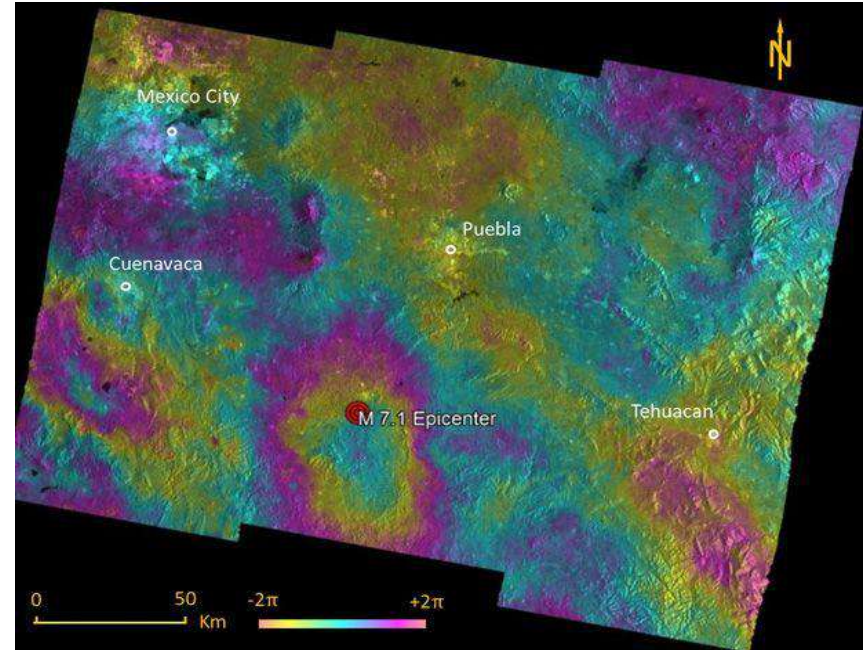
## 5 - C'est un capteur cohérent

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).

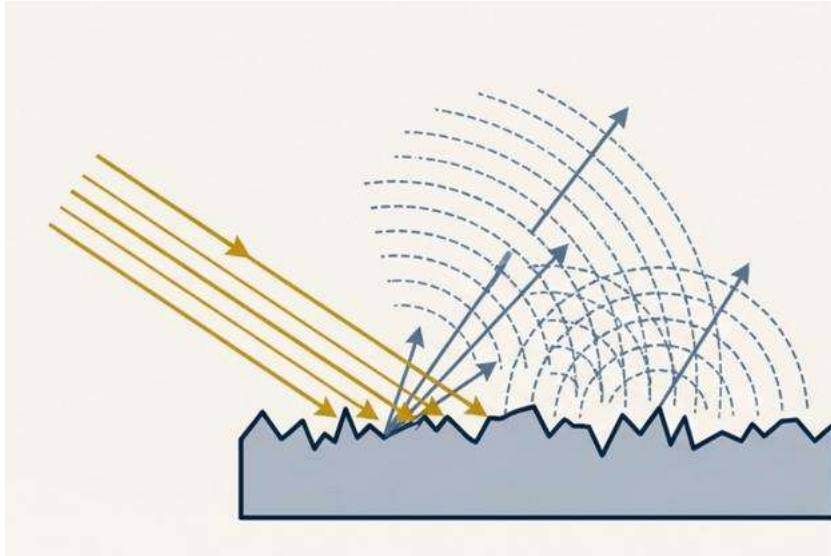




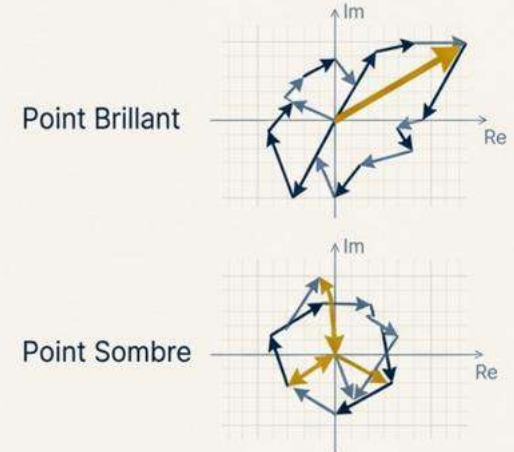
# Une conséquence : le speckle

En éclairage  
cohérent :

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



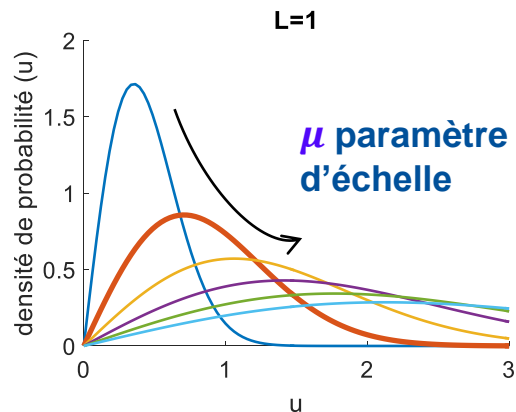
Marche aléatoire de phaseurs



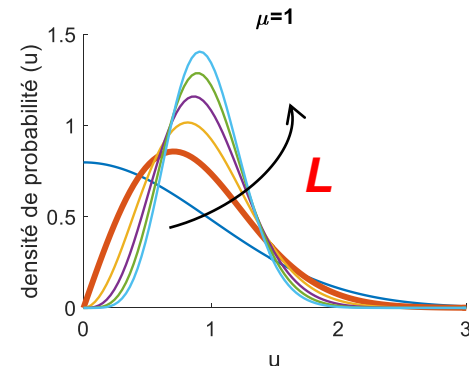
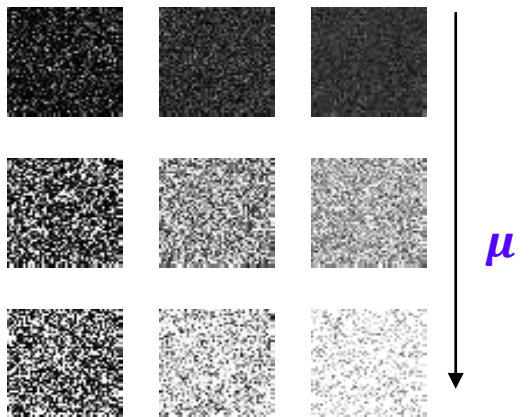
# Des statistiques particulières

Amplitude de speckle: Rayleigh Nakagami ( $\mu$ ,  $L$ )

Intensité de speckle : Gamma( $\mu$ ,  $L$ )



$L$  paramètre de forme

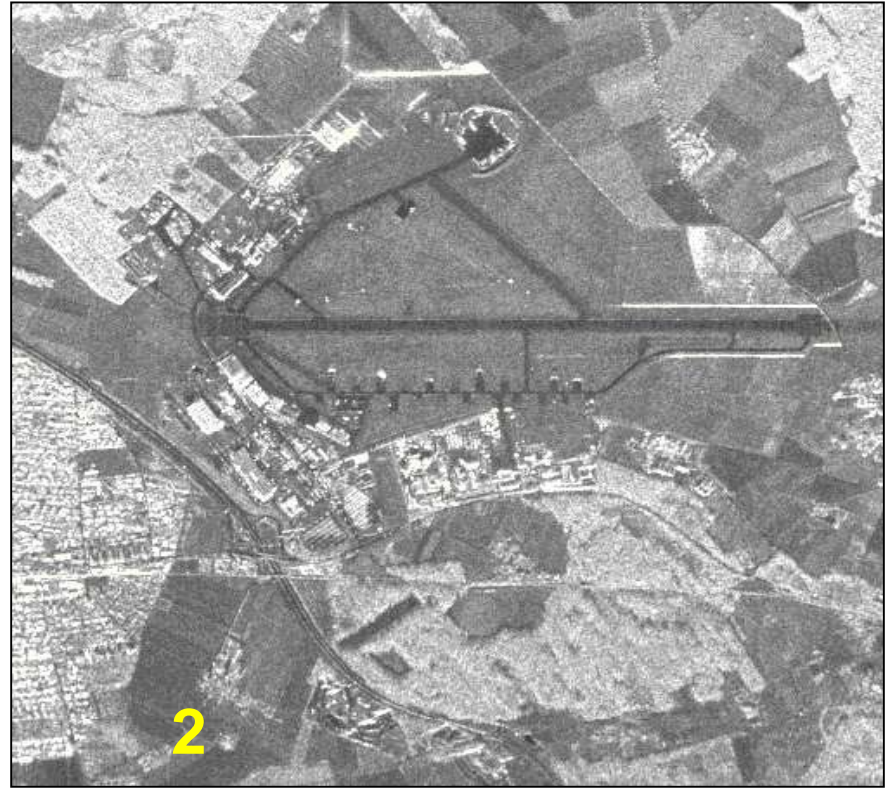


$L$  est appelé ENL ou  
« Equivalent Number of Looks »

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

---



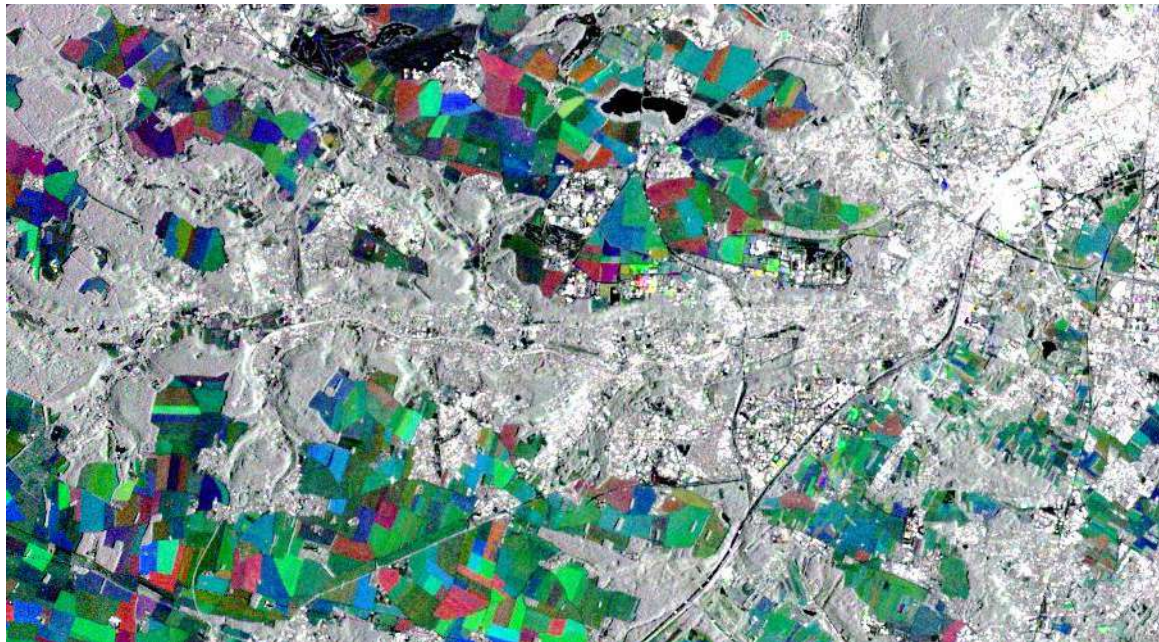
# Les séries temporelles : atout majeur du radar

Echantillonnage régulier (pas de problème de nuage)

Stabilité du signal : capteur actif



# Comment visualiser les changements ?



Généralisation à N dates ?

On va raisonner dans un autre espace colorimétrique : HSV



# L'espace HSV

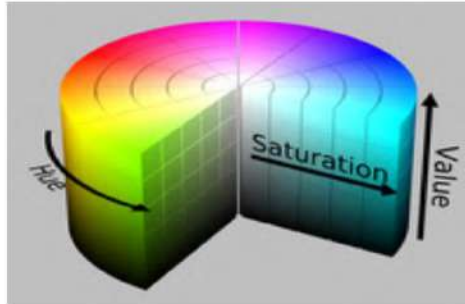


Espace RGB : R, G, B



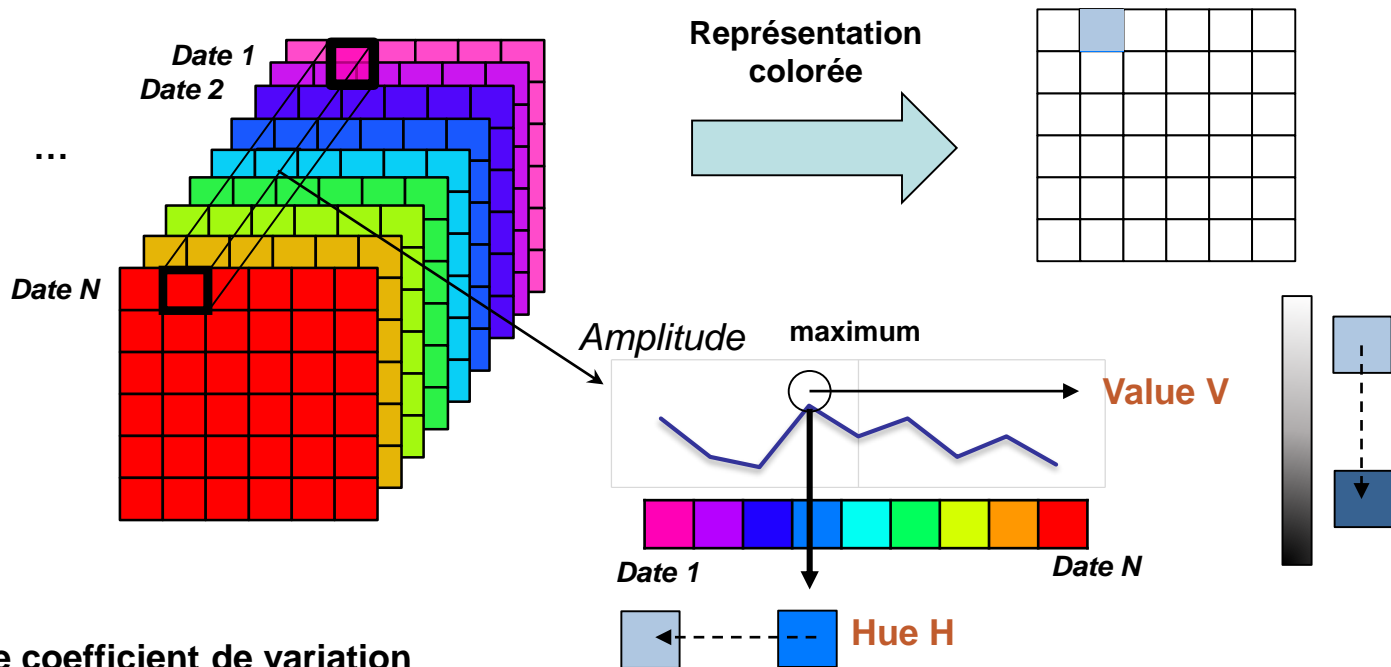
La conversion est possible

Espace : H, S, V



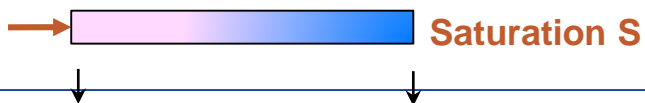
HSV Cylinder





**Le coefficient de variation**

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



# 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

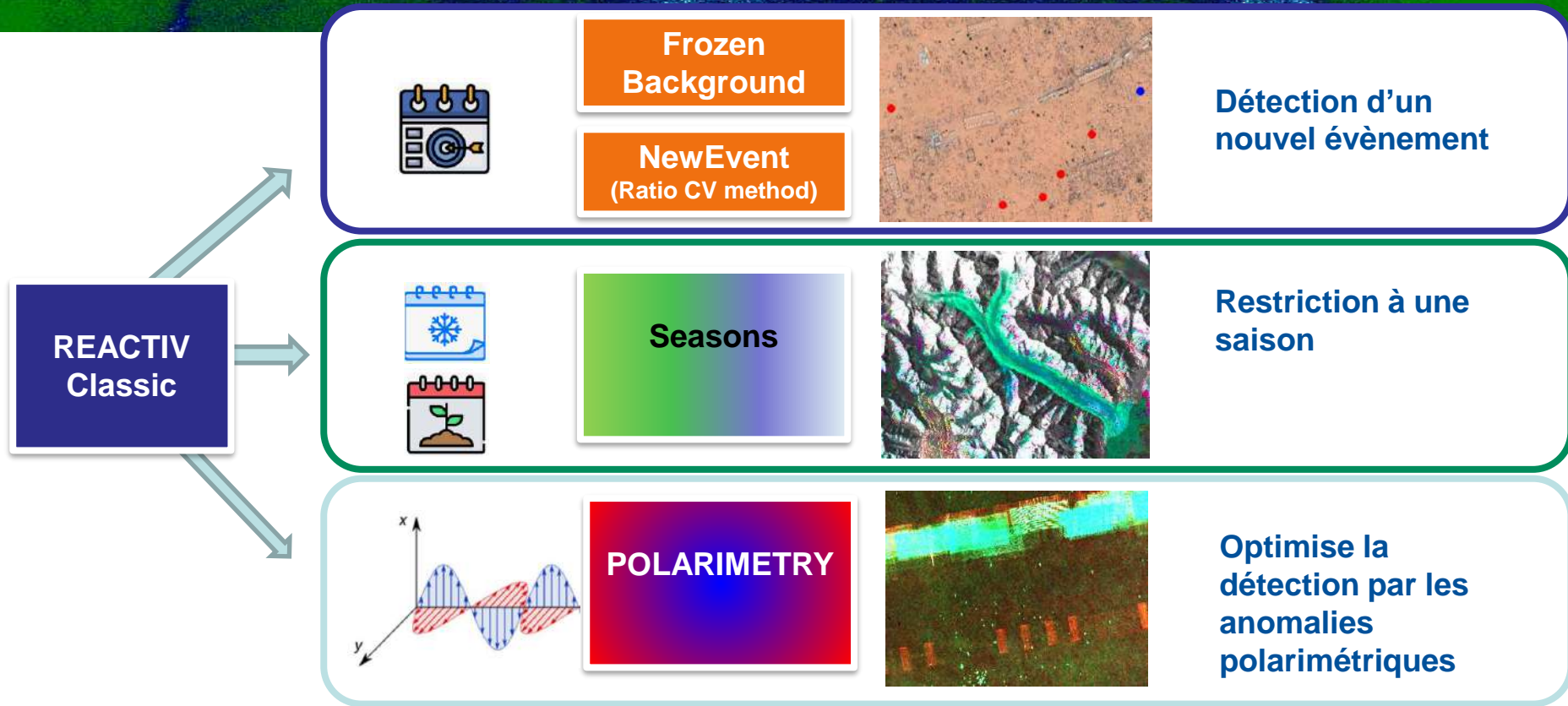


« Permanent  
Scatterer »

Rice Law



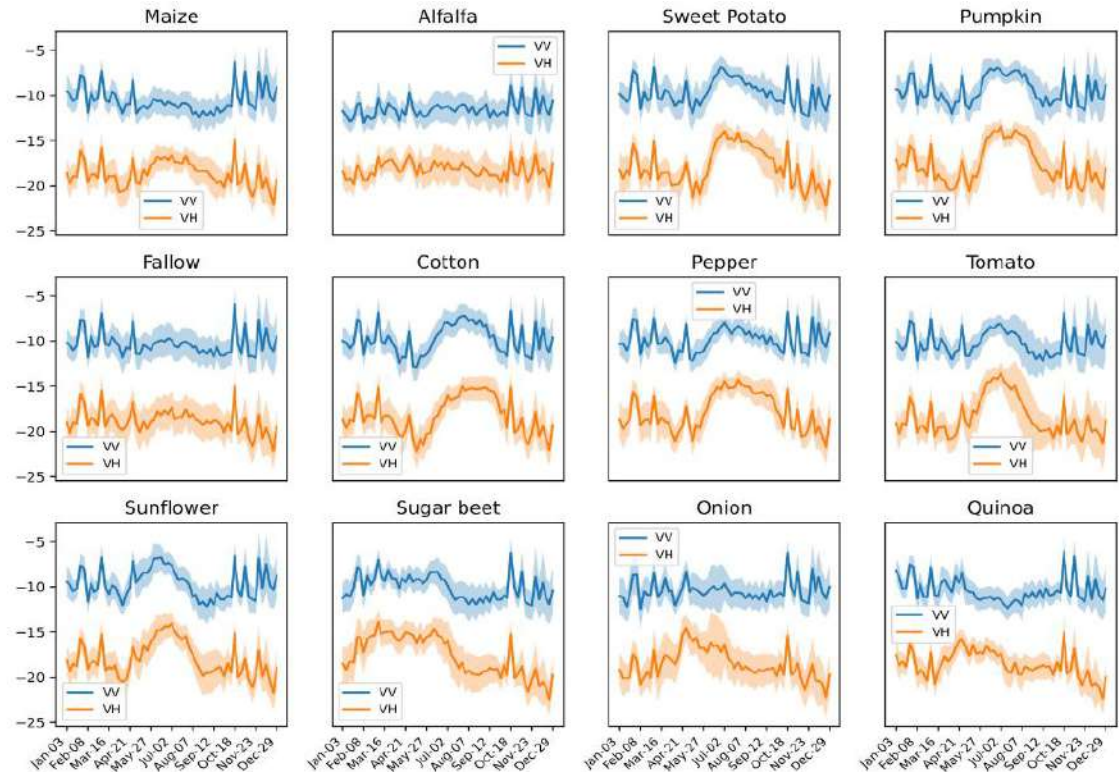
# Extensions récentes



# Autoencodage

Aller plus loin

Di Martino et al.

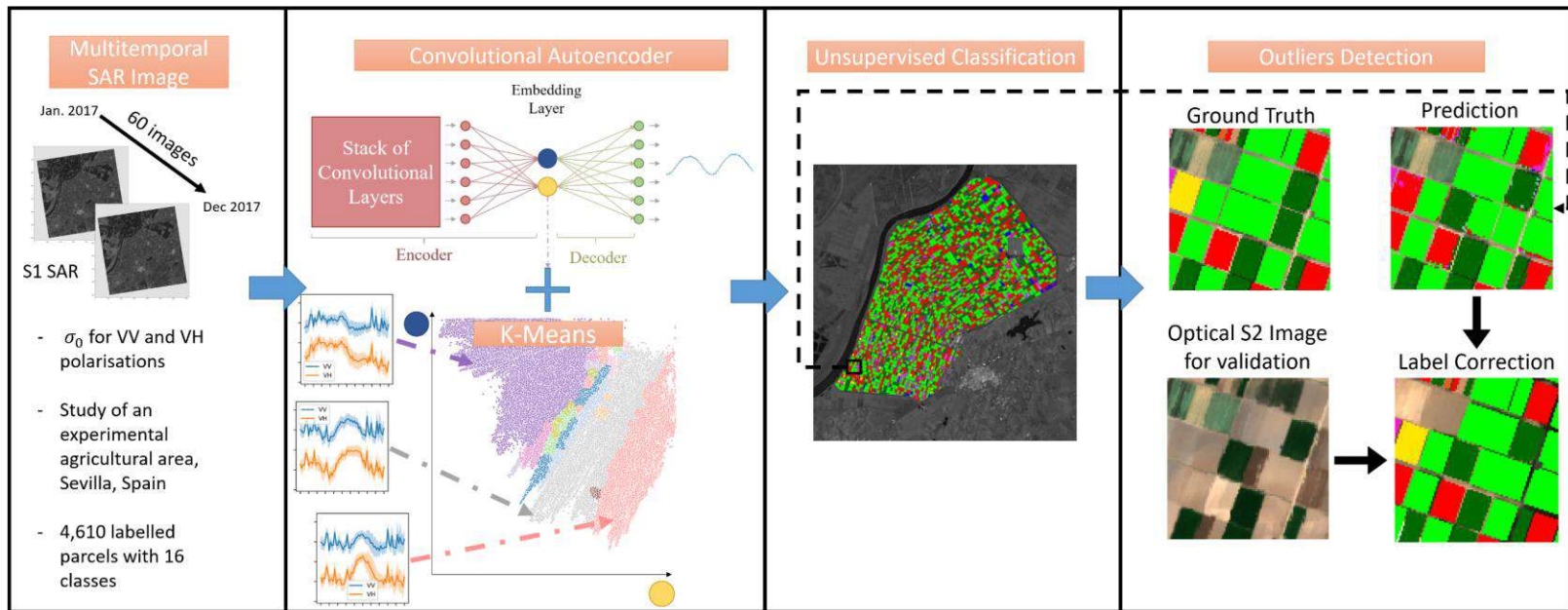




# Autoencodage : application à la correction de labels

**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.



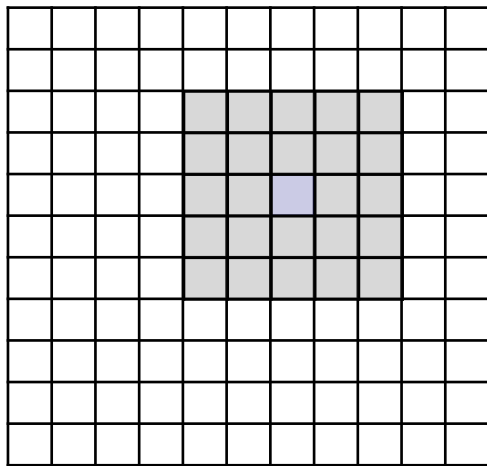
# Une revisite de la polarimétrie : vers l'estimation temporelle

En polarimétrie, on a

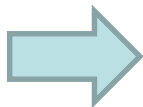
- Des paramètres du premier ordre :  $|HH|$ ,  $|VV|$ ,  $|HV|$ ,  $|HH-VV|$

...

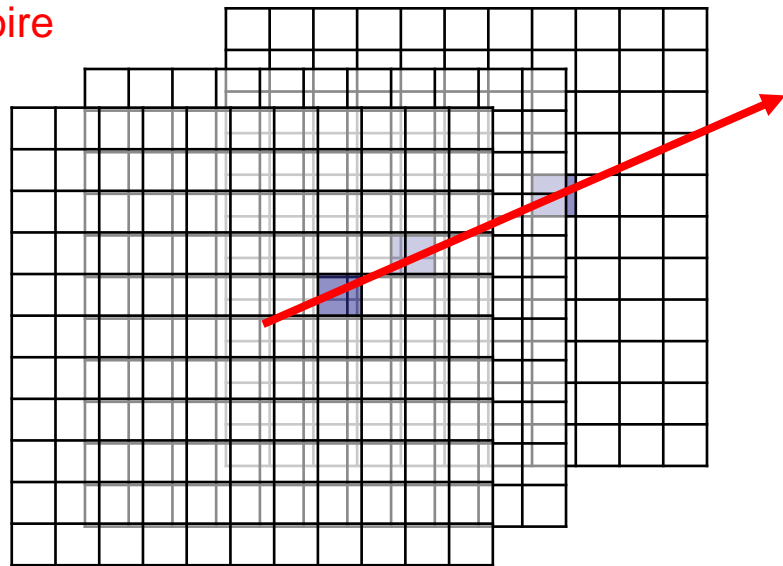
- Des paramètres du second ordre : coherence,  $\langle HH \ HV^* \rangle$ , entropie polarimétrique, ....pour mesurer le degré aléatoire



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



Passer d'une estimation  
spatiale  
A une estimation  
temporelle





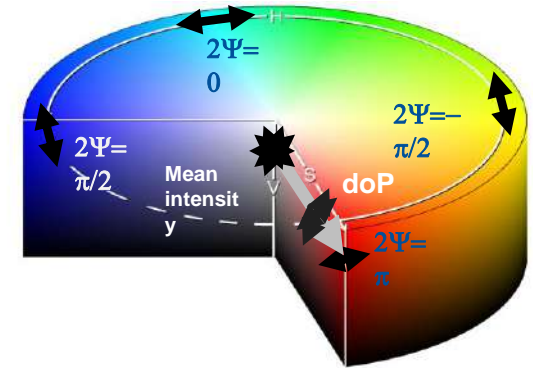
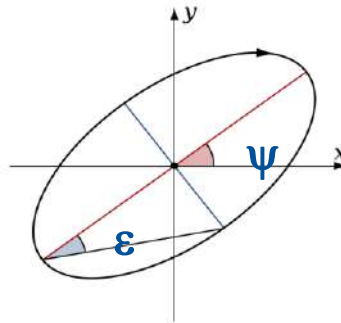
# Ce qu'on peut faire avec Sentinel-1

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

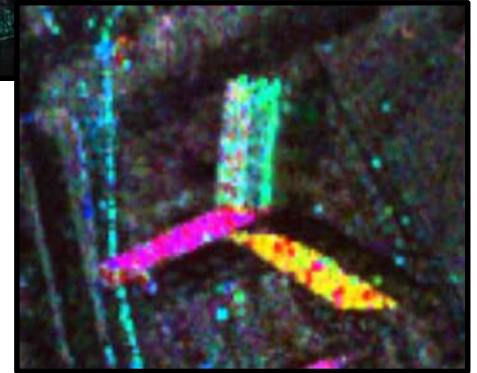
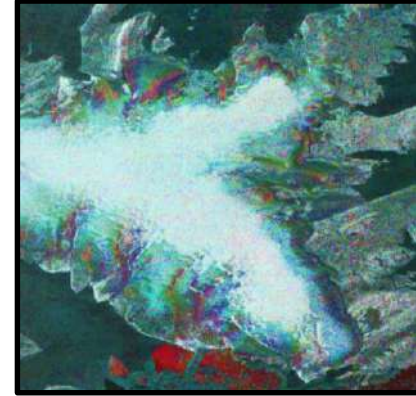
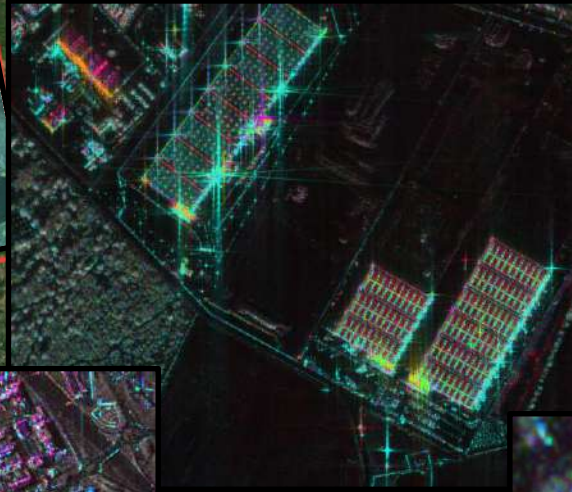
Décrire l'ellipse de polarisation pour une émission Verticale fixée

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

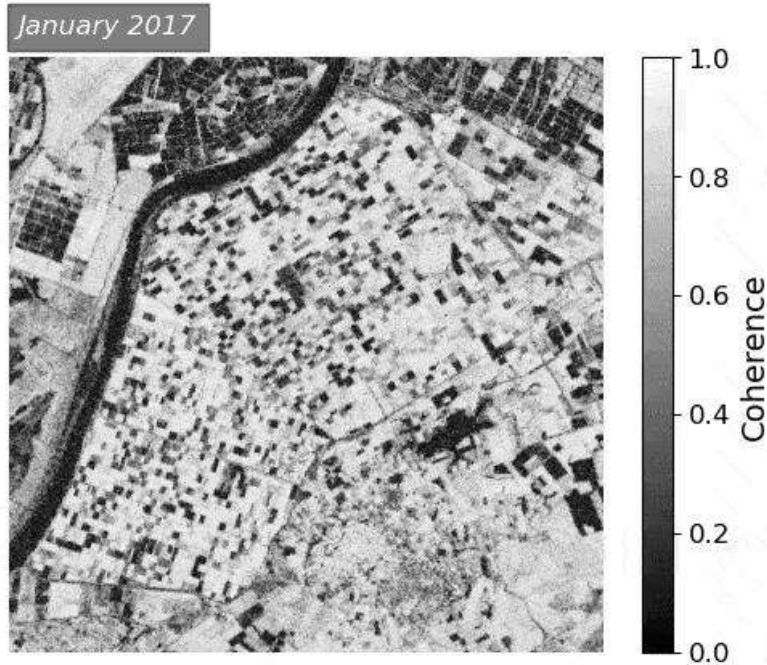


# Angles d'orientation polarimétriques





# Ce qu'on peut faire avec les phases temporelles



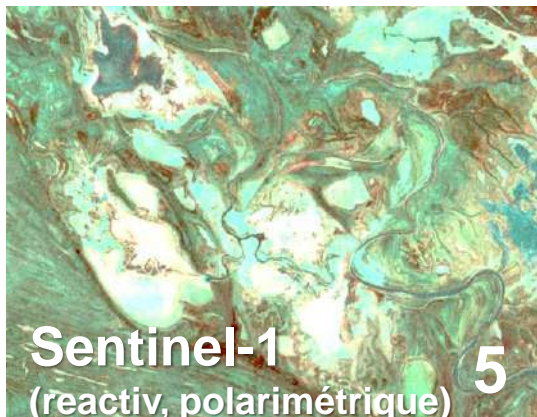
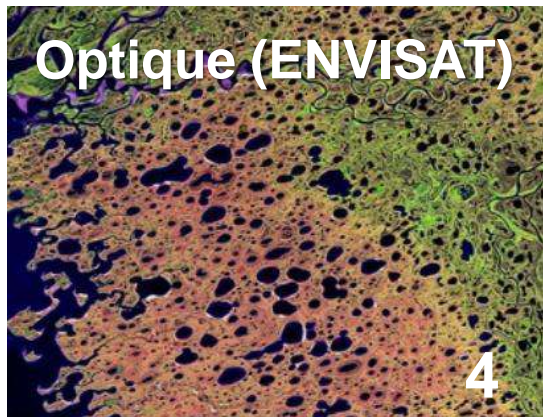
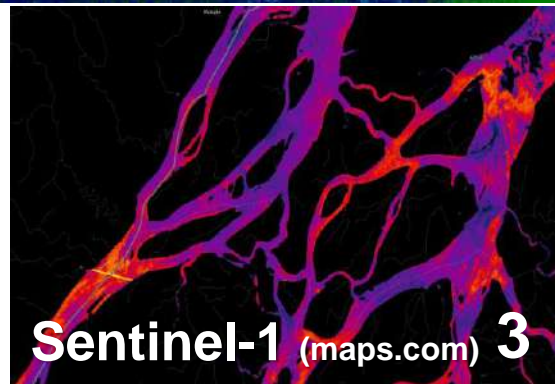
Série chronologique annuelle de données provenant de paires d'images Sentinel-1 combinées de 2017 d'une zone agricole à Séville, en Espagne.

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**

# Savez vous reconnaître une image de la terre ?

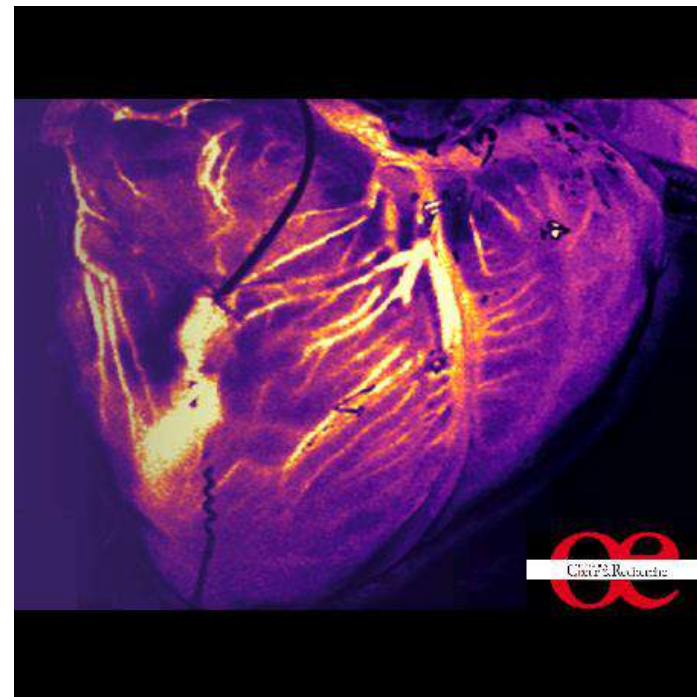




# Comment on passe de l'observation terrestre au médical ?

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

[https://youtu.be/6\\_rR3DDTGjU?si=mu3aEocE5bJl-8-e](https://youtu.be/6_rR3DDTGjU?si=mu3aEocE5bJl-8-e)



# Pour Noël

