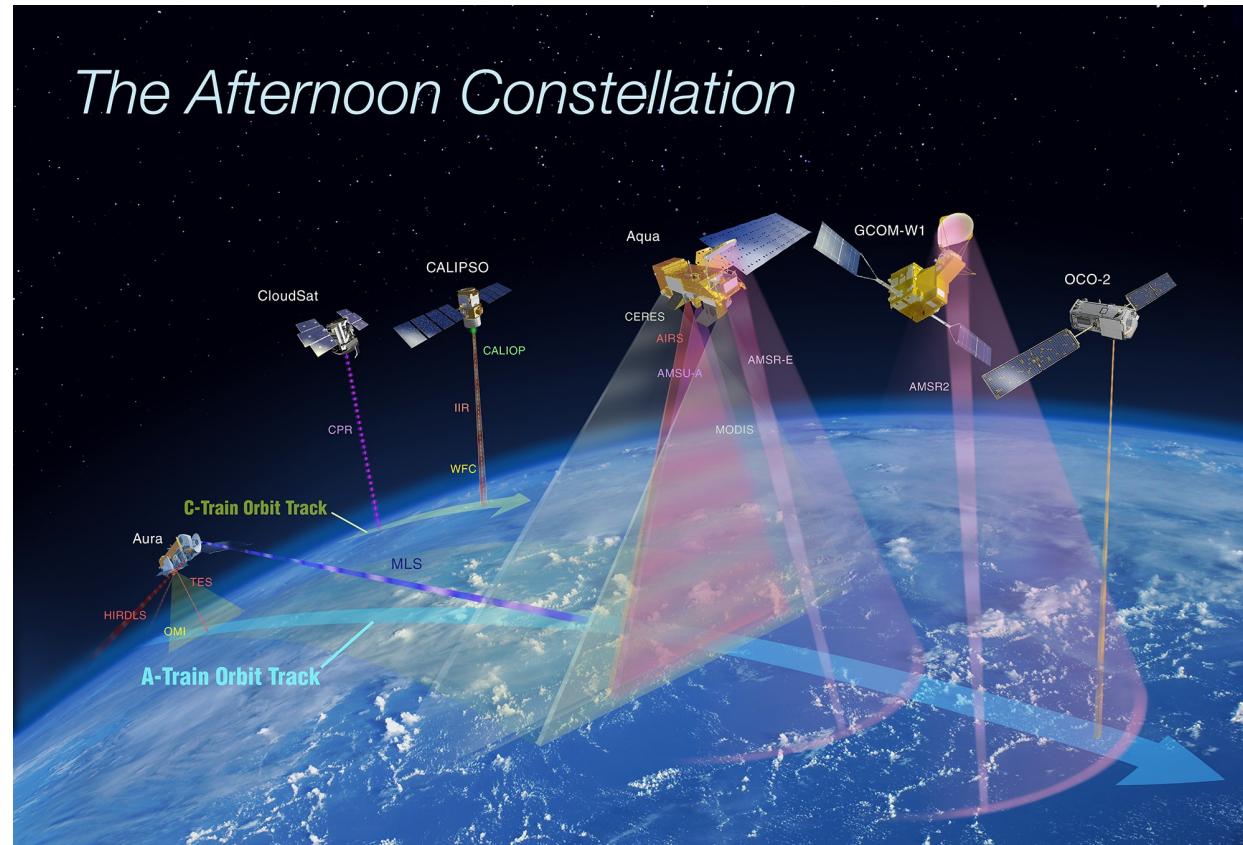


Plan du chapitre :

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



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...

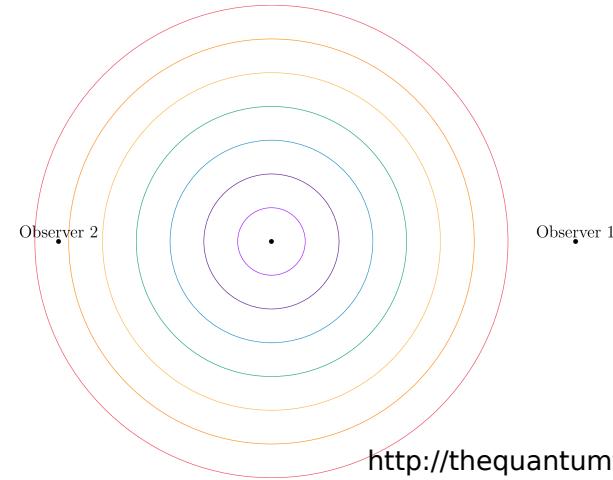
Système actif permet de mesurer les caractéristiques du signal reçu au capteur en fonction du temps. Vitesse de propagation du signal connue
 → mesure de la distance entre capteur et cible.

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

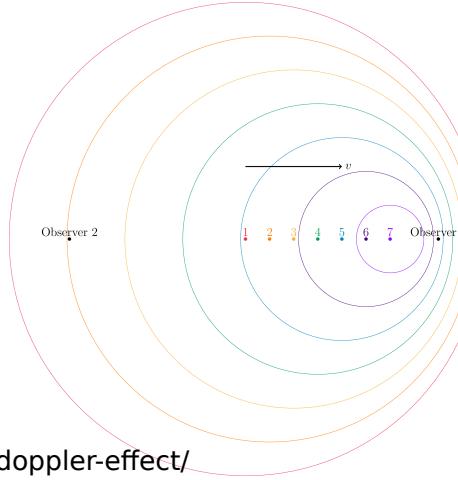
Système conventionnel : mesure de l'amplitude du signal reçu.

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



<http://thequantumtunnel.com/doppler-effect/>

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

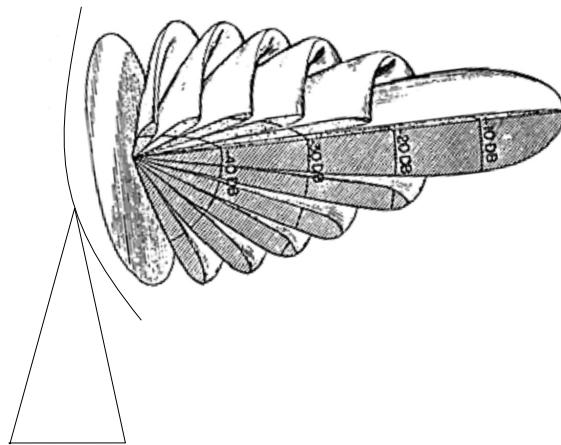
$$dr = \frac{c\tau}{2}$$

→ résolution transversale au sol, inclinaison α

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

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

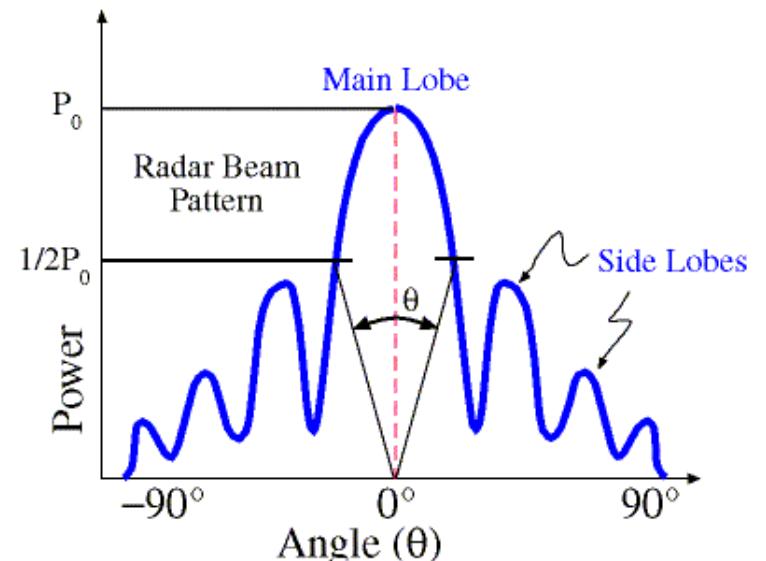
Influence de l'antenne : diagramme de rayonnement



$$dB = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) = 10 \times \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) / \ln(10)$$

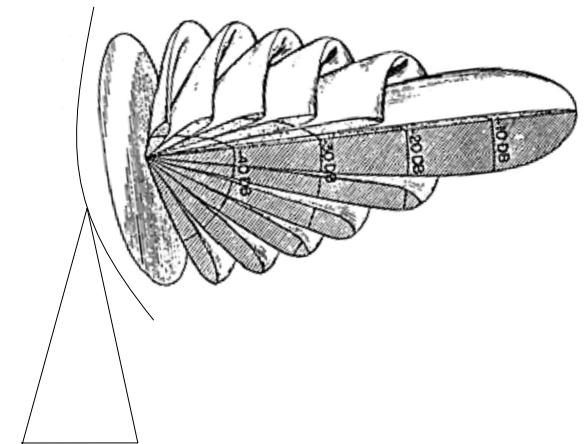
Ouverture à 3 dB du faisceau (θ_{3dB}) : angle pour lequel puissance est la moitié de celle dans l'axe de l'antenne (~70-90% énergie).

Lobes secondaires : “pics” secondaires de puissance.



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

Diagramme de rayonnement d'une antenne



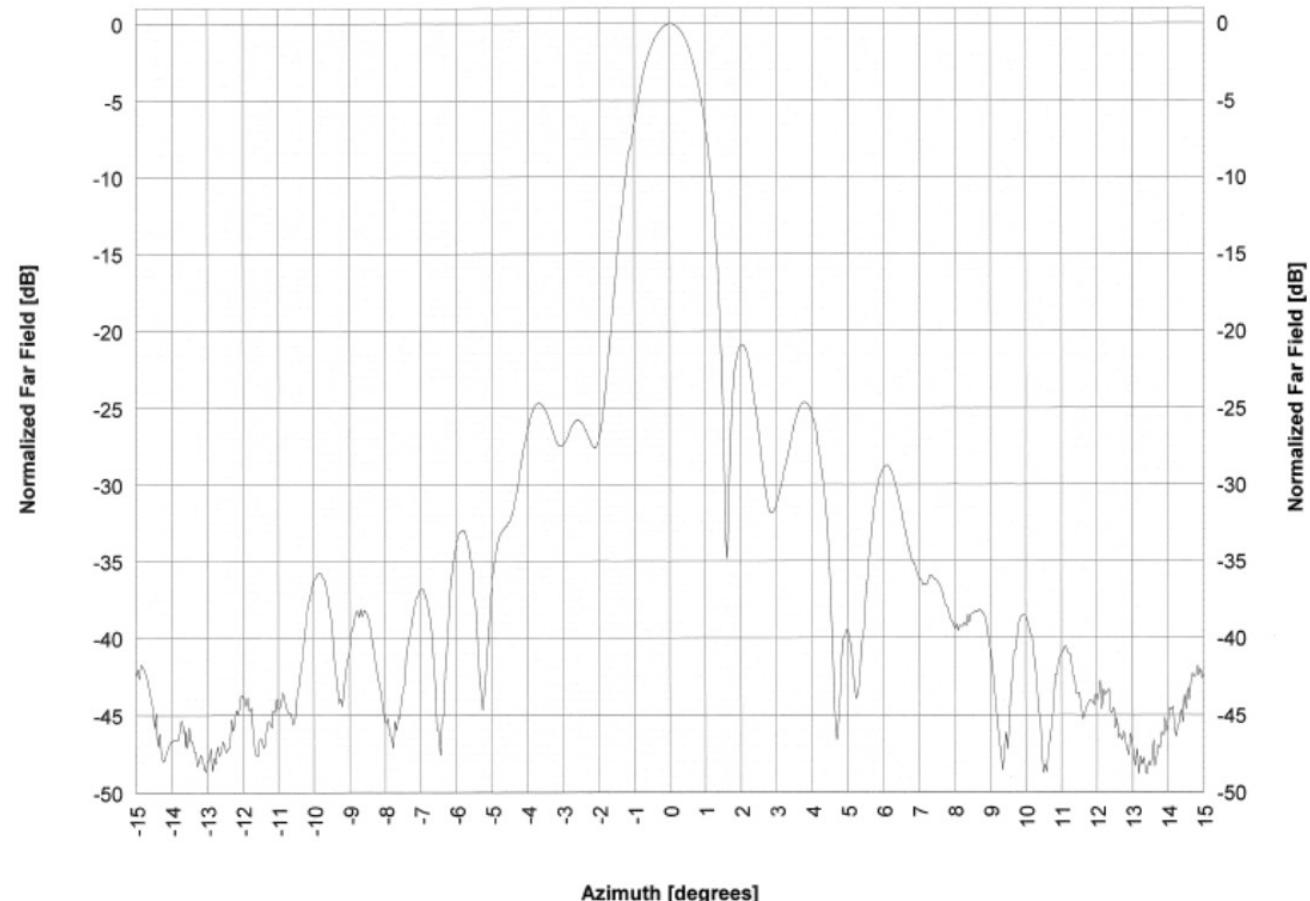


V port E Plane

9.41 GHZ

Chart #3

Diagramme de rayonnement
de l'antenne du radar du LTE



Résolution angulaire d'un capteur à ouverture réelle

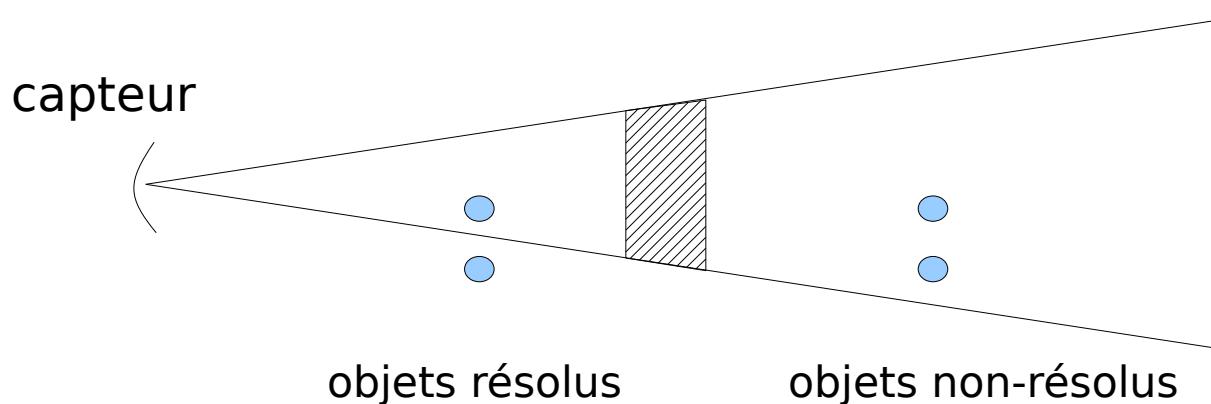
Émission : on montre que

$$\theta_{3dB} \simeq \frac{\lambda}{L}$$

L = taille de l'antenne

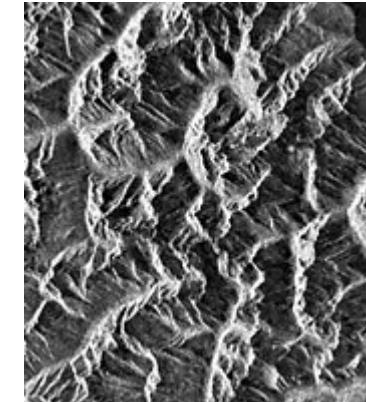
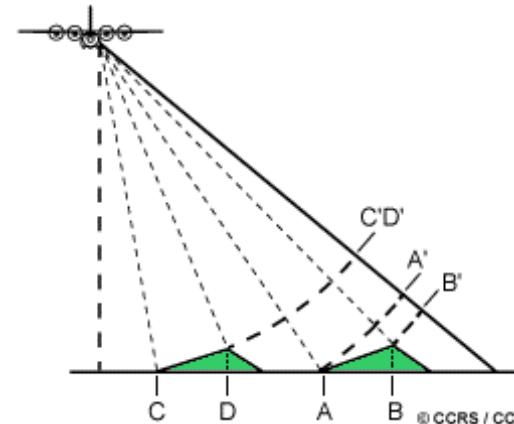
À une distance d du capteur

$$r_a = \theta_{3dB} d \simeq \frac{\lambda d}{L}$$

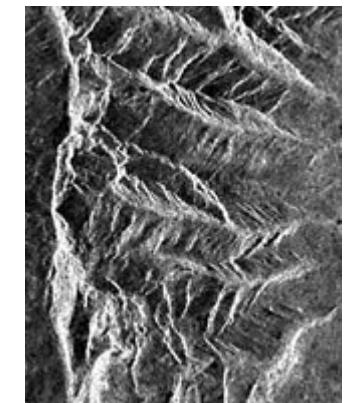
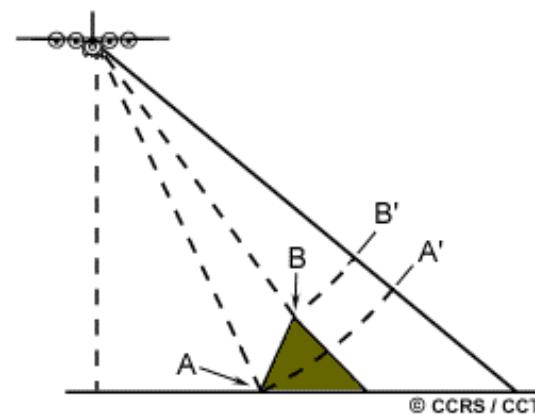


Erreurs géométriques dans l'imagerie des systèmes actifs

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

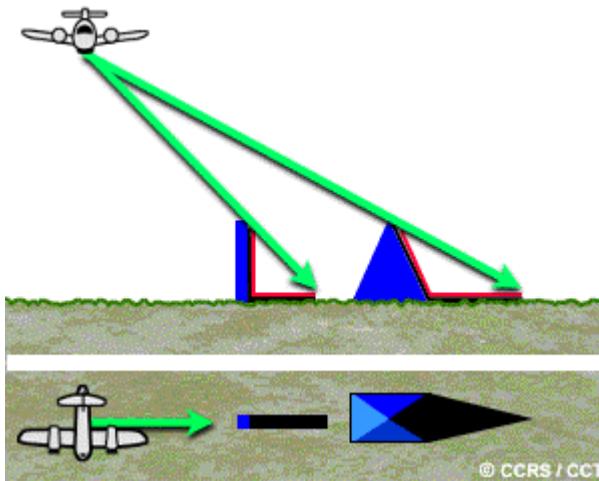


Repliement 1 (layover) :
points + haut = distance + courte.

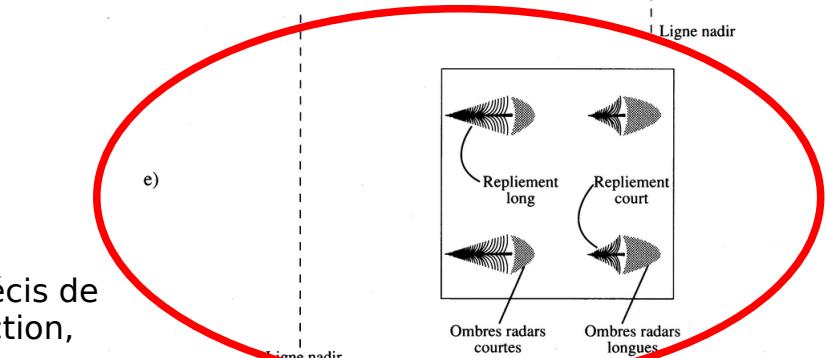
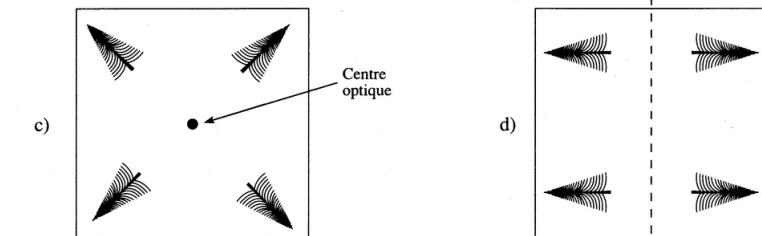
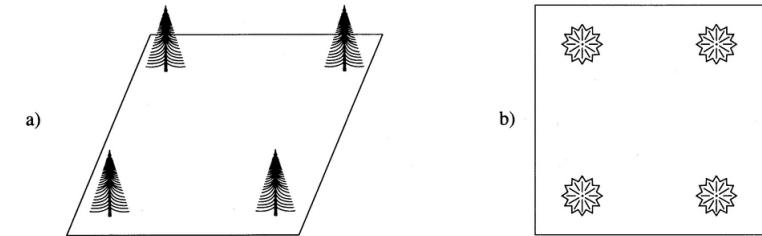


<https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellite-photos-aer/tutoriels-sur-la-teleetection/teleetection-par-hyperfrequence/distorsion-des-images-radar/9326>

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



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



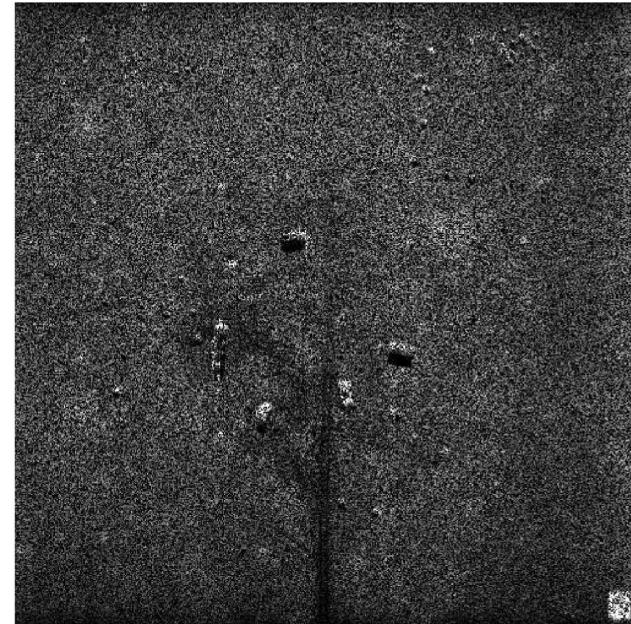
Bonn, Précis de télédétection, vol.1

Erreurs radiométriques dans l'imagerie des systèmes actifs

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



(a)



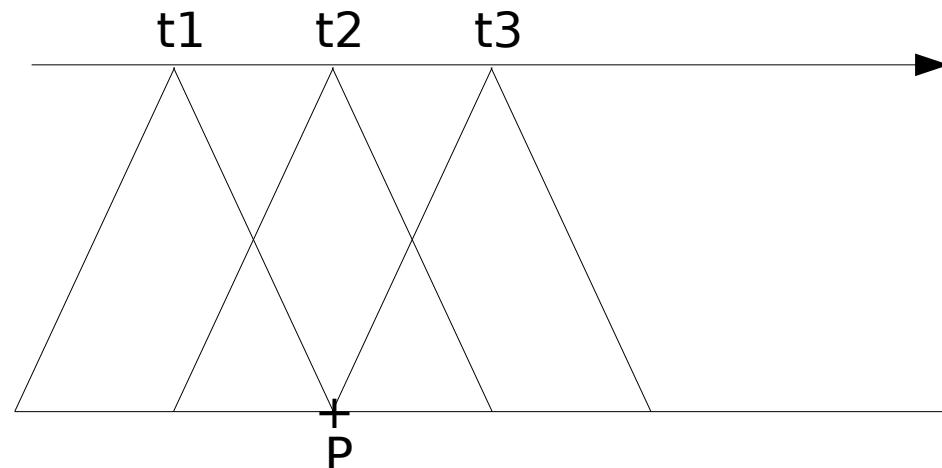
(b)

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 → **Synthetic Aperture Radar** ou SAR en anglais)

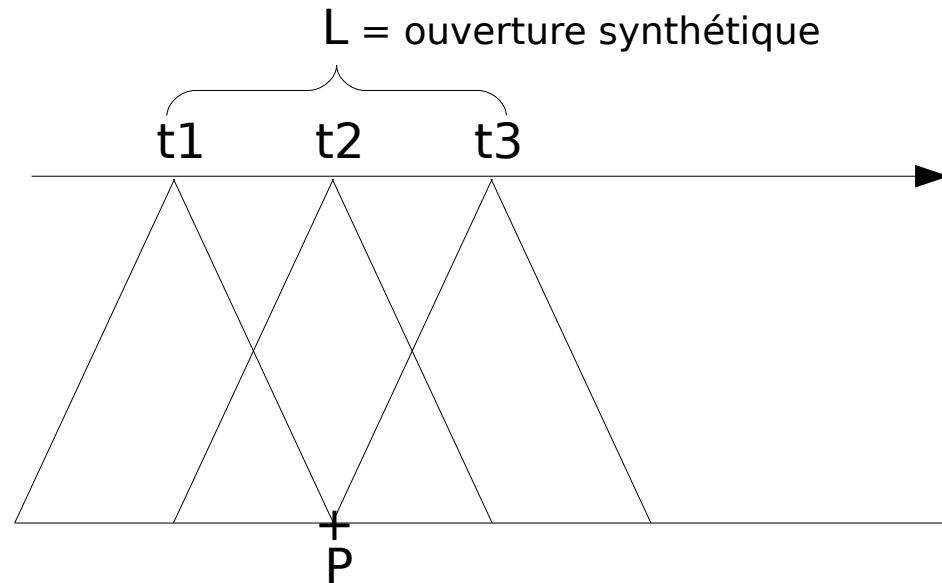
Antenne réelle avec résolution angulaire limitée + déplacement de la plateforme
→ un même point P est illuminé plusieurs fois.



Capteur à antenne synthétique (ouverture synthétique)
(souvent radar → **Synthetic Aperture Radar** ou SAR en anglais)

Fréquence signal réfléchi par P = f (vitesse / 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

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

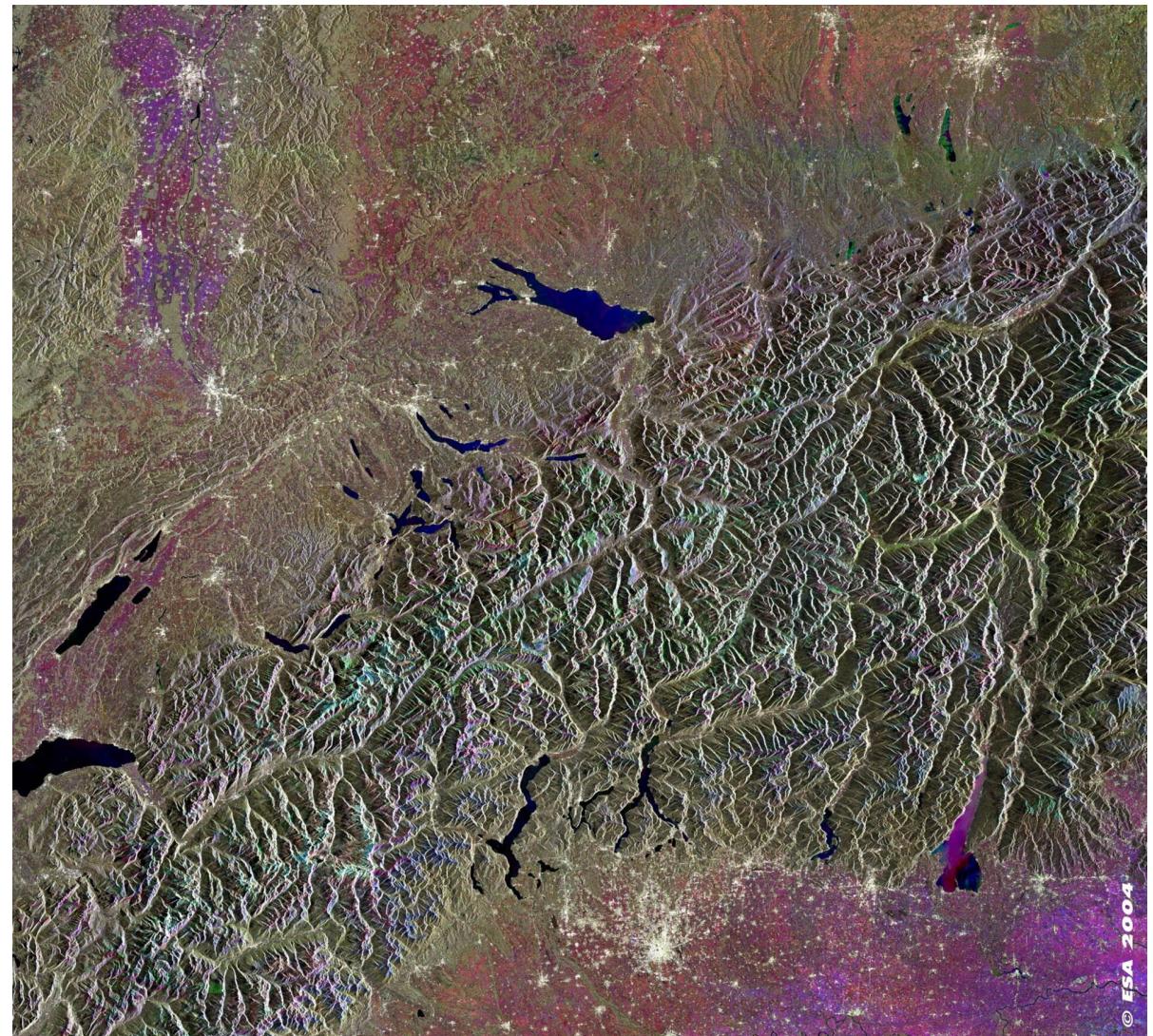
l est la taille de l'antenne réelle.

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

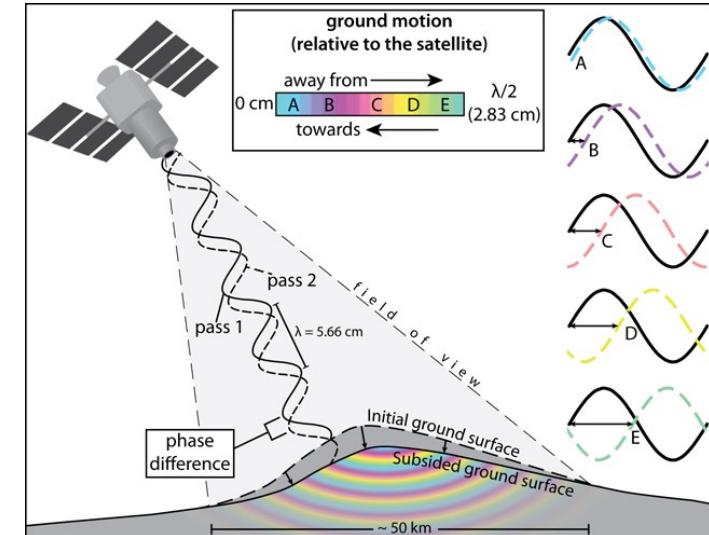
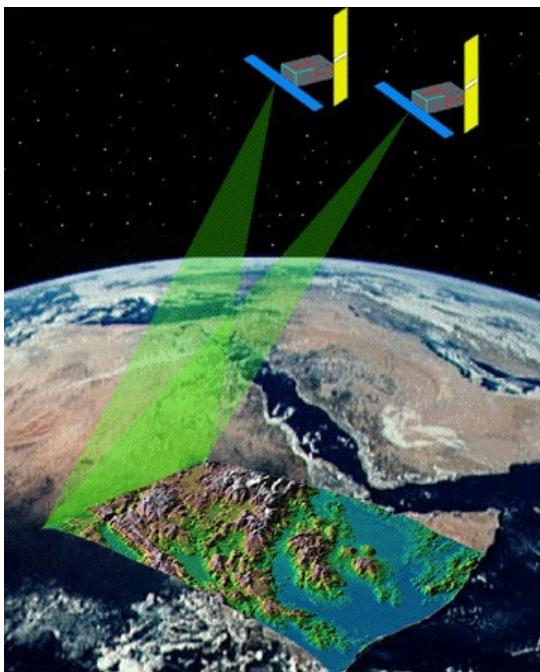


http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/05/Switzerland_-_ASAR_-_29_January_2004

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.

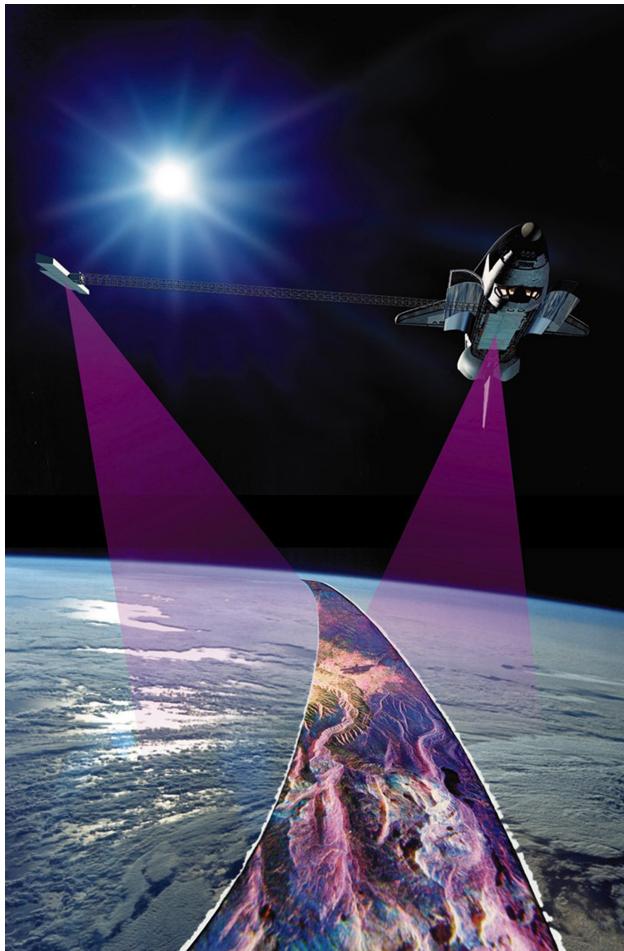
Le déphasage entre 2 signaux = $f(\text{diff. de distance entre les 2 images})$.

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

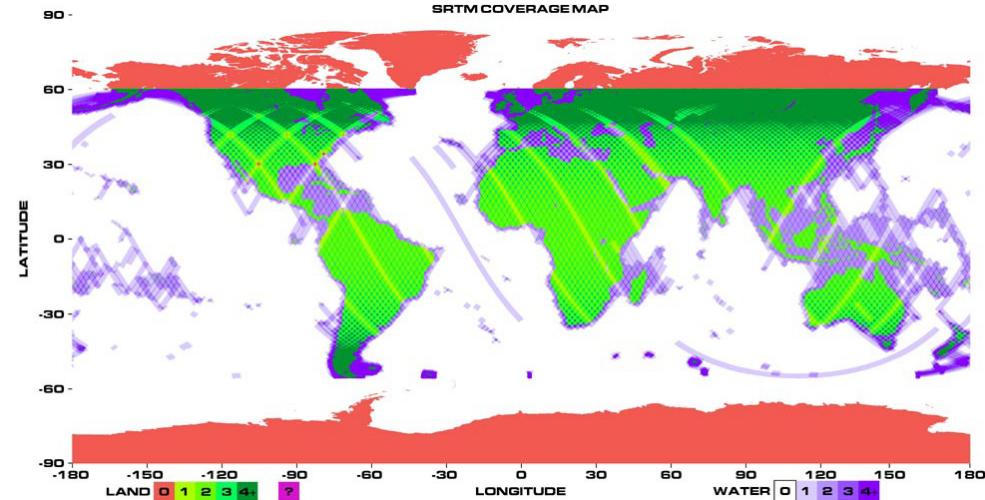
→ prendre en compte nb de repliements...

→ 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>



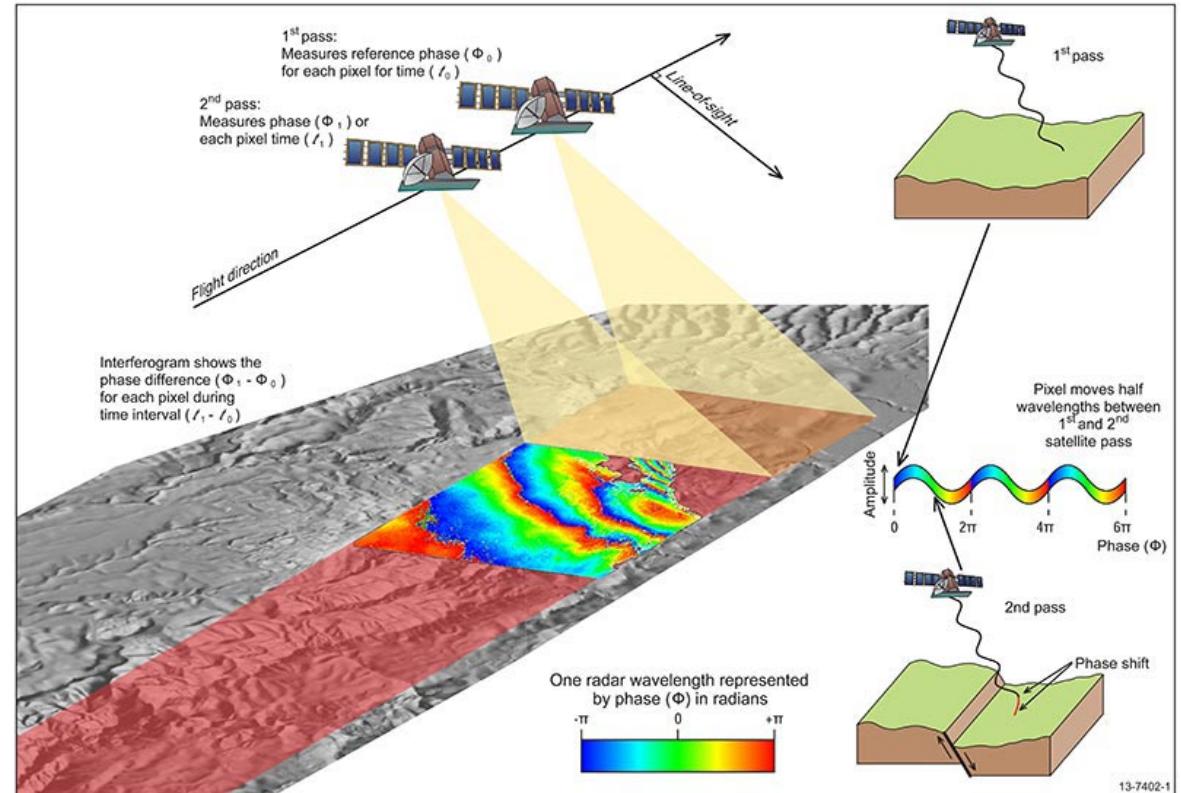
Christoph Hormann <chris_hormann@gmx.de>

Interférométrie temporelle

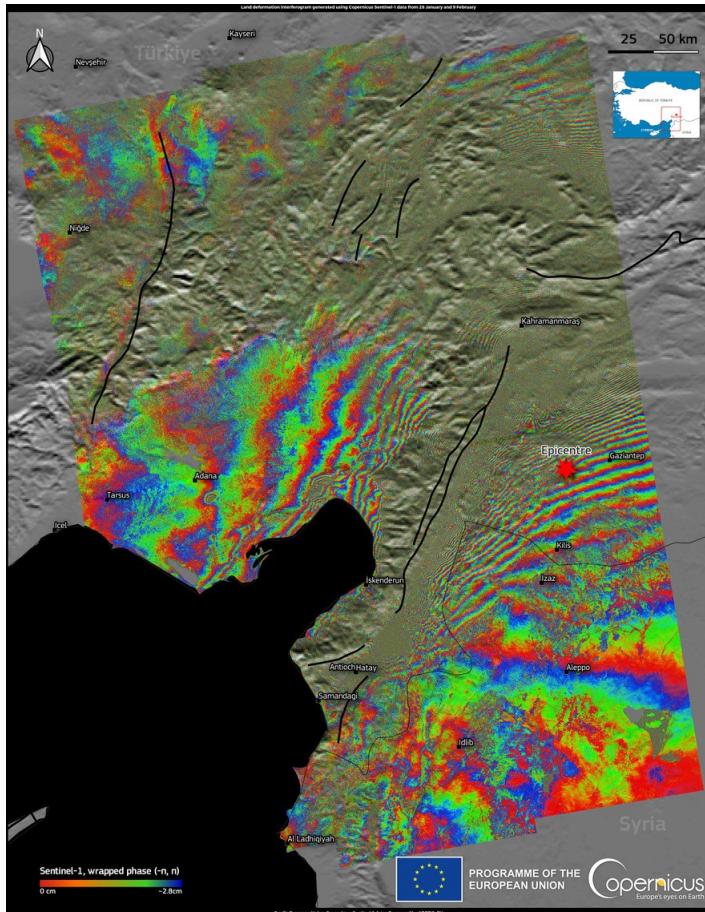
2 images de la même zone prises de la même position mais à deux dates différentes.

→ 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



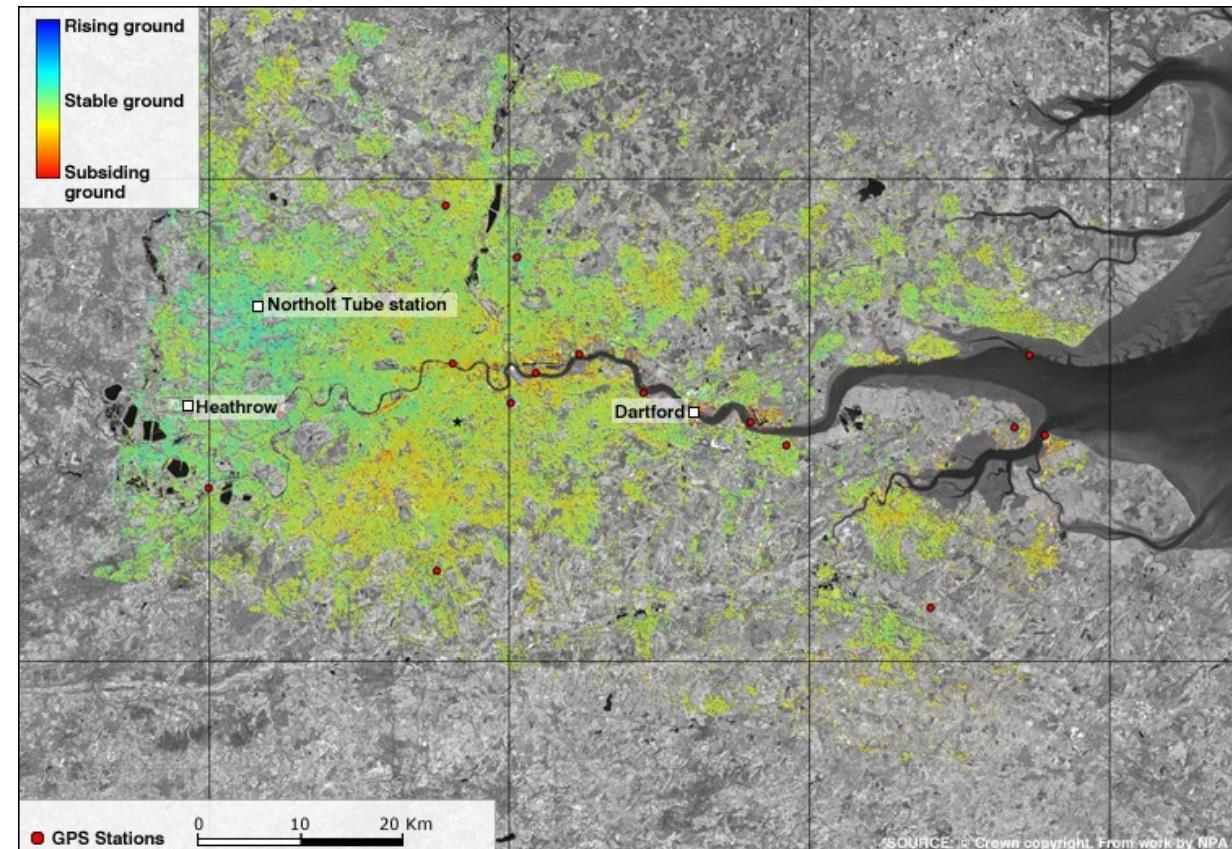
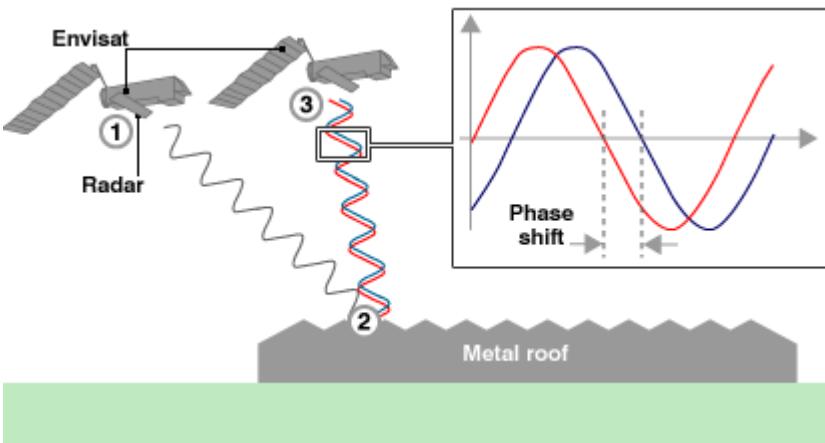
Séisme Gaziantep, Turquie, 2023
Images Sentinel 1A, Copernicus

Mesure déplacement bâtiment



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

Interférométrie + ouverture synthétique = InSAR



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

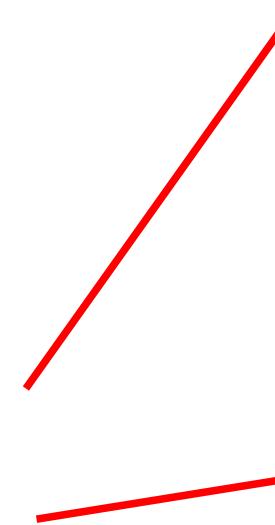
8-12 GHz 3.75-2.50 cmX Band

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

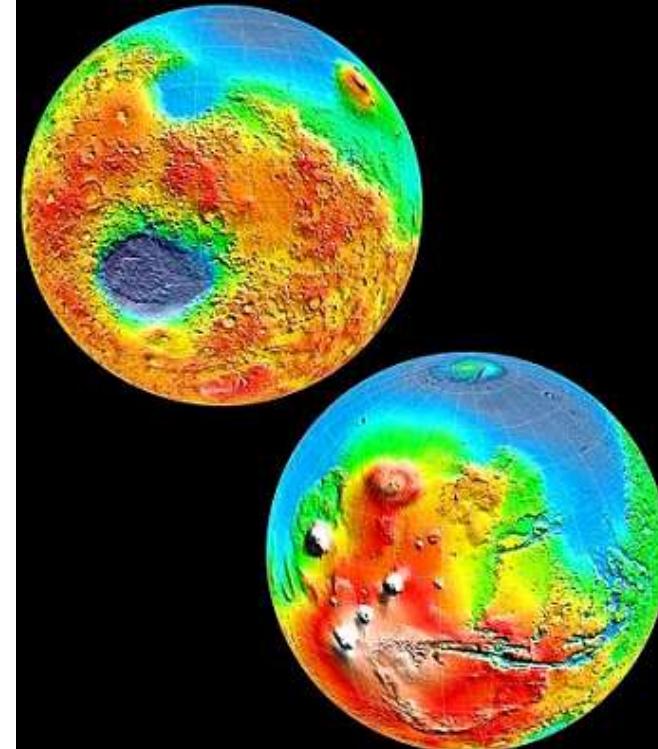


Radar altimétrique

ex : Mars express



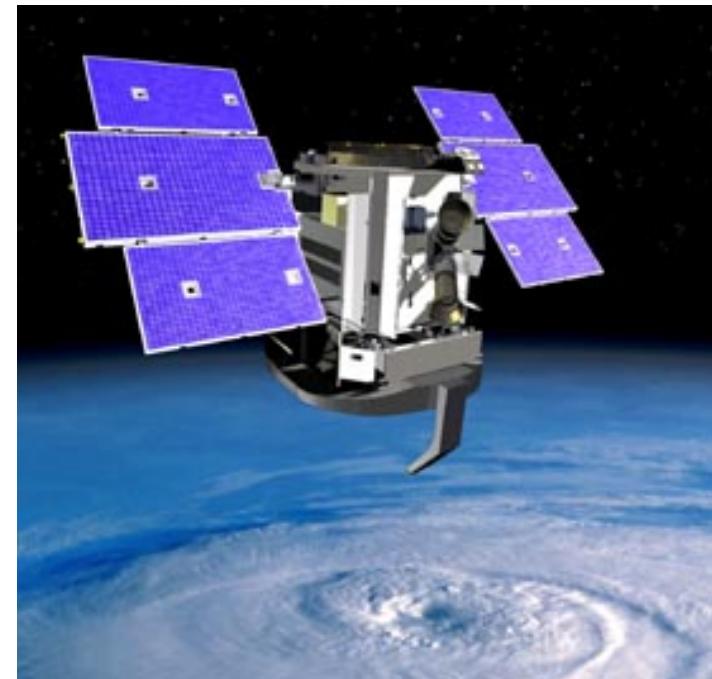
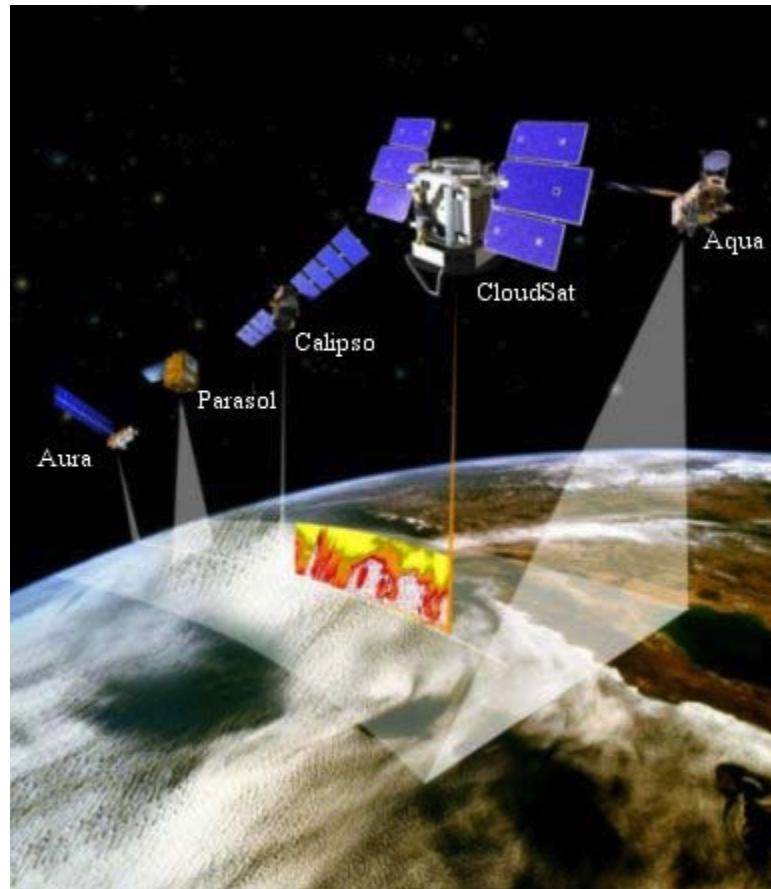
Courtesy of ESA



Courtesy of NASA/MGS

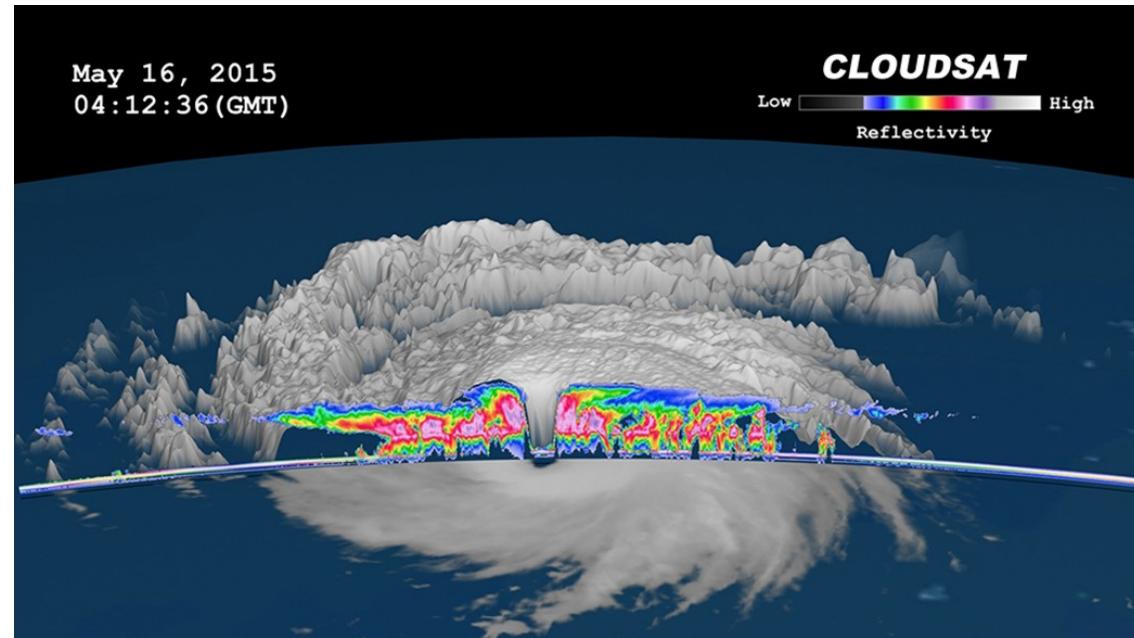
Radar pour l'étude des nuages (cloud radar)

ex : cloudsat (A-train)

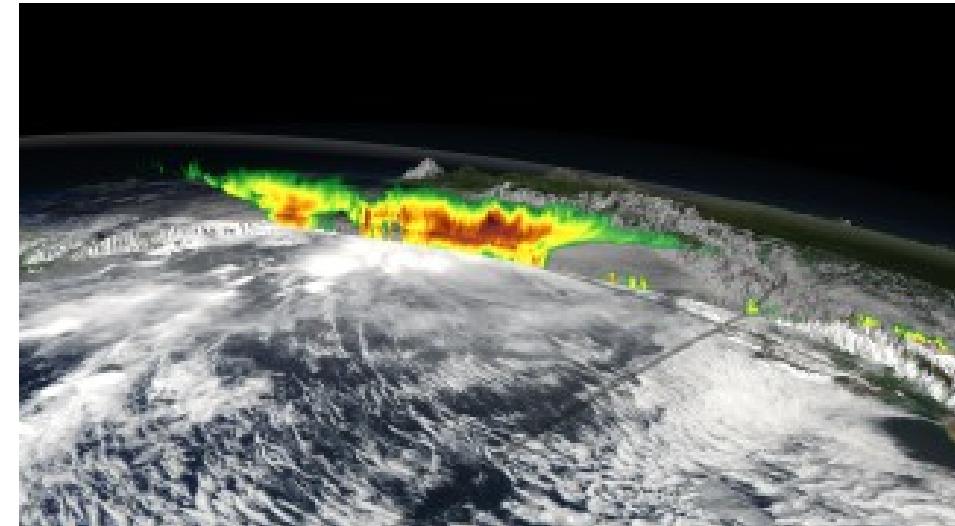


<https://cloudsat.atmos.colostate.edu/education/satellites>

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/>

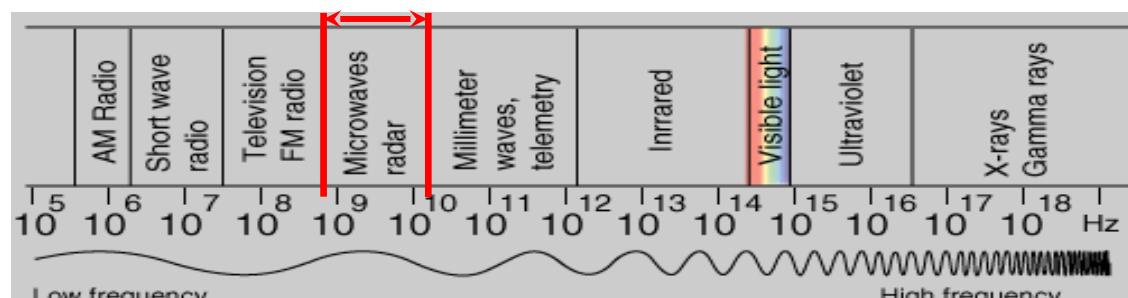
Mesure des précipitations avec un radar

Précipitation consiste en

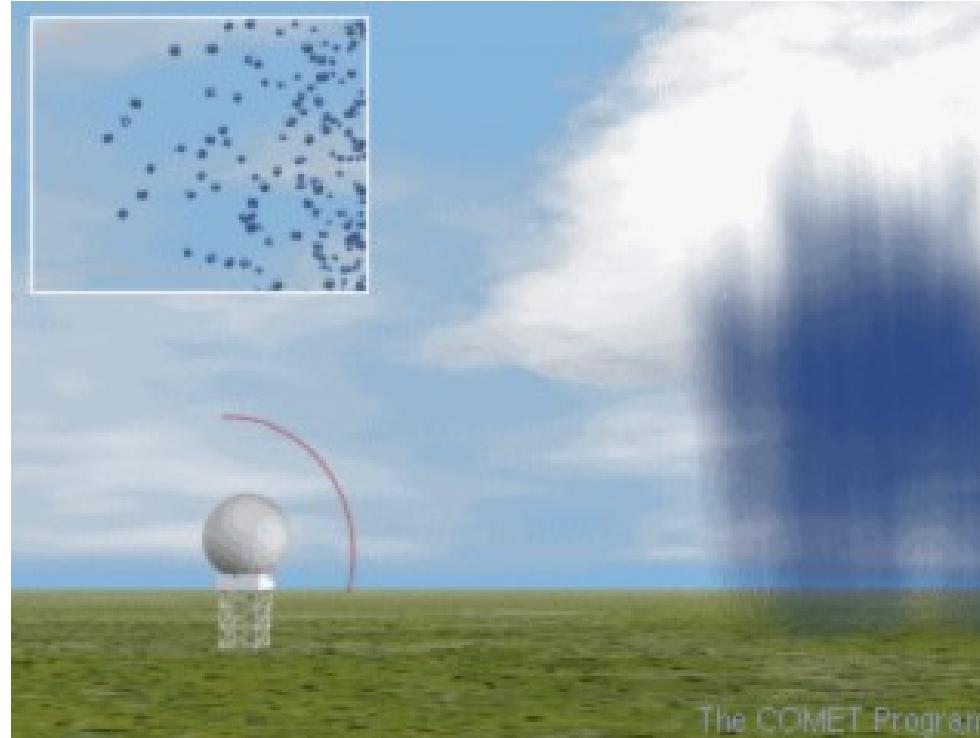
pluie	0.1 - 8 mm
neige	0.1 - 20 mm
grêle	5 - 50 mm

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 \rightarrow réflectivité (Z) reliée aux propriétés électro-mag des gouttes.
- Mesure indirecte \rightarrow 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

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

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 $|K|^2 \sim 0.93$

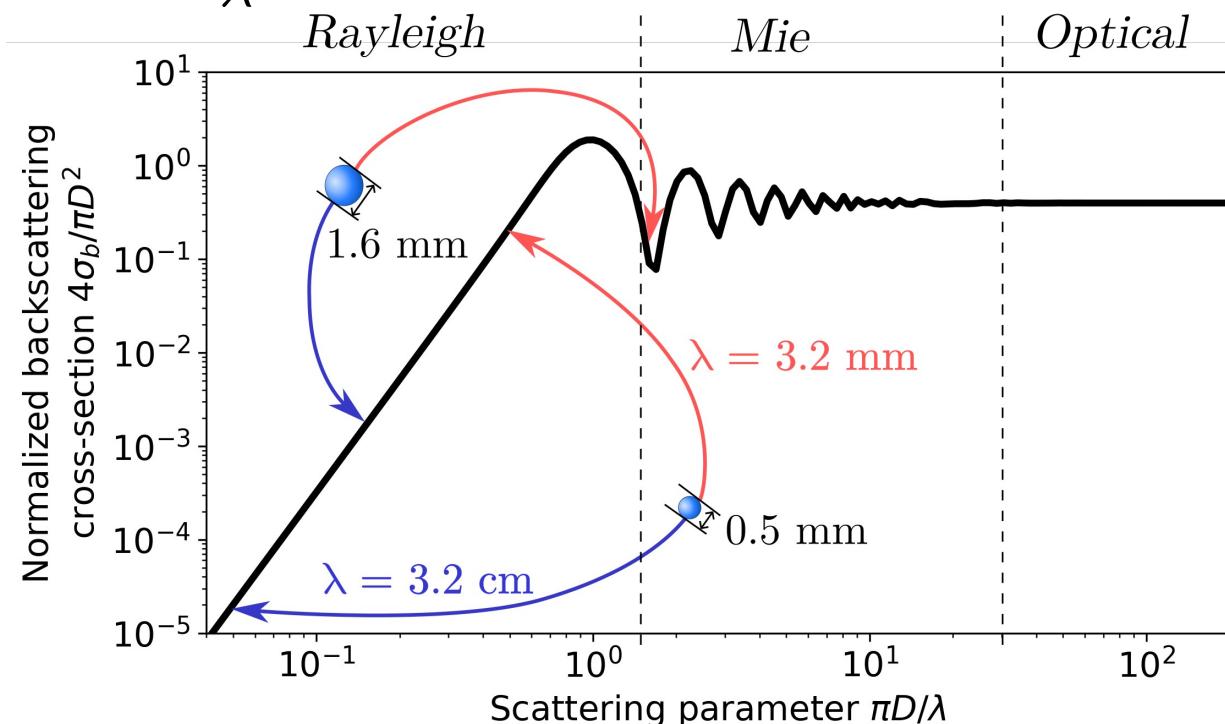
Section efficace de rétro-diffusion σ_b

Fonction de la taille radiométrique

$$x = \frac{\pi D}{\lambda}$$

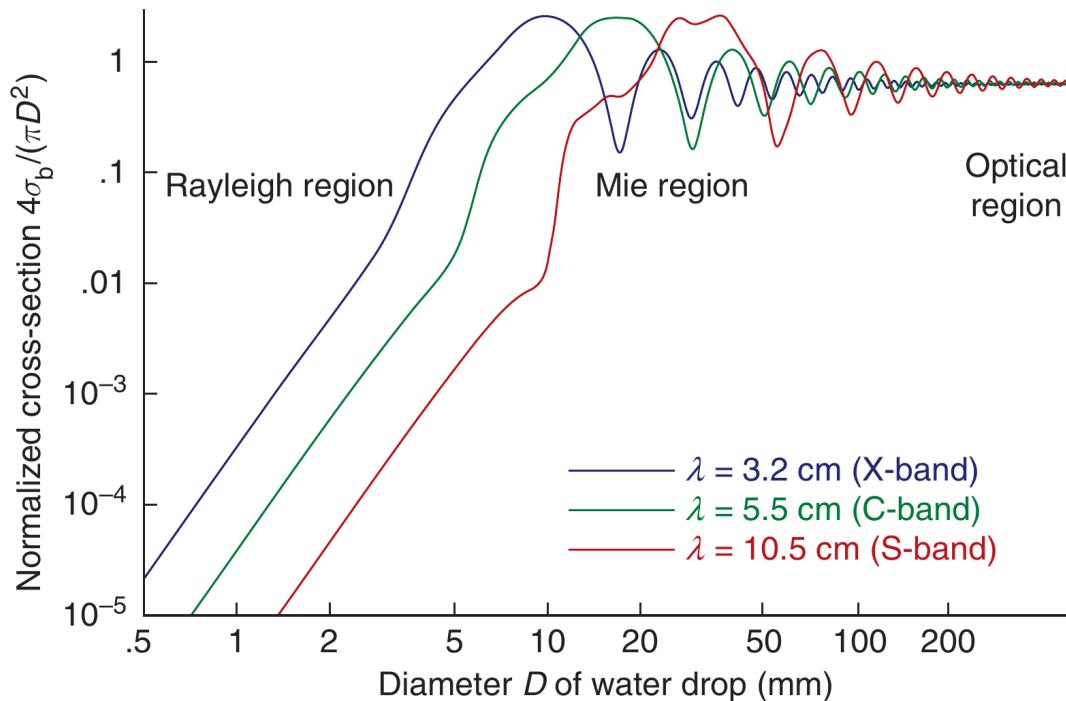
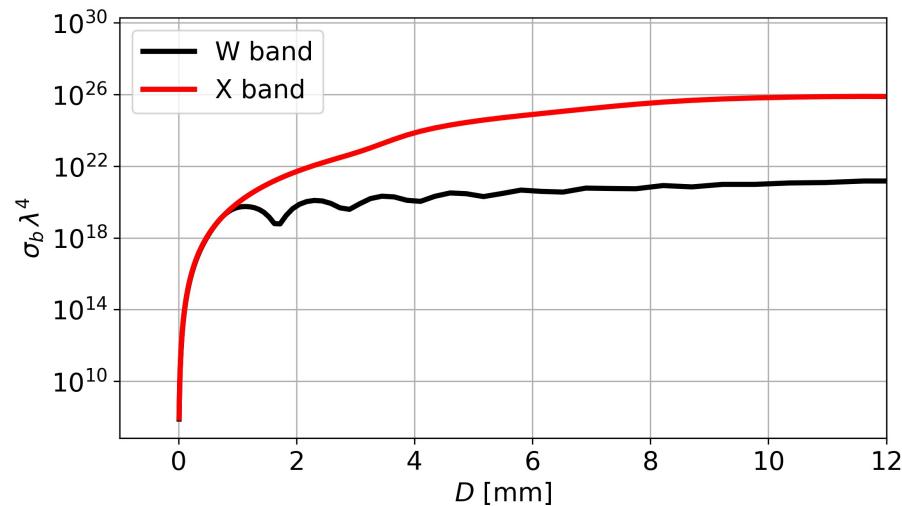
Si $x \ll 1$: régime de Rayleigh

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

If $x \sim 1$: régime de Mie
(exact solution for spheres)If $x \gg 1$: régime non-sélectif ou optique

Influence de la fréquence

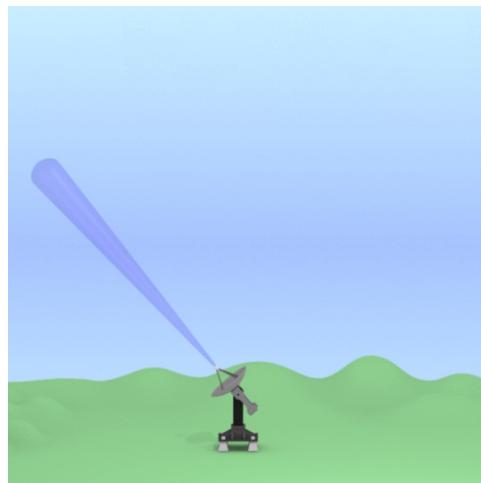
Section efficace rétro-diffusion

 $\sigma_b \lambda^4$ (~réflectivité)

Type de scan avec un radar météo

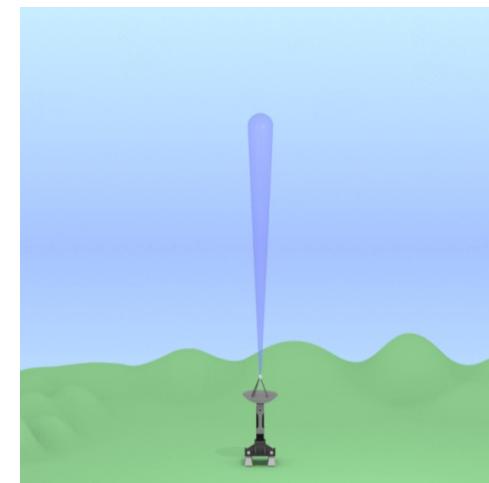
Plan Position Indicator - PPI

Angle d'élévation = cst + scan en azimuth



Range Height Indicator - RHI

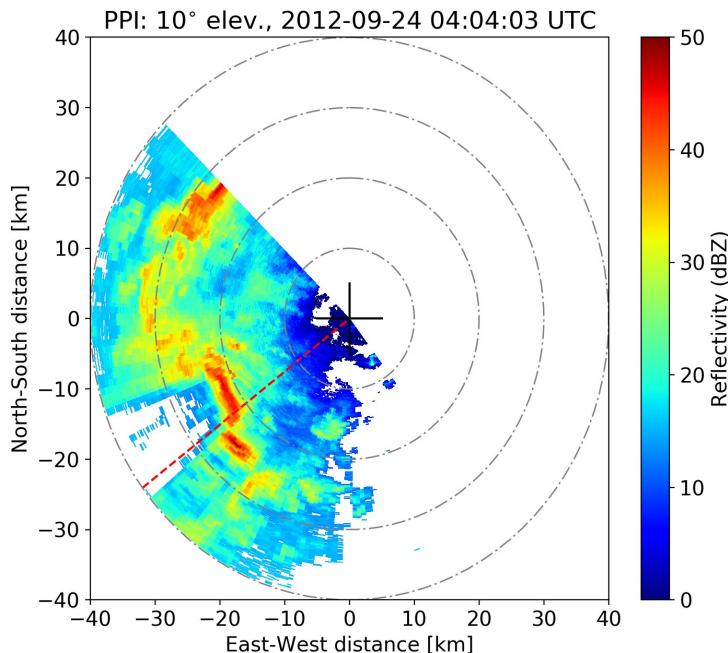
Azimuth = cst + scan en élévation



Type de scan avec un radar météo

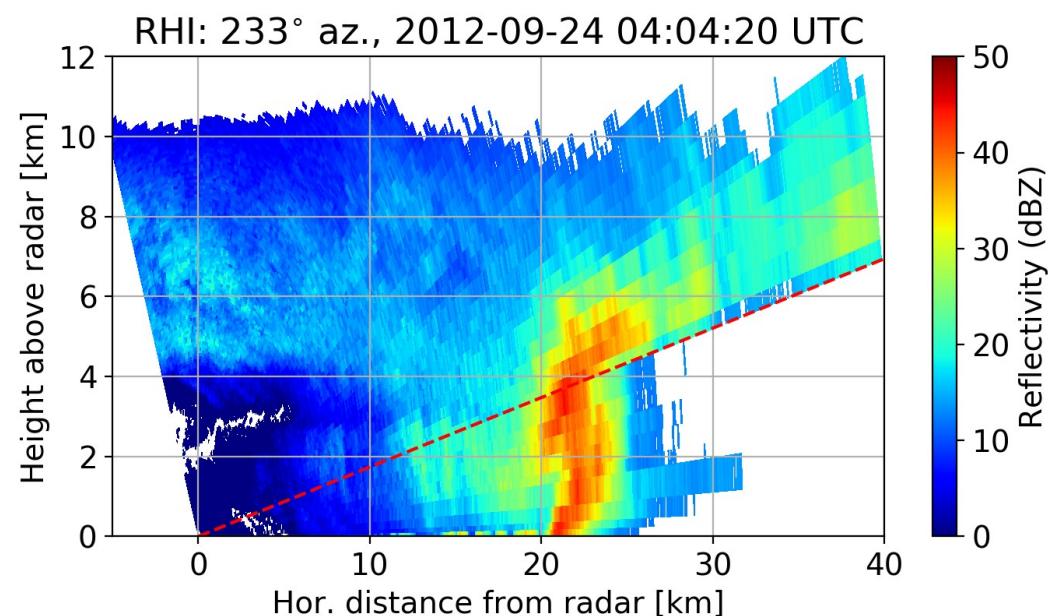
Plan Position Indicator - PPI

Angle d'élévation = cst + scan en azimuth

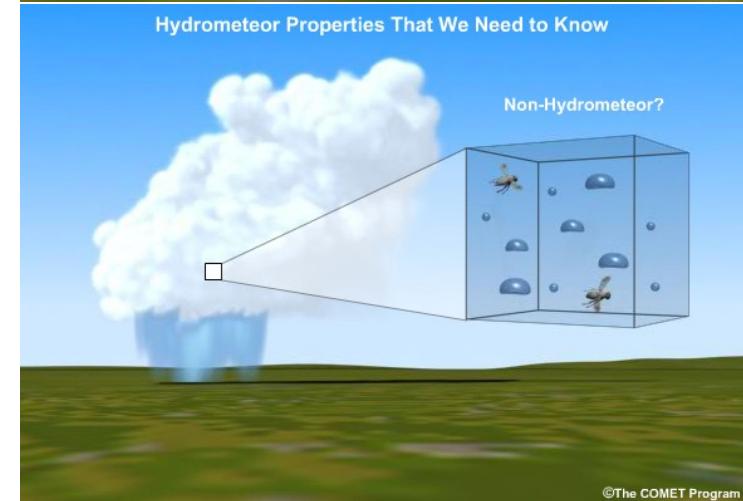
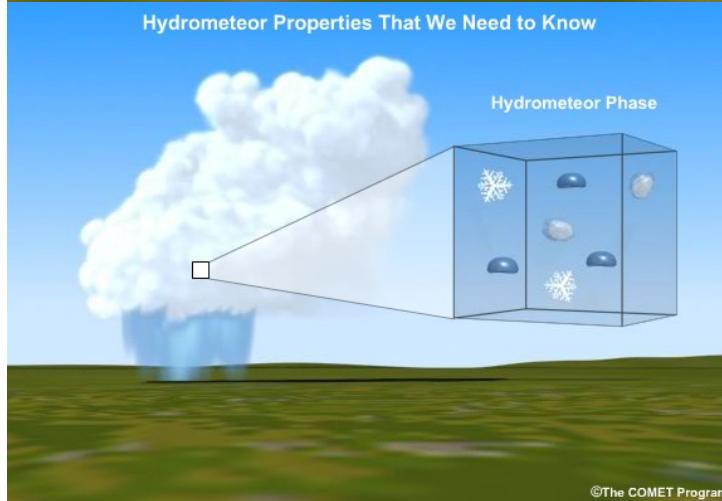
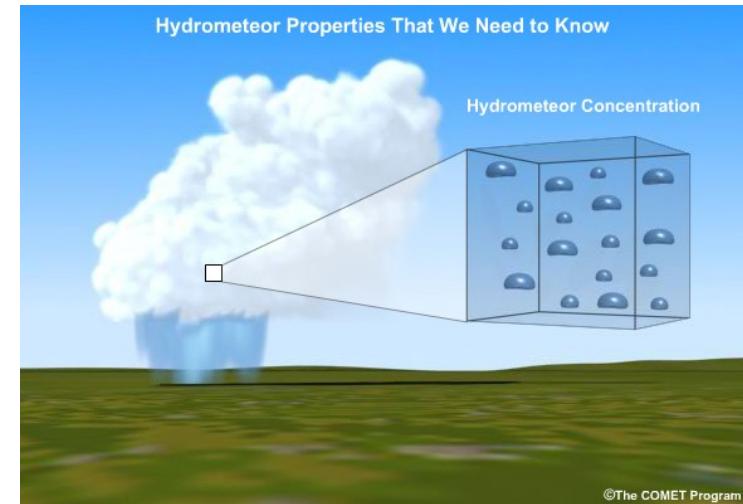
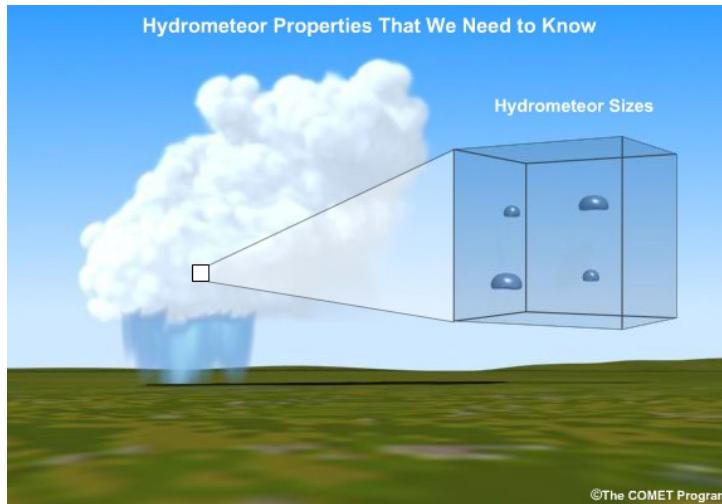


Range Height Indicator - RHI

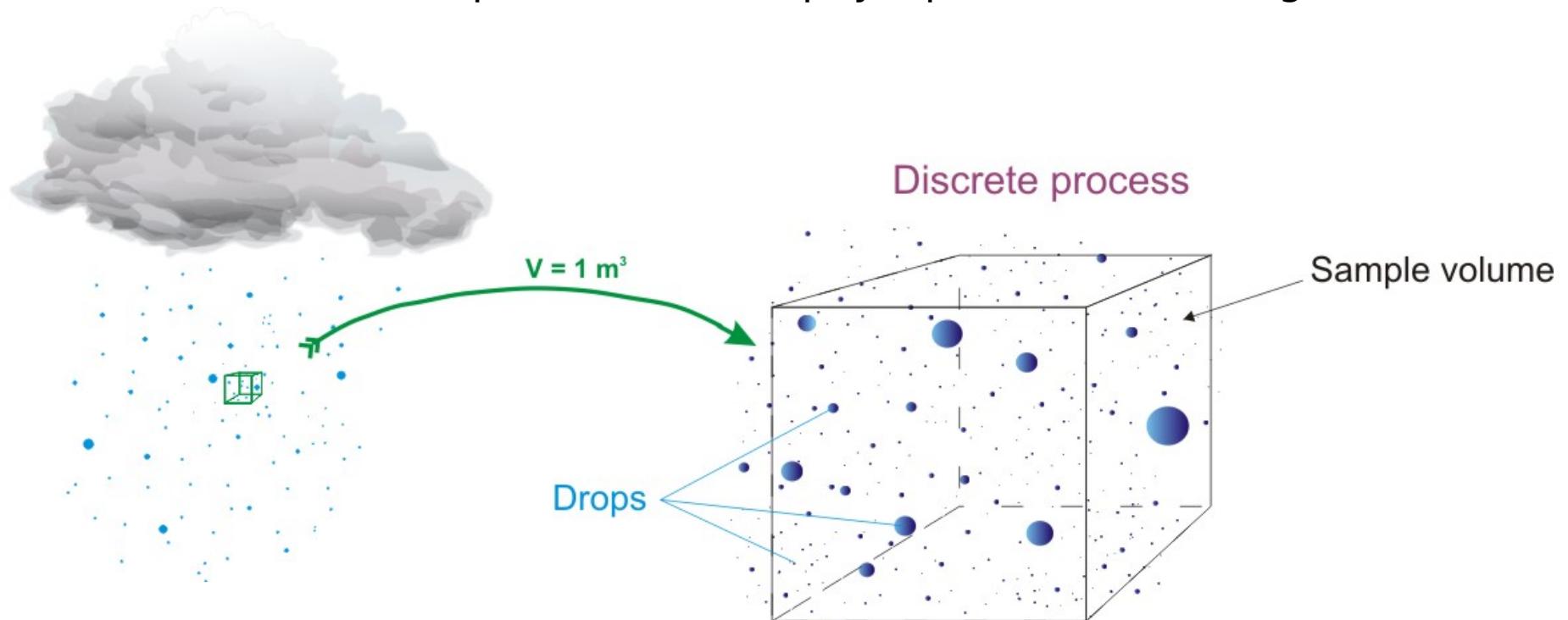
Azimuth = cst + scan en élévation



Facteurs importants contrôlant la mesure radar

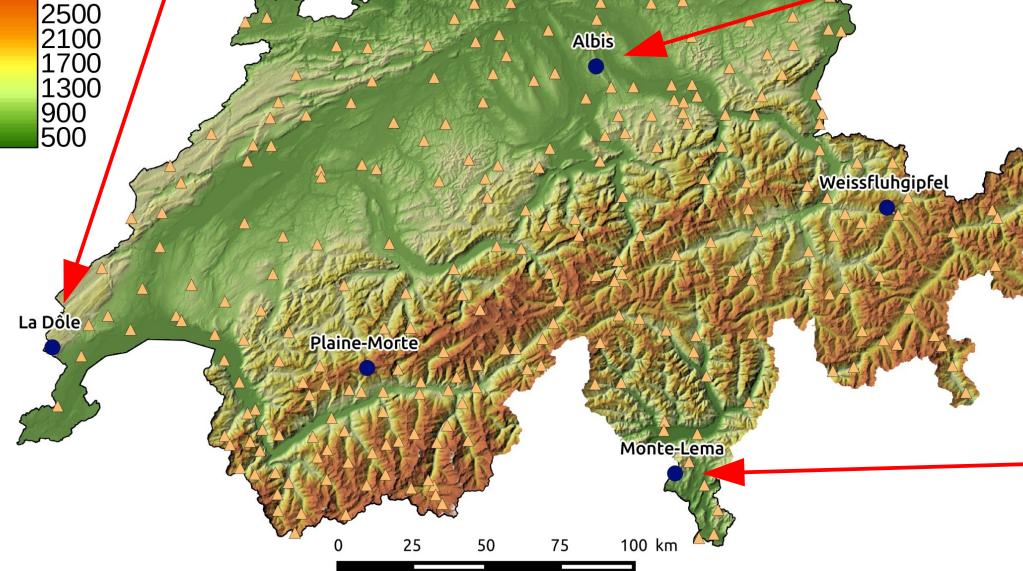
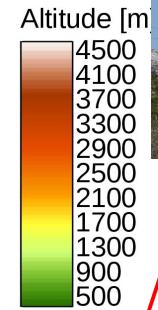


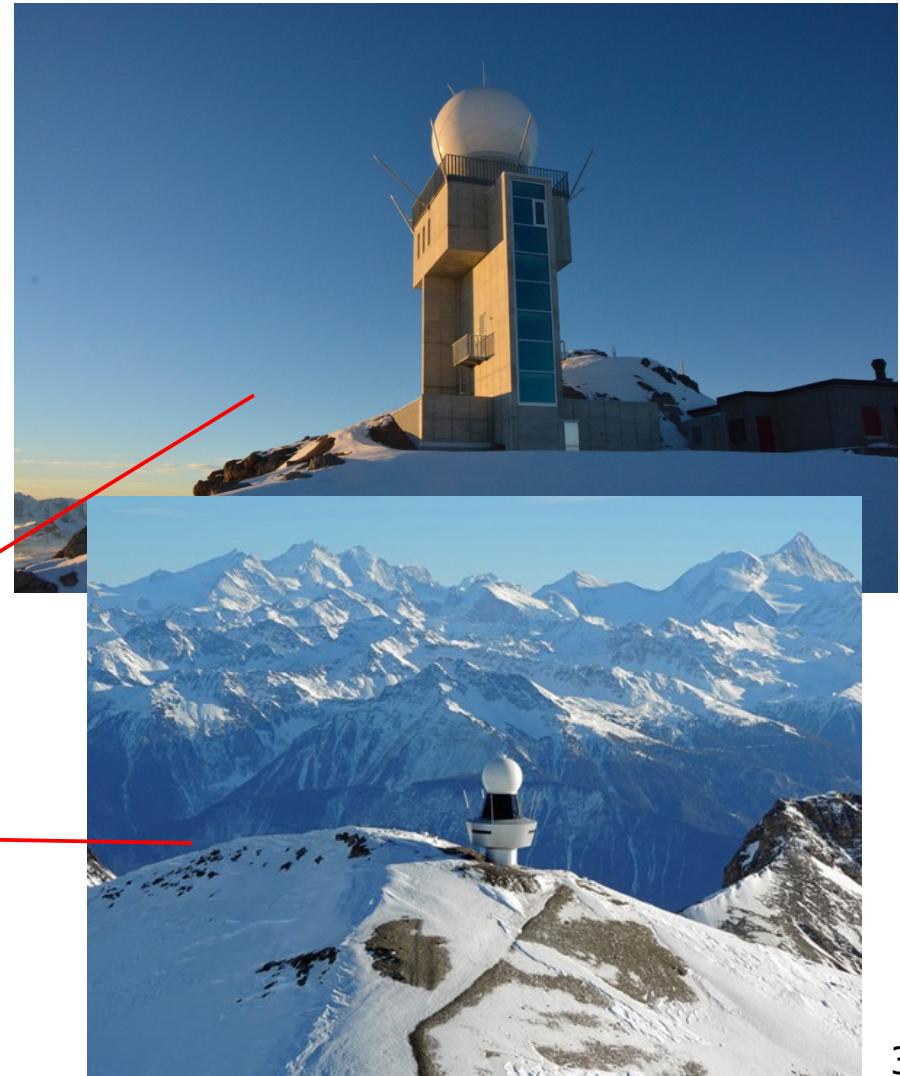
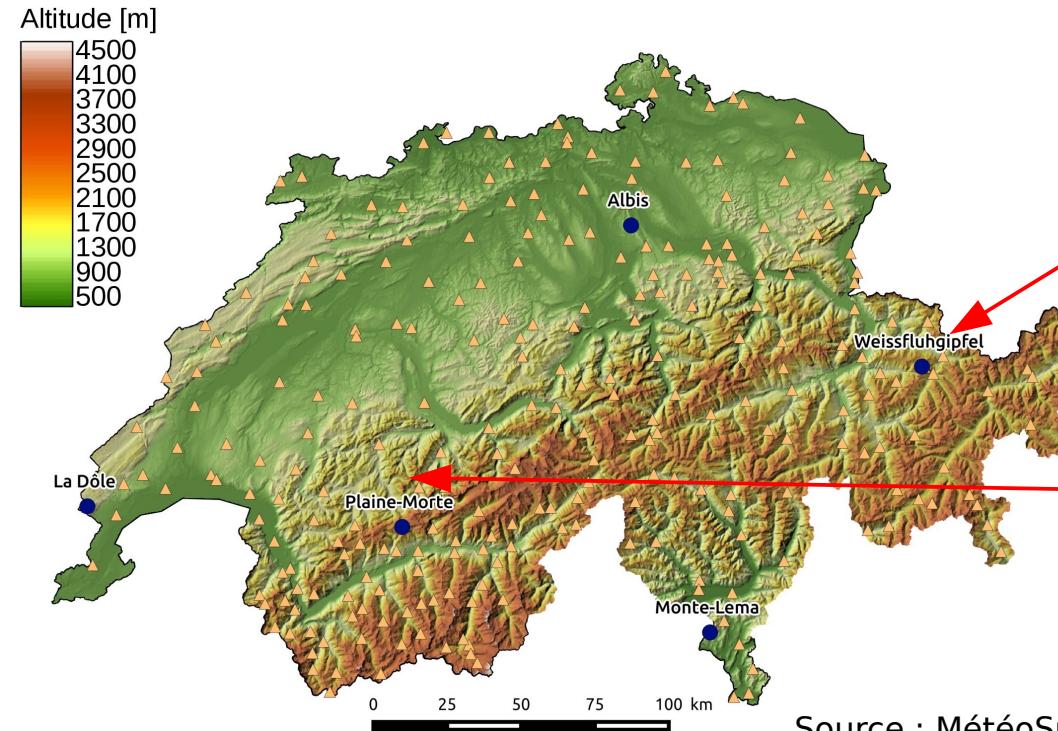
Microstructure = taille, forme, vitesse,... de toutes les gouttes dans un volume.
En lien avec les processus microphysiques dans les nuages.



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

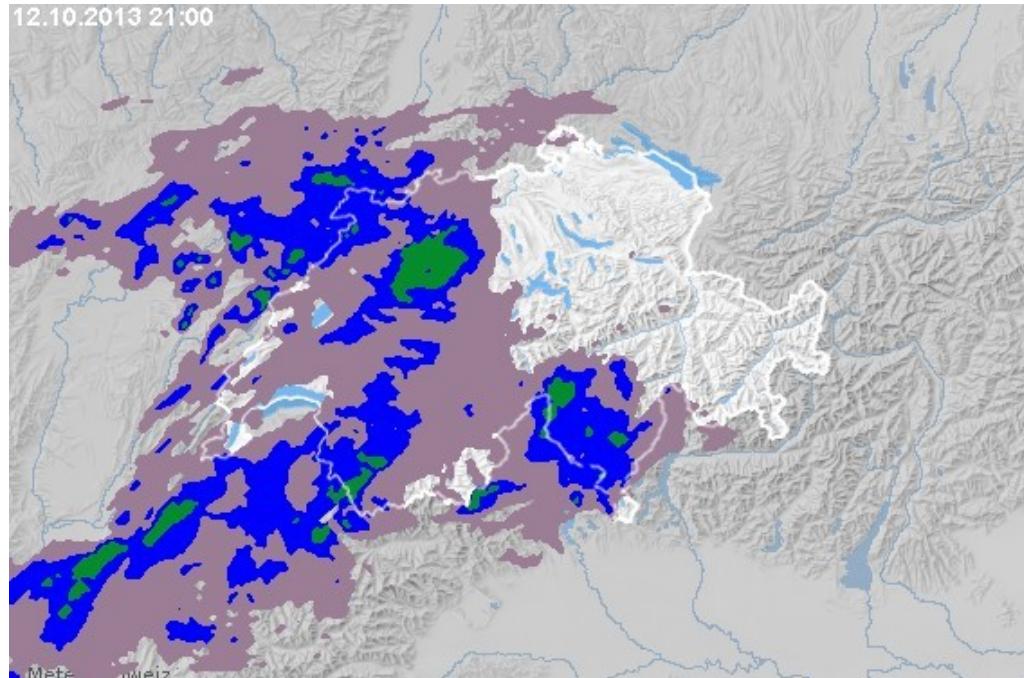
DSD = info cruciale car R, Z, W sont des moments stat de la DSD.



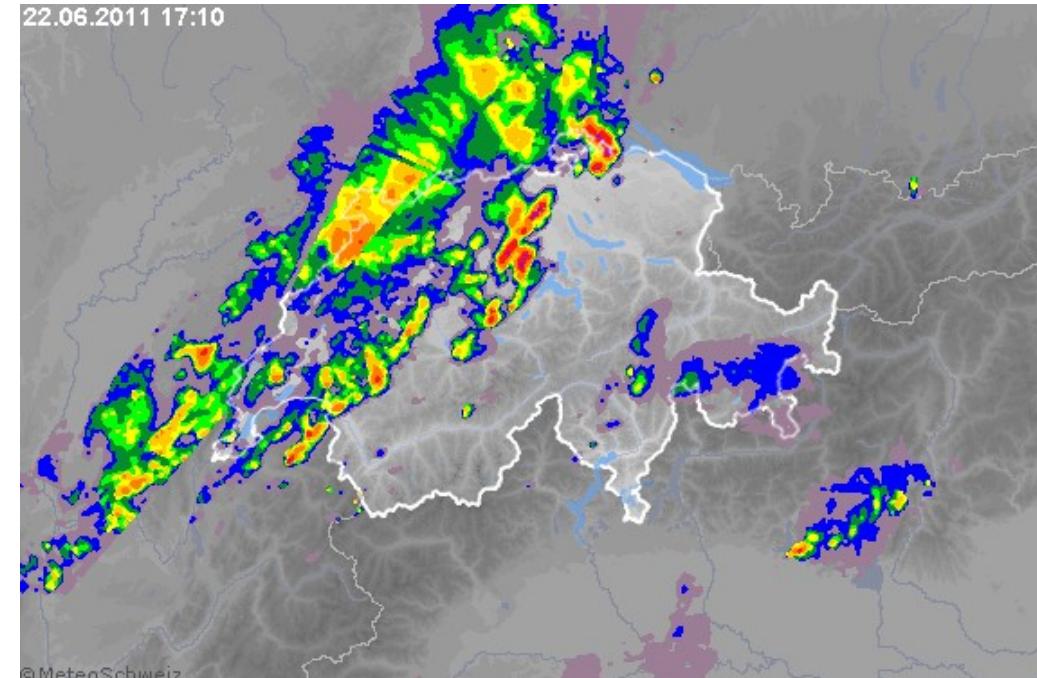


Mosaïque radar produite par MS

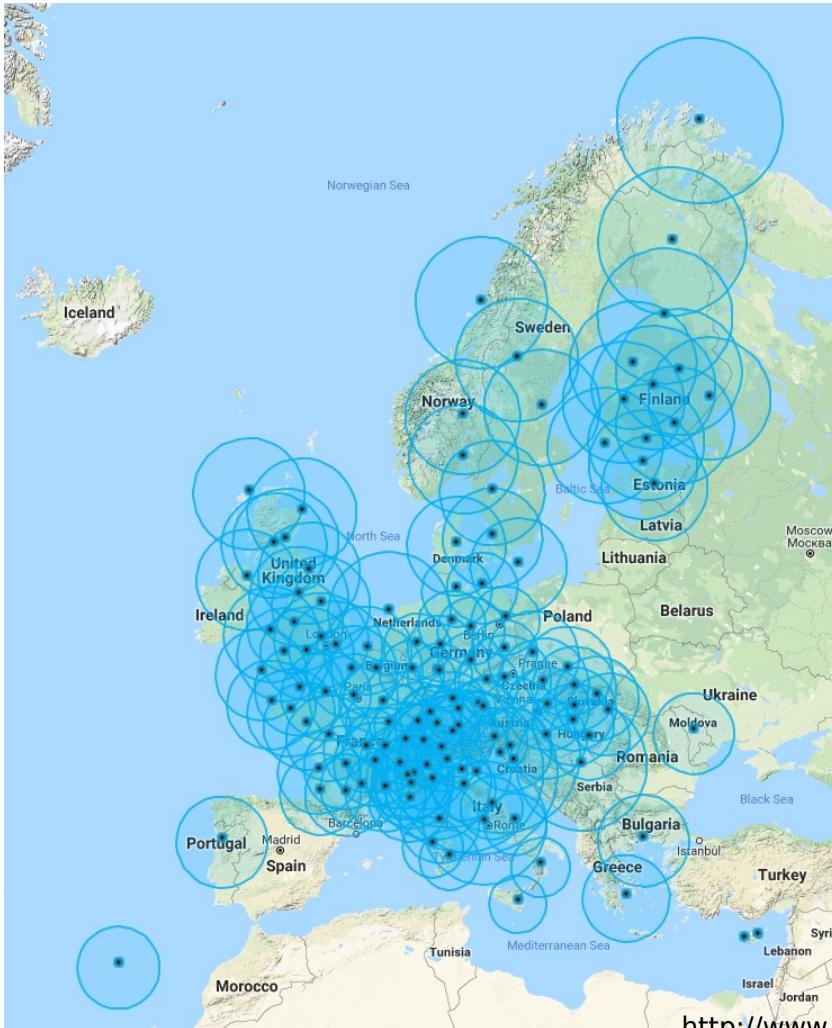
Précipitations frontales



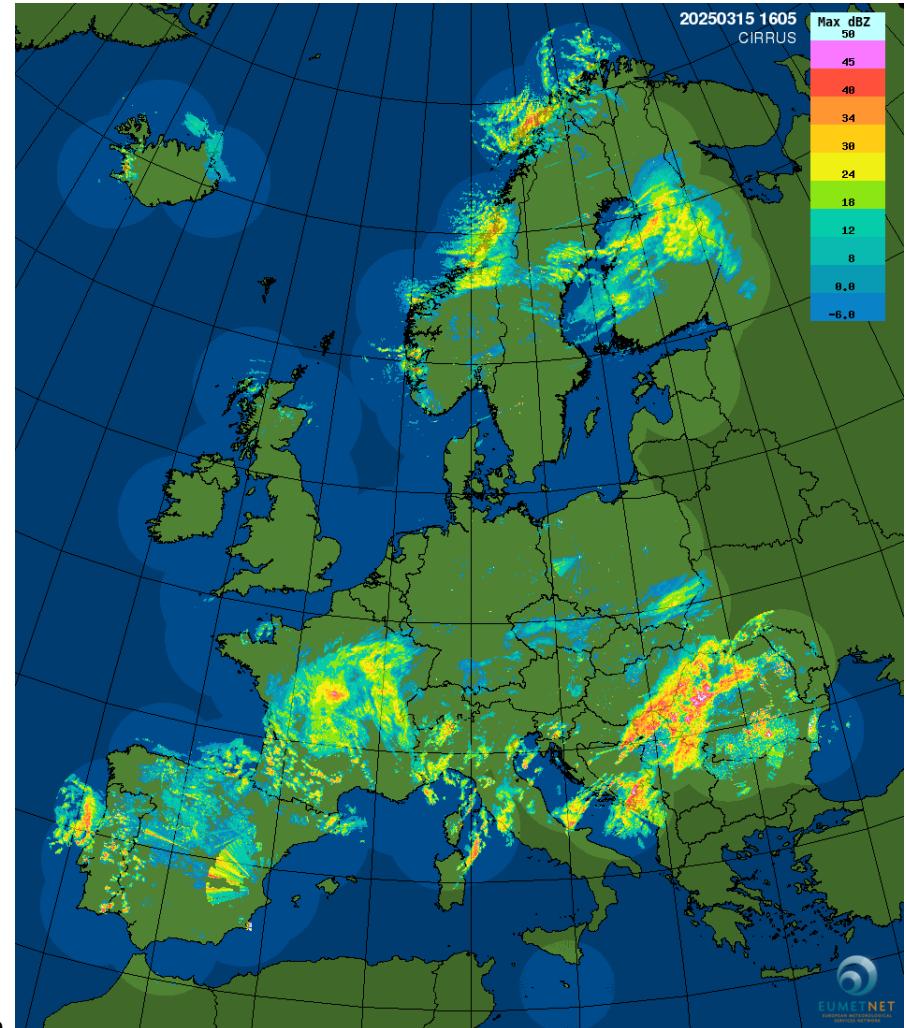
Précipitations convectives



Projet OPERA

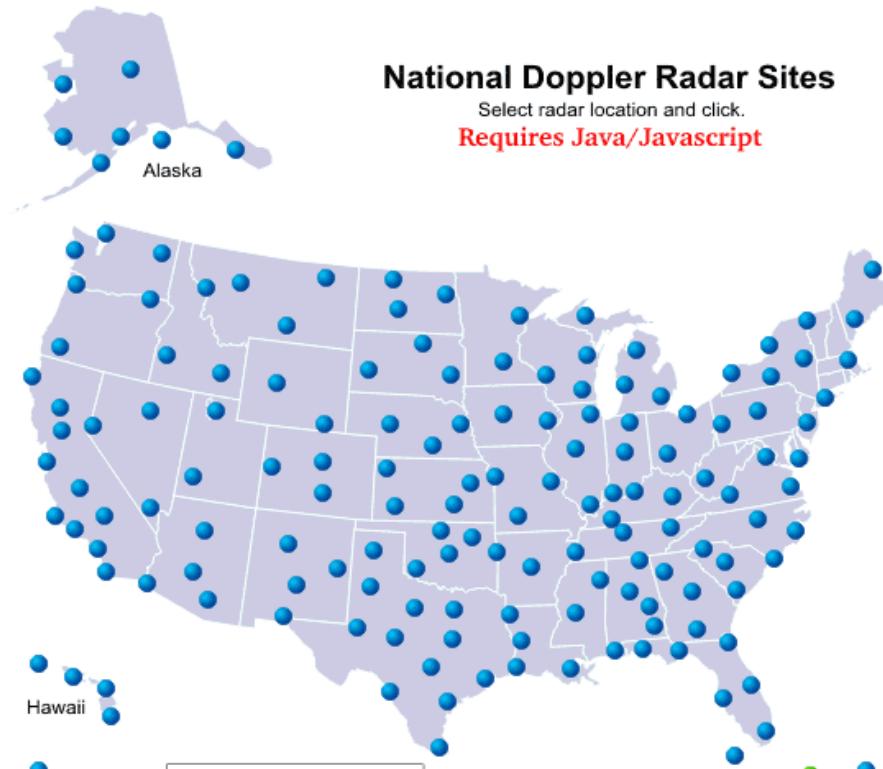


Mosaïque radar européenne

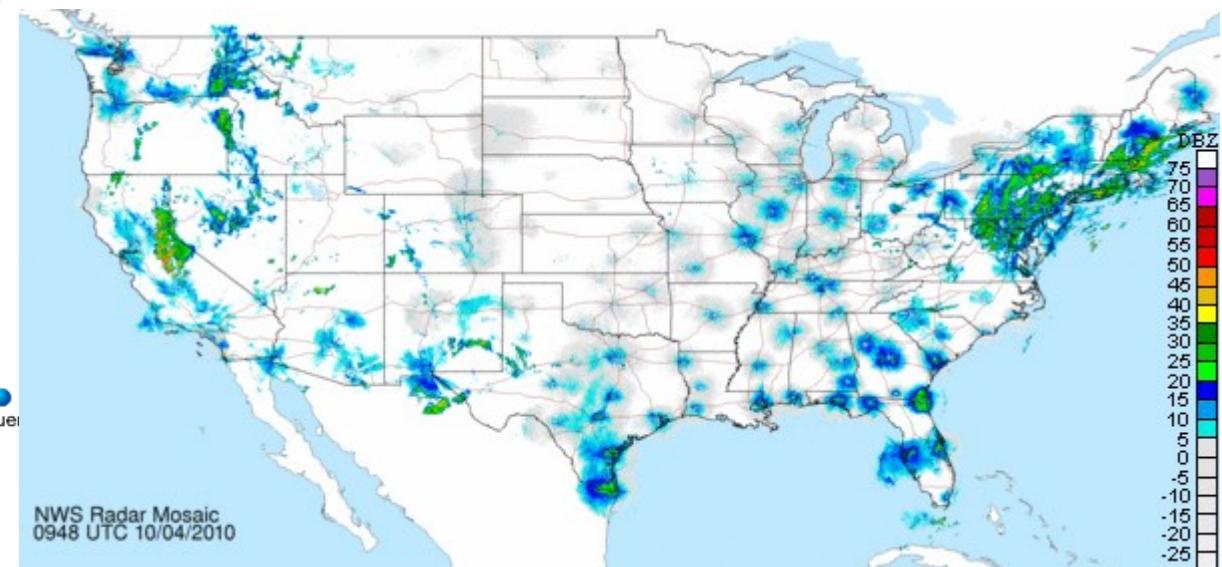


National Doppler Radar Sites

Select radar location and click.
Requires Java/Javascript



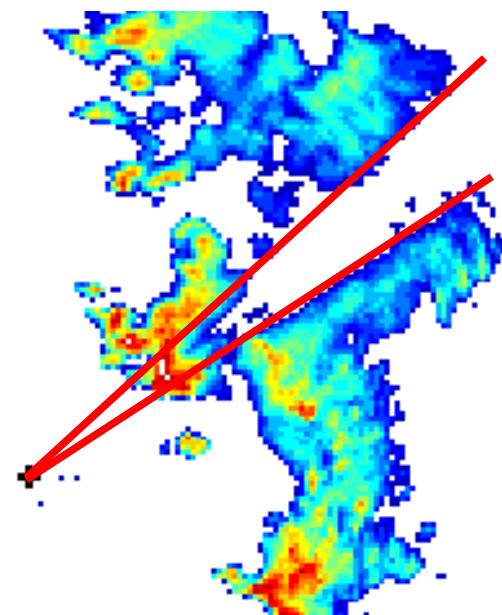
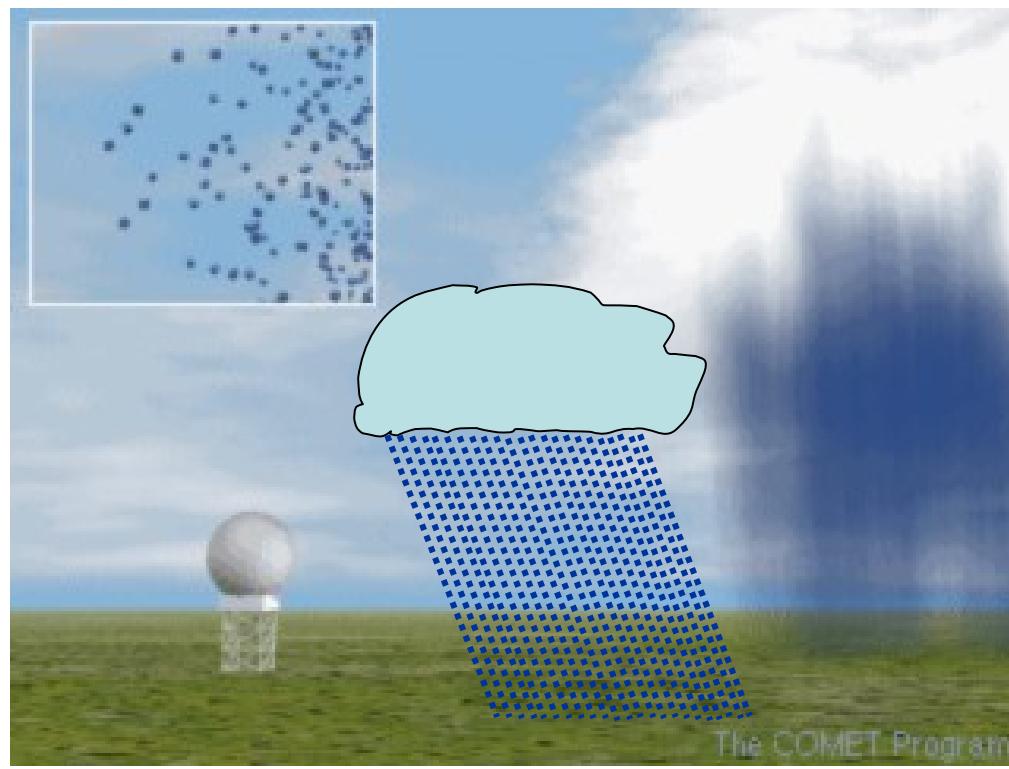
NEXRAD



Atténuation

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

→ sous-estimation de la réflectivité.

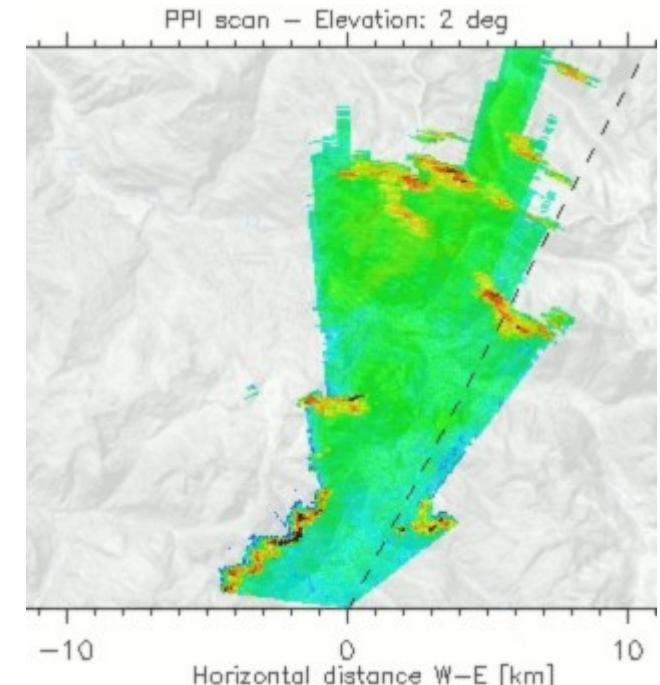
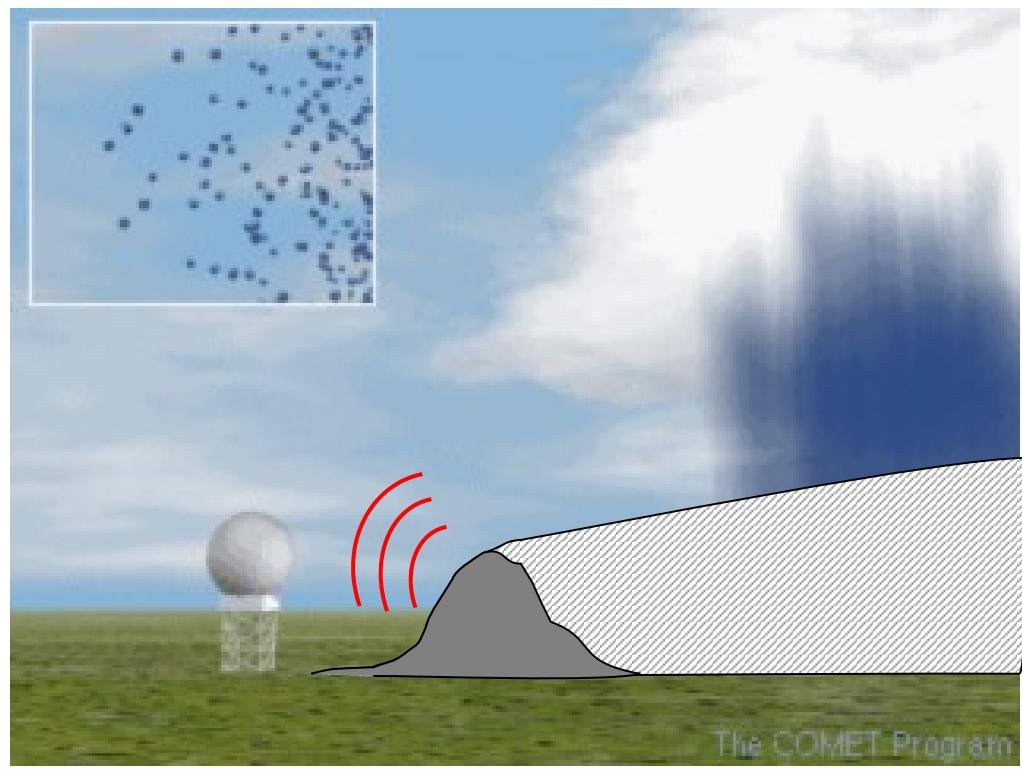


Radar de Wideumont (Belgique)

Interactions avec le relief

Faisceau radar touche (en totalité ou partiellement) le sol

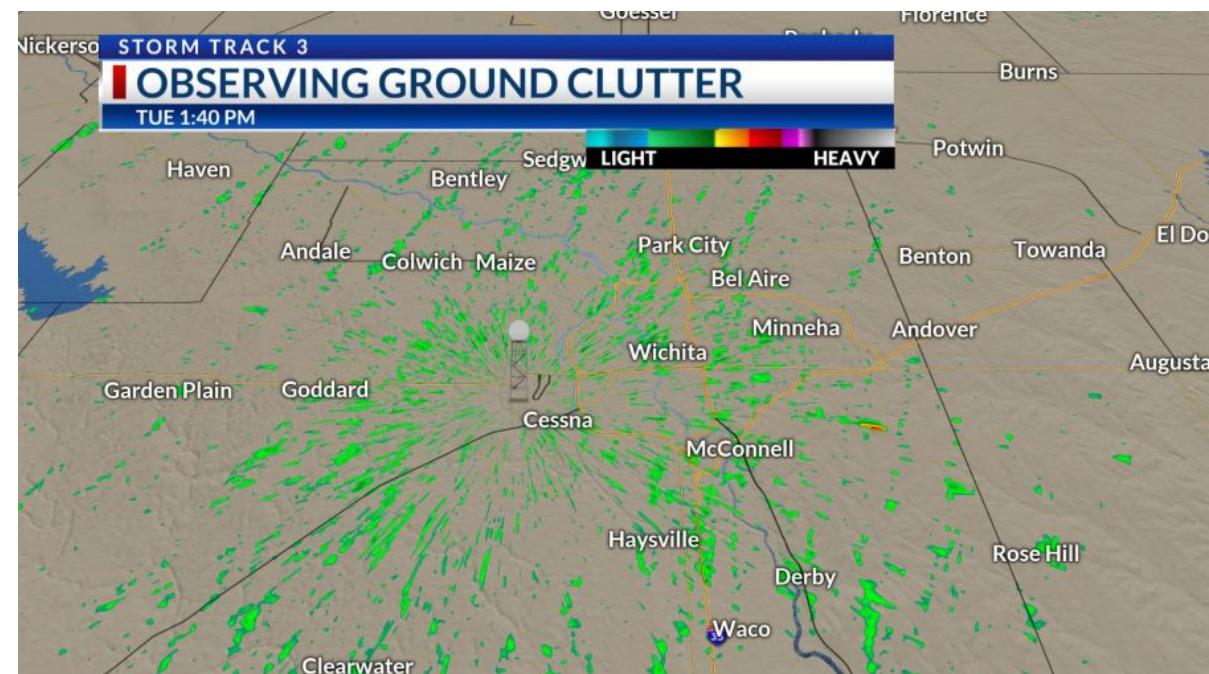
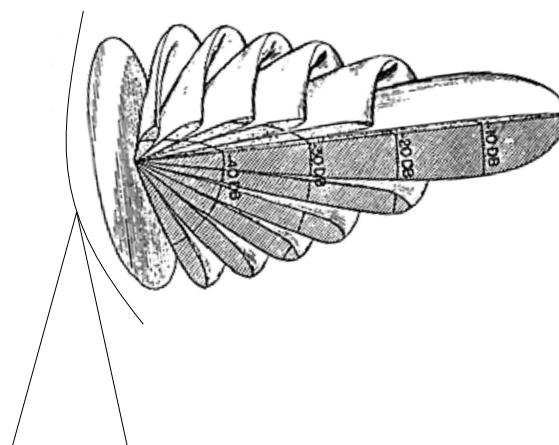
1. Échos de sol → sur-estimation des précipitations.
2. Blocage du faisceau → sous-estimation des précipitations.



Radar du LTE à Davos

Échos de sol en terrain plat

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

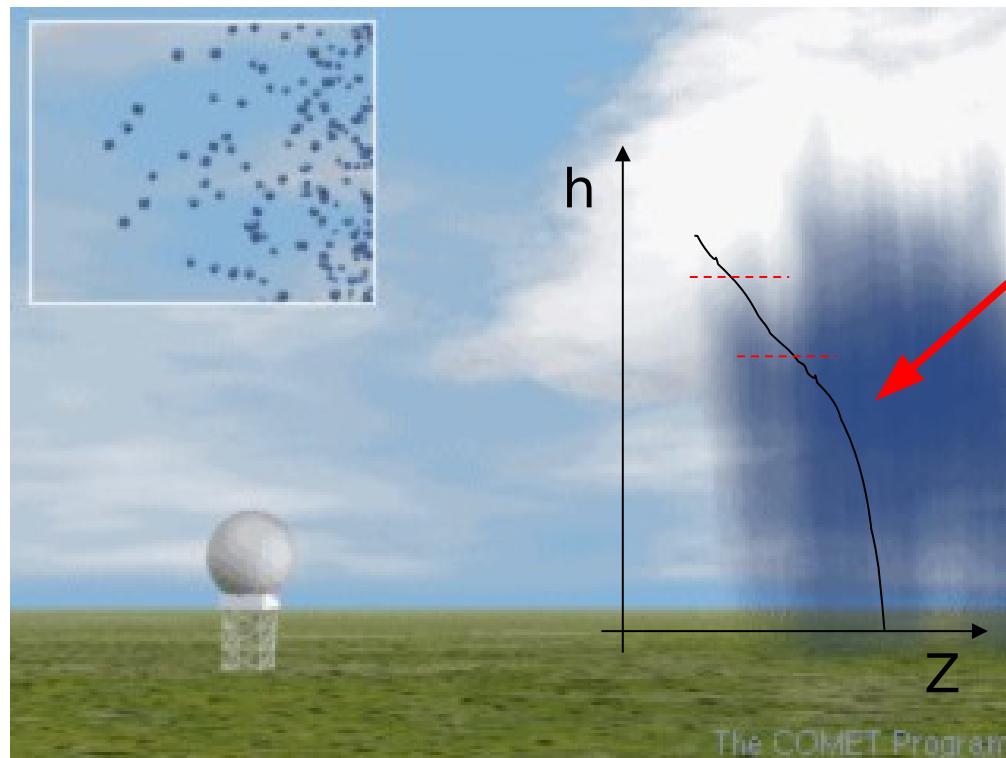


http://en.whttps://www.ksn.com/weather/weather-stories/ksn-storm-track-3-digital-extra-understanding-ground-clutter-on-radar/amp/kipedia.org/wiki/Weather_radar

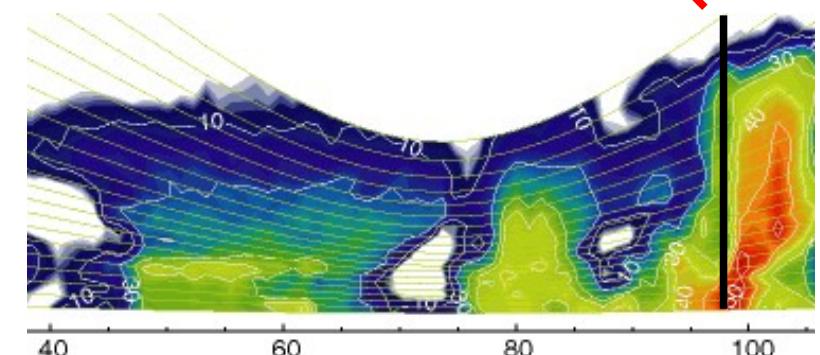
Variabilité verticale des précipitations

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 $> 0^\circ\text{C}$

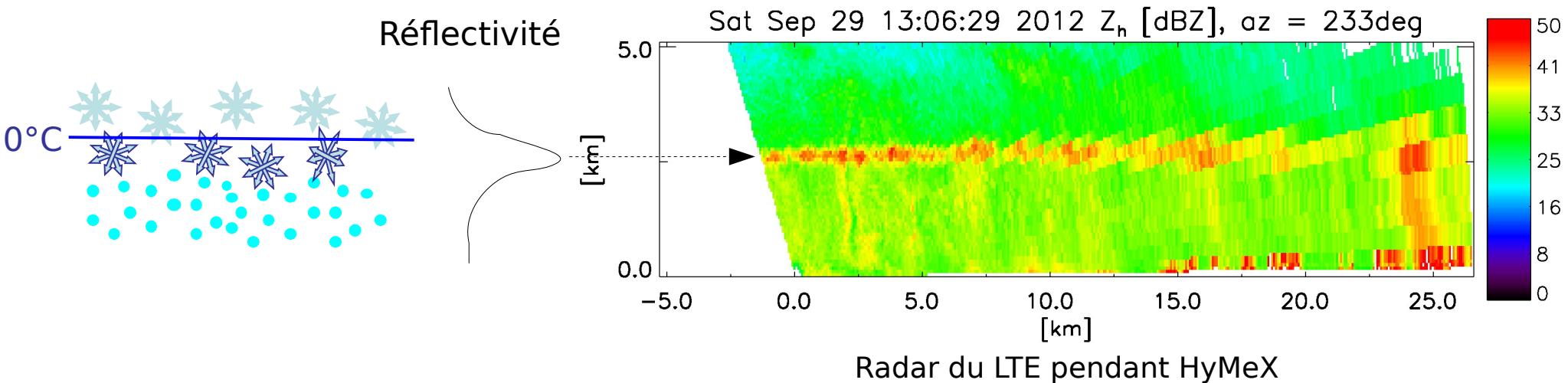
\rightarrow isotherme 0°C entre le sol et le sommet du nuage \rightarrow couche de fusion.

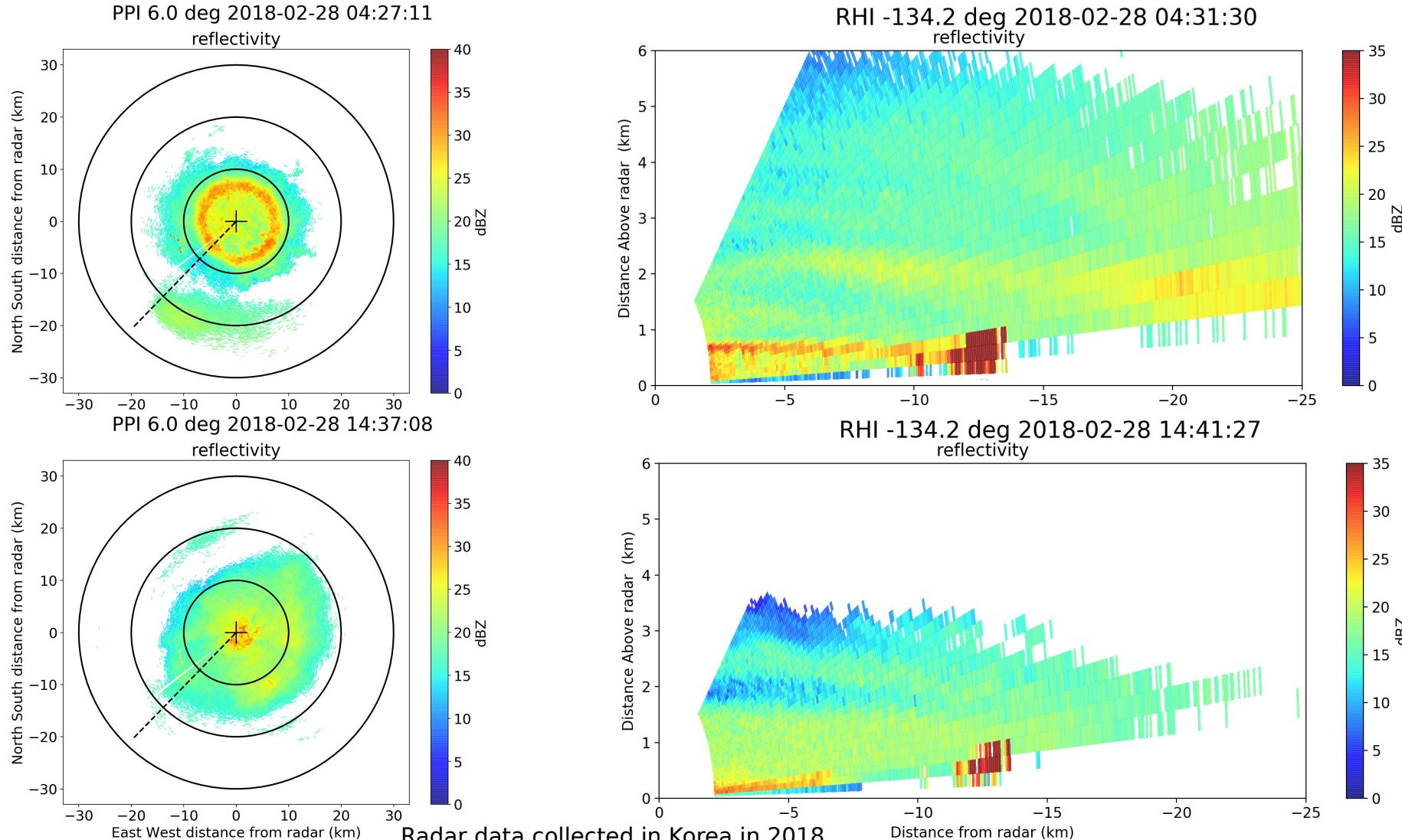
Cristaux de neige passent sous l'isotherme 0°C et commence à fondre

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

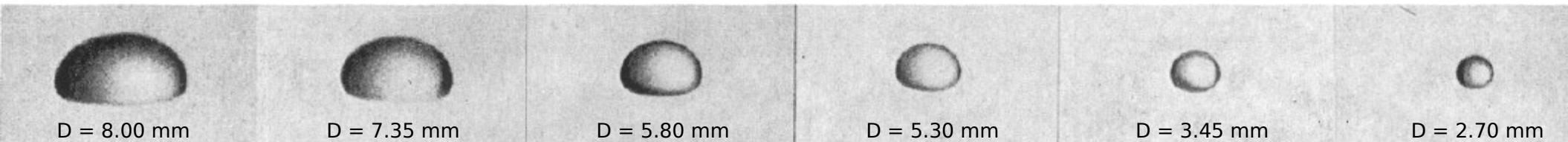
\rightarrow forte réflectivité radar = **bande brillante**

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



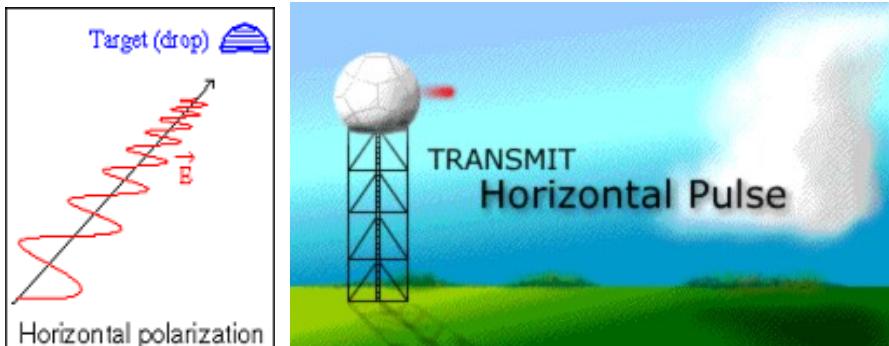


Les grosses gouttes ($> 2\text{mm}$) ne sont pas sphériques

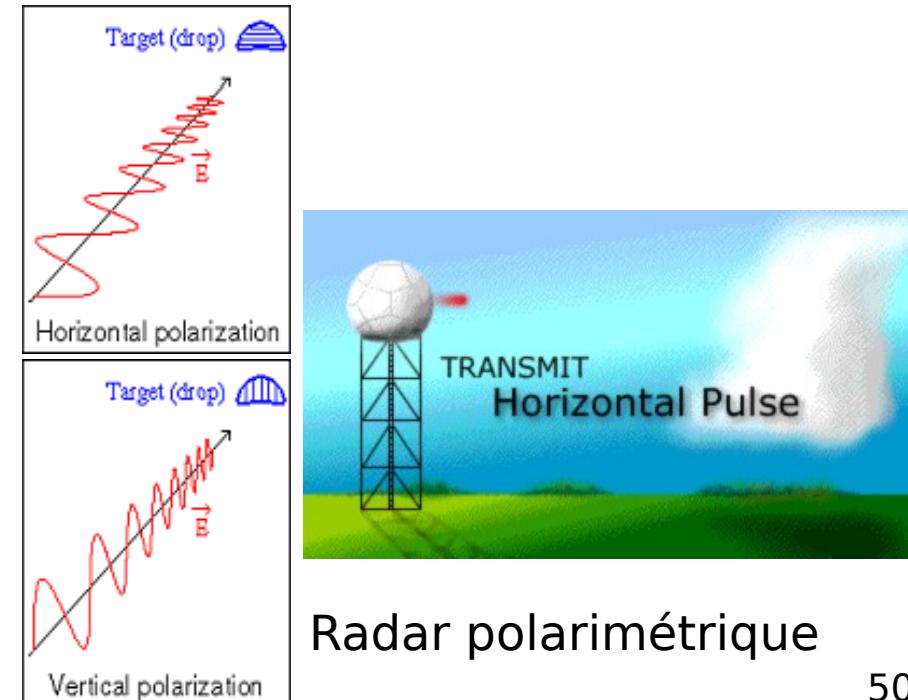


Beard et al., AR, 2010

→ propagation dans le plan horizontal \neq vertical



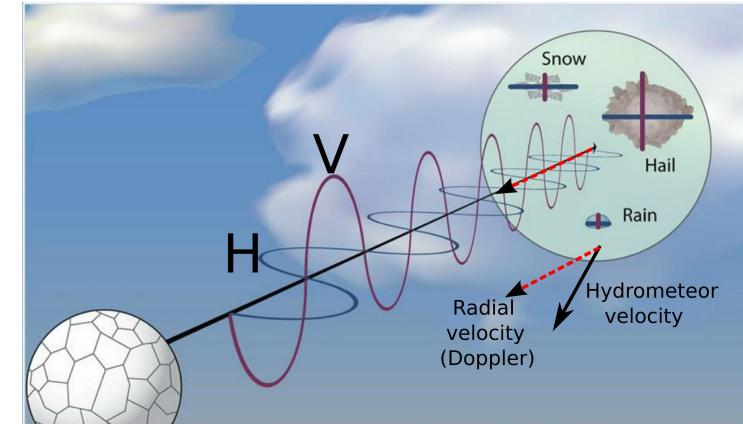
Radar conventionnel



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 :

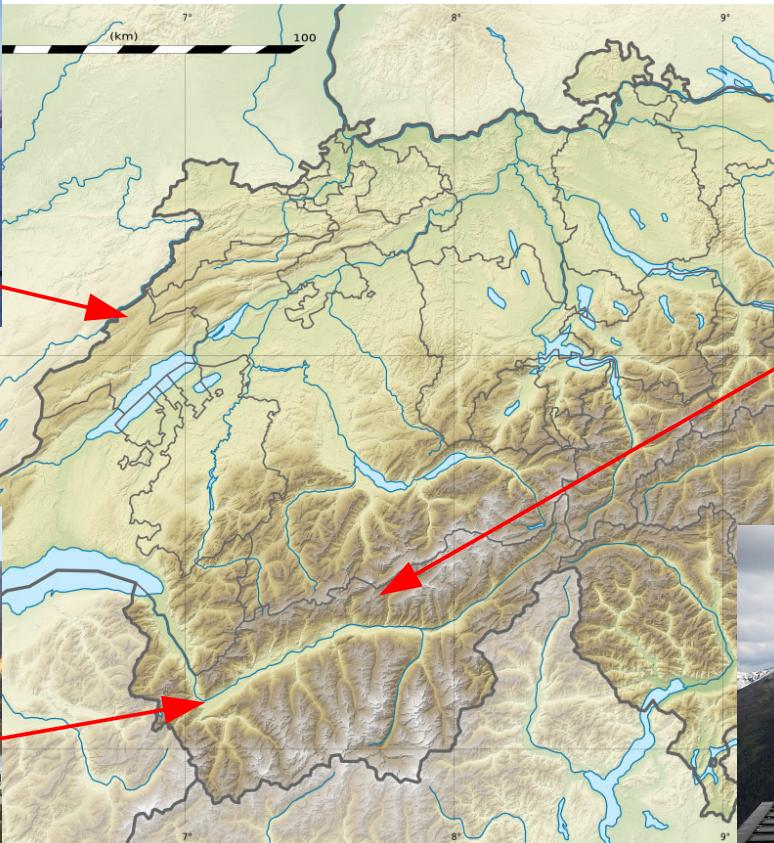
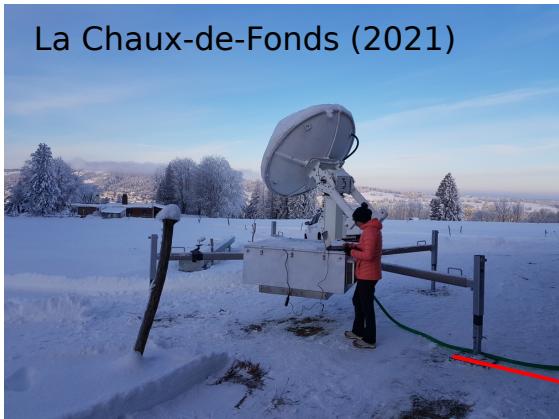
- réflectivité différentielle [dB] Z_{DR}
- déphasage différentielle [deg] Φ_{dp}
- coefficient de corrélation co-polarisation [-] ρ_{hv}
- vitesse radiale moyenne [ms^{-1}] V
- largeur spectrale [ms^{-1}] σ_V

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

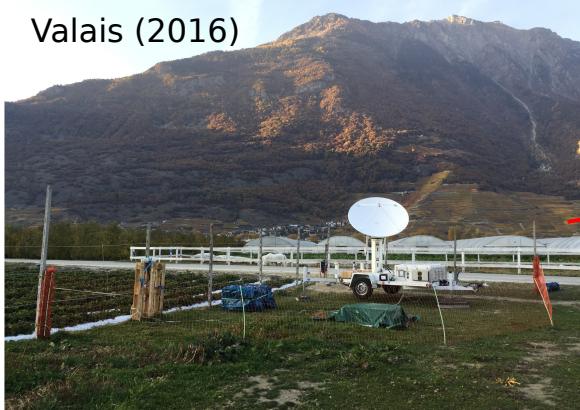
La Chaux-de-Fonds (2021)



Oberland (2014)

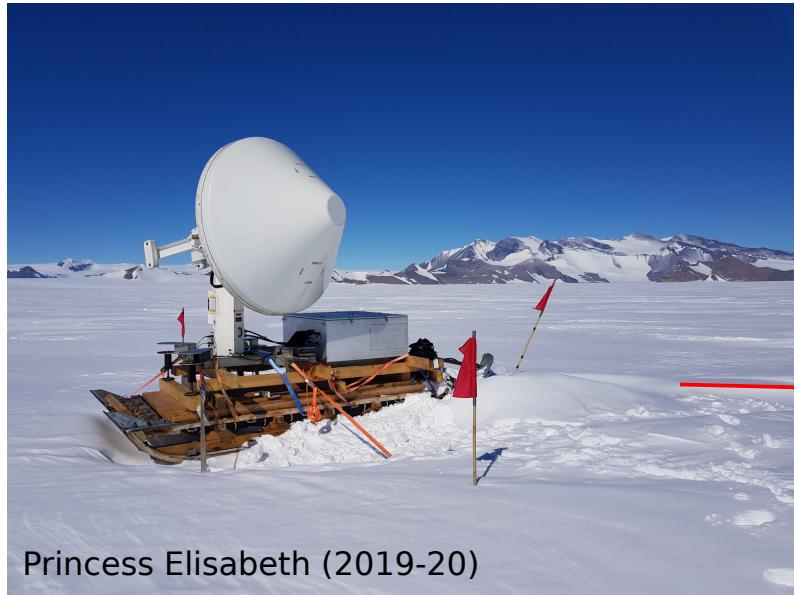


Valais (2016)

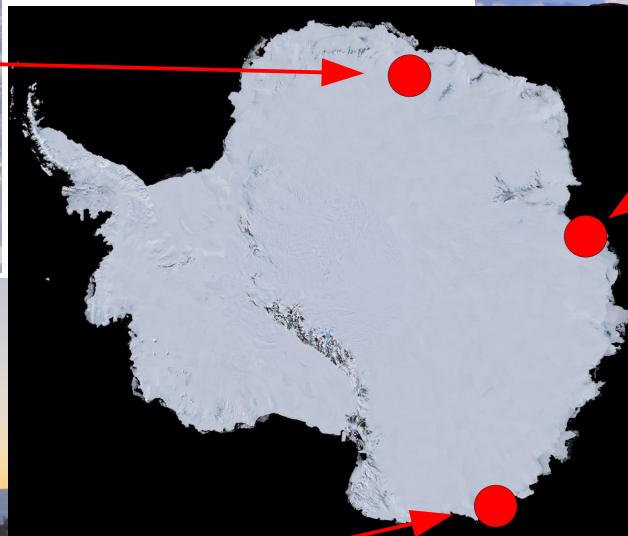


Davos (2014)

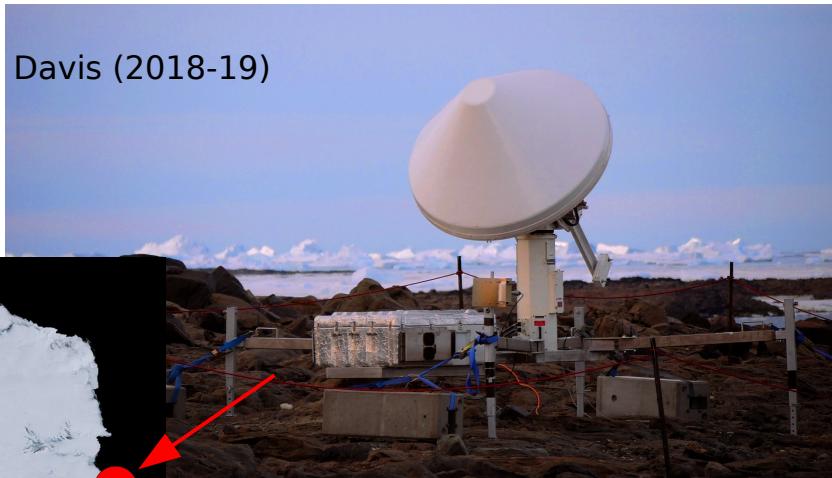




Princess Elisabeth (2019-20)



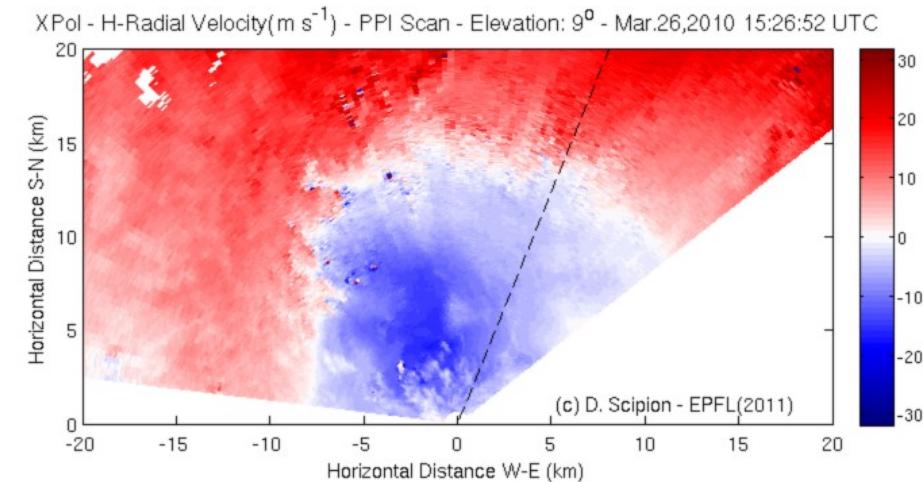
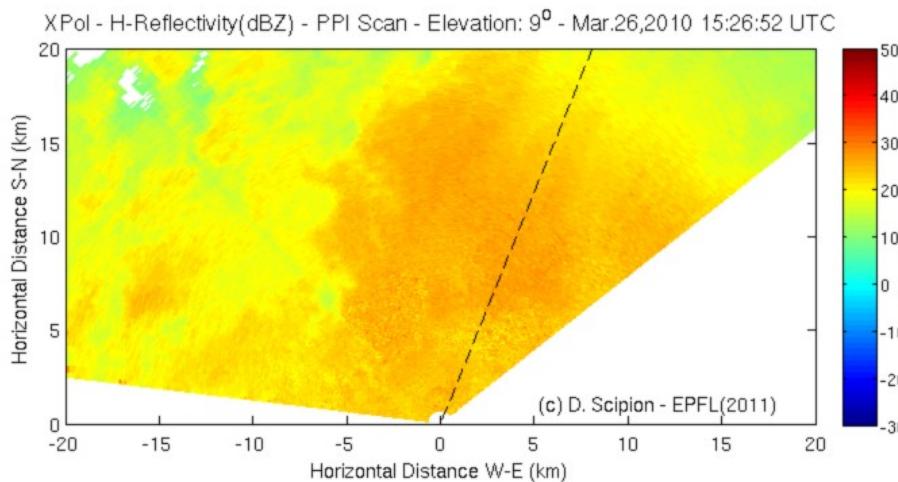
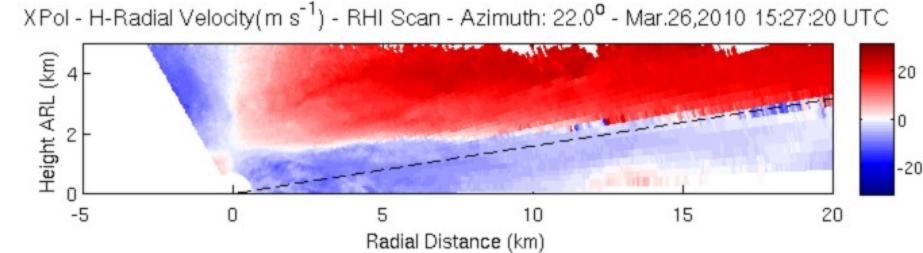
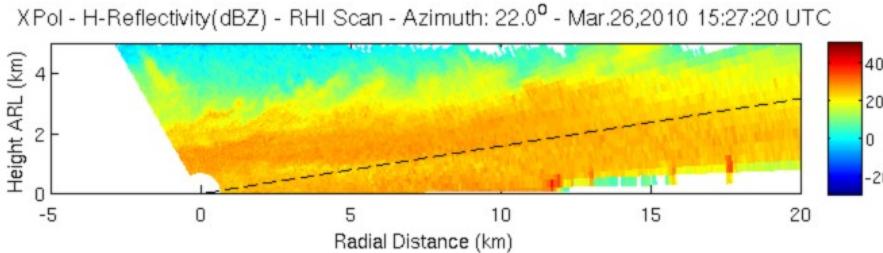
Dumont d'Urville (2015-16)



Davis (2018-19)

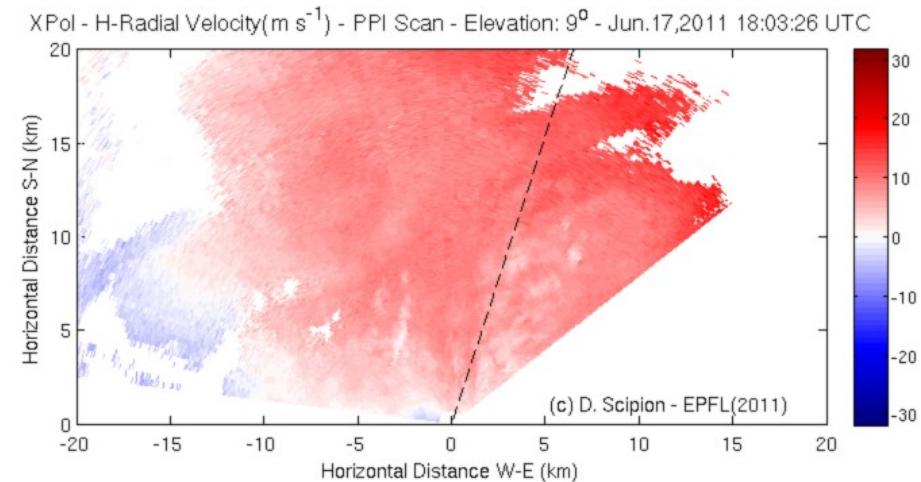
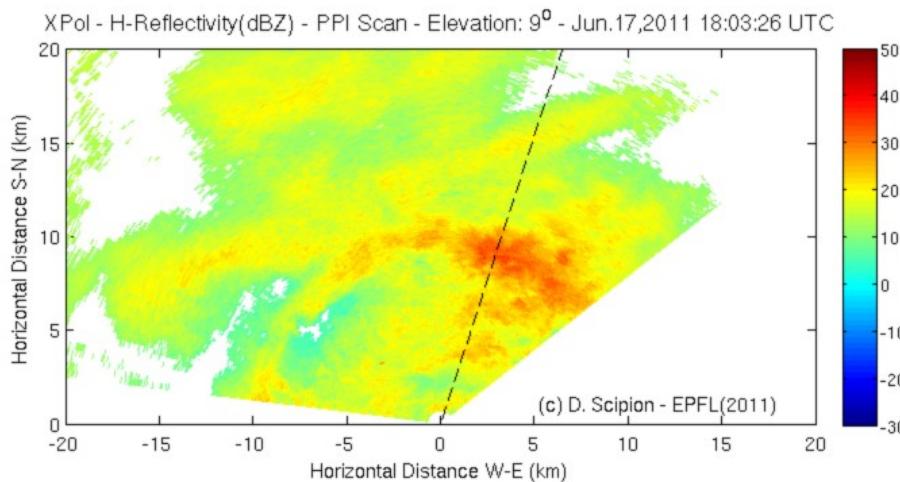
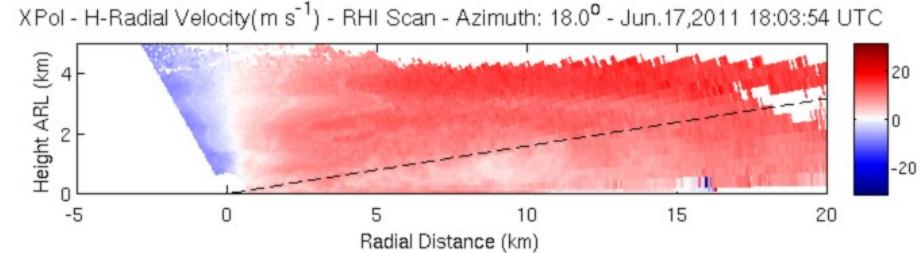
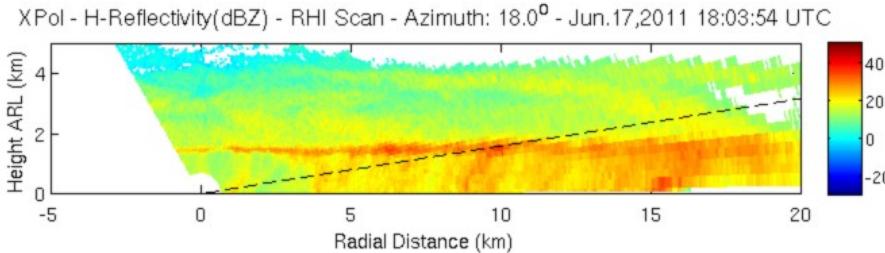
Exemples de données (1)

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



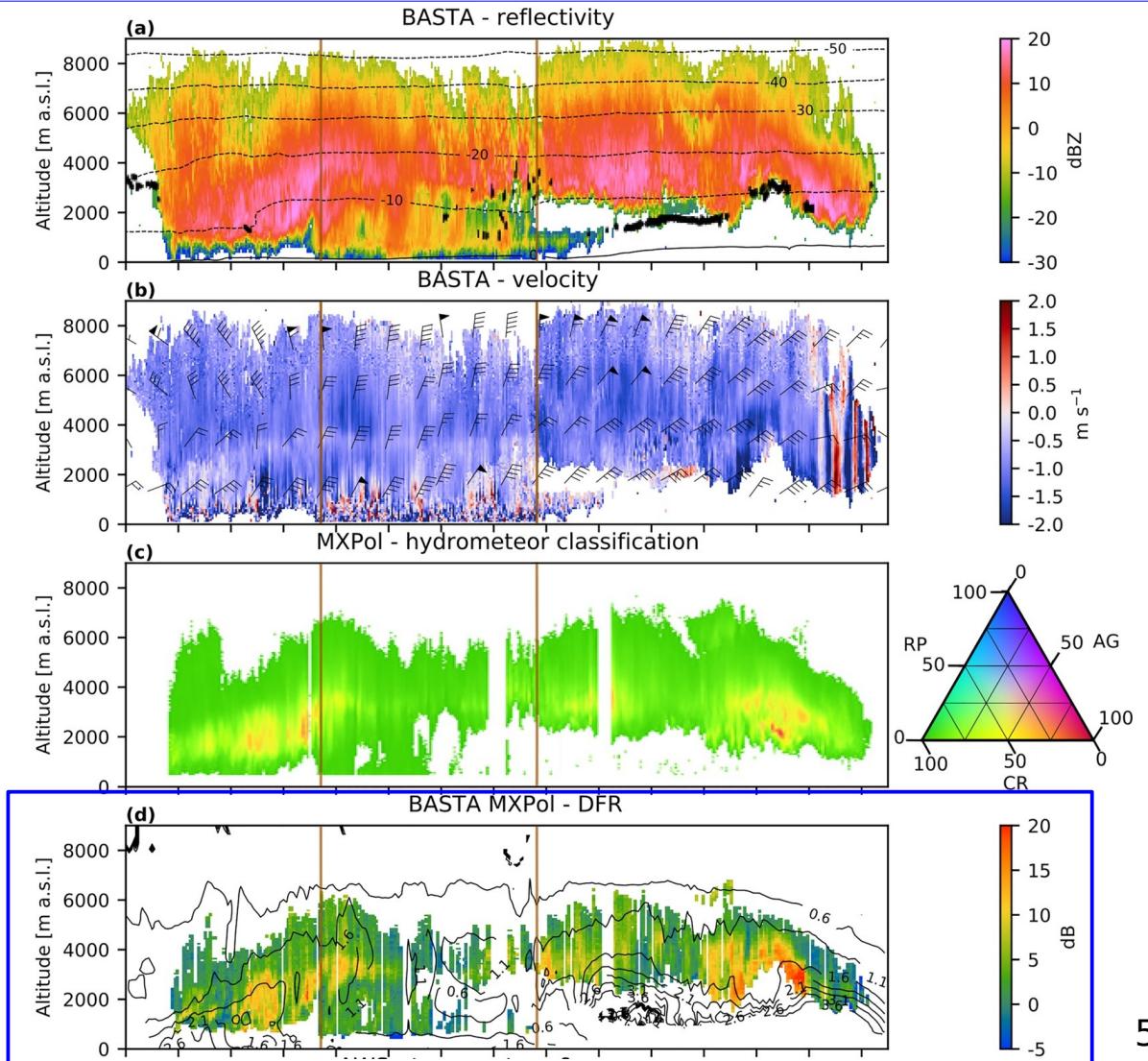
Exemples de données (2)

Davos, 17 juin 2011 : précipitation frontale



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

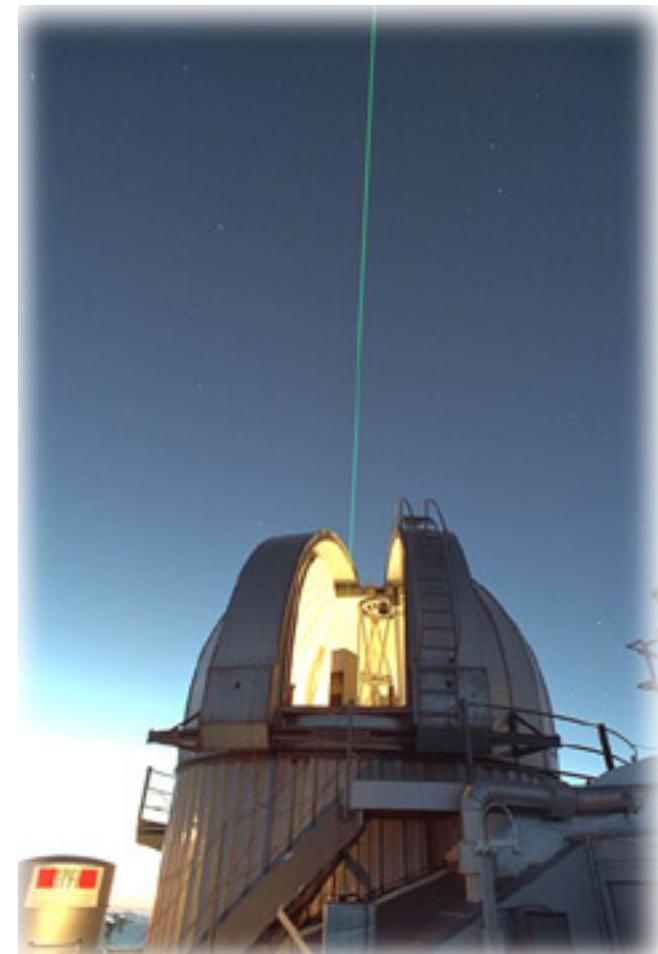
Principe fonctionnement similaire au radar

Utilise laser (**l**ight **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

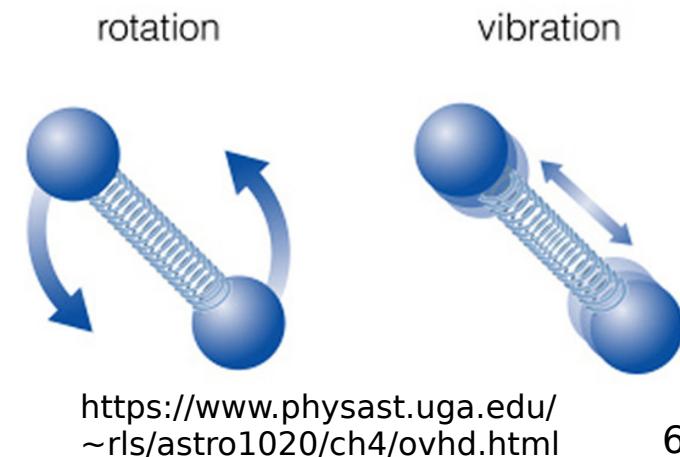
Interaction élastique (sans perte d'énergie) entre signal lidar et cible. Donc fréquence signal réfléchi = fréquence signal incident (excepté décalage Doppler).

Lidar Raman

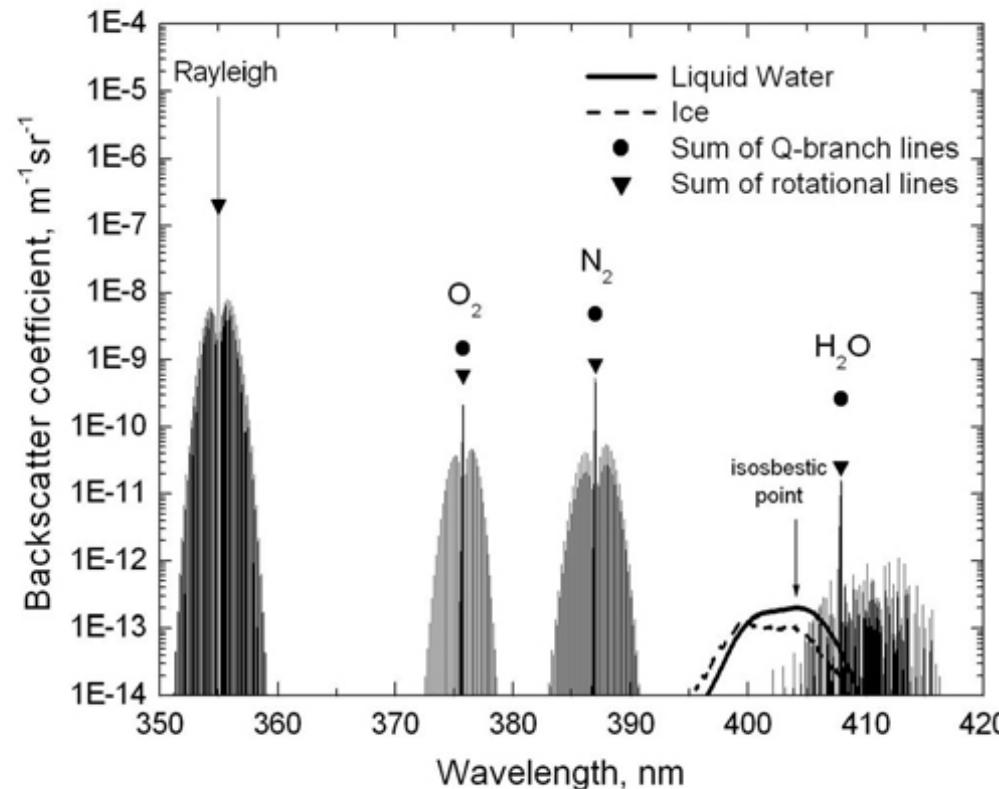
Interaction non-élastique : une partie de l'énergie du signal incident est absorbée puis ré-émise en fonction de la fréquence propre (composition chimique) de la cible → possibilité d'estimer la composition/concentration.

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.



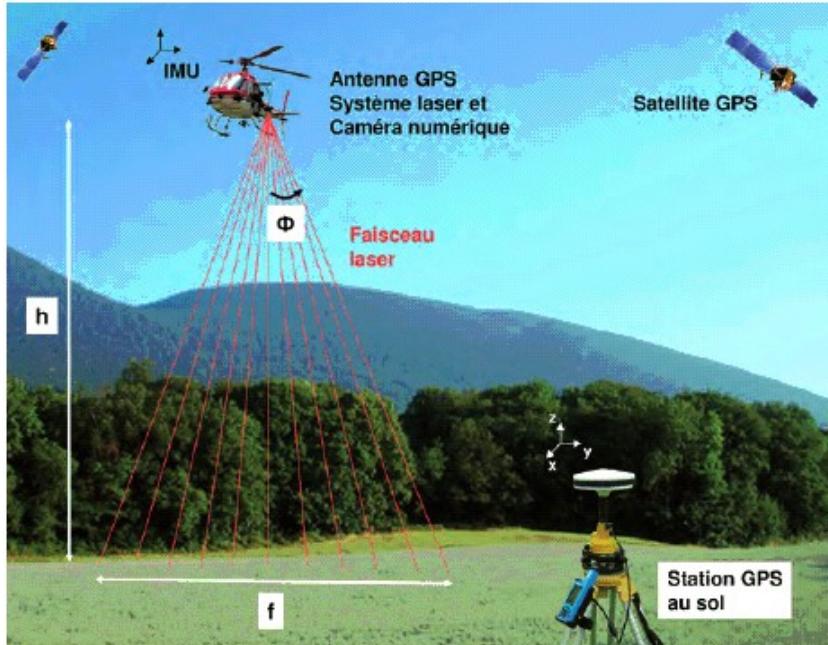
Spectres Raman gaz atmosphériques (long. onde incidente = UV - 355 nm)



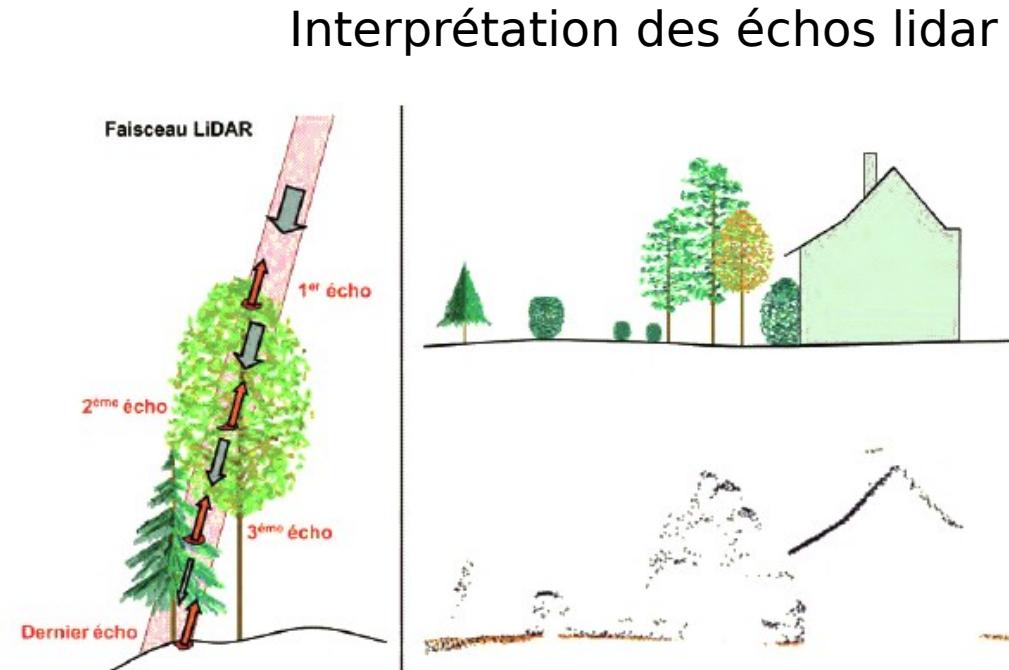
<https://www.tropos.de/en/research/projects-infrastructures-technology/technology-at-tropos/remote-sensing/raman-lidar/>

Apport de l'altimétrie par lidar pour la pratique forestière

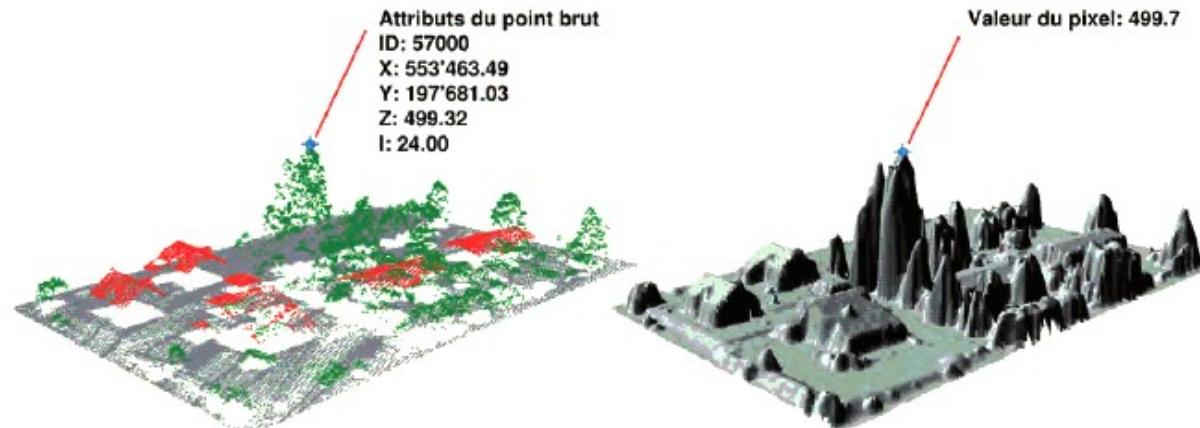
Tiré de Gachet et Junod, SZF 159 (2), p.19-30.
<http://www.atypon-link.com/SFS/toc/szf/159/2>



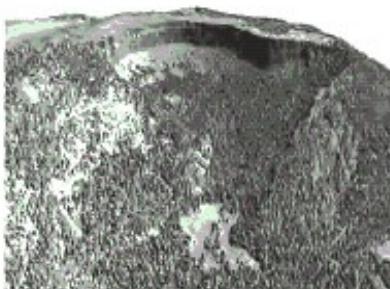
Nécessité positionnement précis (GPS)



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)



MNS



MNT



MNH

Ex : Creux du van

Recherche archéologique

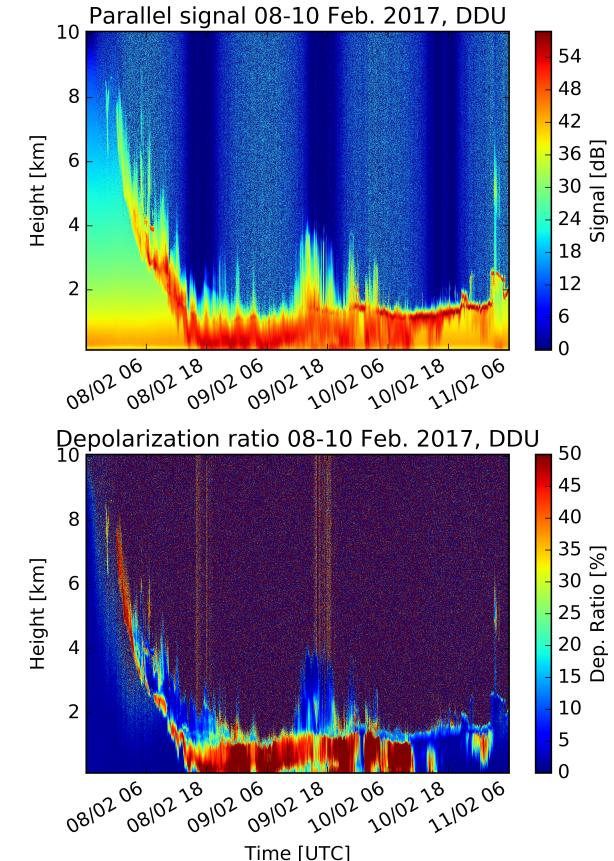


Aguada Fénix (Mexique) : site maya majeur découvert grâce à l'imagerie lidar
(Inomata, Nature, 2020)

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



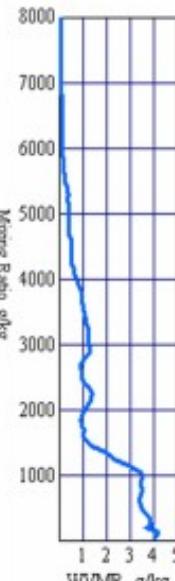
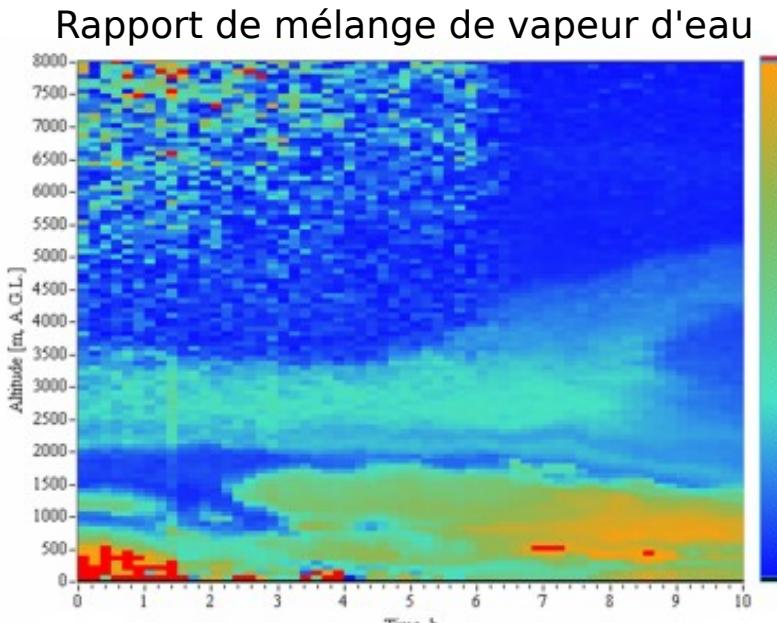
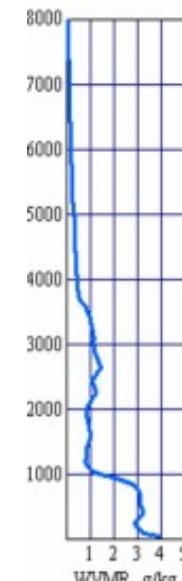
Lidar Raman pour mesure atmosphérique, Météo Suisse - Payerne.

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.