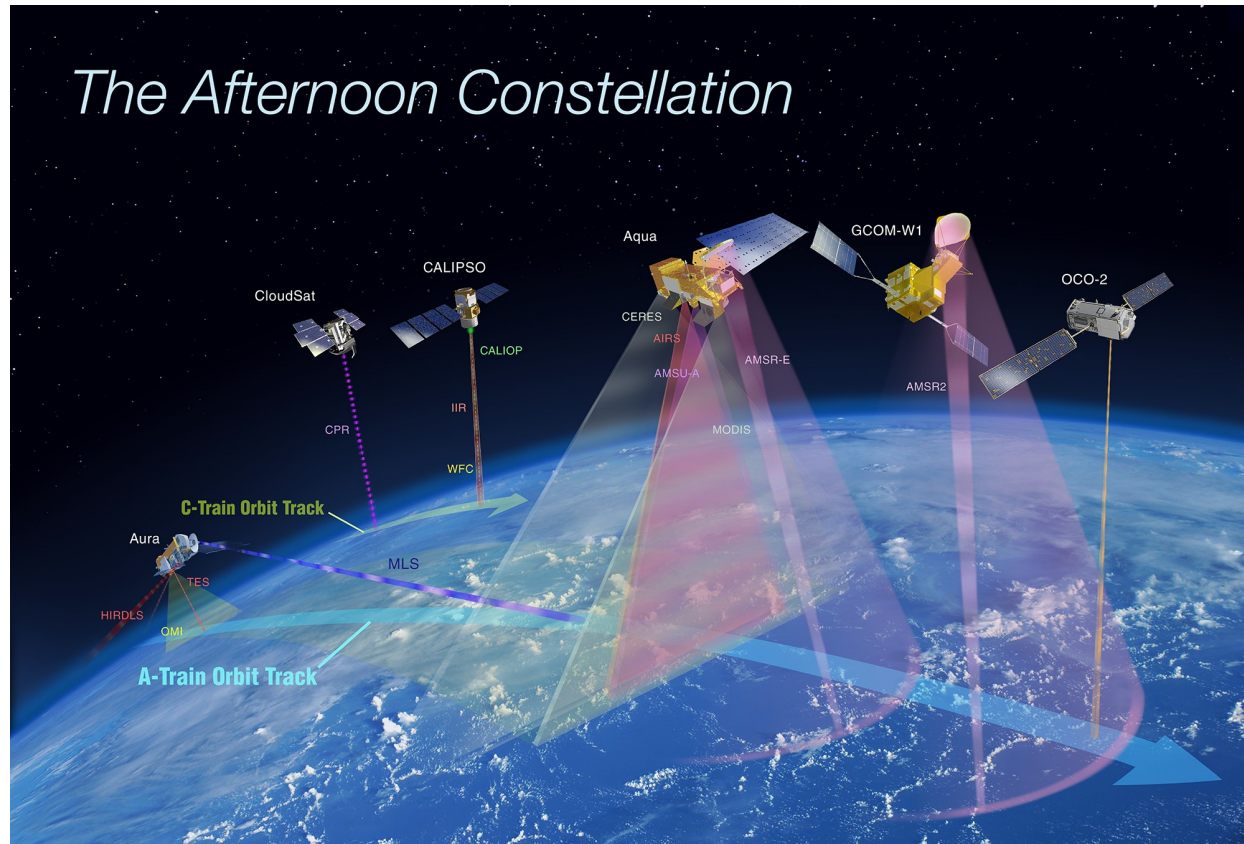


Plan du chapitre :

1. Principes de la télédétection active
2. Télédétection active dans le domaine des micro-ondes : le radar
3. Télédétection active dans le domaine visible et IR : le lidar



<https://atrain.nasa.gov/>

Système actif émet rayonnement et mesure rayonnement réfléchi par cible :

- Différentes plateformes : sol, avion, satellite.
- Différentes caractéristiques du signal émis (fréquence, polarisation...).
- Différentes applications : météorologiques, altimétriques, surveillance...

Système actif permet de mesurer les caractéristiques du signal reçu au capteur en fonction du temps. Vitesse de propagation du signal connue
→ mesure de la distance entre capteur et cible.

$$d = \frac{ct}{2}$$

Système conventionnel : mesure de l'amplitude du signal reçu.

Système Doppler (ou cohérent): mesure du décalage en fréquence du signal
→ estimation de la vitesse radiale de la cible (effet Doppler).

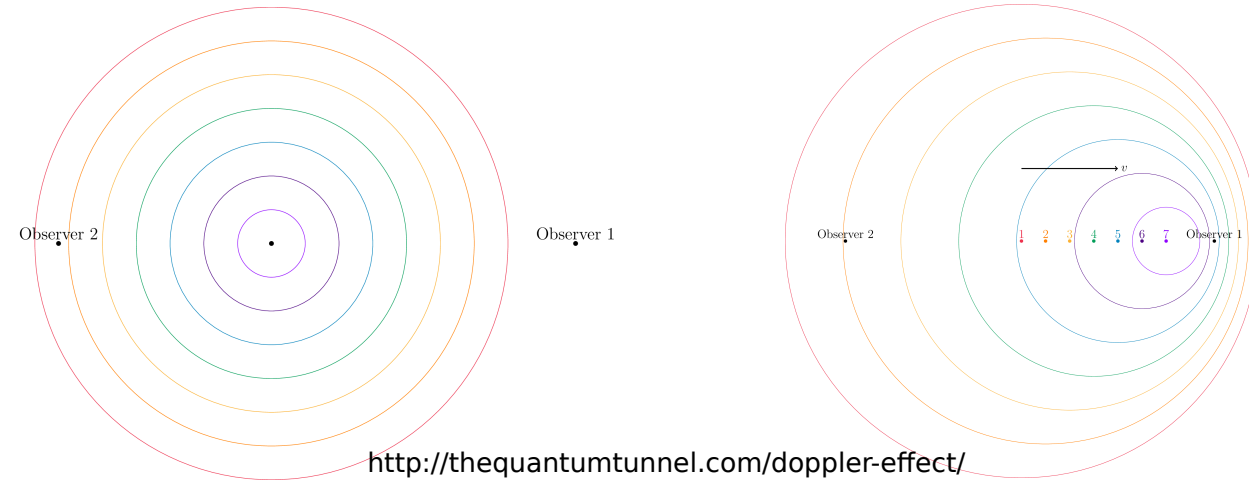
source immobile

source mobile

Décalage en fréquence :

$$\Delta f = \frac{2v_r}{c} f_0$$

v_r vitesse relative objet-observateur
(>0 quand obs et objet se rap.)
 c vitesse de l'onde
 f_0 fréquence de l'onde



Résolution radiale (transversale)

Train d'onde émis pendant durée τ

→ résolution radiale à incidence normale

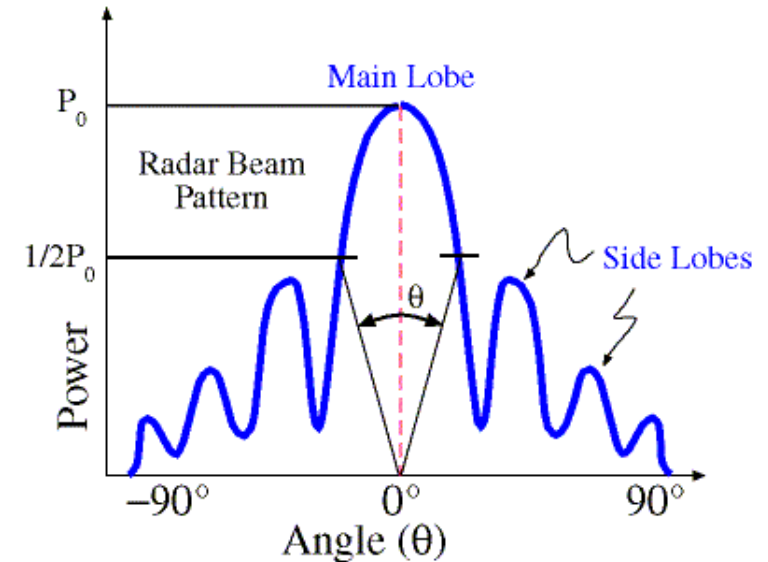
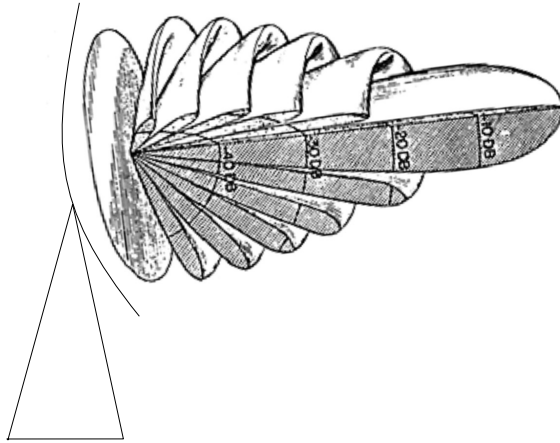
$$dr = \frac{c\tau}{2}$$

→ résolution transversale au sol, inclinaison α

$$dr_t = \frac{c\tau}{2 \cos \alpha}$$

Résolution angulaire (longitudinale) d'un capteur à ouverture réelle

Influence de l'antenne : diagramme de rayonnement



https://apollo.nvu.vsc.edu/classes/remote/lecture_notes/radar/conventional/side_lobes.html

$$\text{dB} = 10 \times \log_{10} () = 10 \times \ln() / \ln(10)$$

Ouverture à 3 dB du faisceau ($\theta_{3\text{dB}}$) : angle pour lequel puissance est la moitié de celle dans l'axe de l'antenne (~70-90% énergie).

Lobes secondaires : “pics” secondaires de puissance.

Diagramme de rayonnement d'une antenne

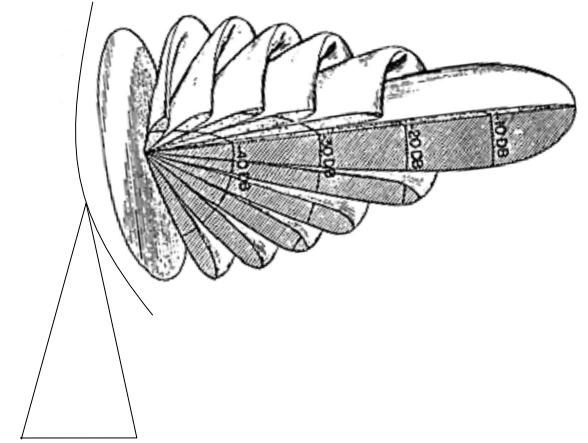


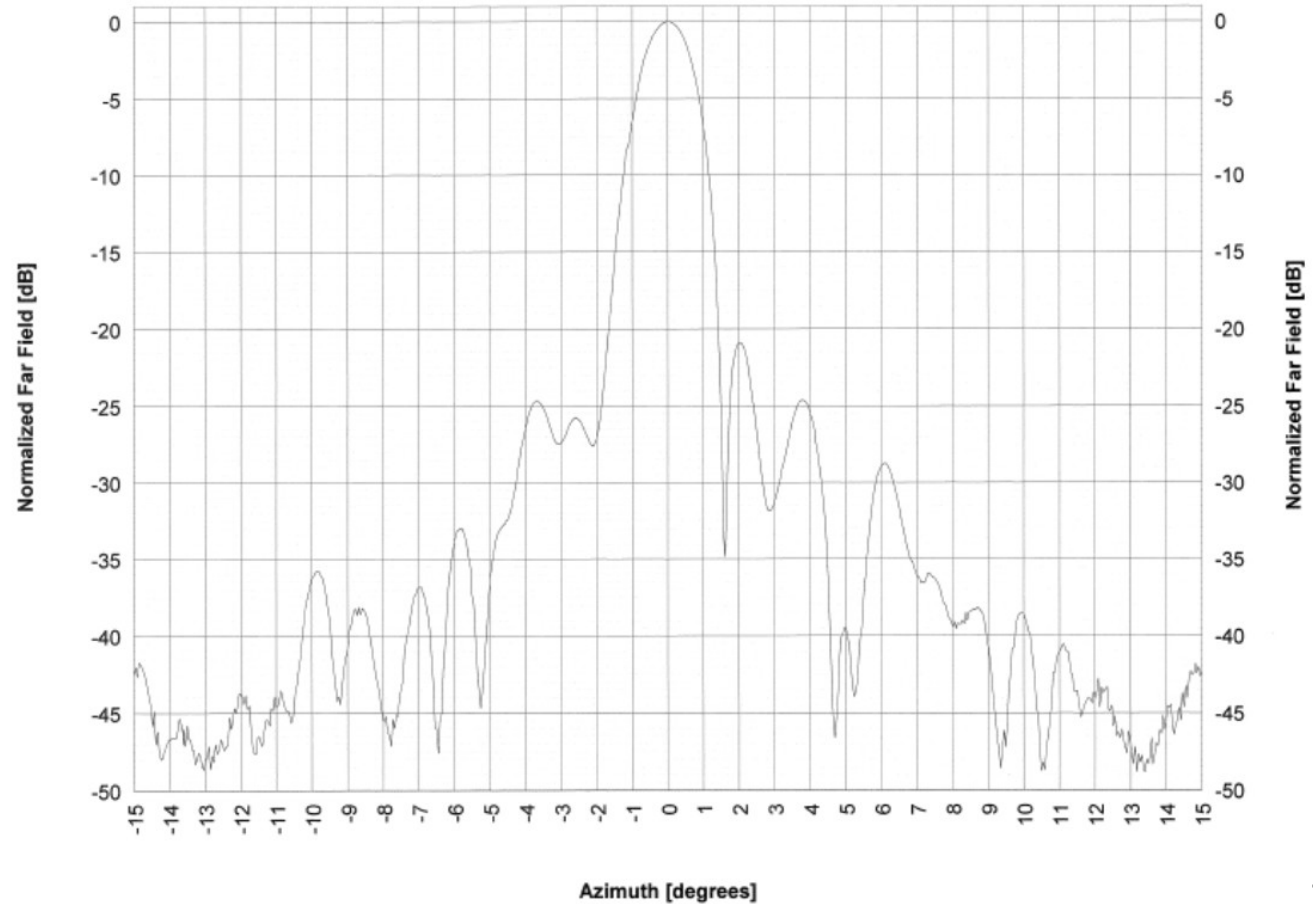
Diagramme de rayonnement
de l'antenne du radar du LTE



V port E Plane

9.41 GHZ

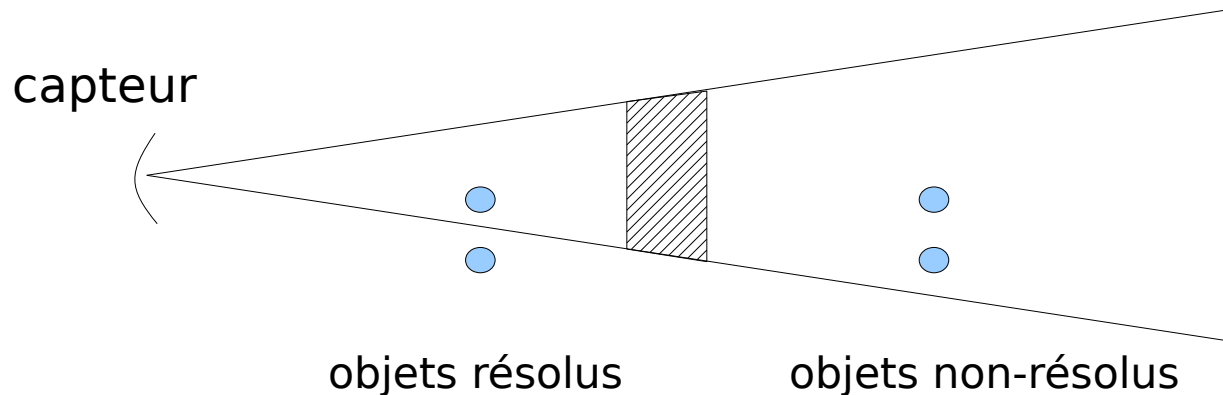
Chart #3



Résolution angulaire d'un capteur à ouverture réelle

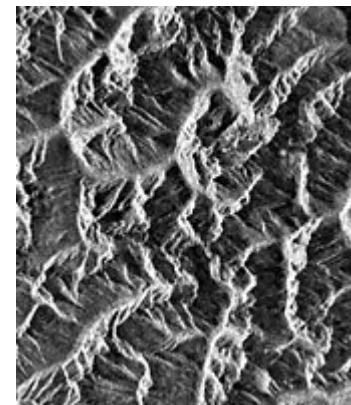
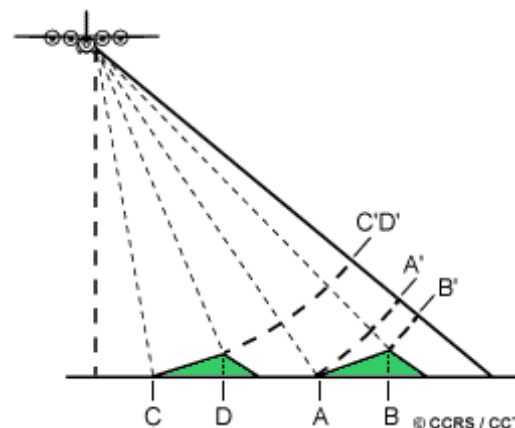
Émission : on montre que $\theta_{3dB} \simeq \frac{\lambda}{L}$ L = taille de l'antenne

À une distance d du capteur $r_a = \theta_{3dB} d \simeq \frac{\lambda d}{L}$

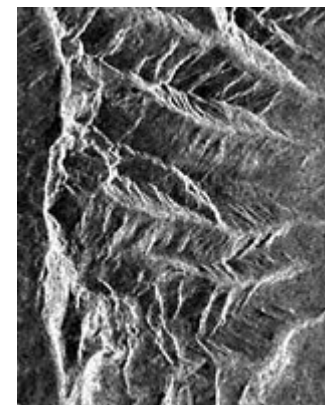
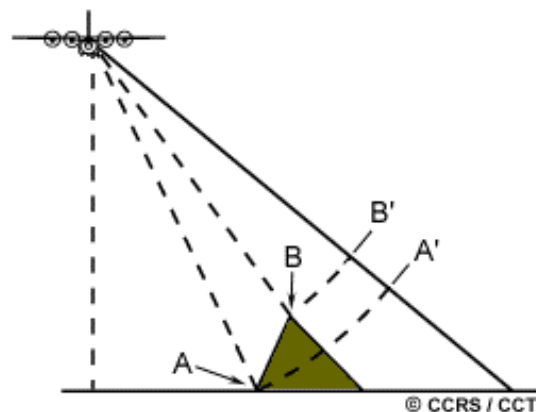


Erreurs géométriques dans l'imagerie des systèmes actifs

Repliement 2 (foreshortening) :
pente apparaît “comprimée”.

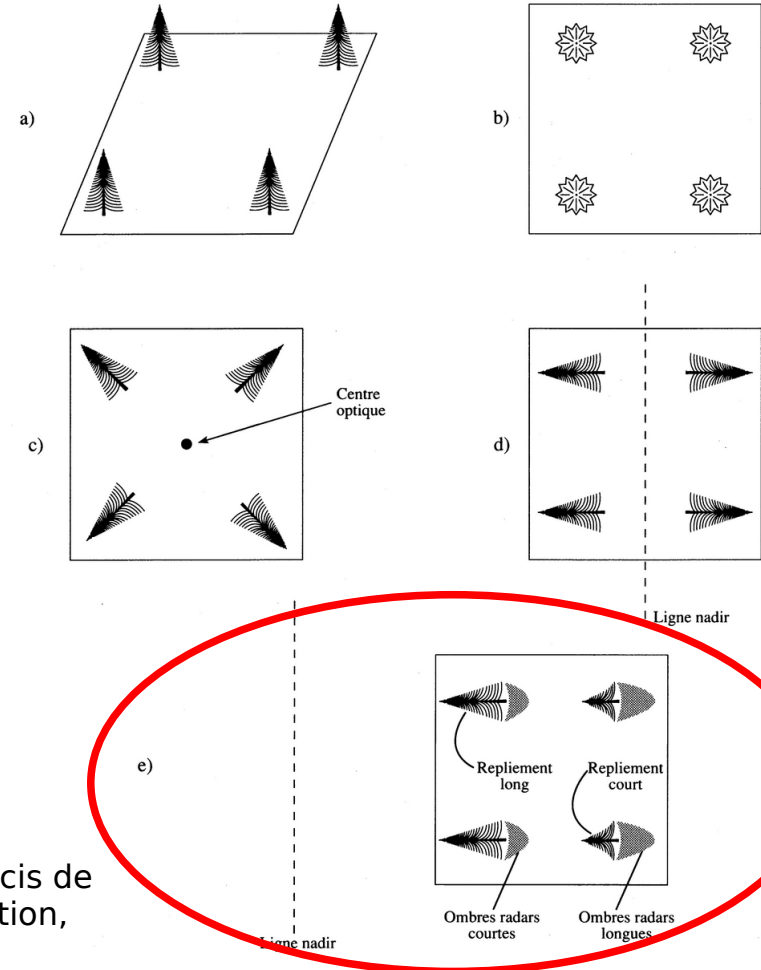
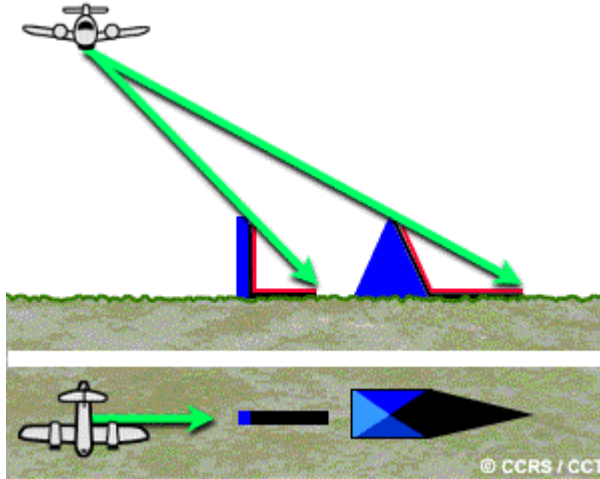


Repliement 1 (layover) :
points + haut = distance + courte.



<https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriels-sur-la-teledetection/teledetection-par-hyperfrequence/distorsion-des-images-radar/9326>

Ombre : si pente suffisamment raide (/ angle incidence) → ombre du sommet.



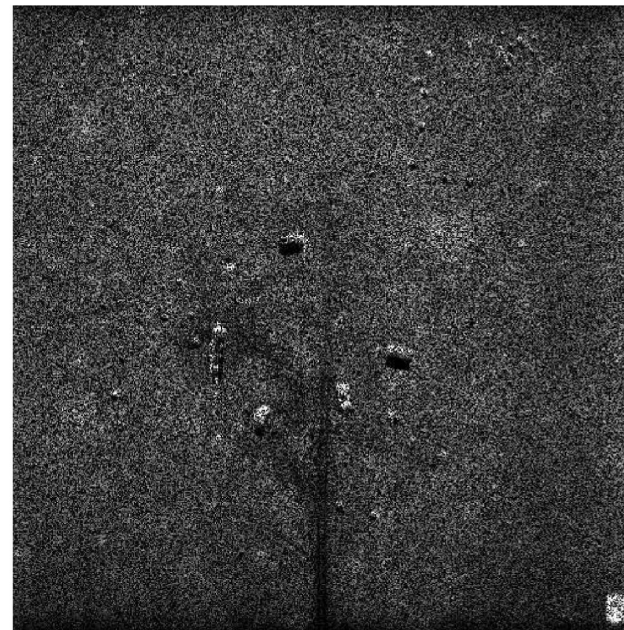
Bonn, Précis de
télédétection,
vol.1

Erreurs radiométriques dans l'imagerie des systèmes actifs

Chatolement (speckle) : rugosité surface → interférences entre différents rayonnements réfléchis par différents points à la surface.



(a)



(b)

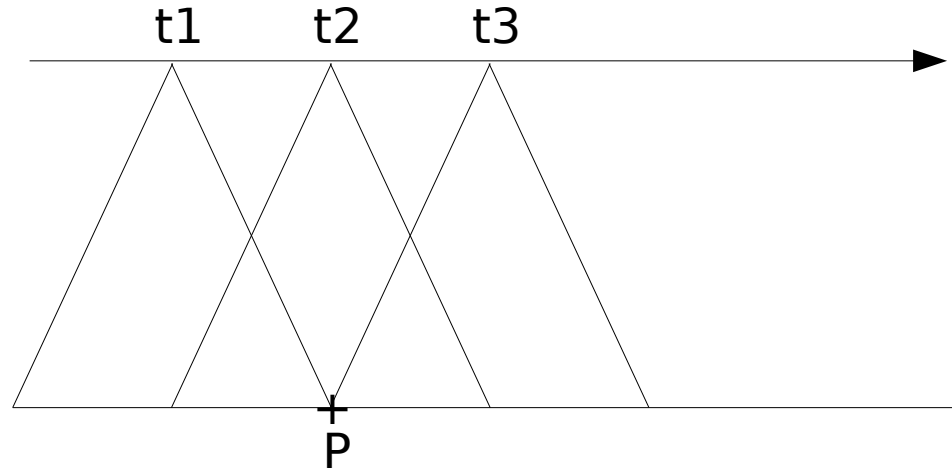
Questions

1. Quelle est la limite de résolution radiale au sol d'un système radar à antenne réelle dont l'impulsion est de $0.05 \mu\text{s}$ et l'angle d'inclinaison (ou dépression) de 60° ? Que devient cette limite pour un angle d'inclinaison de 30° ?
2. Quelle est la limite de résolution angulaire d'un radar à antenne réelle de 10 m en bande C (5 cm long. d'onde) placé sur un satellite orbitant à une altitude de 800 km ?
3. Pourquoi sur les images radar les sommets des montagnes semblent-ils inclinés vers le capteur ?

Capteur à antenne synthétique (ouverture synthétique)
(souvent radar → **S**ynthetic **A**perture **R**adar ou SAR en anglais)

Antenne réelle avec résolution angulaire limitée + déplacement de la plateforme

→ un même point P est illuminé plusieurs fois.



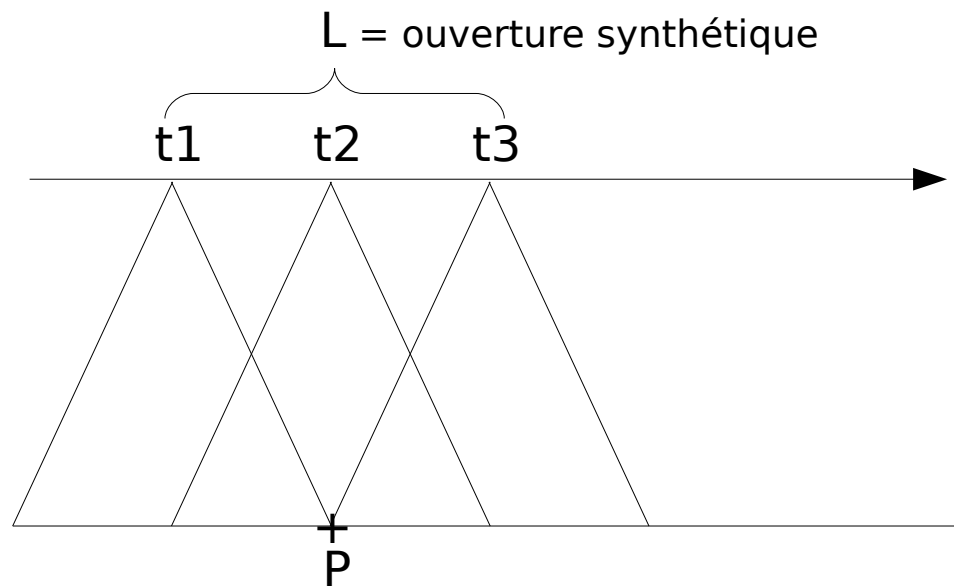
Capteur à antenne synthétique (ouverture synthétique)

(souvent radar → **S**ynthetic **A**perture **R**adar ou SAR en anglais)

Fréquence signal réfléchi par P = $f(\text{vitesse} / \text{à la plateforme})$ - effet Doppler.

- Plateforme est mobile → cette fréquence change.
- Le décalage en fréquence peut être lié à la résolution azimuthale.

→ antenne synthétique >> antenne réelle.



Résolution azimuthale d'un capteur à antenne synthétique

$$r_a = \frac{l}{2}$$

l est la taille de l'antenne réelle.

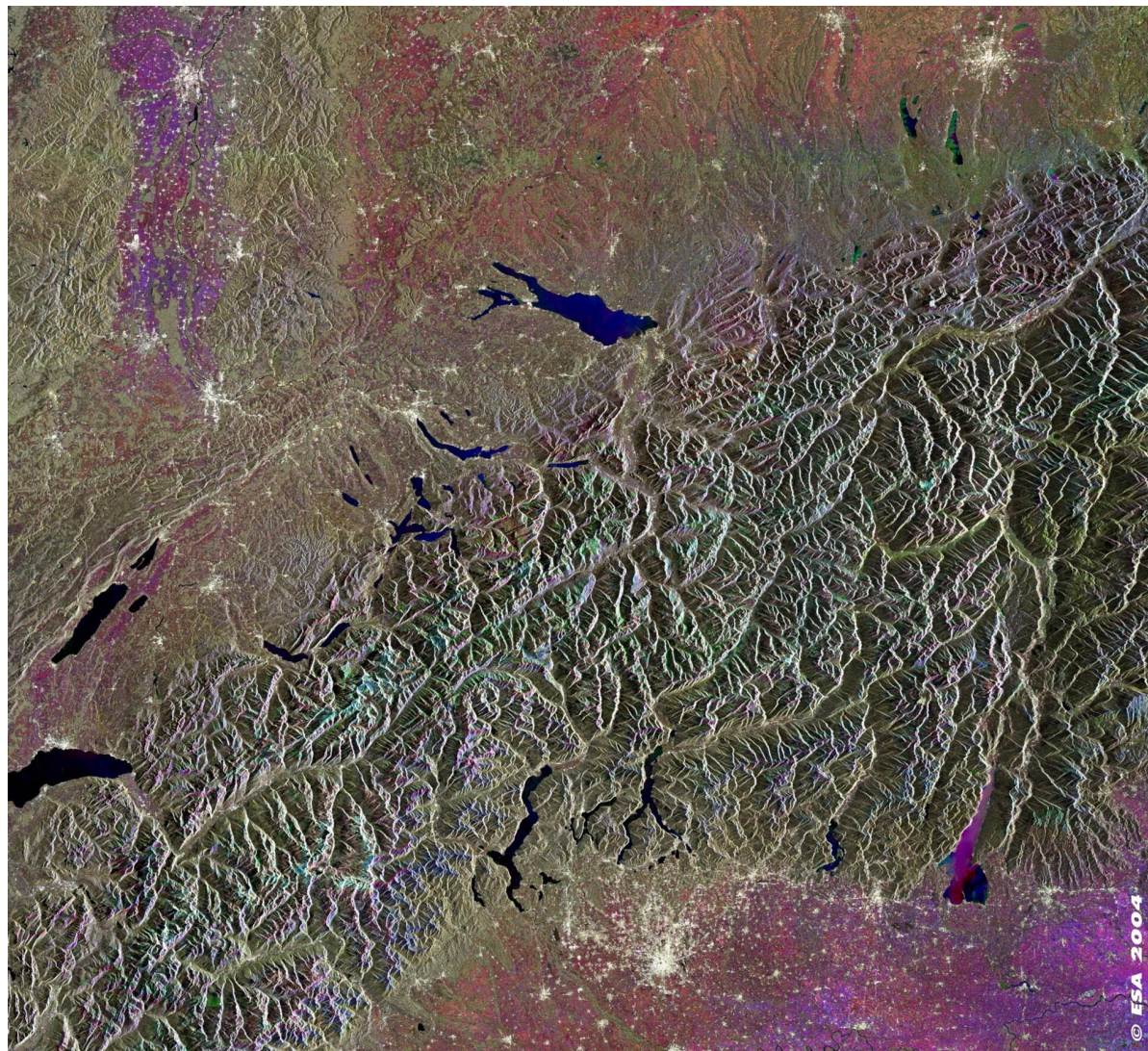
La résolution angulaire d'un capteur à antenne synthétique ne dépend ni de la distance entre le capteur et la cible, ni de la longueur d'onde !

Quand distance capteur-cible augmente, la résolution au sol de l'antenne réelle ($R_s = \theta d$) diminue. Un point P sera plus longtemps dans le faisceau, donc la résolution angulaire de l'antenne synthétique diminue et compense exactement la diminution de résolution au sol !

Plus l'antenne est petite, plus la résolution angulaire est petite → meilleure résolution ! (dans certaines limites de puissance transmise et de SNR)

ENVISAT - ASAR

http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/05/Switzerland_-_ASAR_-_29_January_2004

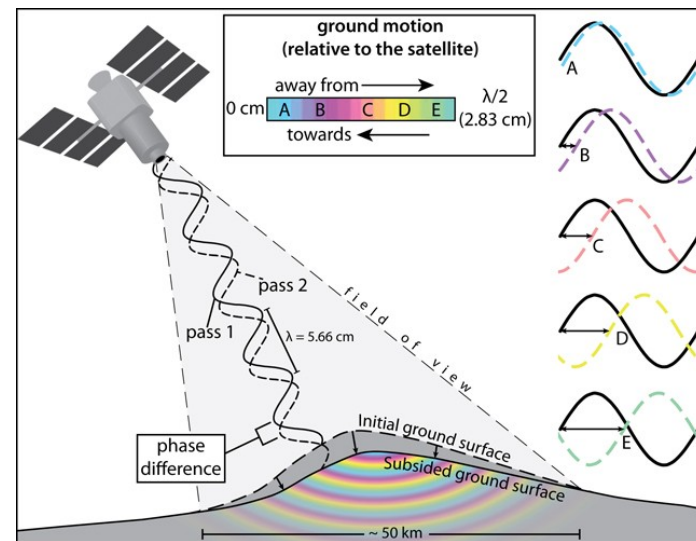
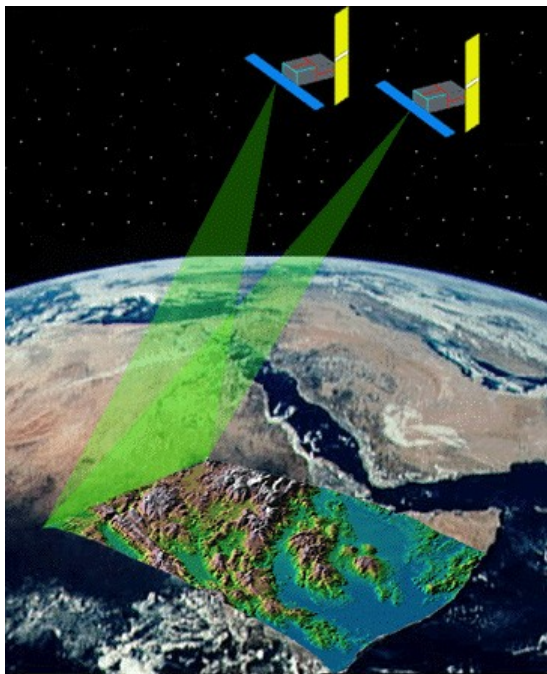


Interférométrie

Repose sur la mesure de la phase du signal émis et reçu.

Même principe que la stéréoscopie.

→ haute résolution en distance !



<https://volcano.si.edu/>

Interférométrie spatiale

2 images de la même zone prises à 2 endroits différents.

Le déphasage entre 2 signaux = $f(\text{diff. de distance entre les 2 images})$.

déphasage $[0, 2\pi]$ → altitude d'ambiguïté ($=\lambda/2$).

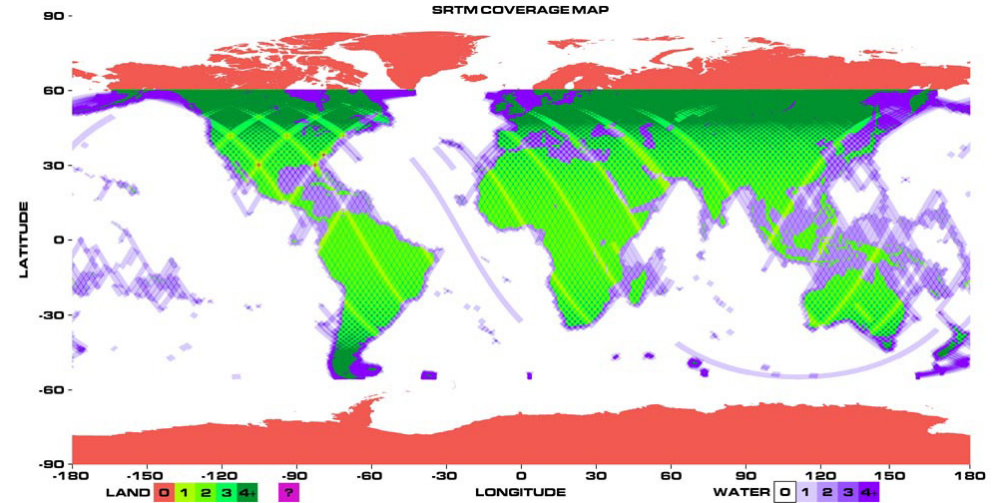
→ prendre en compte nb de repliements...

→ estimation précise de la distance au capteur.

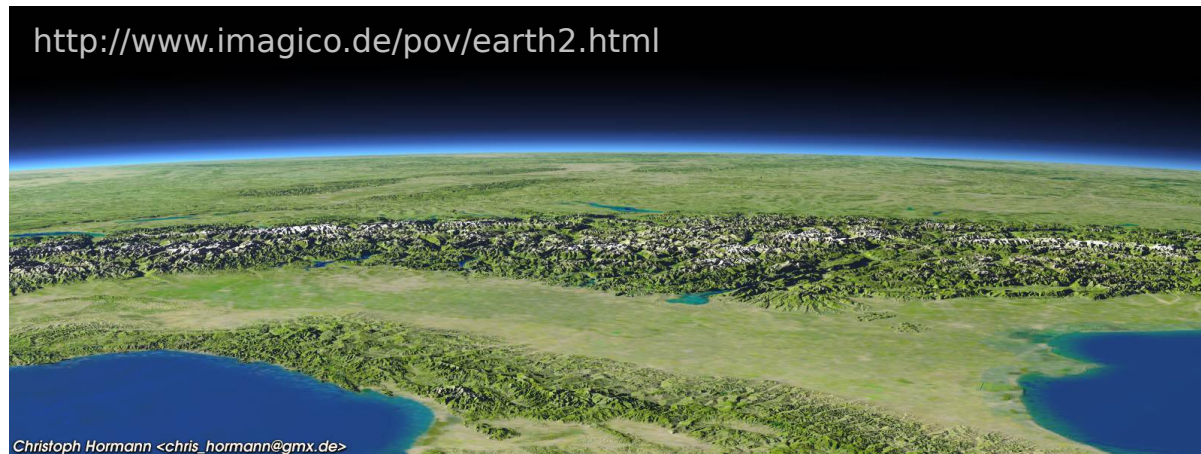
Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) - 02/2000



<https://stringfixer.com/fr/Spacelab>



<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/datacoverage.html>



<http://www.imagico.de/pov/earth2.html>

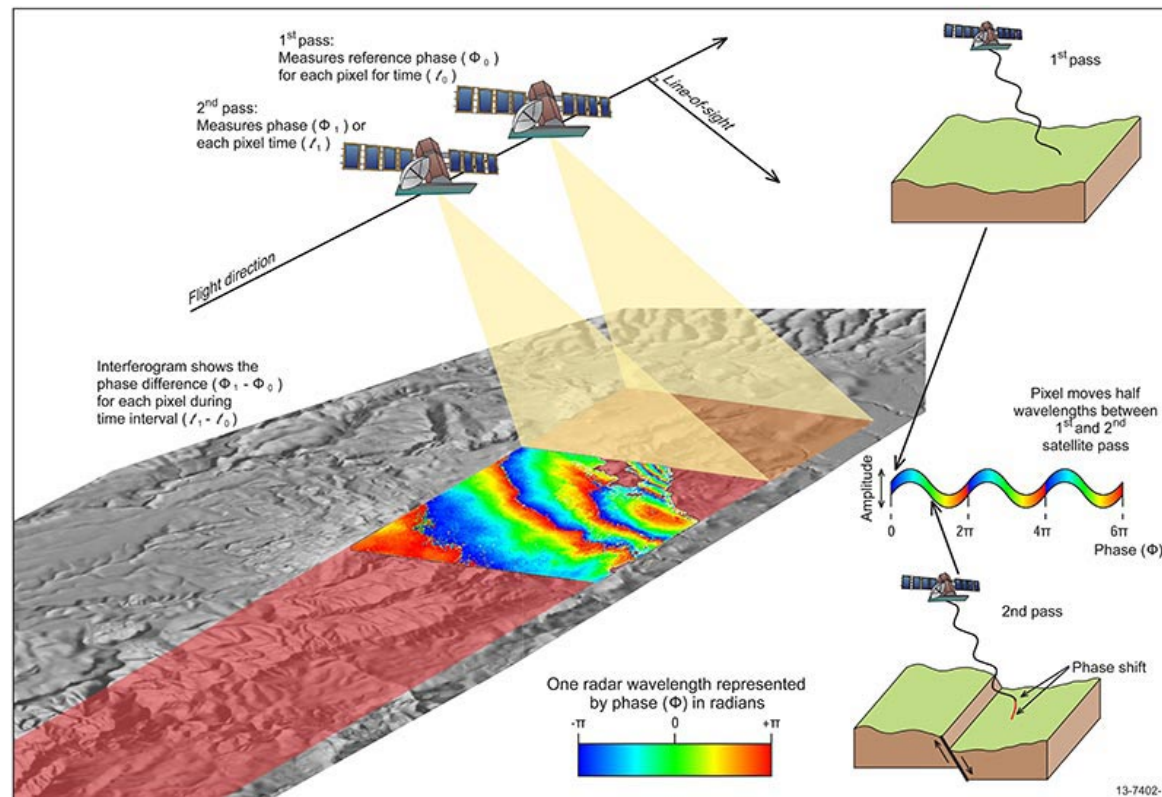
Christoph Hormann <chris_hormann@gmx.de>

Interférométrie temporelle

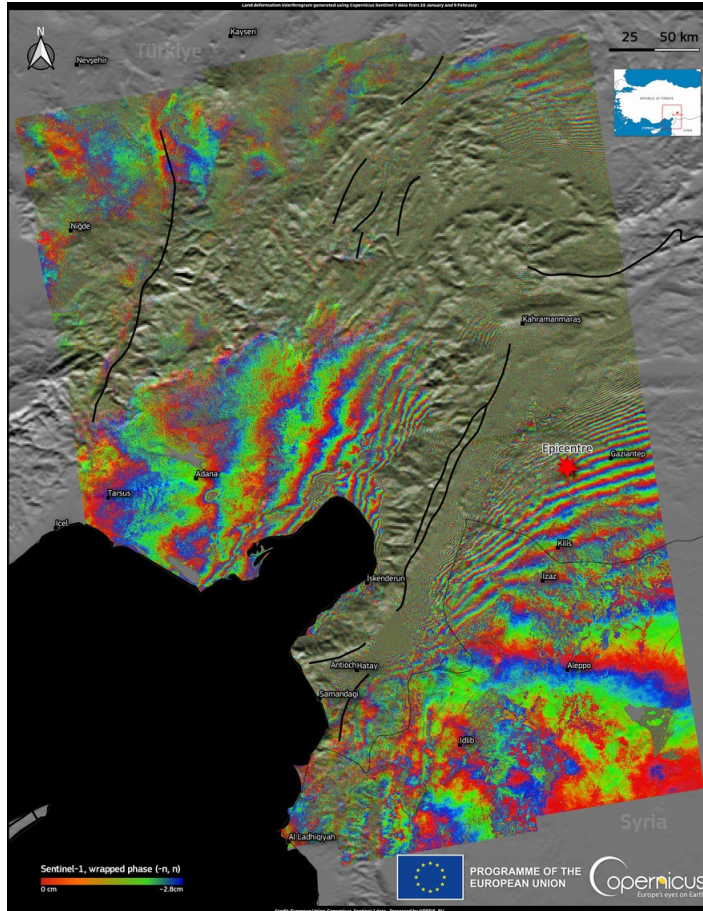
2 images de la même zone prises de la même position mais à deux dates différentes.

→ le déphasage entre 2 images renseigne sur les mouvements relatifs entre les 2 dates.

Possibilité d'identifier un mouvement jusqu'à qq mm !



Mesure déplacement dû à un séisme



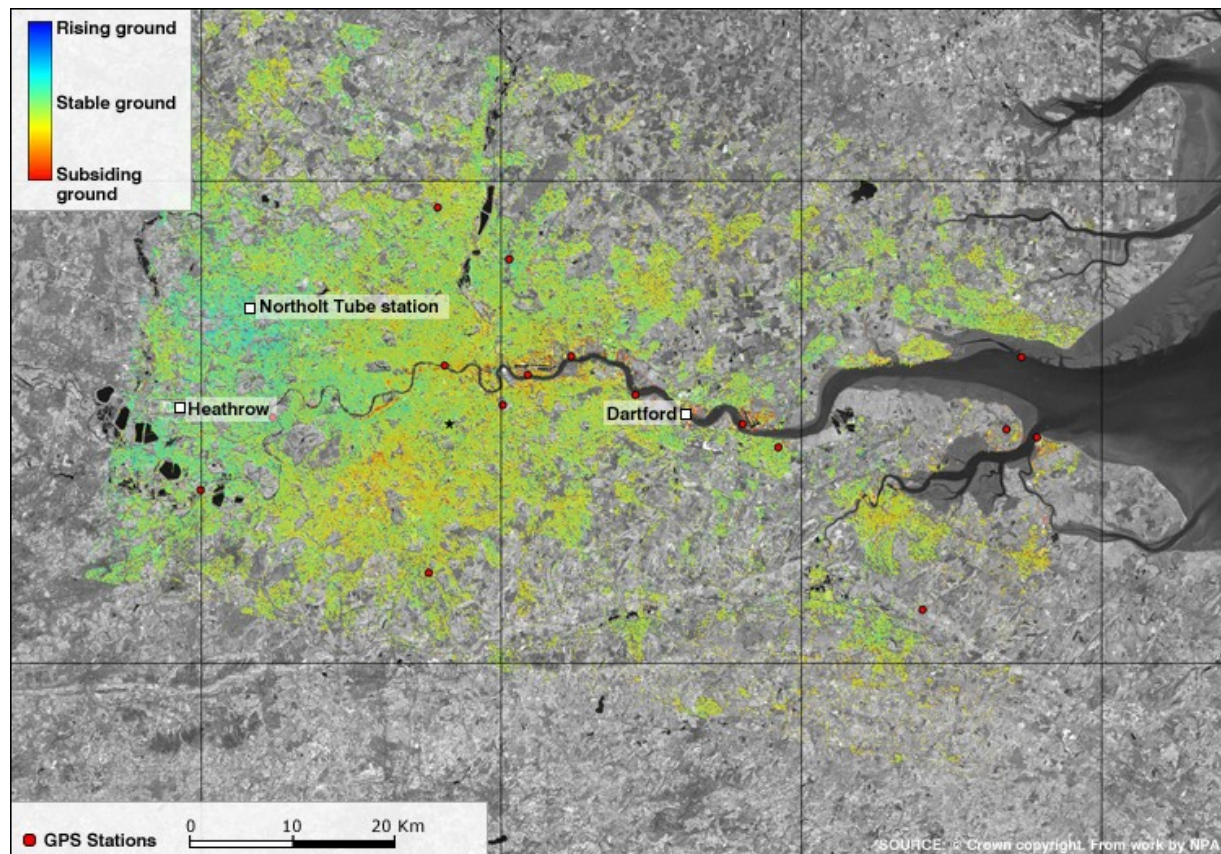
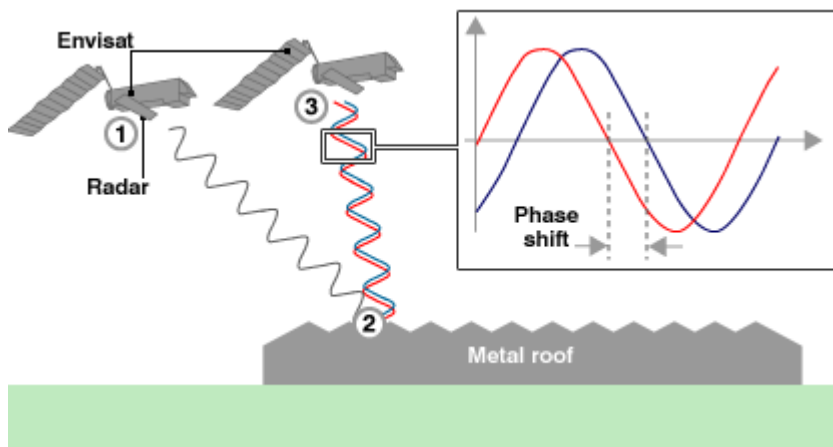
Séisme Gaziantep, Turquie, 2023
Images Sentinel 1A, Copernicus

Mesure déplacement bâtiment



<https://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v046/v046.htm>

Interférométrie + ouverture synthétique = InSAR



Questions

1. Quel est le principe d'une antenne à ouverture synthétique ?
2. Quelle est la limite de résolution angulaire d'un radar en bande C à antenne synthétique, sachant que l'antenne réelle est de 10 m, placé sur un satellite orbitant à une altitude de 800 km ?
3. Quel est le principe de l'interférométrie ?
4. En considérant une image obtenue par interférométrie, quelle serait la difficulté si l'on souhaite estimer des déplacements importants sur une partie de l'image et faibles sur une autre zone ?

RADAR = RAdio Detection And Ranging

Pour télédétection environnementale, fréquences entre 0.1 et 100 GHz.
(longueurs d'onde entre 3 mm et 3 m)

Fréquences < 10 GHz → atmosphère ~ transparente.

Fréquences > 10 GHz → atténuation atmosphérique non-négligeable (abs+diff)

30-300 Hz 10-1MmELF (extremely low frequency)

300-3000 Hz1Mm-100 km

3-30 kHz 100-10 kmVLF (very low frequency)

30-300 kHz 10-1 kmLF (low frequency)

300-3000 kHz 1 km-100 mMF (medium frequency)

3-30 MHz 100-10 mHF (high frequency)

30-300 MHz 10-1 mVHF (very high frequency)

300-3000 MHz 1 m-10 cm ..UHF (ultra high frequency)

3-30 GHz 10-1 cmSHF (super high frequency)

30-300 GHz 1 cm-1 mm EHF(extremely high frequency)

1-2 GHz 30-15 cmL Band

2-4 GHz 15-7.5 cmS Band

4-8 GHz 7.5-3.75 cmC Band

8-12 GHz 3.75-2.50 cm..... X Band

12-18 GHz 2.5-1.67 cmKu Band

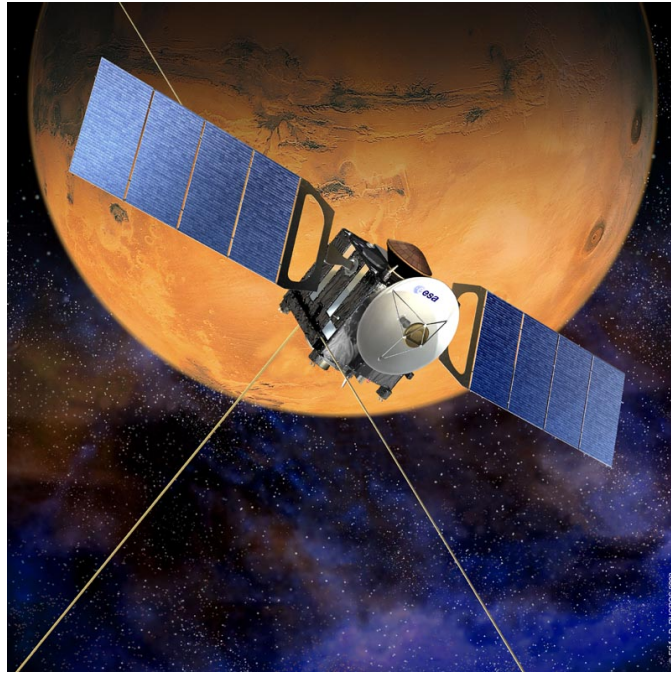
18-27 GHz 1.67-1.11 cmK Band

27-40 GHz 1.11 cm-7.5 mm .Ka Band

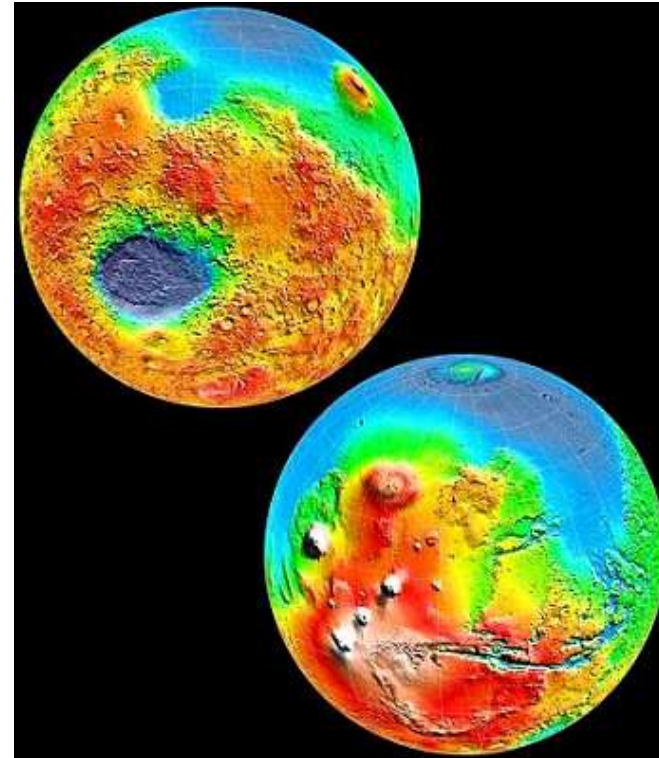
40-300 GHz 7.5-1.0 mm mm

Radar altimétrie

ex : Mars express



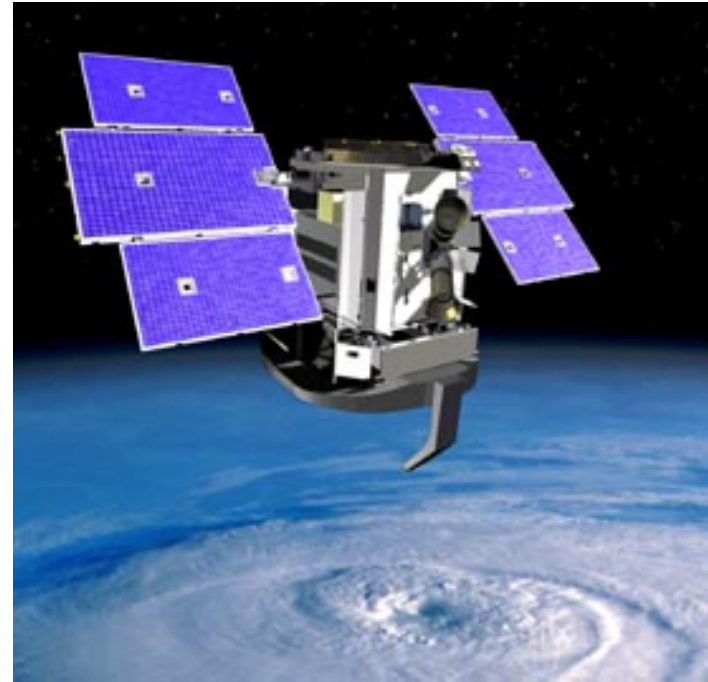
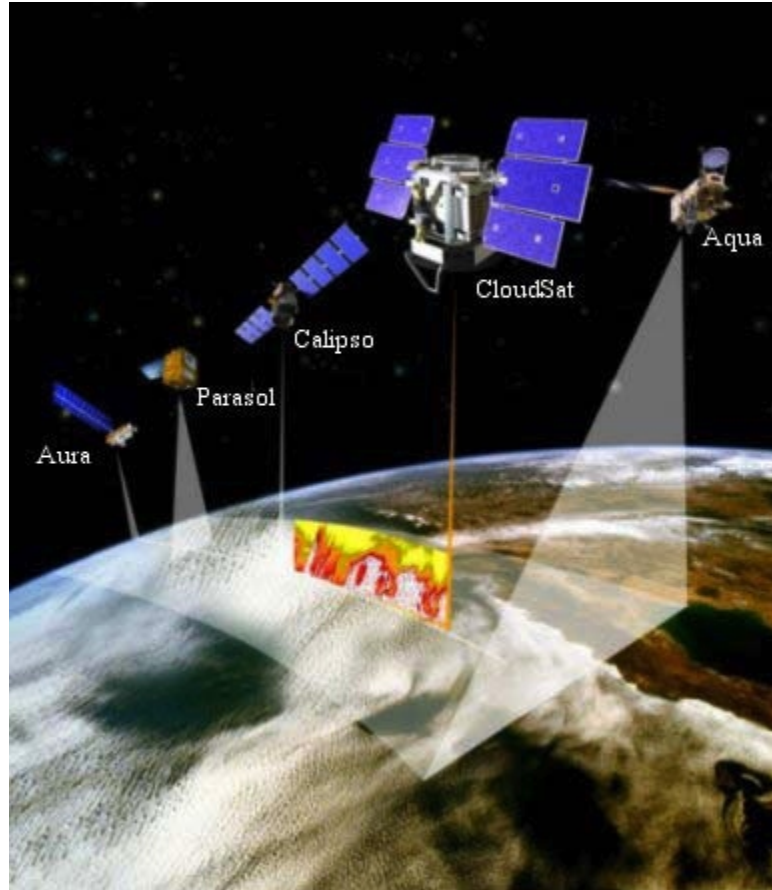
Courtesy of ESA



Courtesy of NASA/MGS

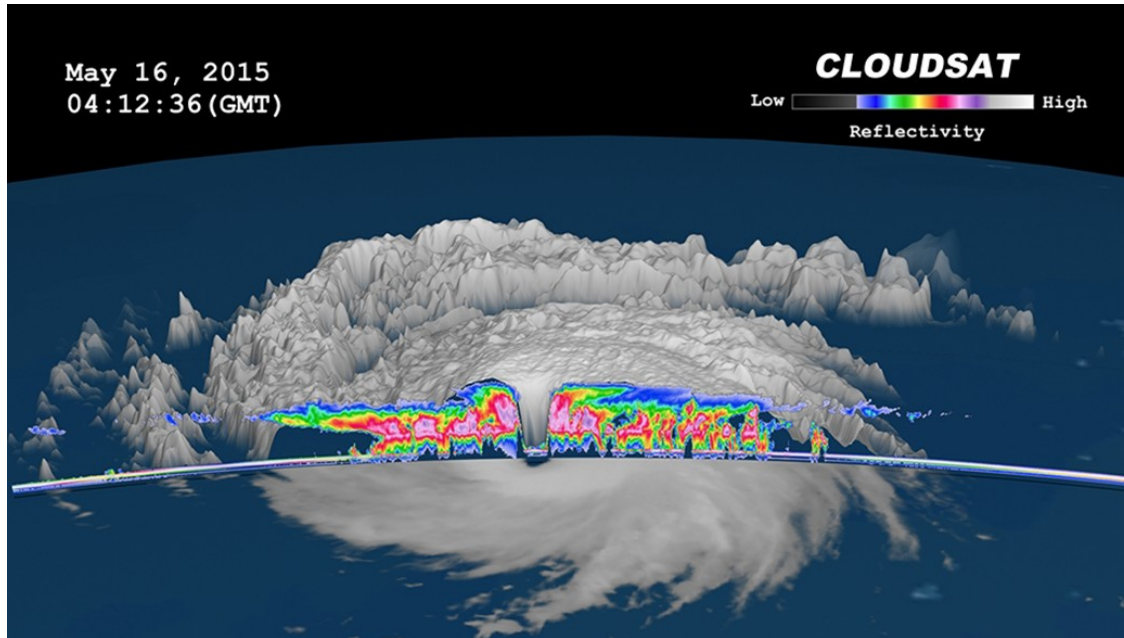
Radar pour l'étude des nuages (cloud radar)

ex : cloudsat (A-train)

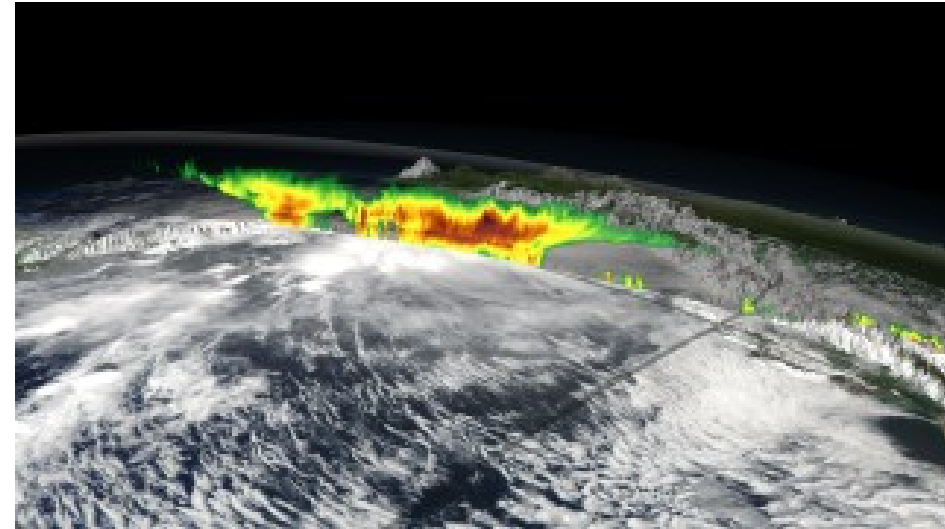


<https://cloudsat.atmos.colostate.edu/education/satellites>

Exemples de mesures de Cloudsat



<https://www.nasa.gov/feature/goddard/how-does-nasa-study-hurricanes>



NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

Radar... routier !



Radar météorologique

Mesure des précipitations, prévisions courtes échéances, phénomènes météorologiques dangereux (orages, tornades,...).



Radar du Moucherotte, Grenoble, France

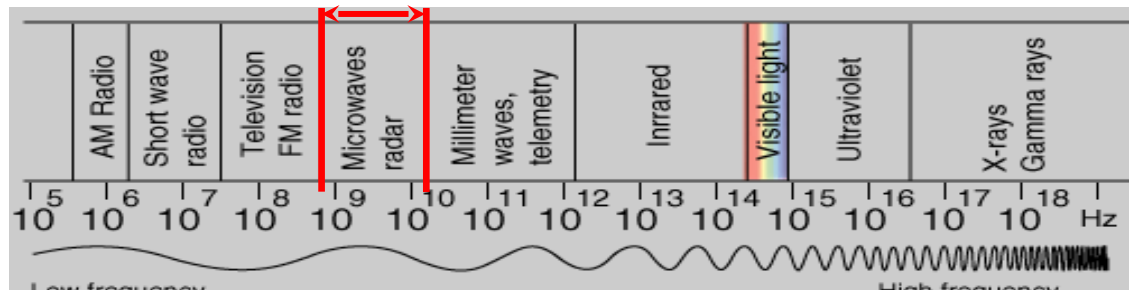
<https://www.trace-ta-route.com/randonnee-vercors-moucherotte-grenoble/>

Mesure des précipitations avec un radar

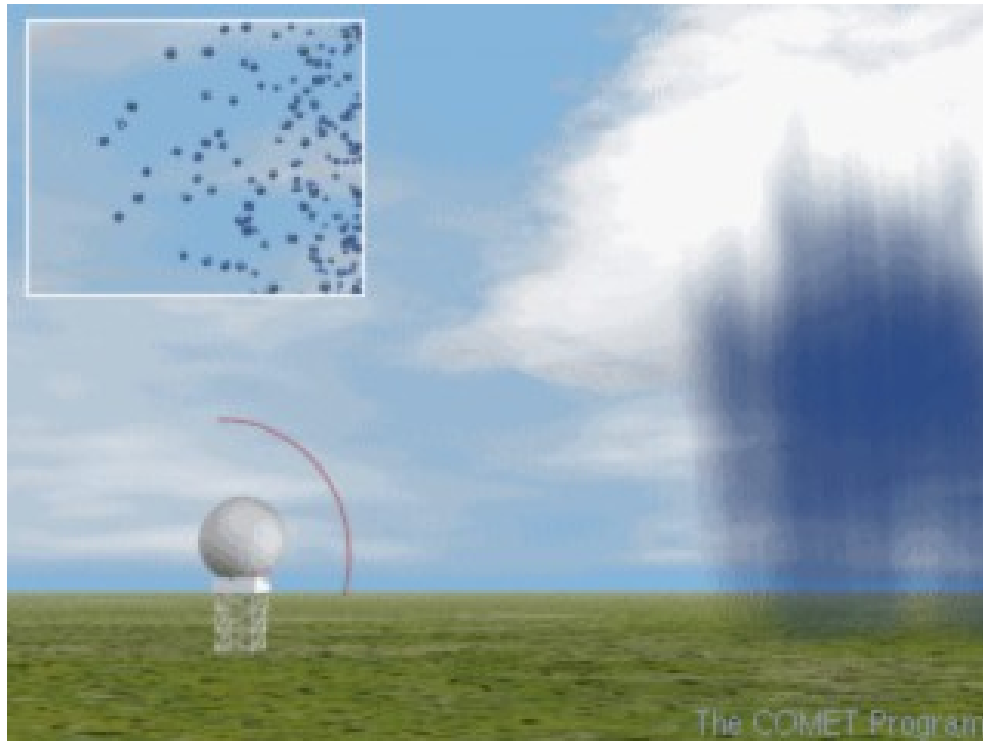
Précipitation consiste en	pluie	0.1 - 8 mm
	neige	0.1 - 20 mm
	grêle	5 - 50 mm

Interaction cible/onde si longueur d'onde $\sim 10 \times$ taille.

→ radar météorologique : 3 - 10 cm de longueur d'onde
(bandes S-C-X)



Principe de la mesure radar



- Radar → réflectivité (Z) liée aux propriétés électro-mag des gouttes.
- Mesure indirecte → incertitudes liées à la propagation du signal + estimation de l'intensité de pluie.
- Microstructure est cruciale pour l'interprétation quantitative.

Facteur de réflectivité radar Z

Équation radar $P_r = C \frac{Z}{r^2}$

puissance reçue P_r , distance r , réflectivité Z
constante radar C

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int_D N(D) \sigma_b(D) dD$$

D diam goutte, N dist. taille gouttes,
 σ_b section efficace rétro-diffusion
 K facteur diélectrique $|K|^2 = \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2$

Z est exprimé en $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ou en dBZ ($10 \ln(Z/1)/\ln(10)$)

Z_e = réflectivité équivalente (eau liquide) pour $|K|^2 \sim 0.93$

Section efficace de rétro-diffusion σ_b

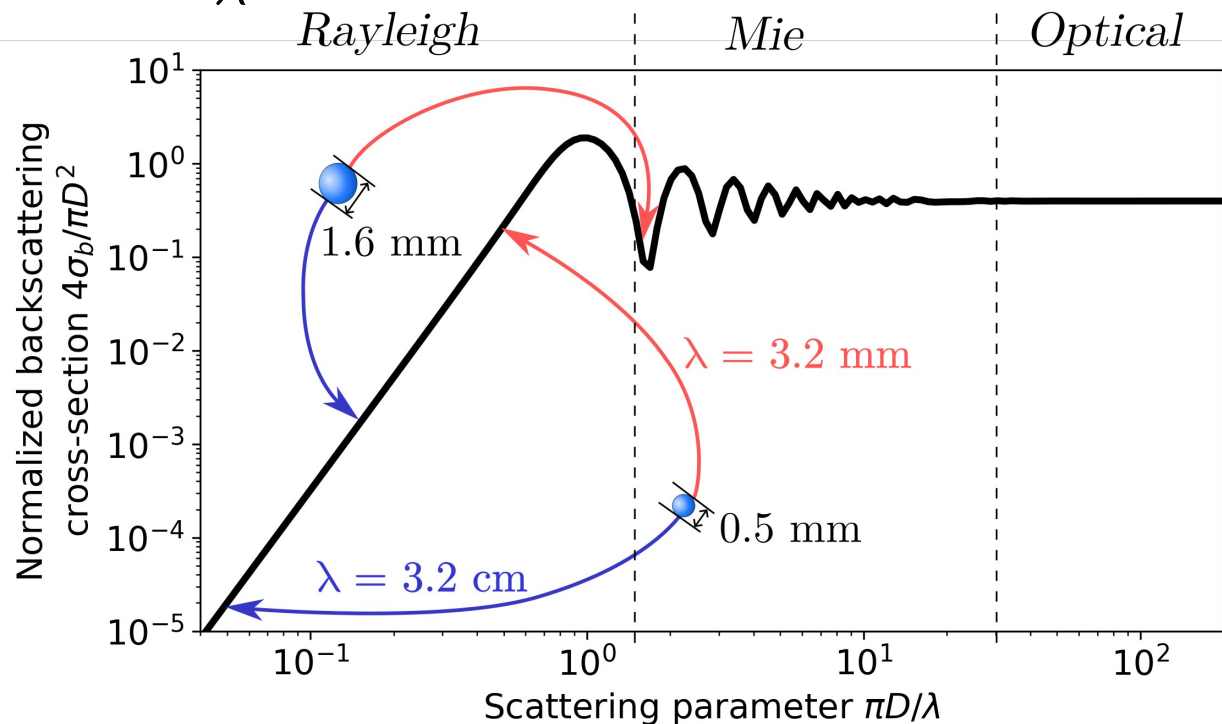
Fonction de la taille radiométrique $x = \frac{\pi D}{\lambda}$

Si $x \ll 1$: régime de **Rayleigh**

$$\sigma_b(D) = \frac{\pi^5}{\lambda^4} D^6 |K|^2 \rightarrow Z = M_6$$

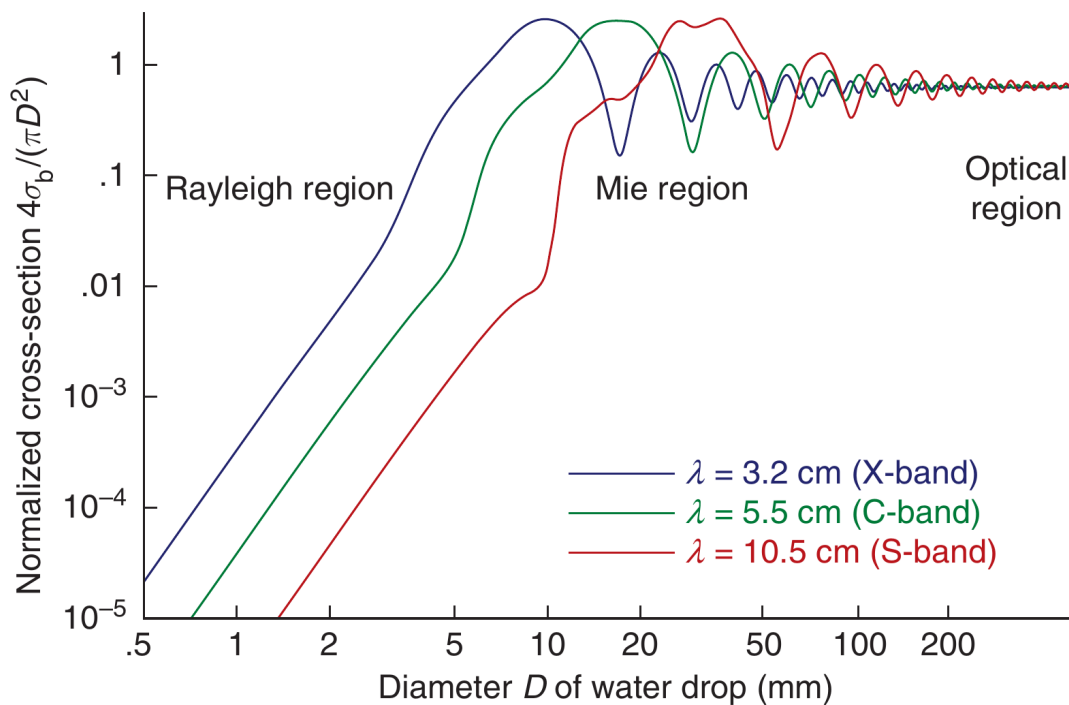
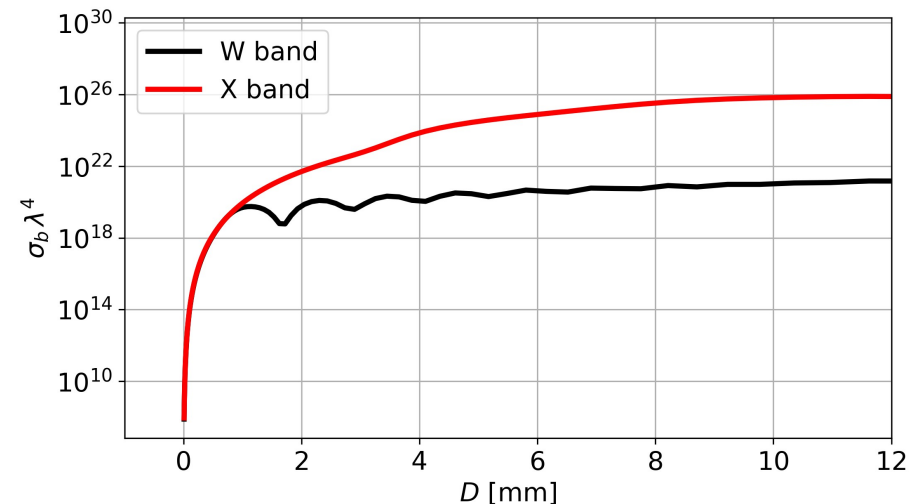
If $x \sim 1$: régime de **Mie**
(exact solution for spheres)

If $x \gg 1$: régime **non-sélectif ou optique**



Influence de la fréquence

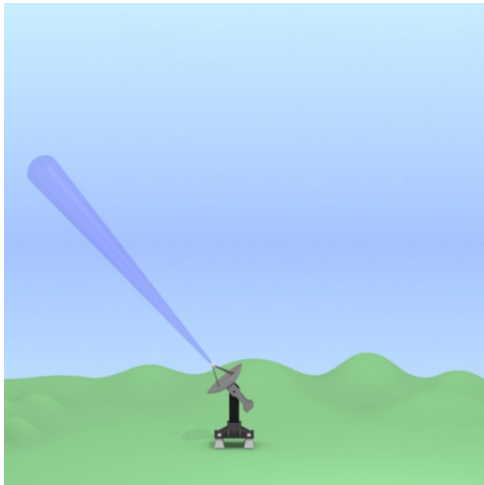
Section efficace rétro-diffusion

 $\sigma_b \lambda^4$ (\sim réflectivité)

Type de scan avec un radar météo

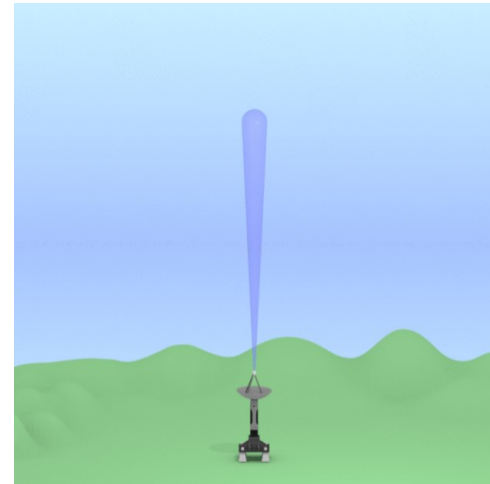
Plan Position Indicator – PPI

Angle d'élévation = cst + scan en azimuth



Range Height Indicator – RHI

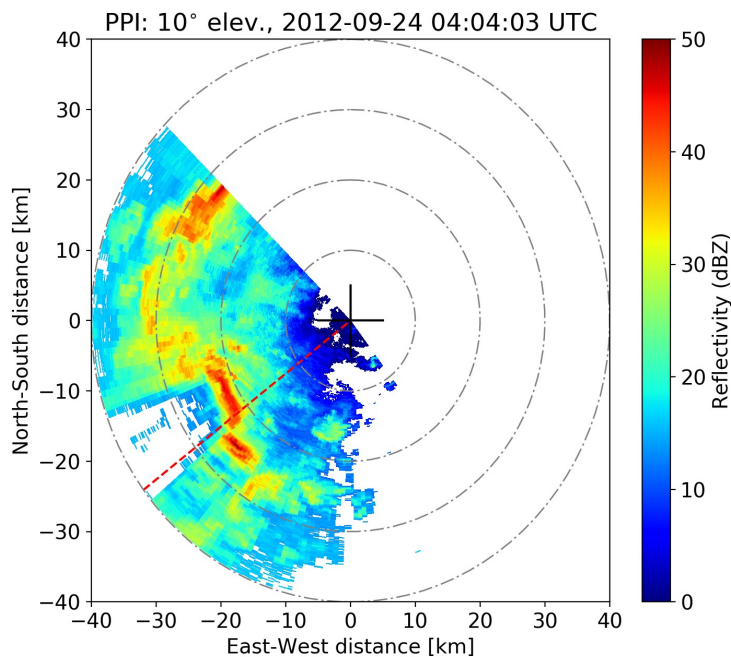
Azimuth = cst + scan en élévation



Type de scan avec un radar météo

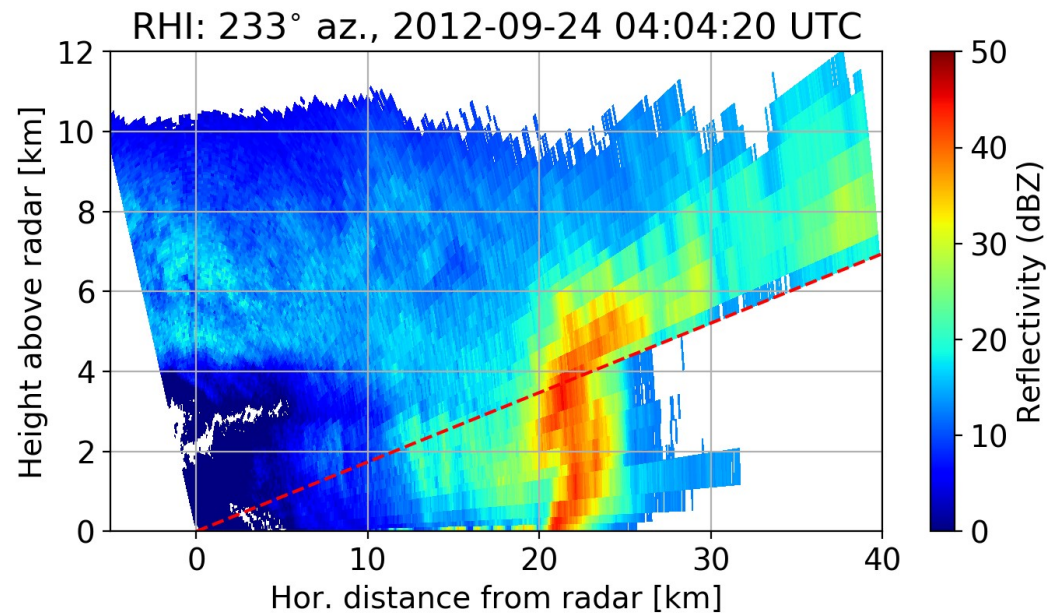
Plan Position Indicator – PPI

Angle d'élévation = cst + scan en azimuth

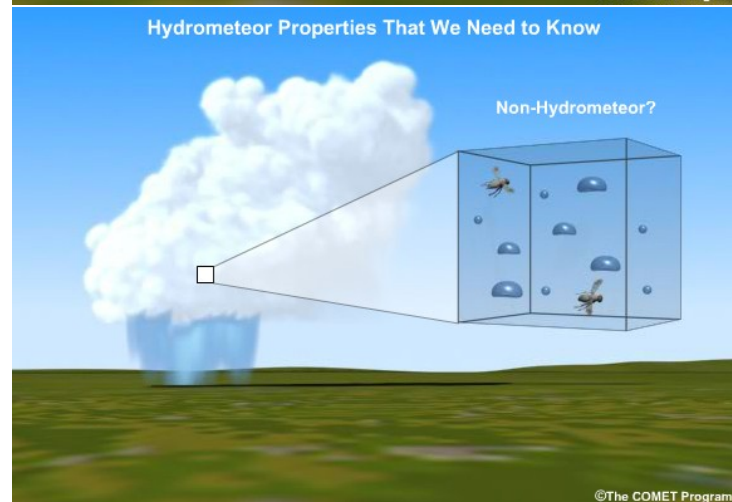
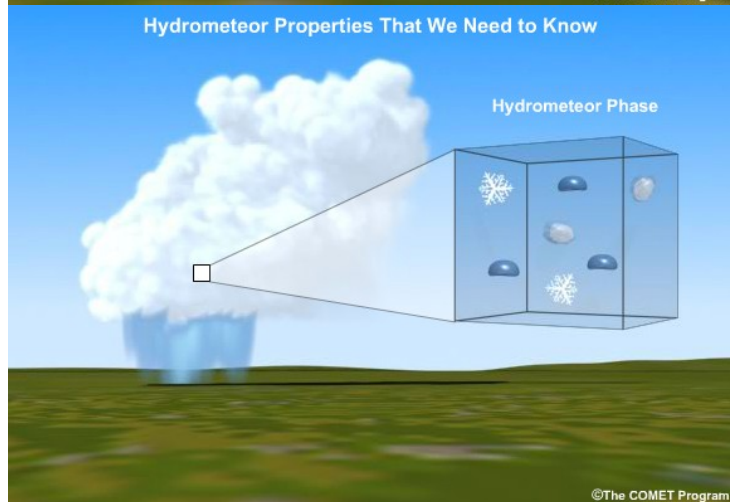
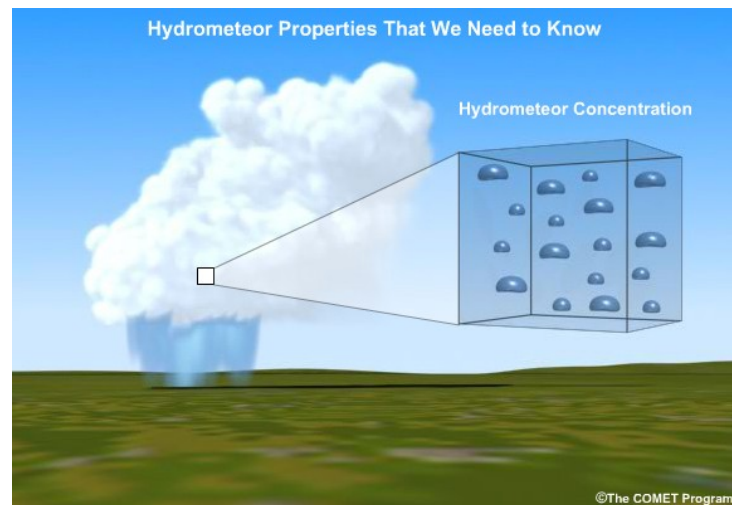
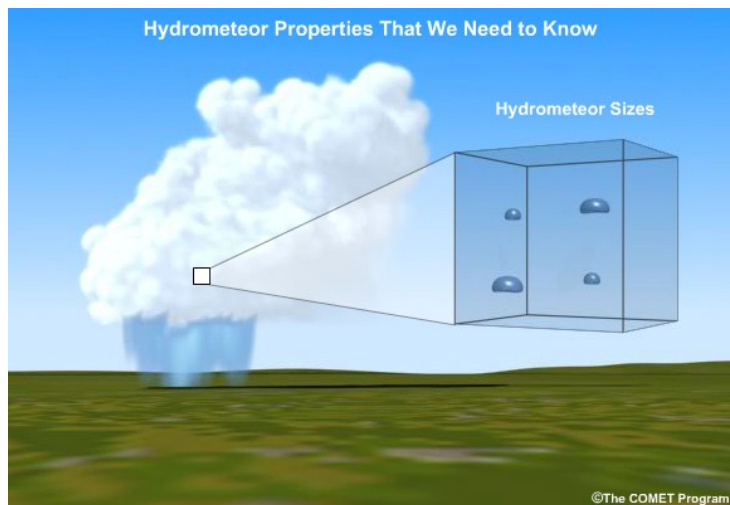


Range Height Indicator – RHI

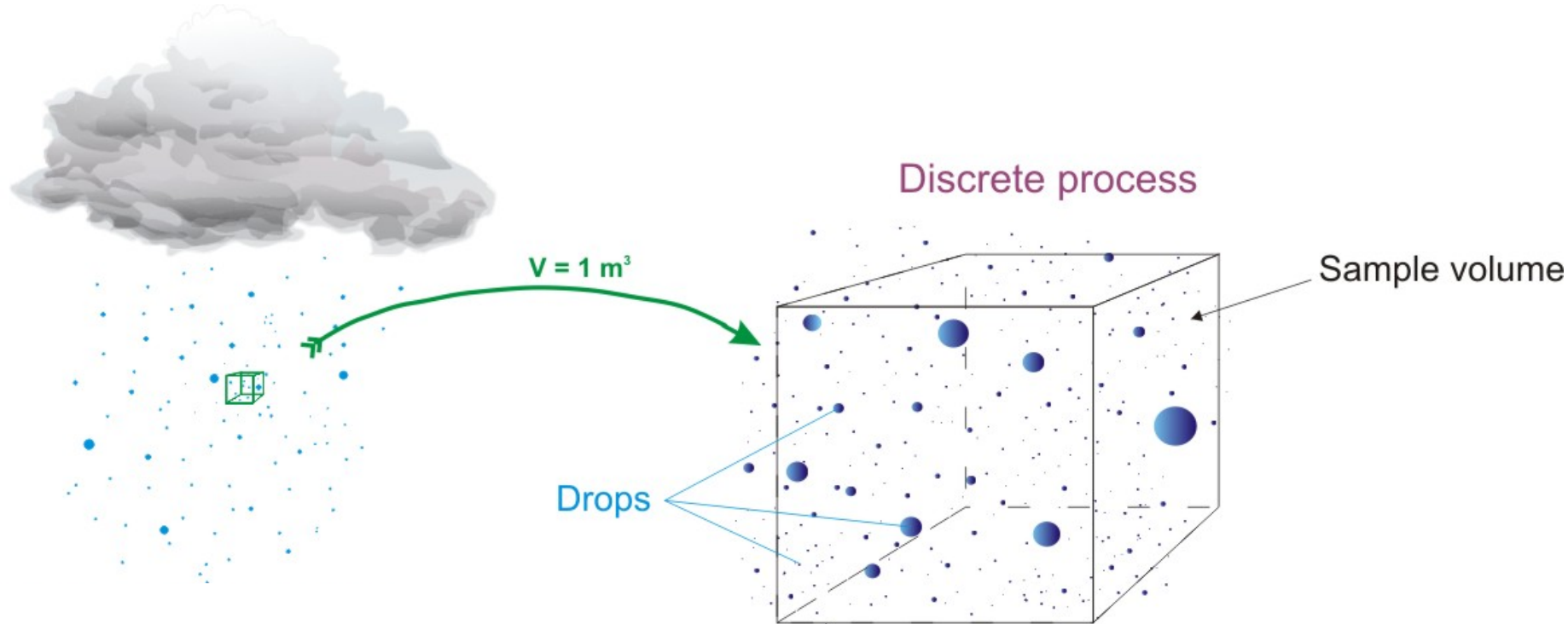
Azimuth = cst + scan en élévation



Facteurs importants contrôlant la mesure radar

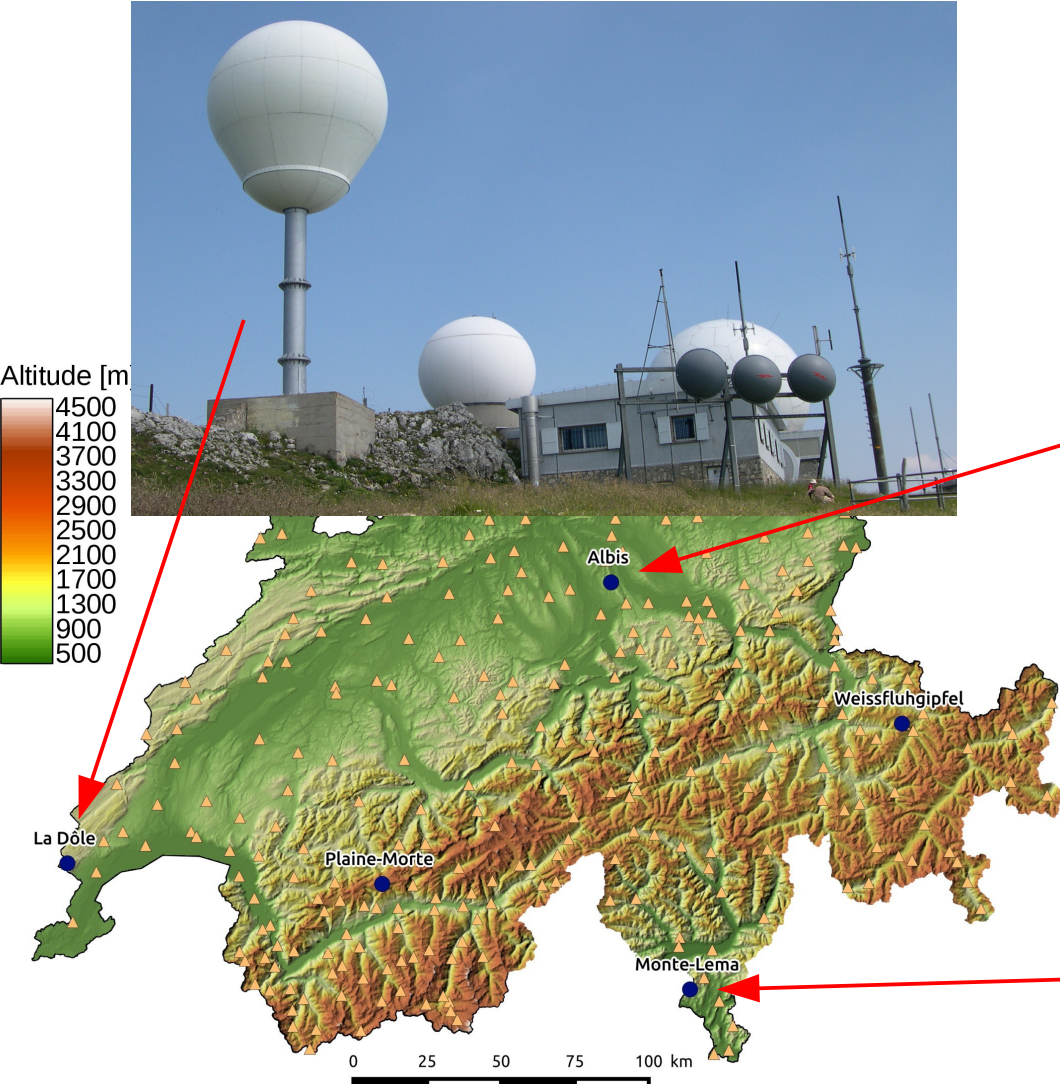


Microstructure = taille, forme, vitesse,... de toutes les gouttes dans un volume.
En lien avec les processus microphysiques dans les nuages.



Grand nombre de gouttes → approche statistique pour résumer l'info :
→ granulométrie des gouttes ou **Drop Size Distribution (DSD)** 0.1 à 8 mm

DSD = info cruciale car R, Z, W sont des moments stat de la DSD.

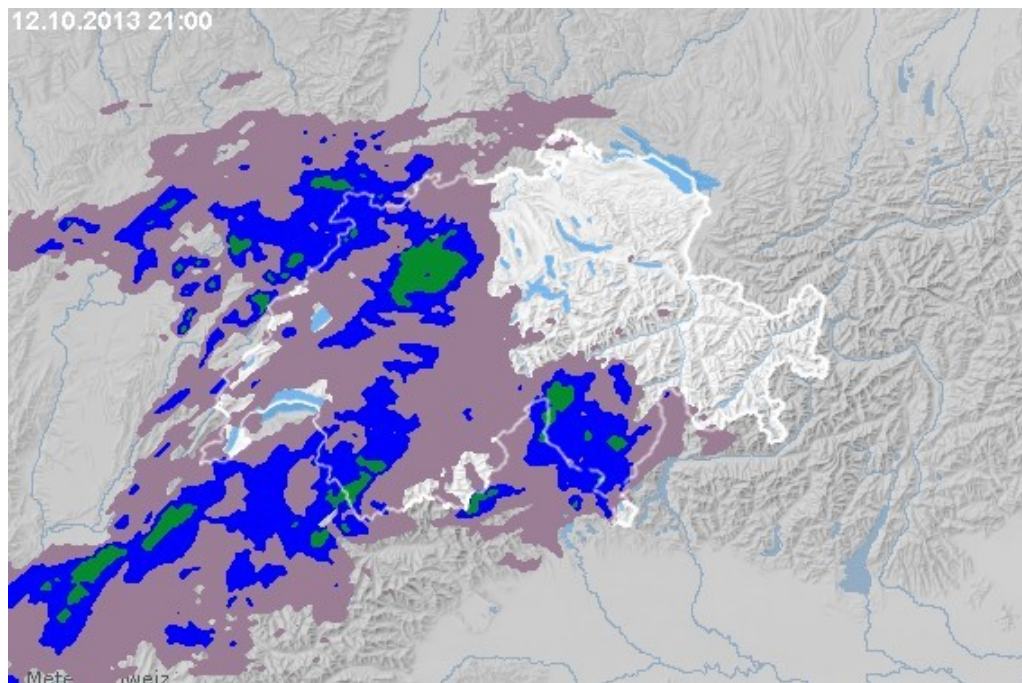




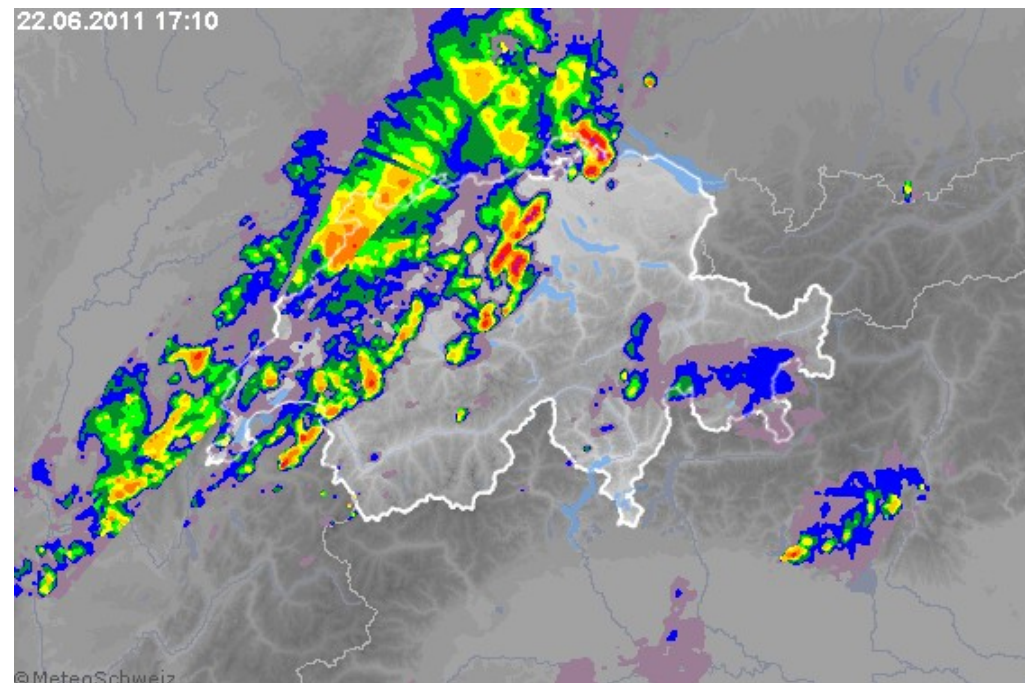
Source : MétéoSuisse

Mosaïque radar produite par MS

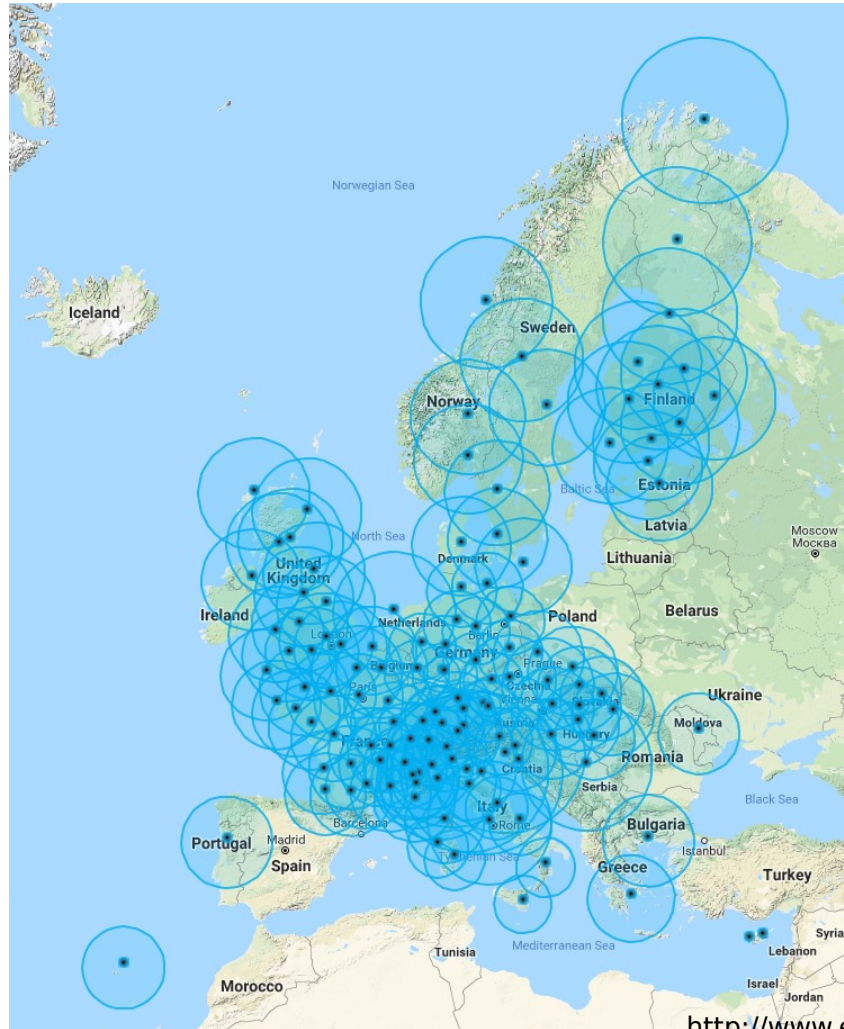
Précipitations frontales



Précipitations convectives

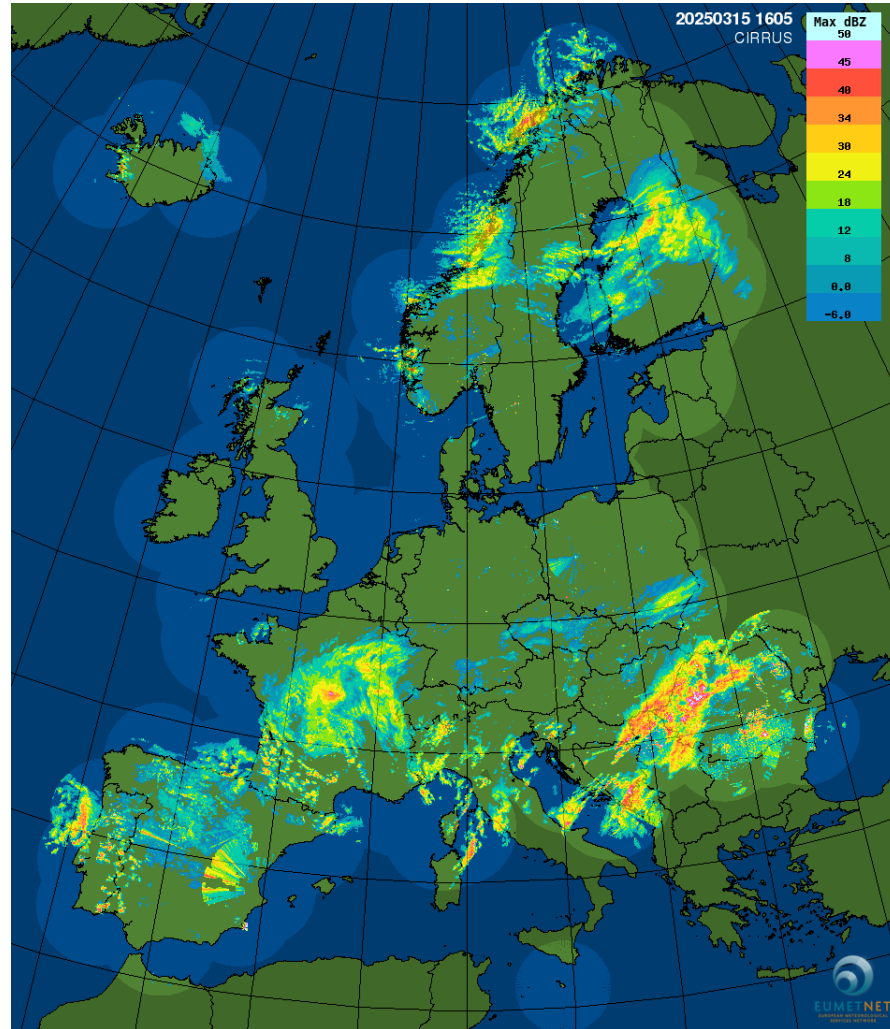


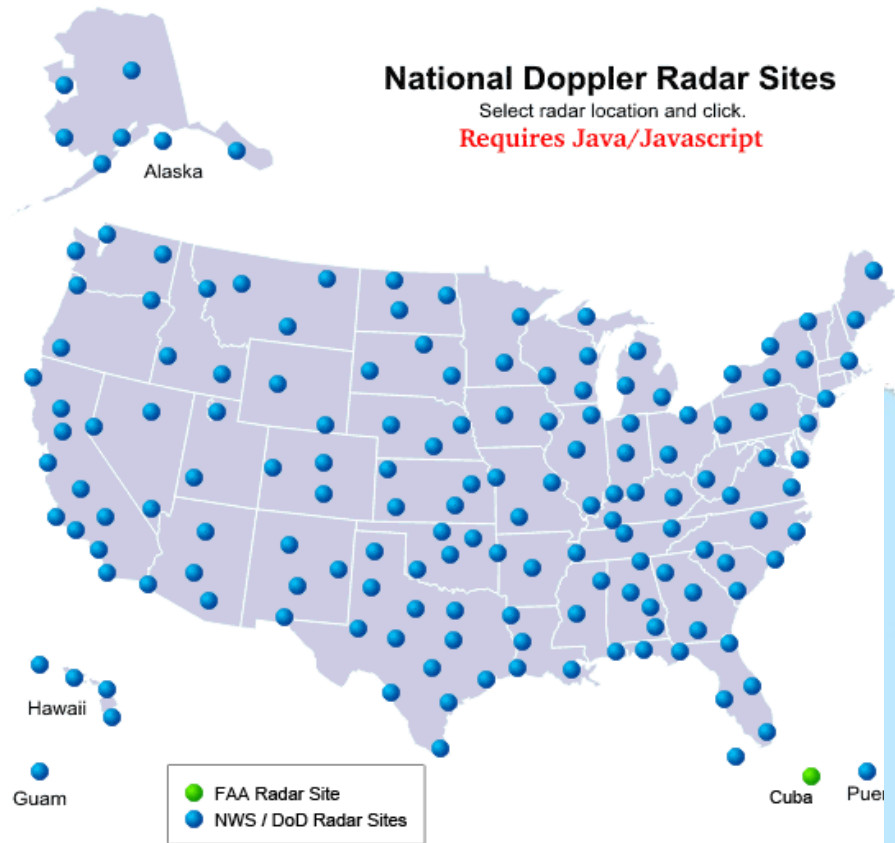
Projet OPERA



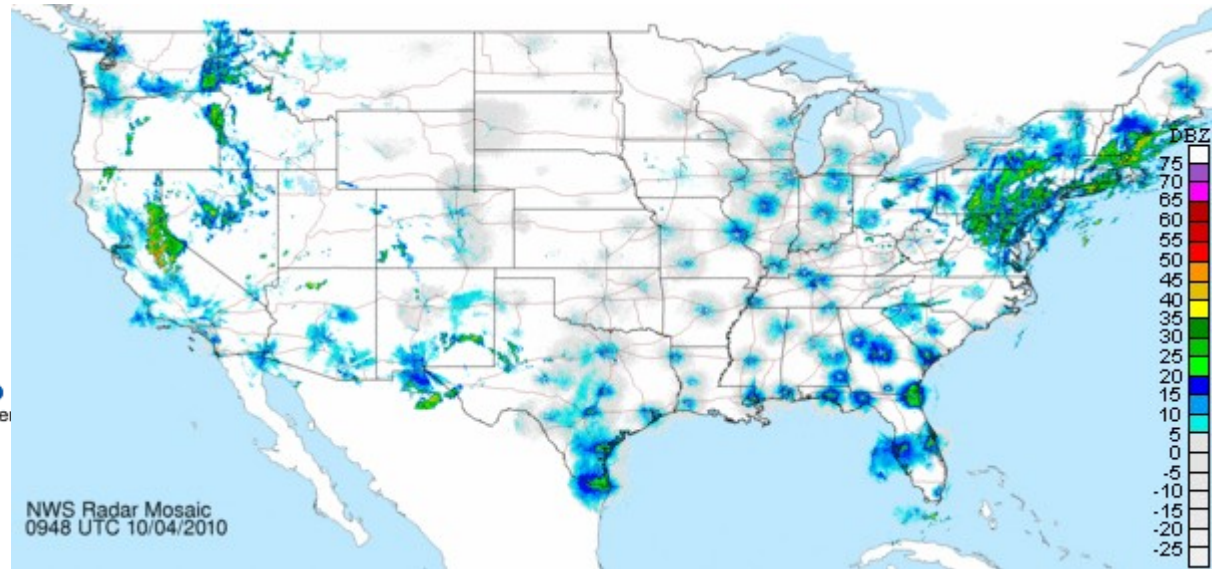
<http://www.eumetnet.eu/opera>

Mosaïque radar européenne





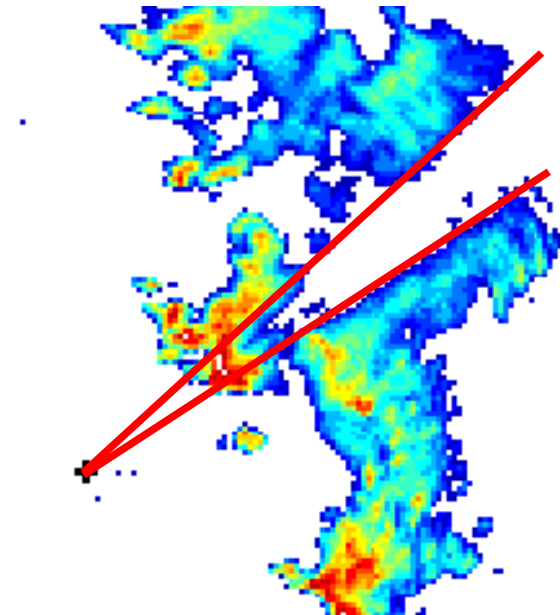
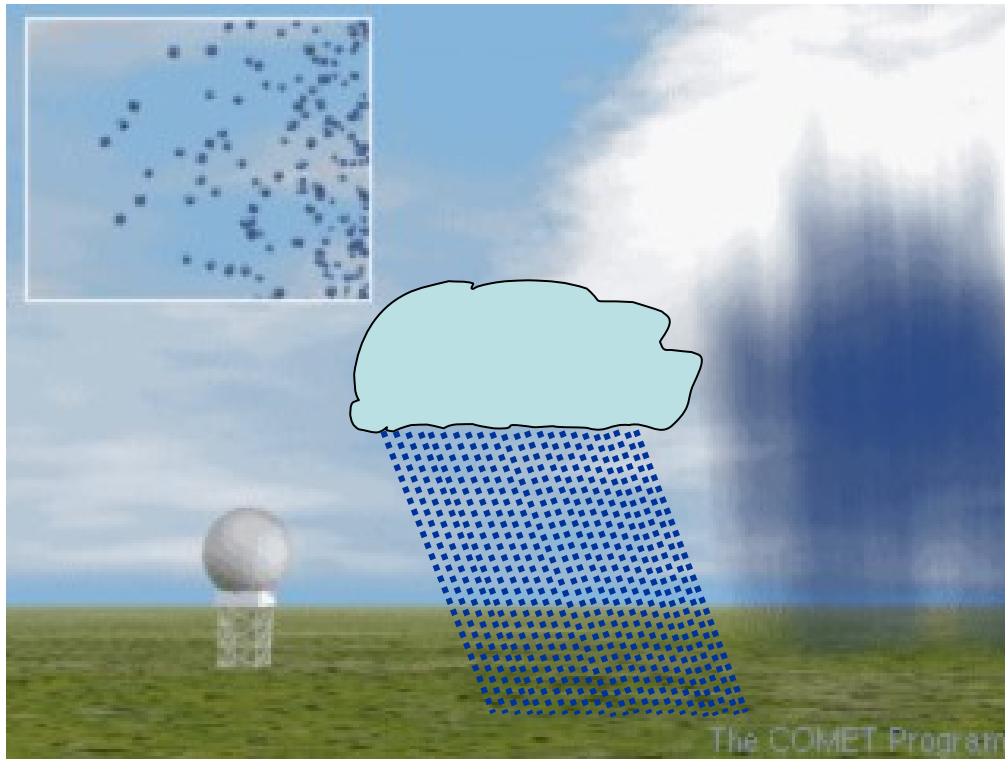
NEXRAD



Atténuation

Le signal radar est atténué par les précipitations (longueur d'onde < 10 cm)

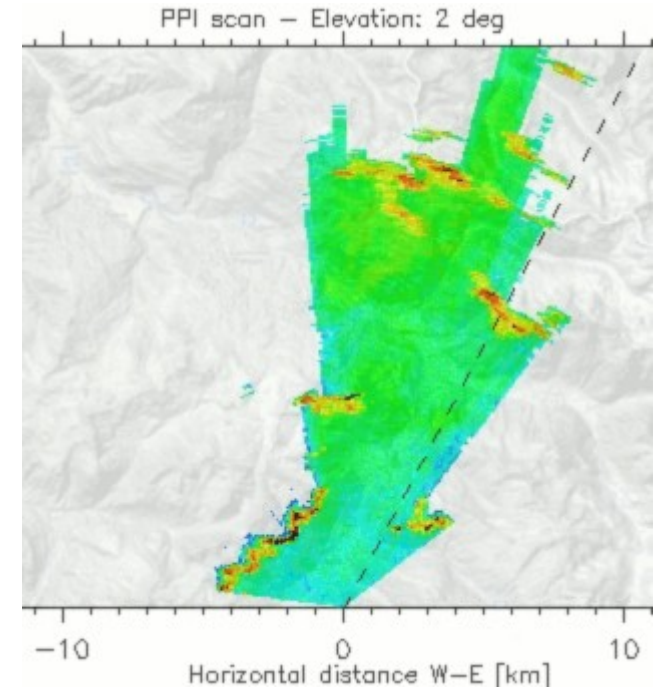
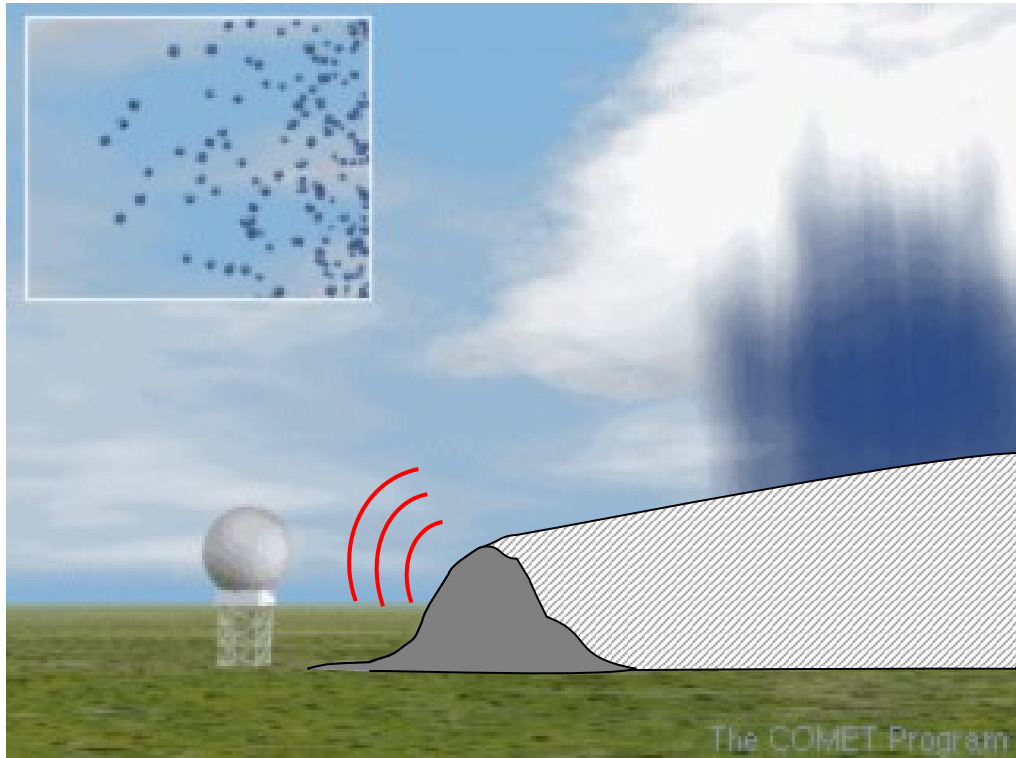
→ sous-estimation de la réflectivité.



Interactions avec le relief

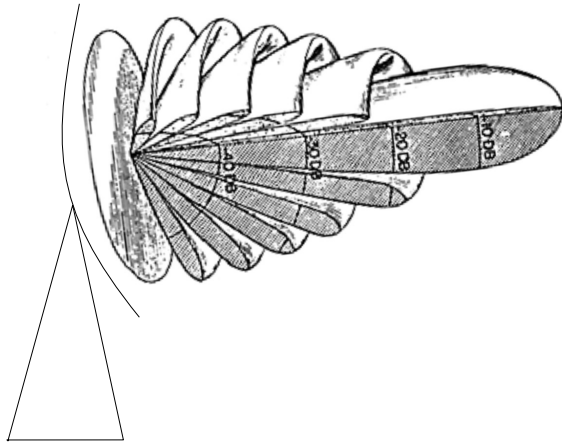
Faisceau radar touche (en totalité ou partiellement) le sol

1. Échos de sol → sur-estimation des précipitations.
2. Blocage du faisceau → sous-estimation des précipitations.



Échos de sol en terrain plat

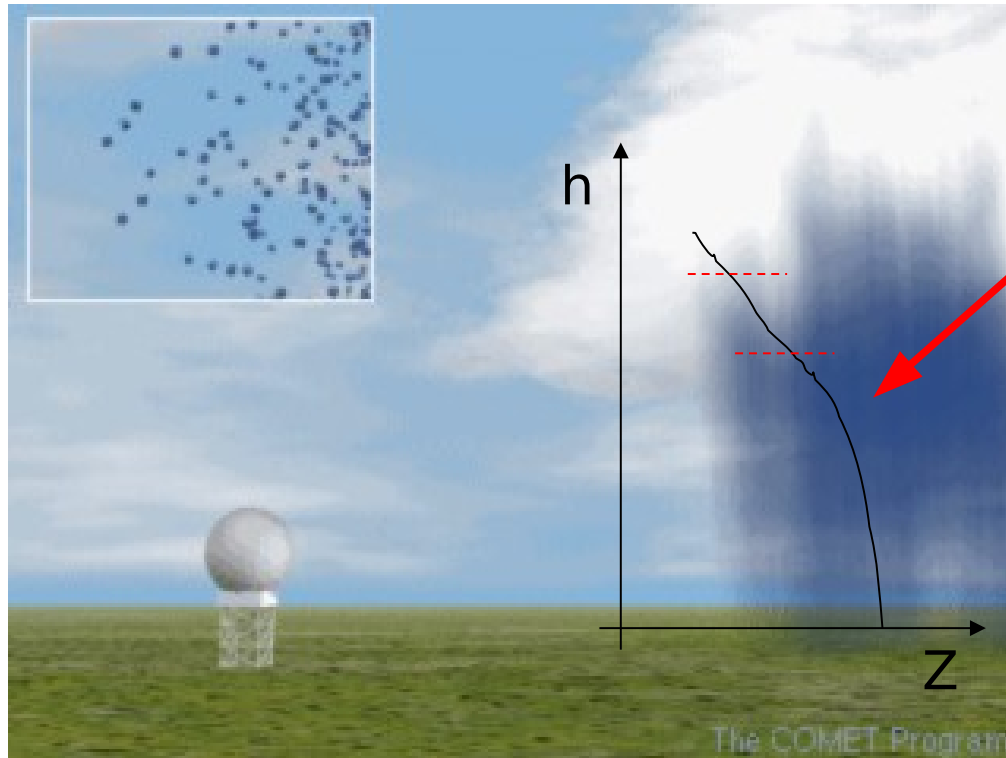
Antenne non-parfaite → lobes secondaires
→ échos de sol.



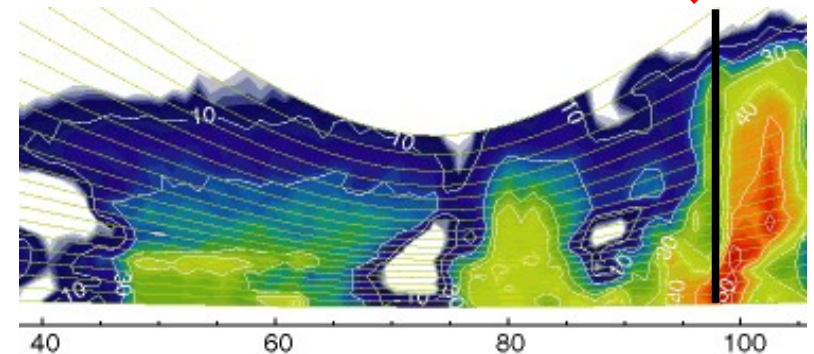
Variabilité verticale des précipitations

Faisceau radar est en altitude à grande distance (~ 2 km à 100 km)

Précipitations à 2 km \neq au niveau du sol.



Profil Vertical de Réflectivité



Radar → réflectivité (propriétés électromagnétiques des hydromét.)

Variable d'intérêt = intensité de pluie (flux d'eau)

Nécessité de convertir réflectivité Z en intensité de pluie R

→ relation loi puissance

$$Z = aR^b$$

Coefficients (a,b) dépendent de la **microstructure de la pluie**

ex: pluie stratiforme	$a=200$, $b=1.6$	Marshall-Palmer, 1948
pluie convective	$a=486$, $b=1.37$	Jones, 1956

Microstructure fortement variable et difficilement mesurable

→ incertitude sur a et b

→ **erreur dans la conversion de Z en R**

Bande brillante

Nuage froid (\rightarrow formation de neige/glace) + température au sol $> 0^{\circ}\text{C}$

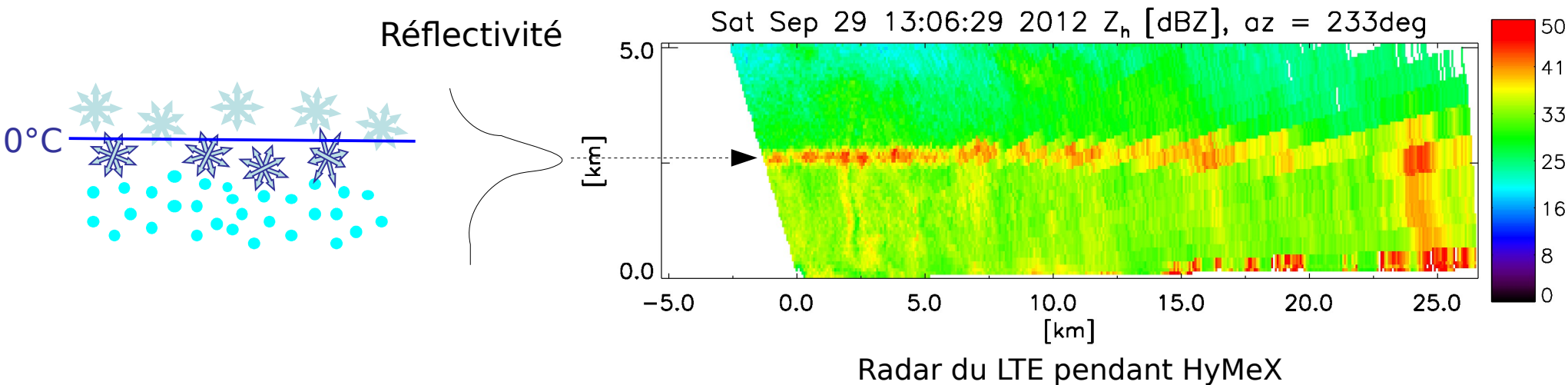
\rightarrow isotherme 0°C entre le sol et le sommet du nuage \rightarrow couche de fusion.

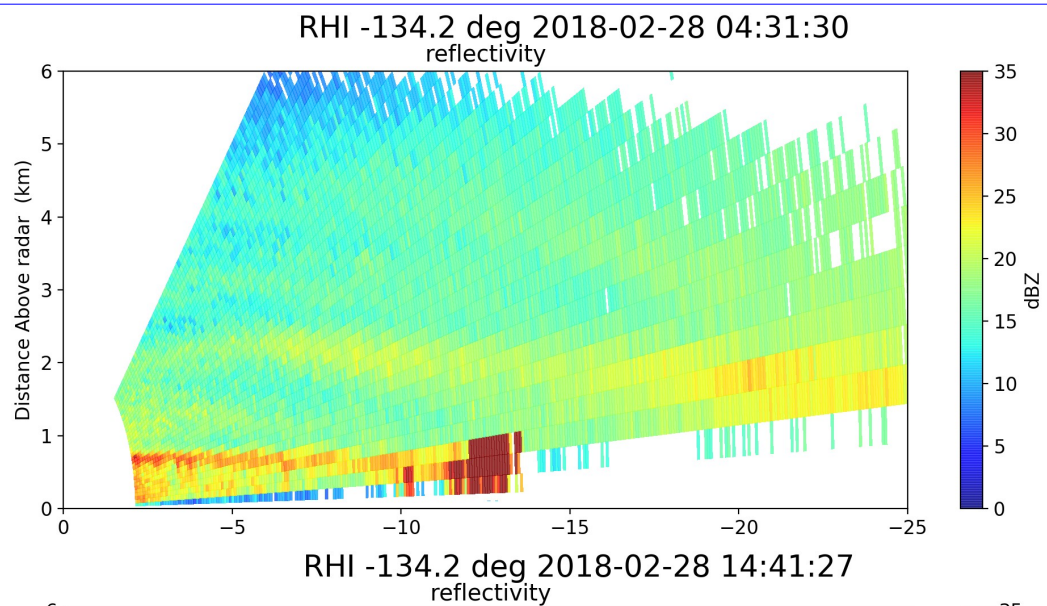
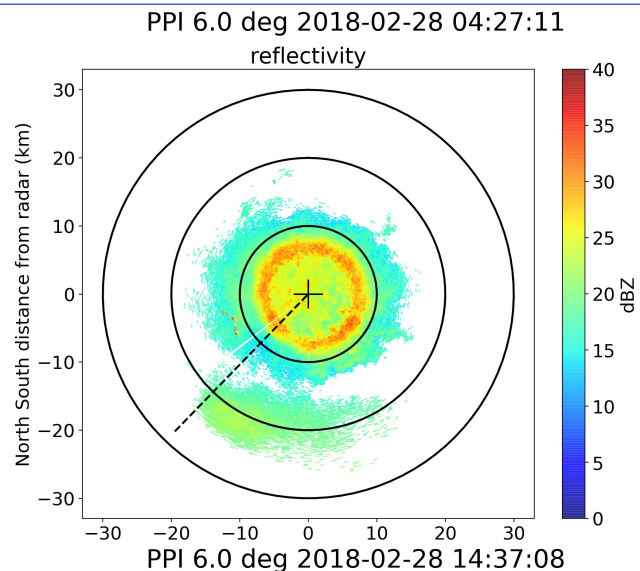
Cristaux de neige passent sous l'isotherme 0°C et commence à fondre

\rightarrow formation d'une pellicule d'eau liquide entourant les cristaux

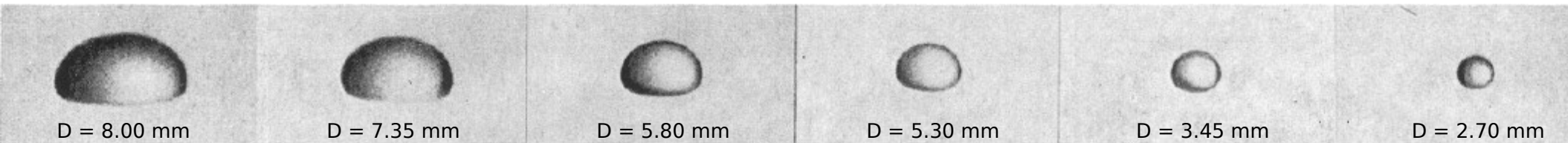
\rightarrow forte réflectivité radar = **bande brillante**

\rightarrow mais flux constant donc **sur-estimation des intensités de pluie**



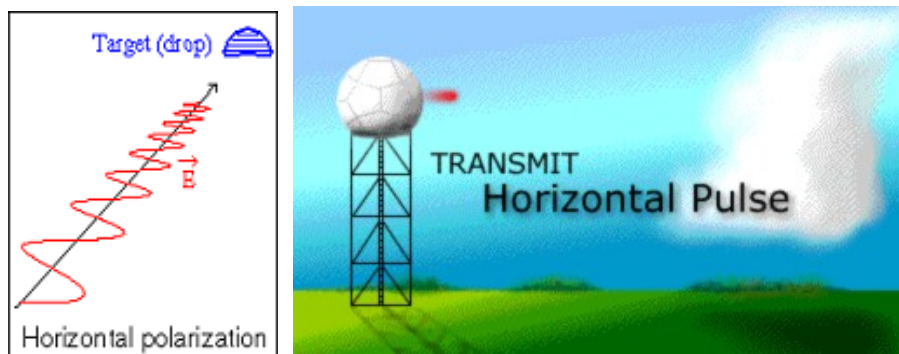


Les grosses gouttes ($> 2\text{mm}$) ne sont pas sphériques

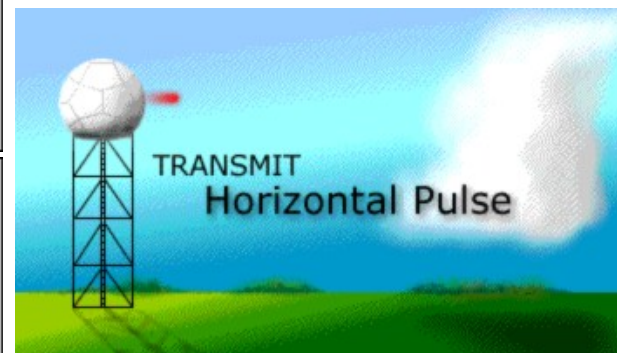
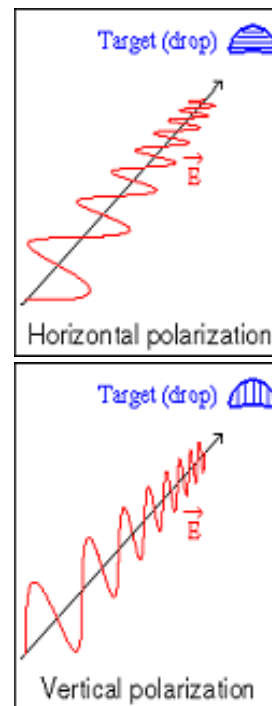


Beard et al., AR, 2010

→ propagation dans le plan horizontal \neq vertical



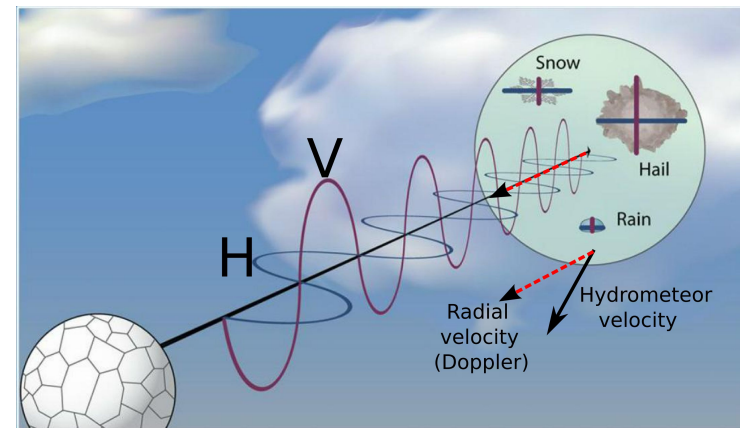
Radar conventionnel



Radar polarimétrique

Radar polarimétrique :

- **Doppler** → mesure de la phase (fréquence).
→ vitesse radiale (effet Doppler).
- **Double polarisation** : horizontale et verticale
→ information sur la forme des cibles.



Variables supplémentaires / radar conventionnel :

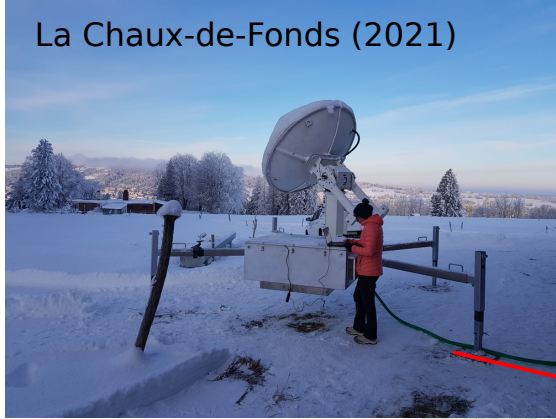
- | | |
|--|-------------|
| - réflectivité différentielle [dB] | Z_{DR} |
| - déphasage différentielle [deg] | Φ_{dp} |
| - coefficient de corrélation co-polarisation [-] | ρ_{hv} |
| - vitesse radiale moyenne [ms^{-1}] | V |
| - largeur spectrale [ms^{-1}] | σ_V |

Informations additionnelles pour améliorer :

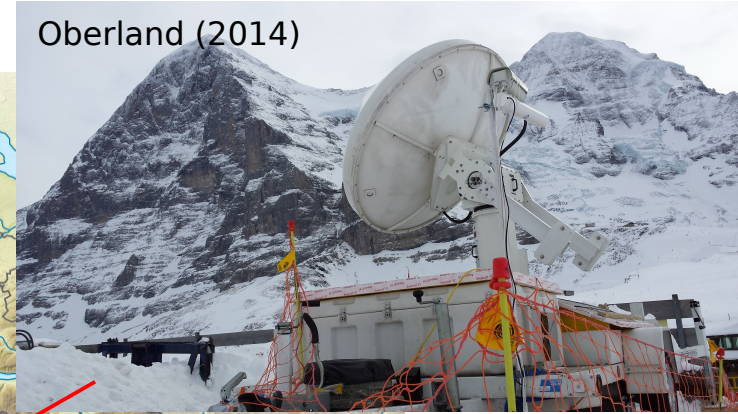
- identification du type d'hydrométéores.
- estimation quantitative des précipitations.

Le radar du LTE a été utilisé dans différentes campagnes de mesure dans les Alpes

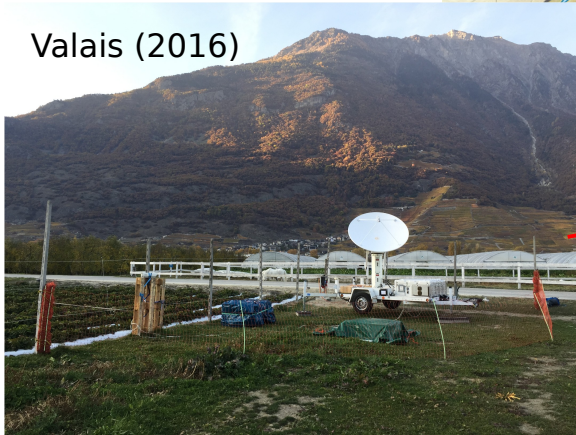
La Chaux-de-Fonds (2021)



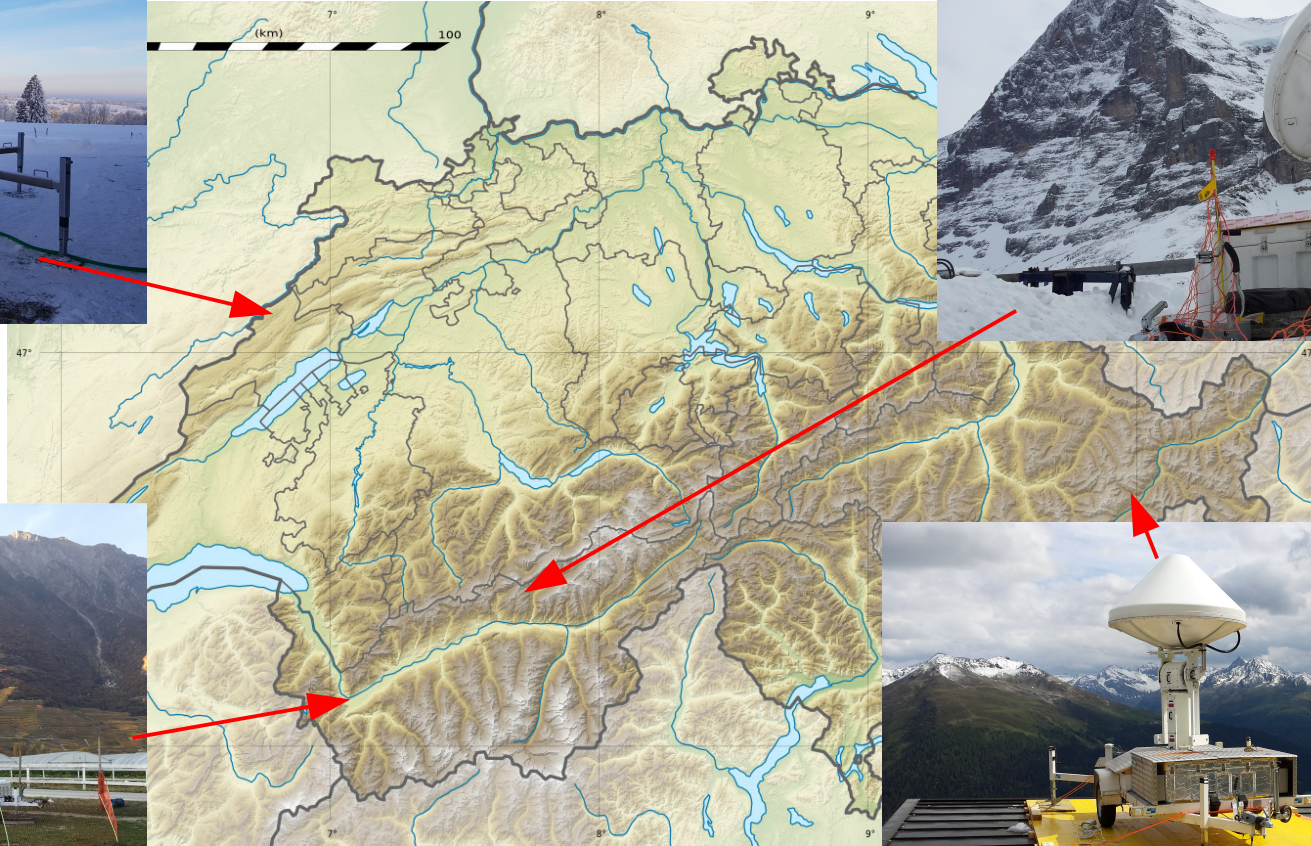
Oberland (2014)



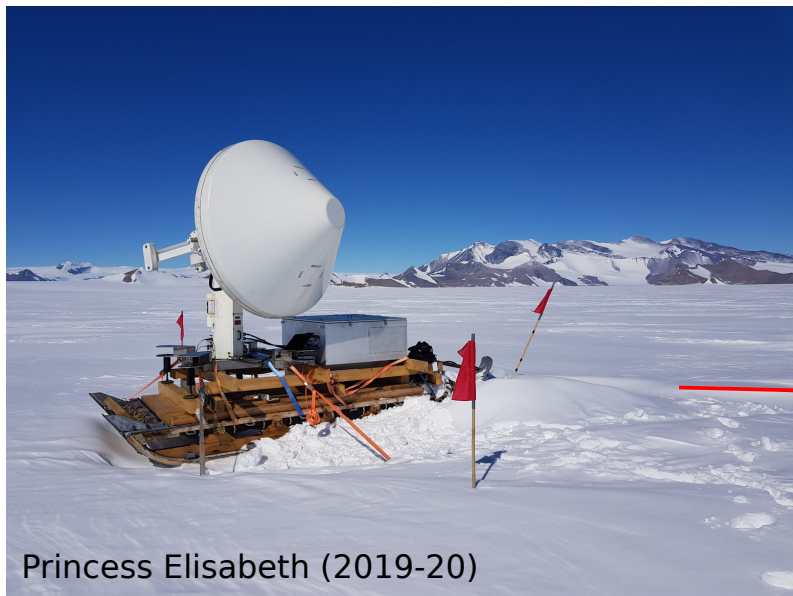
Valais (2016)



Davos (2014)



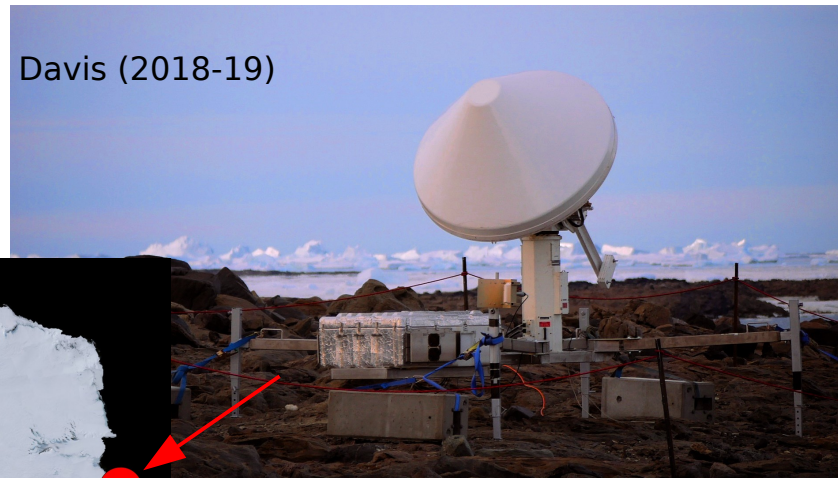
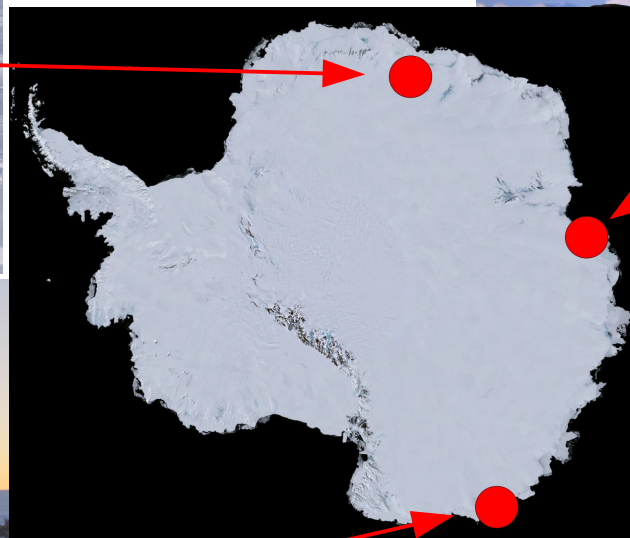
Et en Antarctique...



Princess Elisabeth (2019-20)



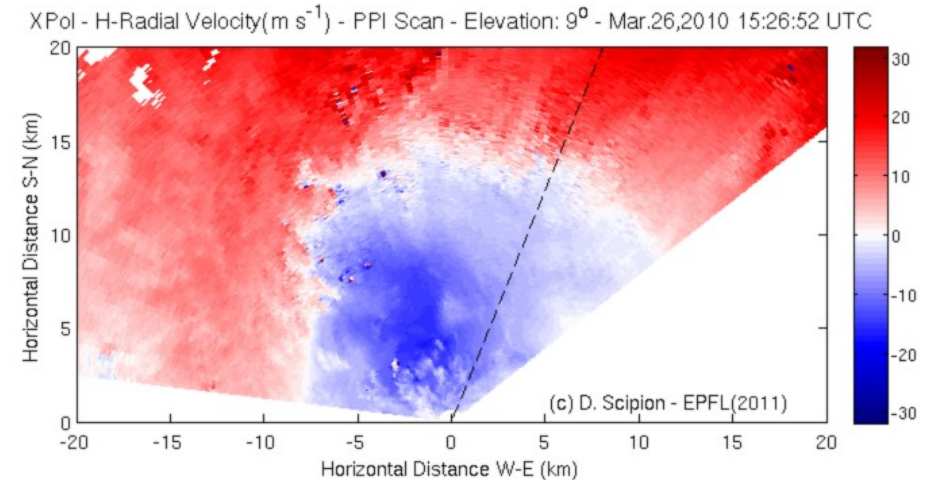
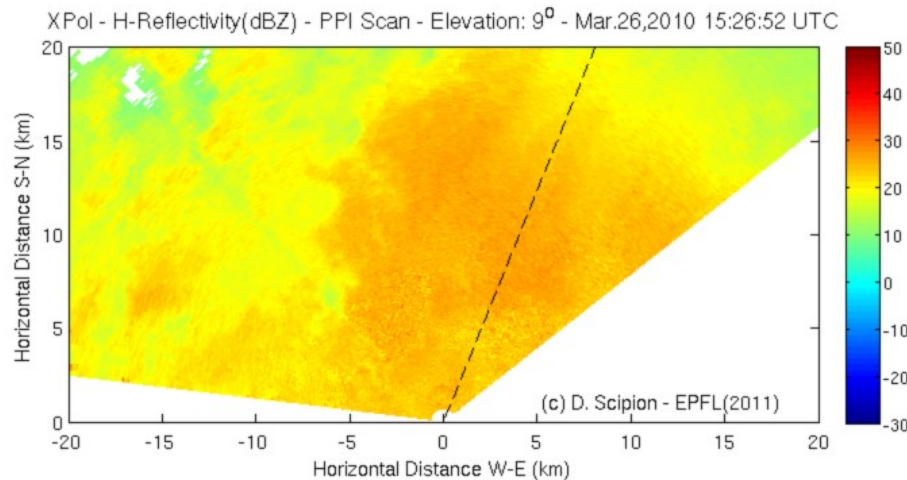
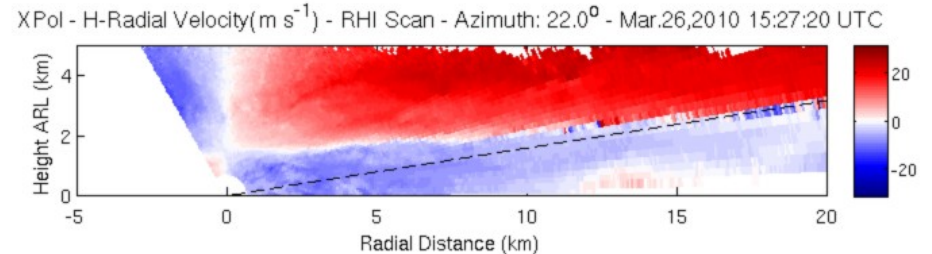
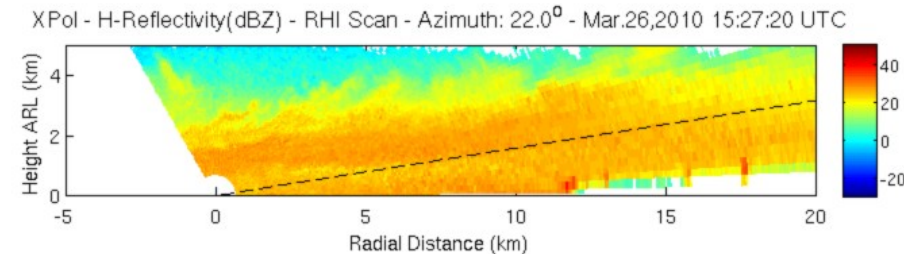
Dumont d'Urville (2015-16)



Davis (2018-19)

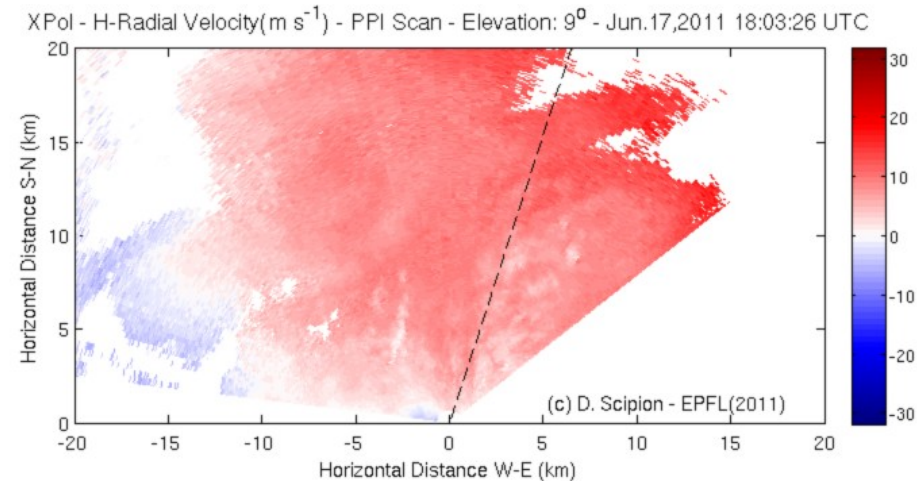
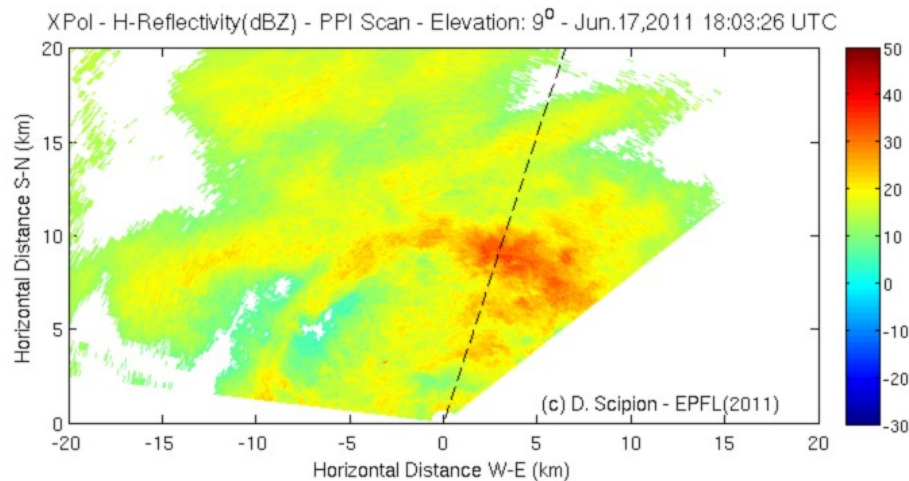
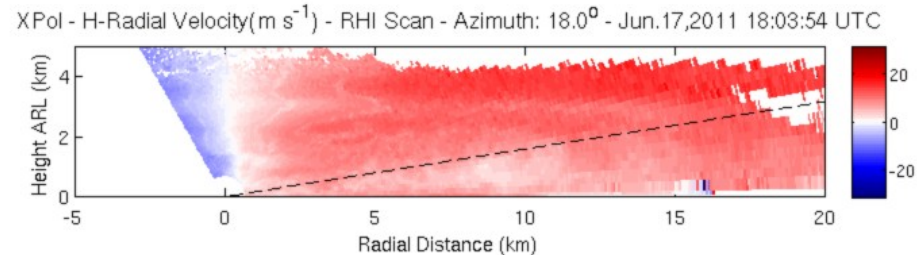
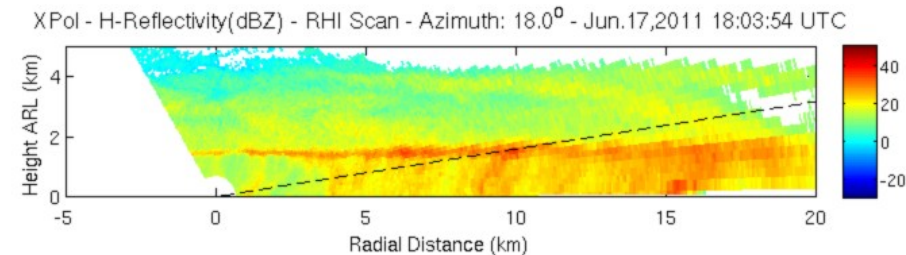
Exemples de données (1)

Davos, 26 mars 2010 : fortes chutes de neige (~ 40 cm de neige fraîche).



Exemples de données (2)

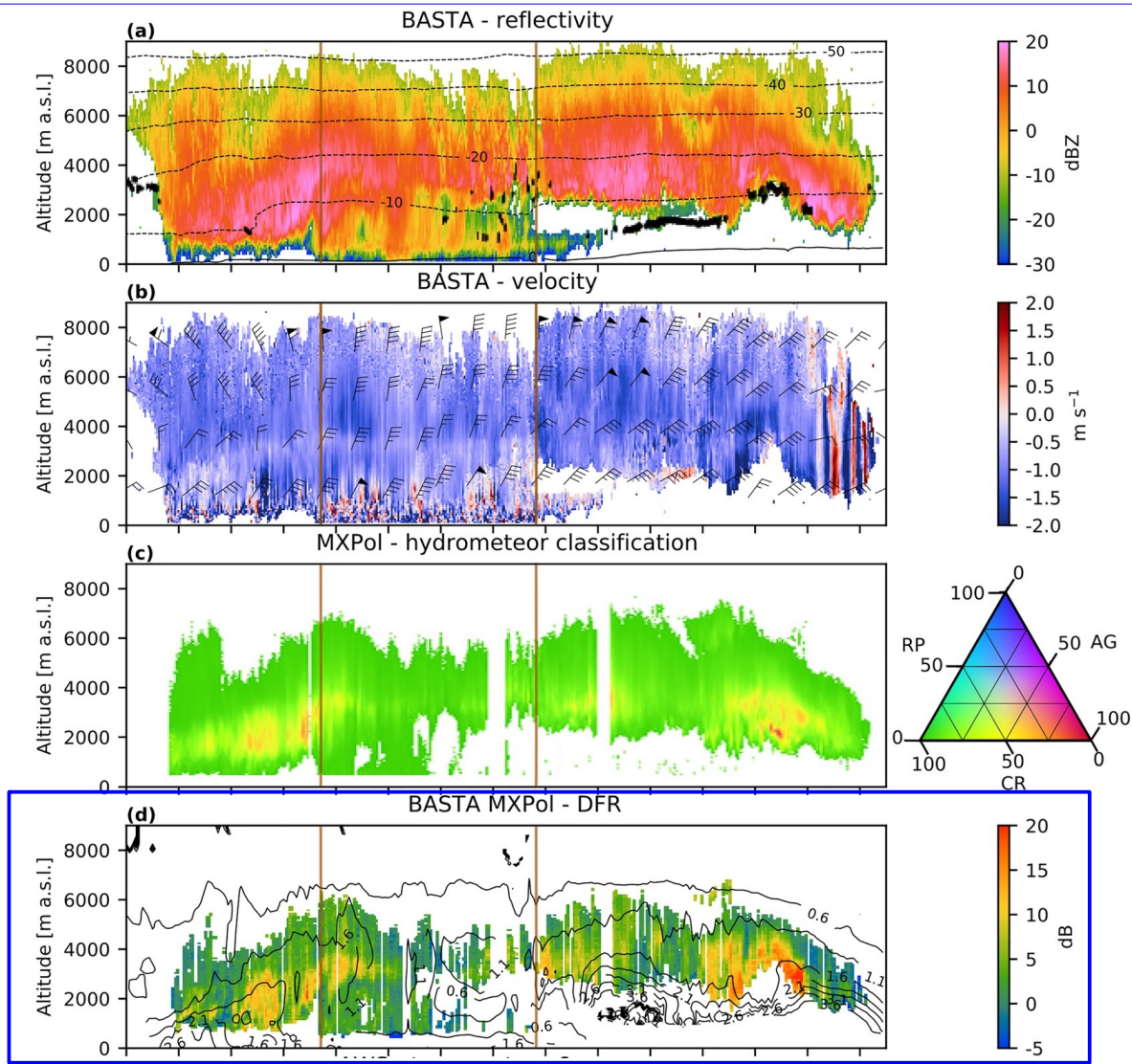
Davos, 17 juin 2011 : précipitation frontales



Davis, 8-10 janvier 2018

(Gehring, 2022)

Exemples de
données multi-fréquences



Questions

1. Quelles sont les sources d'incertitudes dans la mesure de la réflectivité par un radar météorologique ?
2. Qu'est-ce qu'un radar Doppler ?
3. Qu'est-ce que le phénomène de bande brillante pour un radar météorologique ?
4. Pourquoi un radar météorologique à double-polarisation fournit-il plus d'information qu'un radar météorologique conventionnel ?

LIDAR = Light Detection And Ranging

Visible et IR

Principe fonctionnement similaire au radar

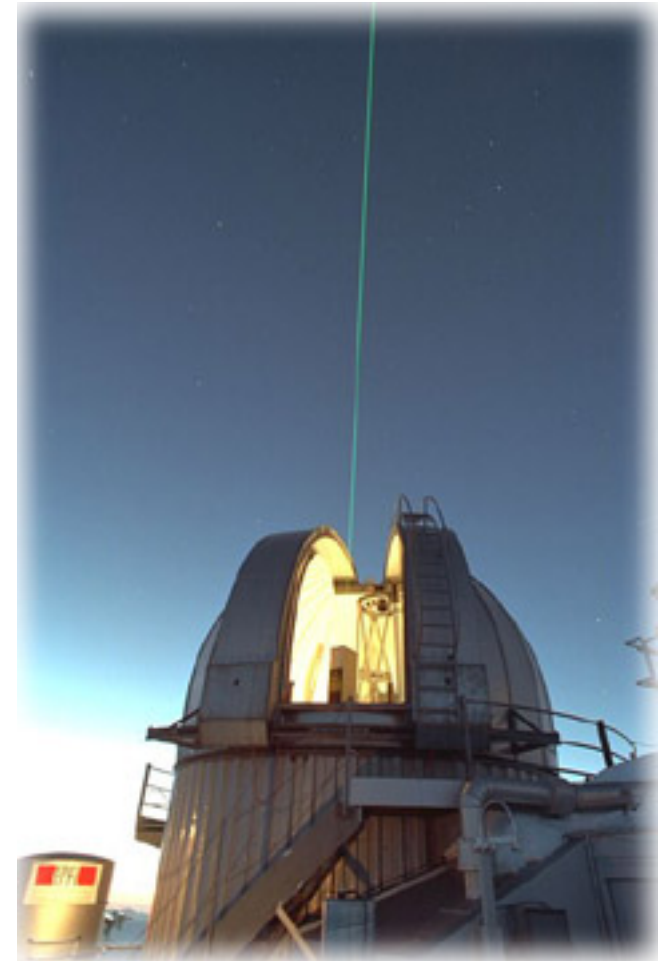
Utilise laser (light **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation).

Longueur d'onde $< 1 \mu\text{m}$

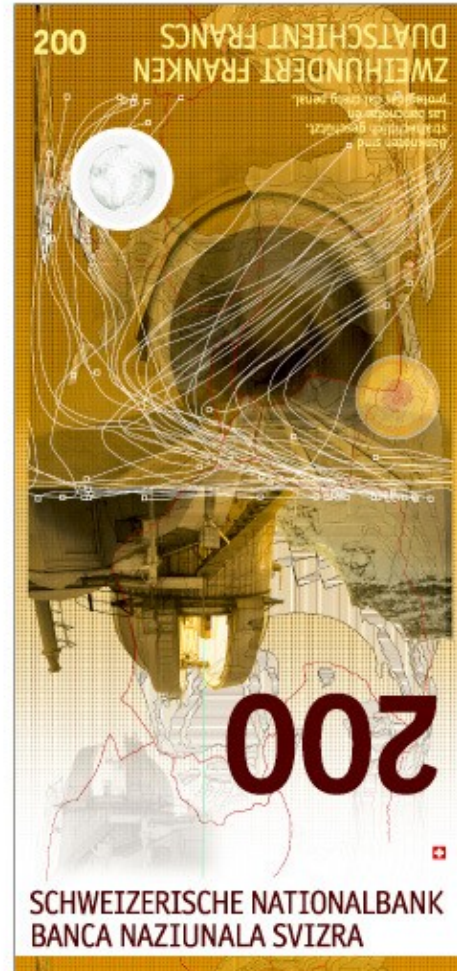
→ interactions avec particules très petites.

Applications :

- Altimétrie haute résolution.
- Chimie/pollution atmosphérique.
- Couche limite atmosphérique.
- Microphysique atmosphérique.



Lidar EPFL , Jungfraujoch



Lidar élastique

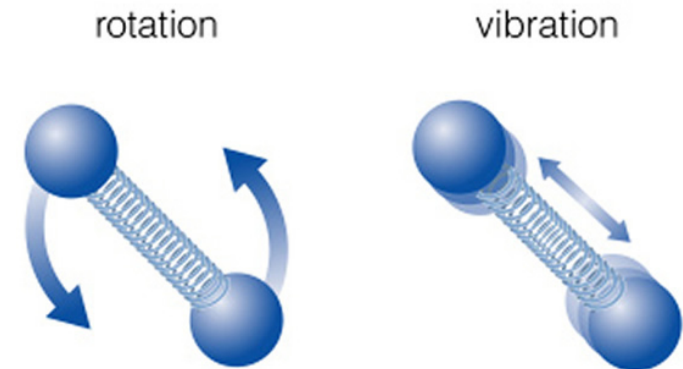
Interaction élastique (sans perte d'énergie) entre signal lidar et cible. Donc fréquence signal réfléchi = fréquence signal incident (excepté décalage Doppler).

Lidar Raman

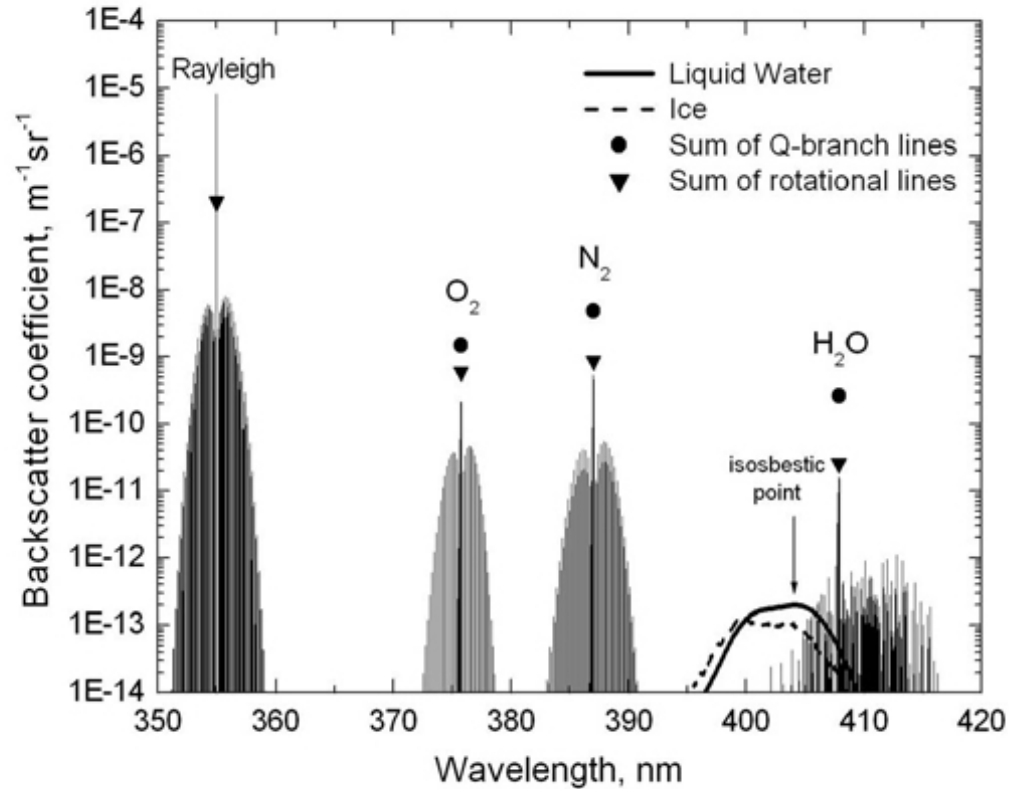
Interaction non-élastique : une partie de l'énergie du signal incident est absorbée puis ré-émise en fonction de la fréquence propre (composition chimique) de la cible → possibilité d'estimer la composition/concentration.

Diffusion rotationnelle : une (petite) partie de l'énergie incidente est utilisée pour faire entrer en rotation les molécules du milieu.

Diffusion vibrationnelle : une (petite) partie de l'énergie incidente est utilisée pour faire entrer en vibration les molécules du milieu.



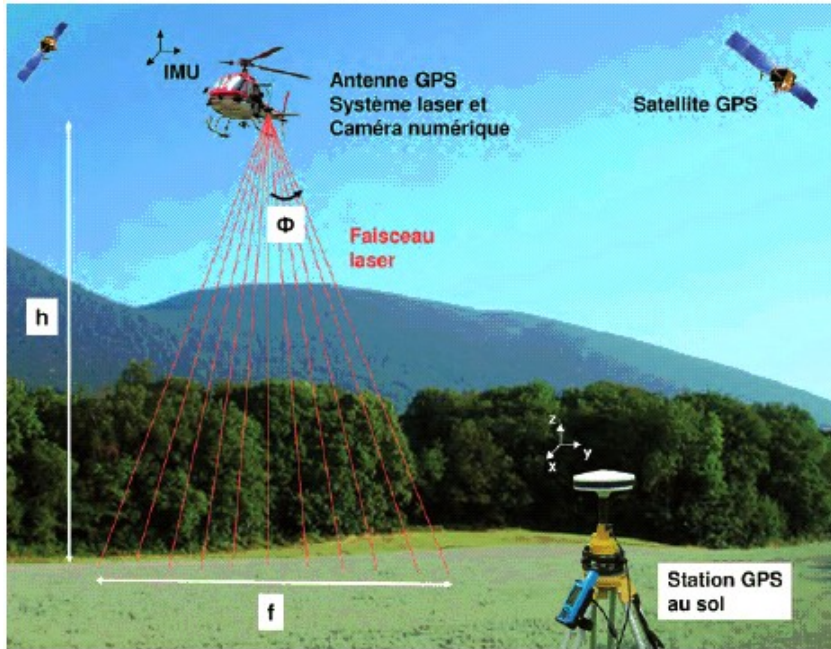
Spectres Raman gaz atmosphériques (long. onde incidente = UV - 355 nm)



<https://www.tropos.de/en/research/projects-infrastructures-technology/technology-at-tropos/remote-sensing/raman-lidar/>

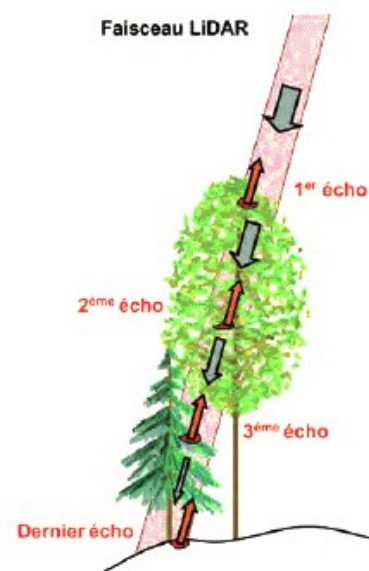
Apport de l'altimétrie par lidar pour la pratique forestière

Tiré de Gachet et Junod, SZF 159 (2), p.19-30.
<http://www.atypon-link.com/SFS/toc/szf/159/2>

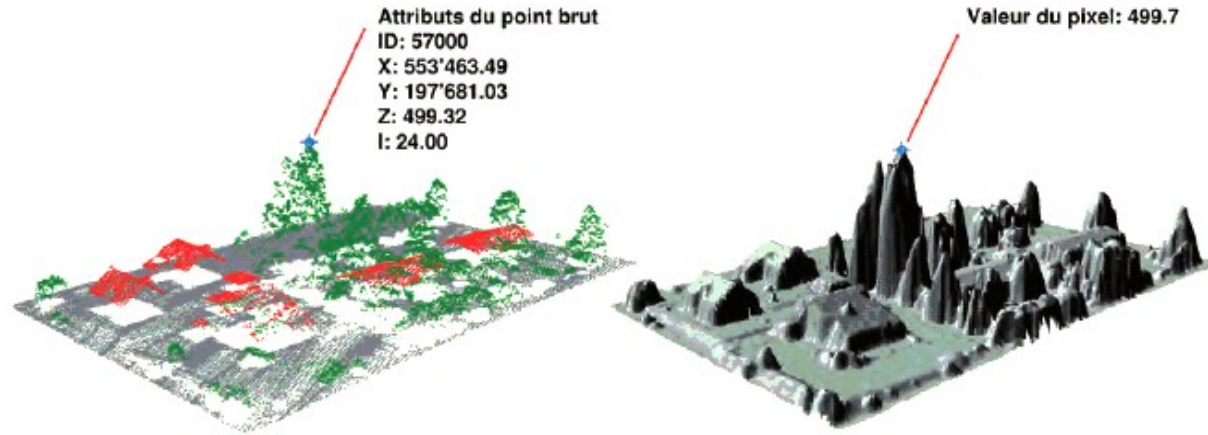


Nécessité positionnement précis (GPS)

Interprétation des échos lidar



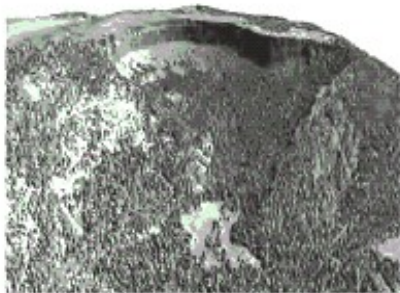
Classification échos de sol / échos objets de surface (végétation, bâtiment).



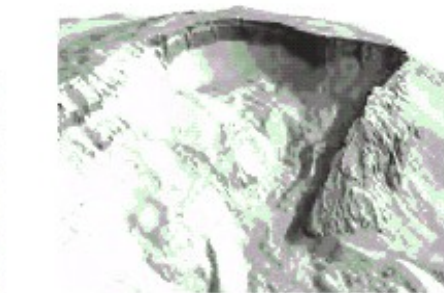
→ obtention

- modèle numérique de terrain (MNT)
- modèle numérique de surface (MNS)
- modèle numérique de hauteur (MNH)

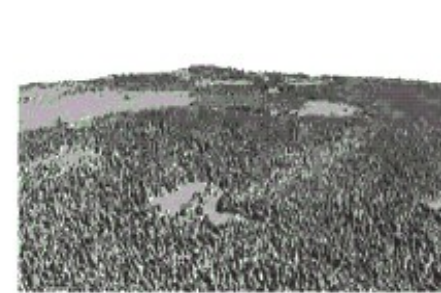
Ex : Creux du van



MNS



MNT



MNH

-

=

Recherche archéologique



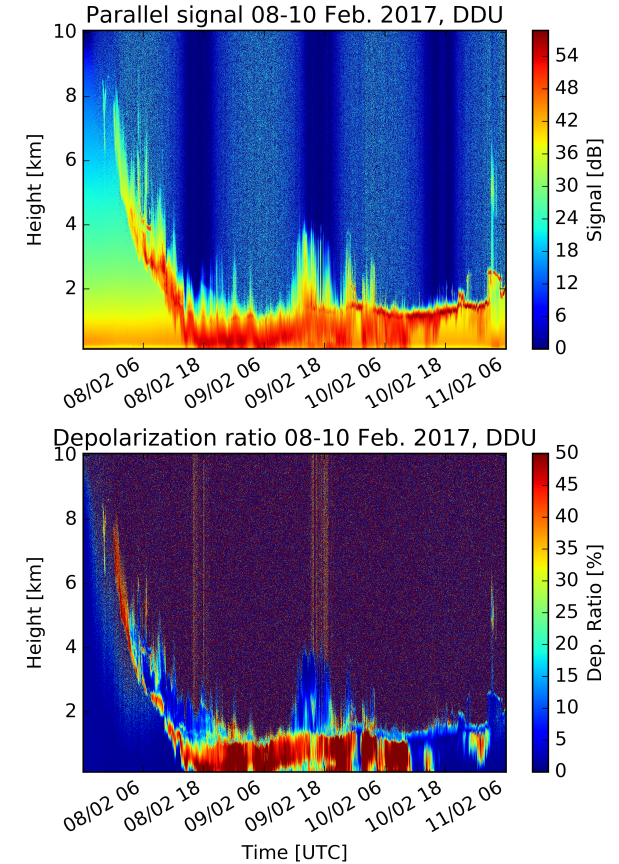
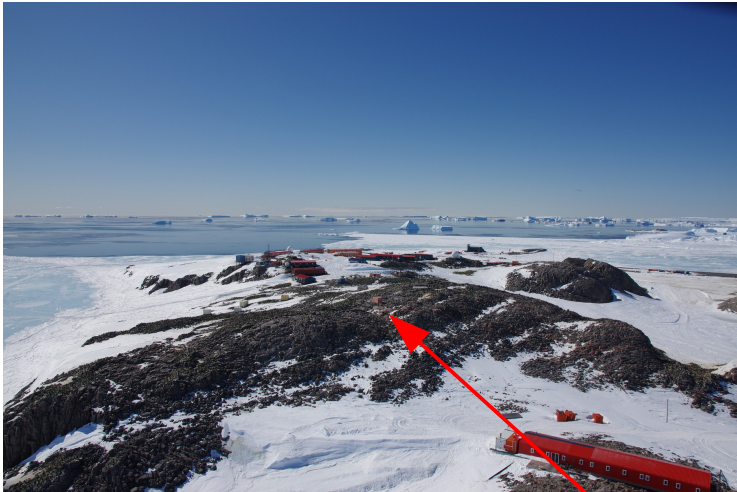
Aguada Fénix (Mexique) : site maya majeur découvert grâce à l'imagerie lidar
(Inomata, Nature, 2020)

Lidar élastique à dépolarisation pour mesure atmosphérique, EPFL-LTE

Mesure **rétrodiffusion** et **rapport de dépolarisation linéaire**

Résolution : 3.8 m + 10 s, sur troposphère (0.1 – 10 km).

Station Dumont d'Urville, Antarctique



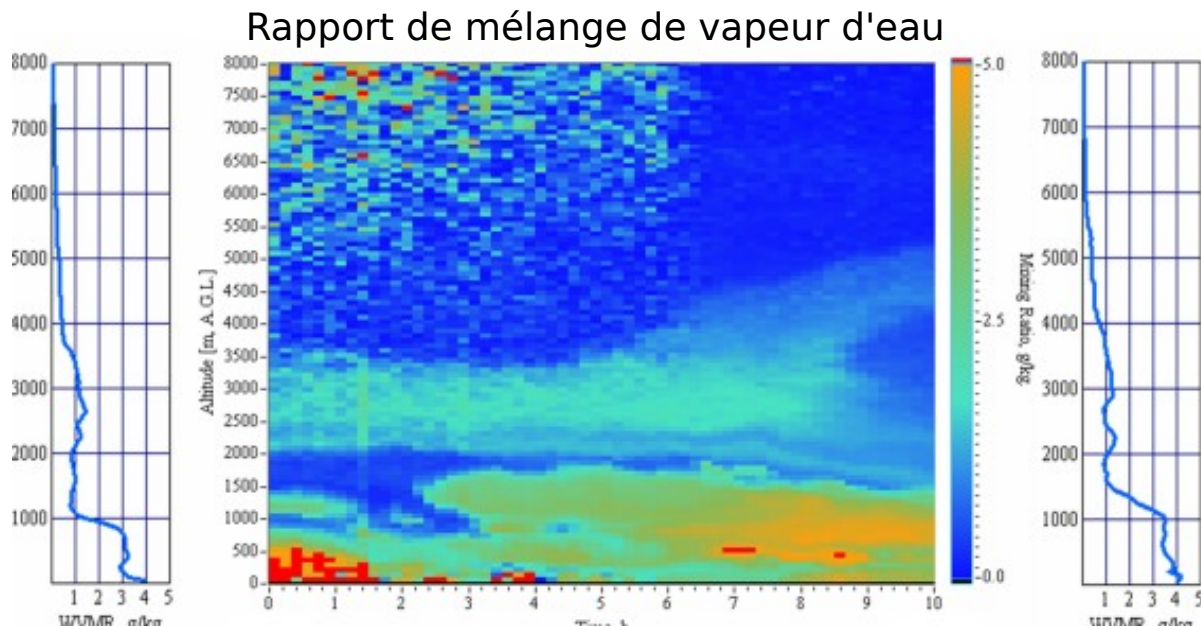
Lidar Raman pour mesure atmosphérique, Météo Suisse - Payerne.

Raman Lidar for Meteorological Observations (RALMO)

Mesure **vapeur d'eau** et **aérosols** avec haute résolution 150 – 600 m
15 – 60 min

Troposphère (0 – 10 km)

Système opérationnel



1. Qu'est-ce qu'un lidar Raman ?
2. Pourquoi le lidar est-il utile pour déterminer l'altitude du terrain, le couvert végétal et le bâti ?
3. Pourquoi un lidar permet d'obtenir des informations sur les aérosols alors qu'un radar météorologique non ?

1. Principes de la mesure de télédétection active

- a) Antenne à ouverture réelle, synthétique (SAR), interférométrie (spatiale ou temporelle).
- b) Mesure de la distance, résolution radiale et angulaire.

2. Déformations

- a) Géométriques : repliements de type 1 et 2 (en fonction de la hauteur et de la distance au radar).
- b) Radiométriques : chatoiement (lié à des interférences).

3. Radar météorologique

- a) Facteurs influençant la mesure : taille, concentration, phase des hydrométéores.
- b) Réseaux opérationnels en Suisse, Europe et USA.
- c) Sources d'incertitudes : atténuation, interactions avec le relief/sol, variabilité verticale + conversion en intensité de pluie, bande brillante (fusion neige en pluie).
- d) Radar polarimétrique (non-sphéricité des hydrométéores → réponse différente suivant polarisation).

4. Lidar

- a) Élastique (on néglige les pertes d'énergie) ou Raman (énergie incidente ré-émise à fréq. propre).
- b) Applications environnementales : suivi surface (foresterie, bâti), dynamique et pollution atmosphériques.