

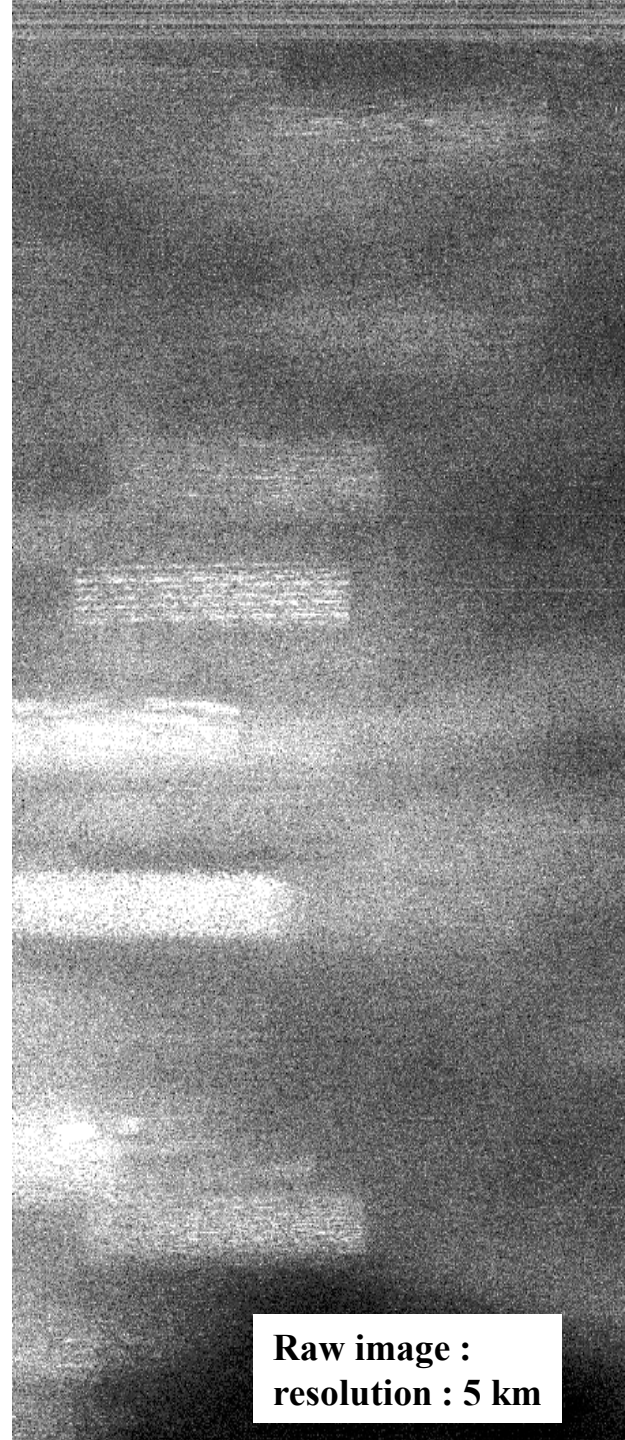
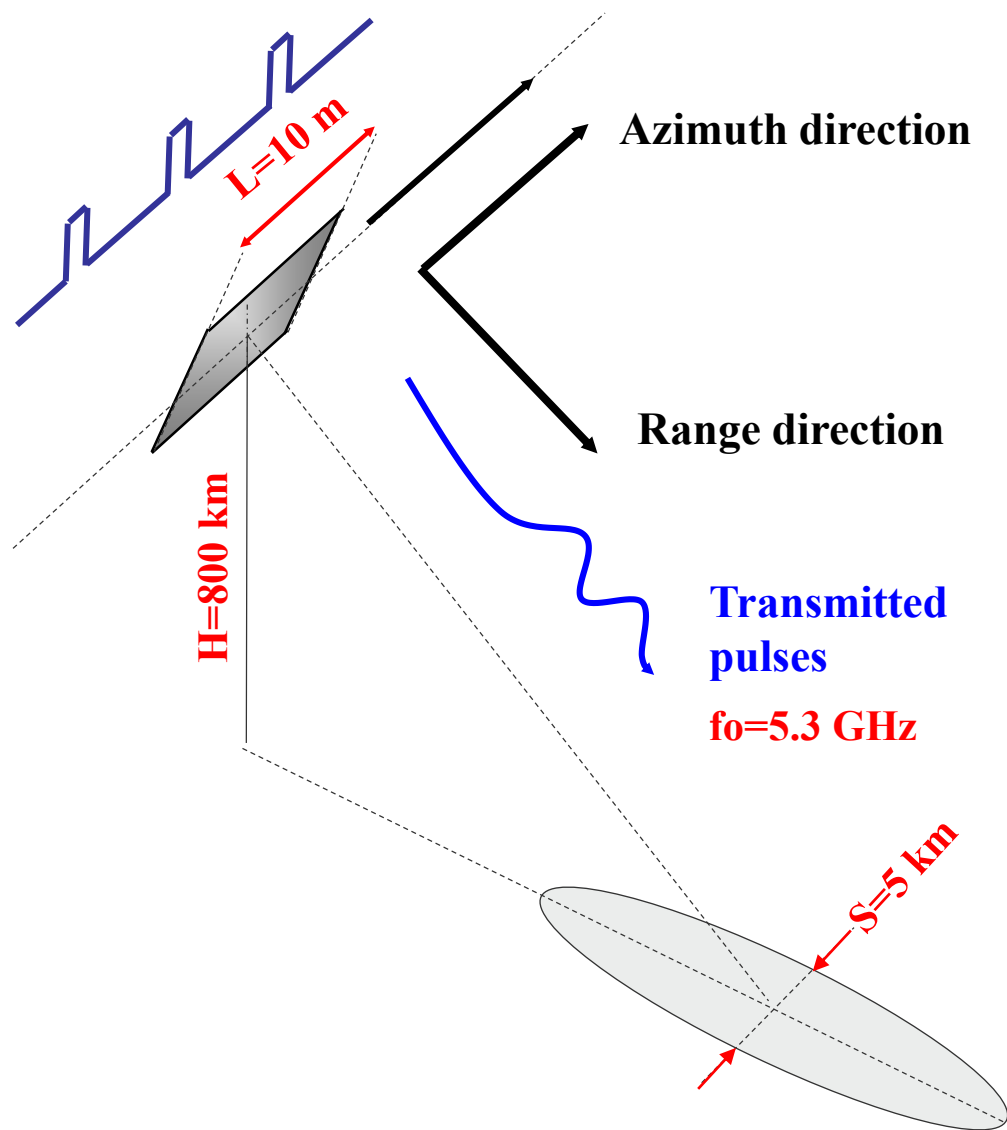
Processing SAR,

Raquel Rodriguez Suquet

CNES

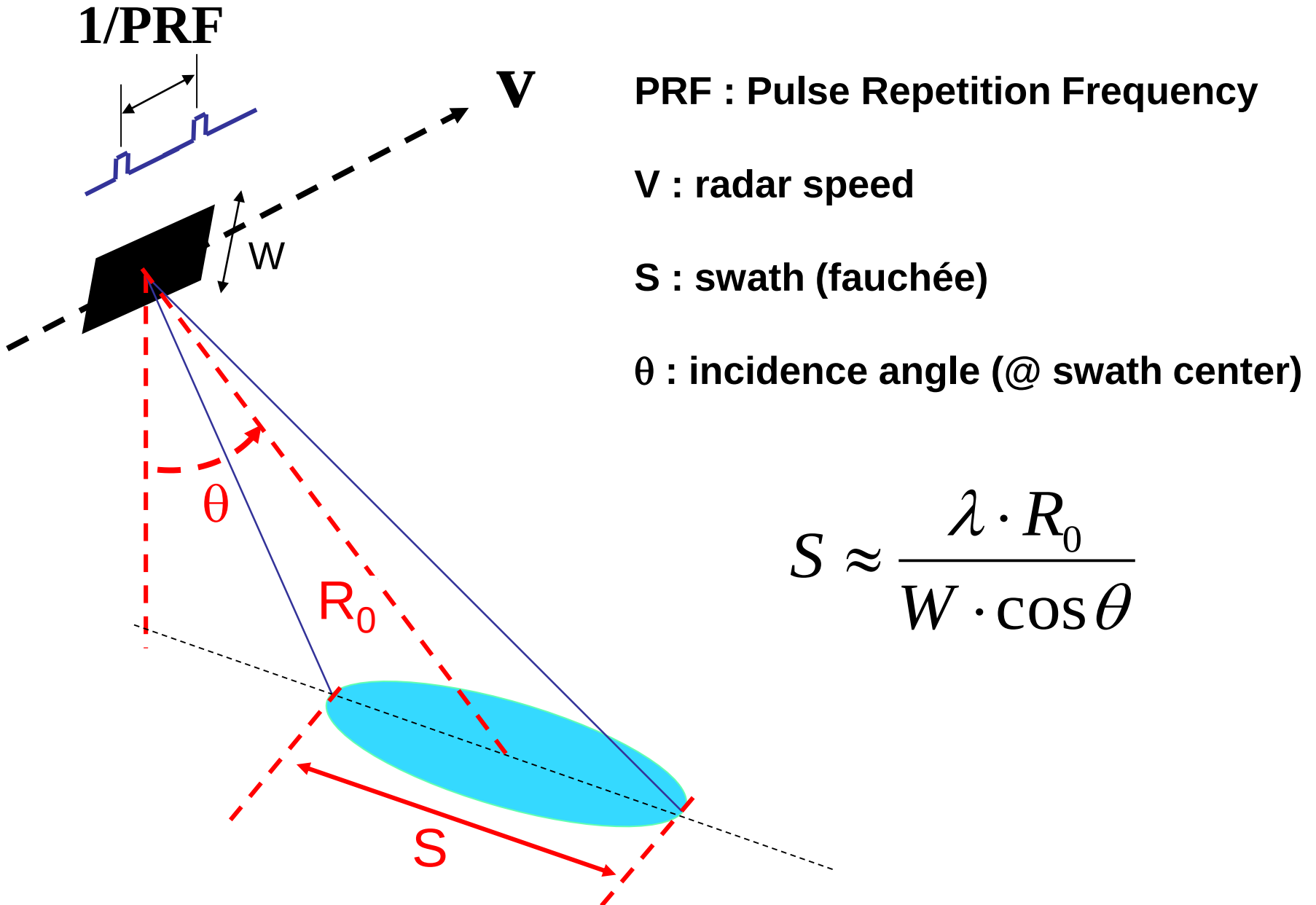
Mastère SIA – Décembre 2016

GEOMETRIE DE L'ACQUISITION

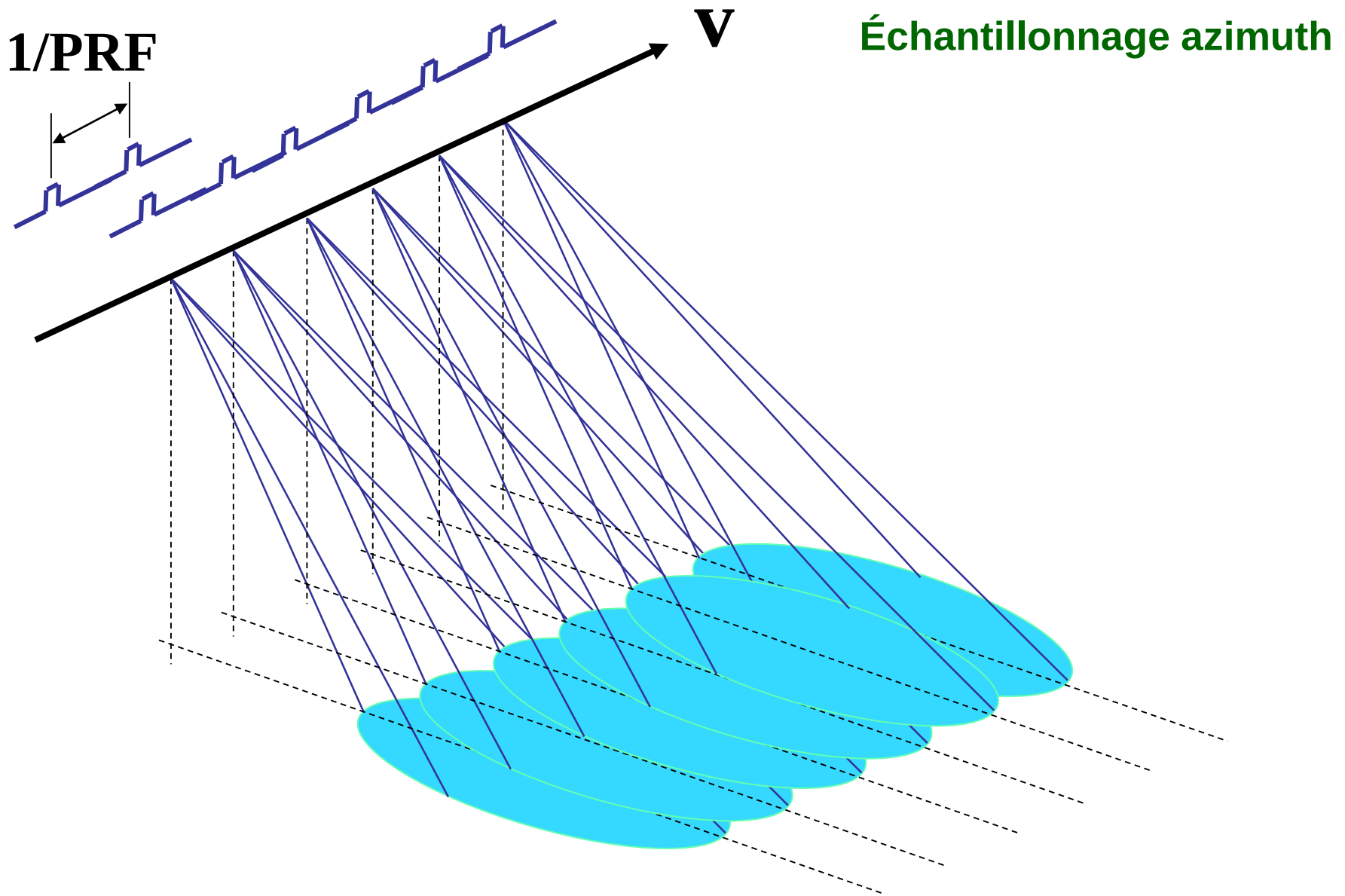


Raw image :
resolution : 5 km

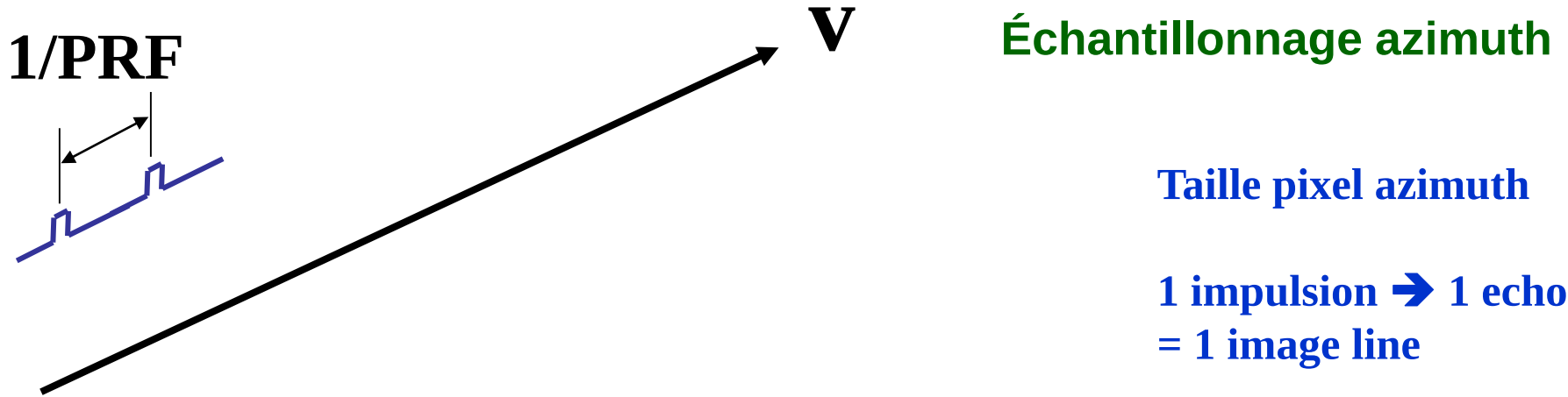
SAR Processing : Image formation in azimuth



Avant le processing ... acquisition des données radar

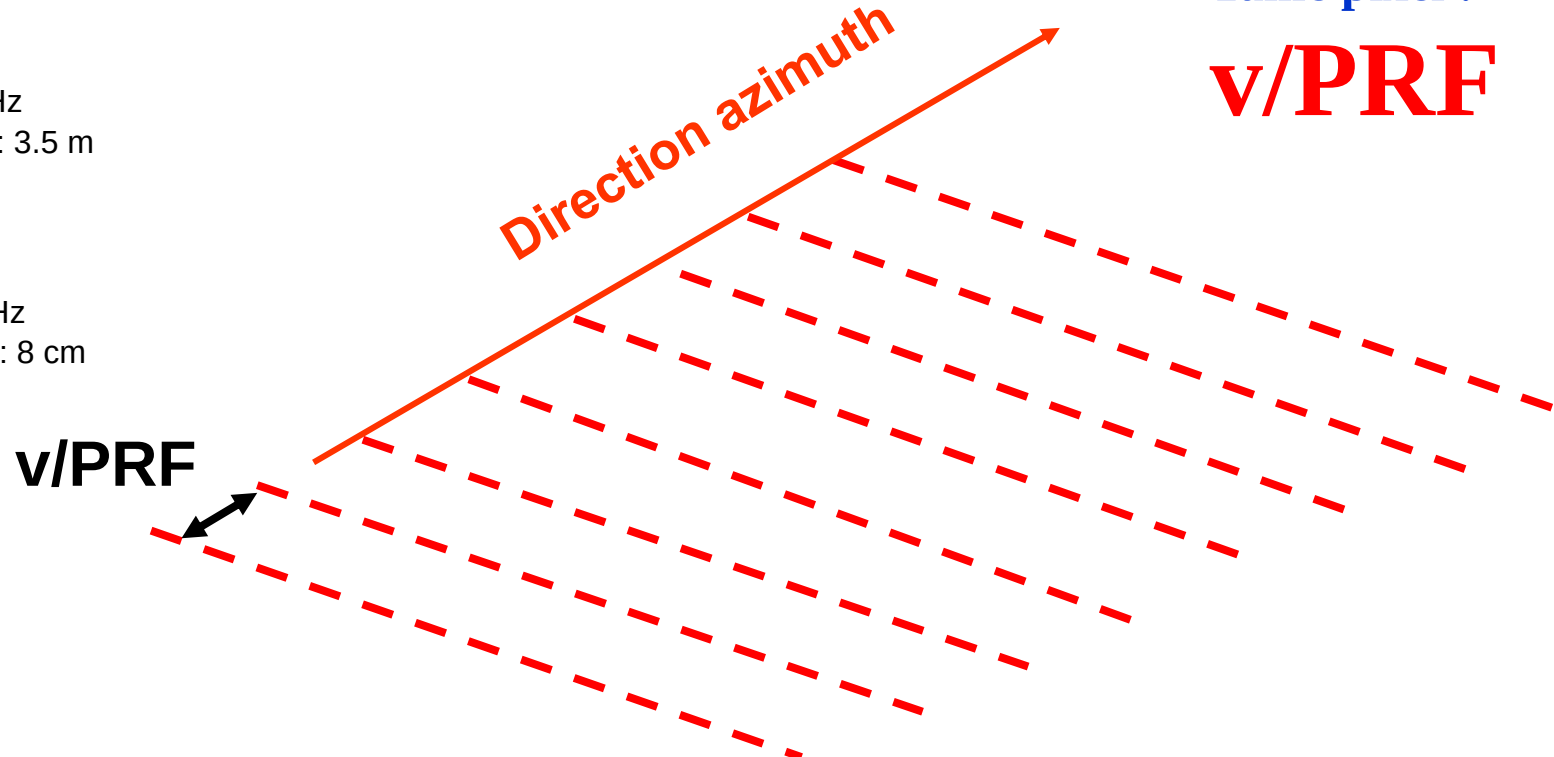


Avant le processing ... acquisition des données radar

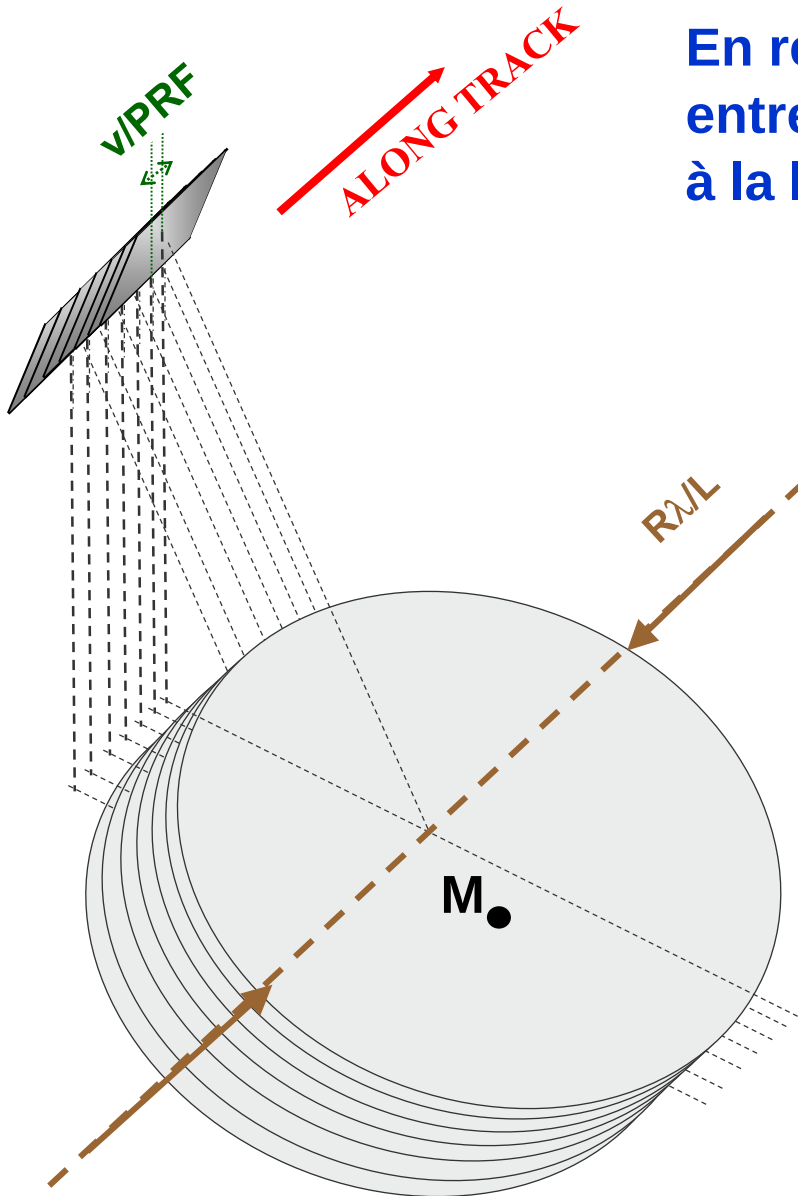


Spatial,
 $v=7 \text{ km.s}^{-1}$
 $PRF = 2 \text{ kHz}$
Taille pixel : 3.5 m

Aéroporté
 $v=80 \text{ m.s}^{-1}$
 $PRF = 1 \text{ kHz}$
Taille pixel : 8 cm



Avant le processing ... acquisition des données radar



En réalité, la progression du radar entre 2 impulsions (v/PRF) est très inférieure à la largeur de la tâche azimuth ($R\lambda/L$)

Un point M donné est observé par un très grand nombre (N) d'impulsions

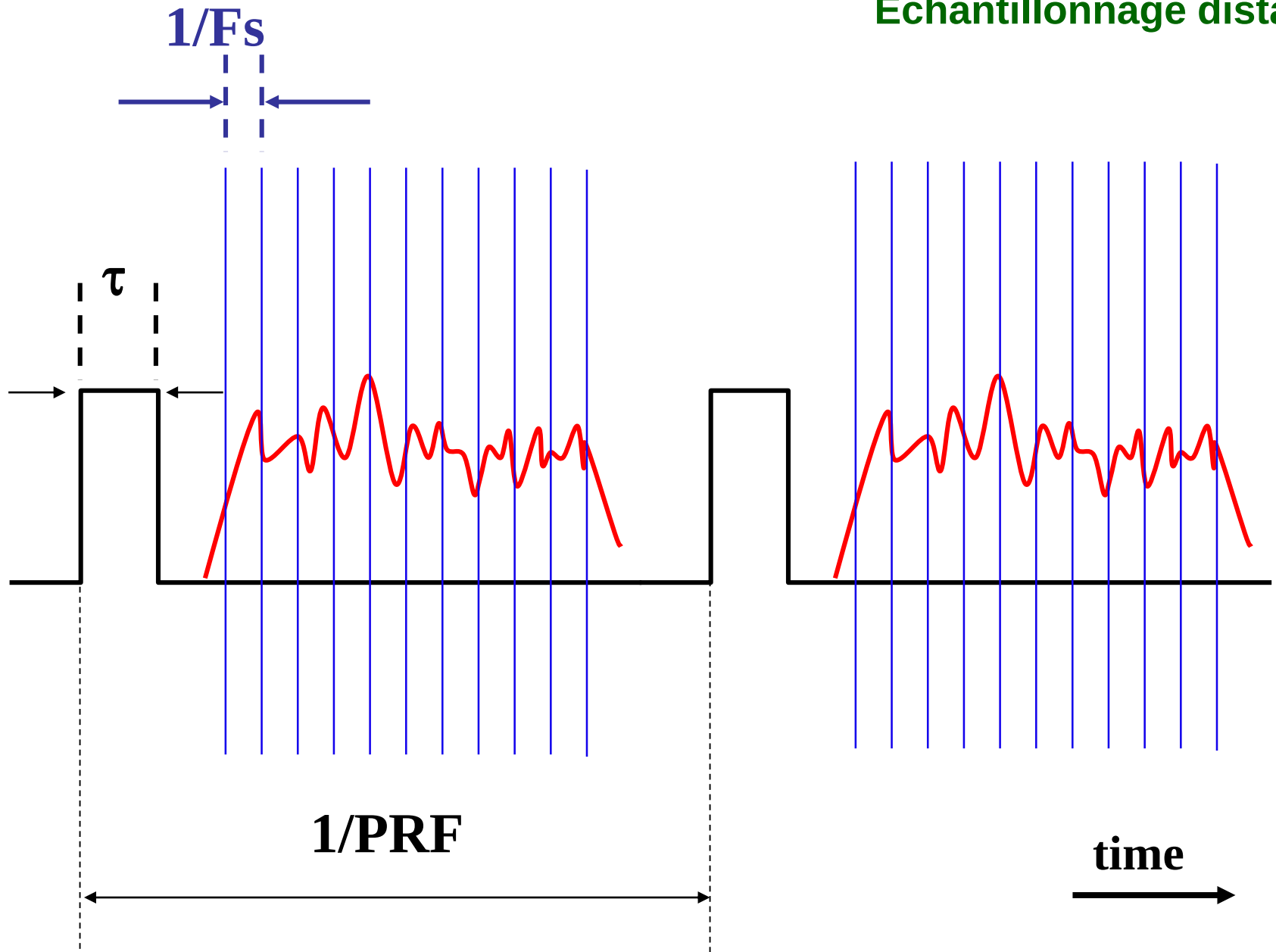
Combien ?

... environ (spatial) :

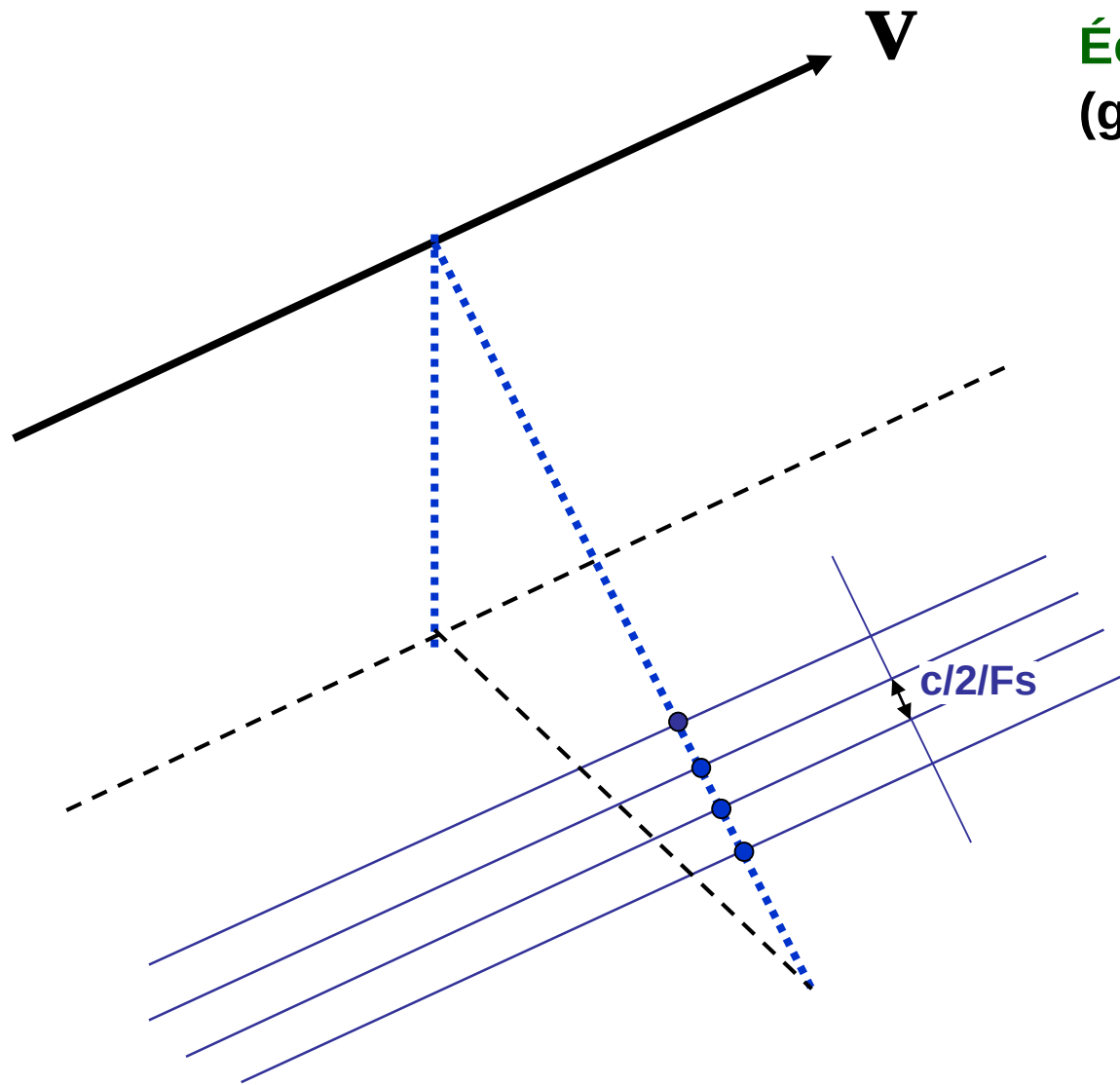
$$N = \frac{R\lambda / L}{v / PRF} = 5 \text{ km} / 3.5 \text{ m} = 1400 !$$

Avant le processing ... acquisition des données radar

Échantillonnage distance



Avant le processing ... acquisition des données radar



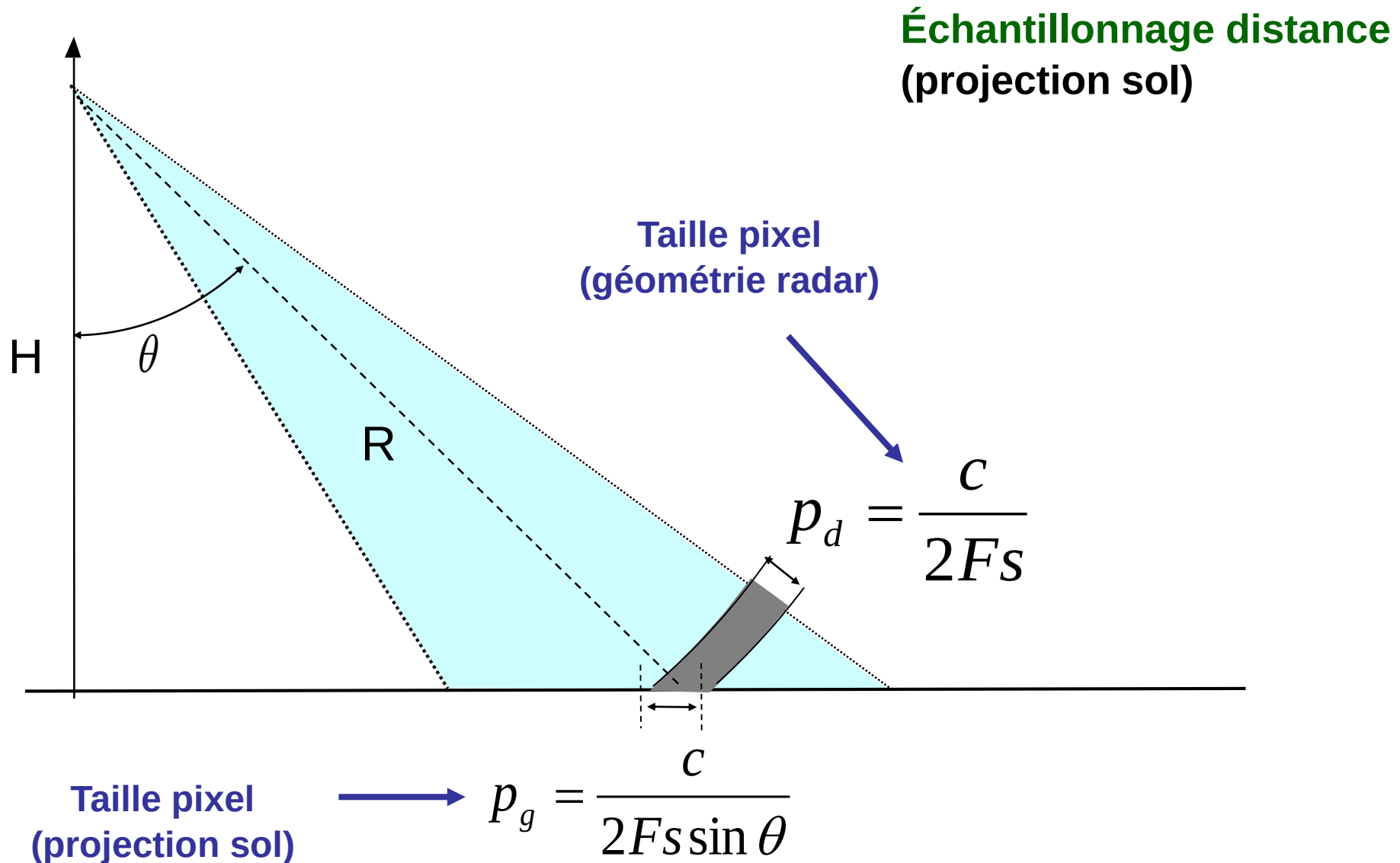
Échantillonnage distance
(géométrie radar)

Taille pixel distance

(géométrie « slant range »)

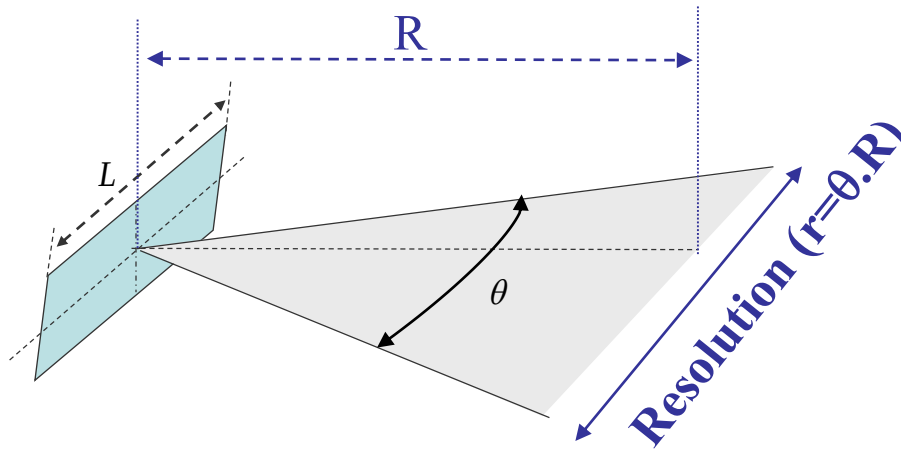
$c/2/F_s$

Avant le processing ... acquisition des données radar



RESOLUTION av. Traitement : azimuth

Reminder: Antenna scattering



$$\theta = \frac{\lambda}{L}$$

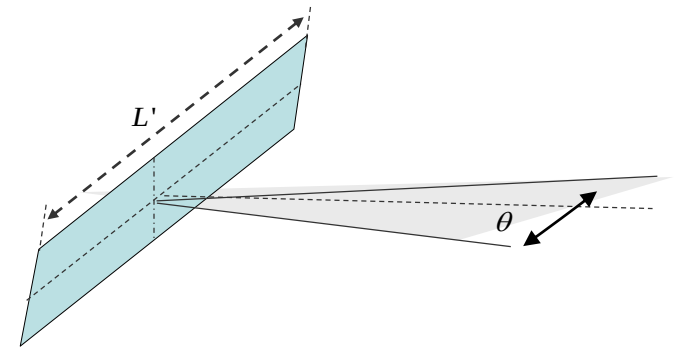
Wavelength

Antenna length (horizontal direction)

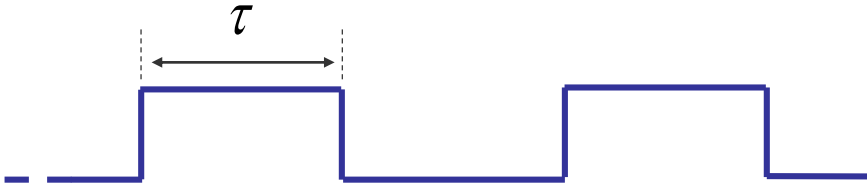
Angular aperture (horizontal plane)

➔ Plus l'antenne est large, plus étroite et fine est l'aperture de l'antenne (meilleure résolution)

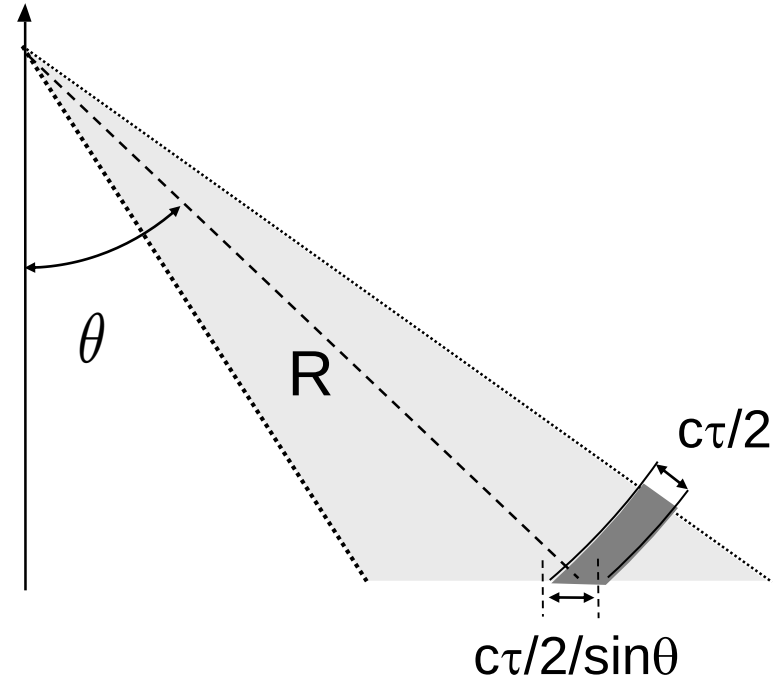
➔ Résolution Azimut = $R.\lambda/L$



RESOLUTION av. Traitement : distance



τ = durée d'impulsion longue



➡ Résolution distance (géométrie radar) = $c.\tau/2$

Taille de pixel / résolution avant traitement

Taille pixel azimuth = v/PRF

Taille pixel distance = $c/2/F_s$
(projection sol : $c/2/F_s/\sin\theta$)

Ordre de grandeur
(spatial) :
qq mètres

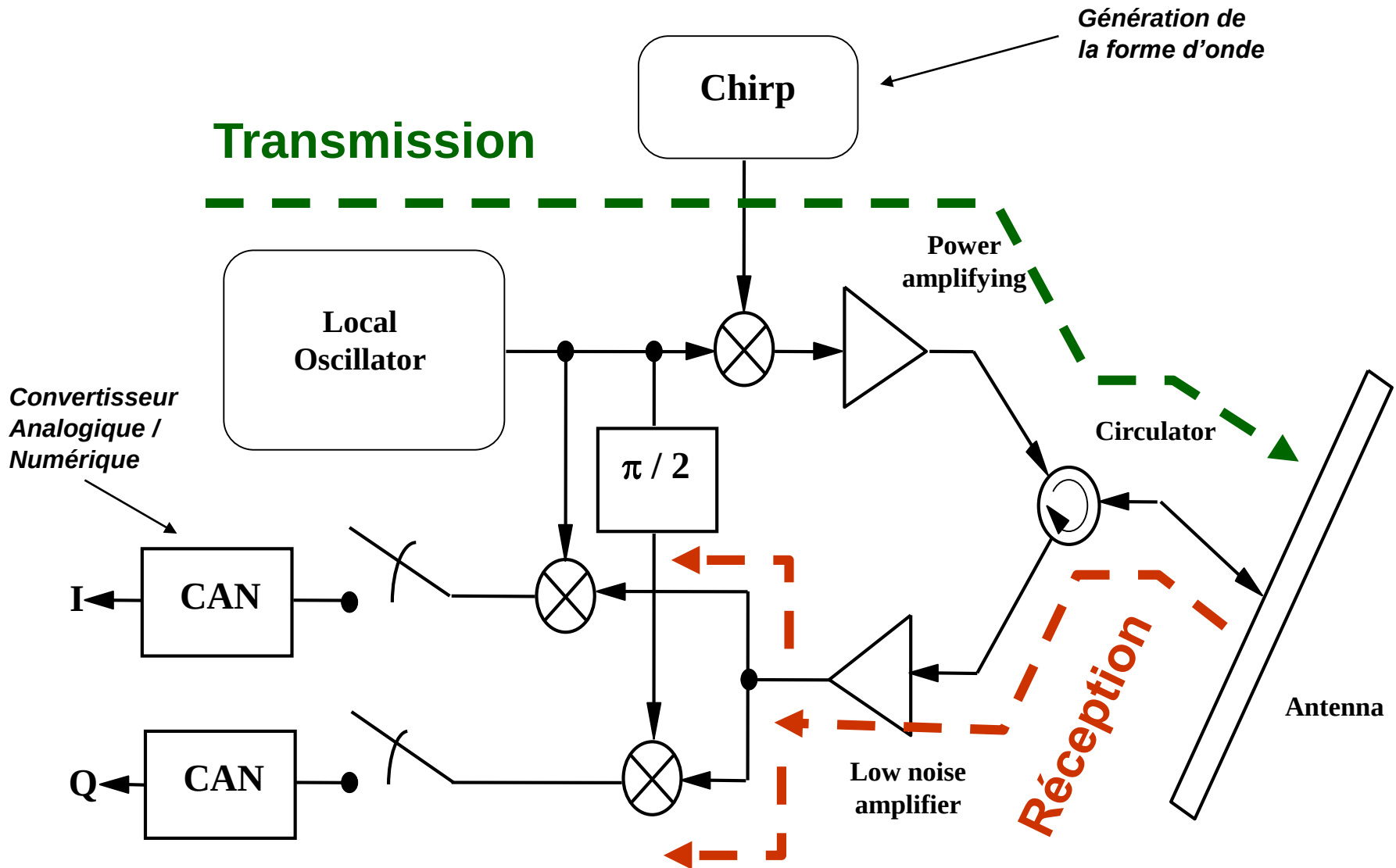
Taille pixel $\neq$ résolution !

Résolution azimuth (avant processing) = $R\lambda/L$

Résolution distance (avant processing) = $c\tau/2$
(projection sol : $c\tau/2 / \sin\theta$)

Ordre de grandeur
(spatial) :
qq kilomètres

Du caractère complexe (amplitude, phase) des données traitées

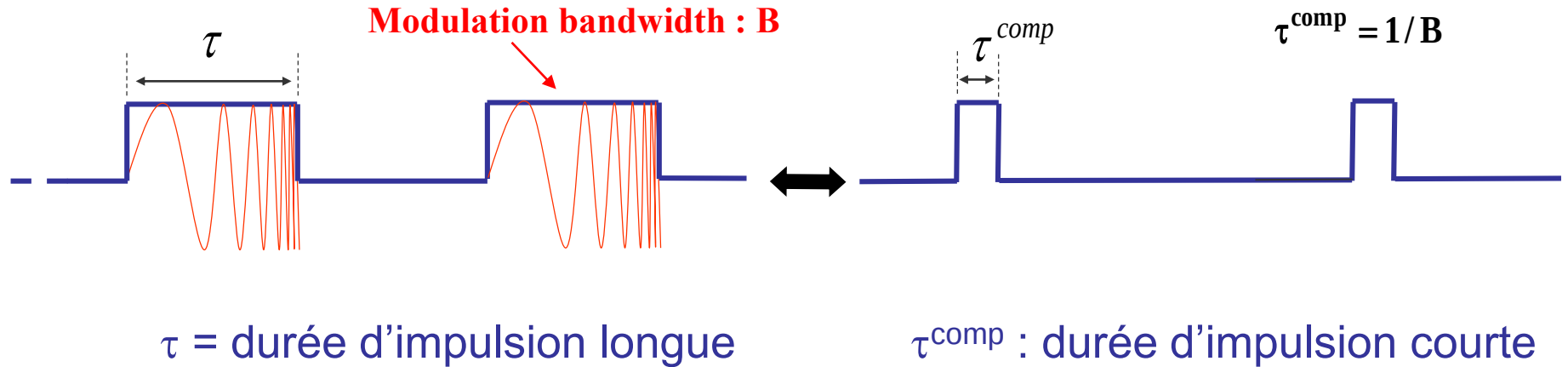


1 pixel image = I + j. Q (nombre complexe) = amplitude + phase

AMELIORATION DE LA RESOLUTION

Montée en résolution : distance

→ Modulation en fréquence de l'impulsion émise



$$c\tau / 2 \rightarrow c / 2B$$

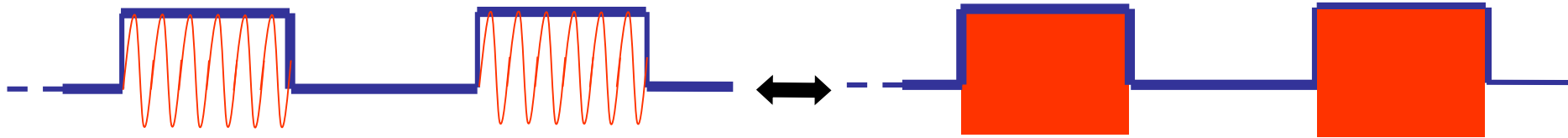
$$(\text{for } \tau = 33.3 \mu\text{s}) \quad 5 \text{ km} \rightarrow 10 \text{ m} \quad (\text{for } B = 15 \text{ MHz})$$

$$\text{Résolution gain (=compression gain)} = \tau / \tau^{\text{comp}} = \mathbf{B \cdot \tau}$$

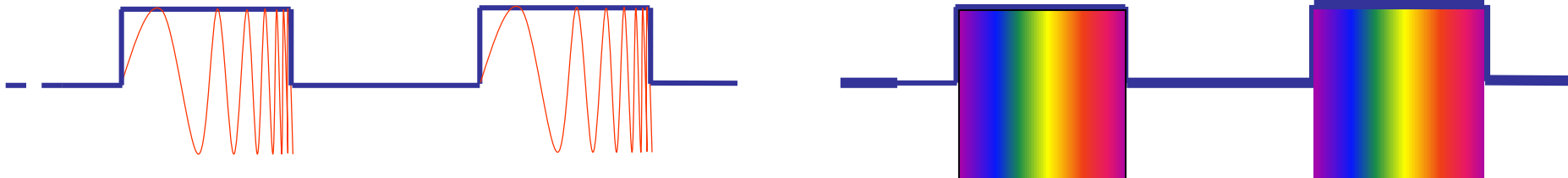
Une interprétation naïve de la compression d'impulsion ... (1/2)

→ La modulation de fréquence est une « colorisation » de l'impulsion

Onde monochromatique : 1 raie, 1 « couleur »

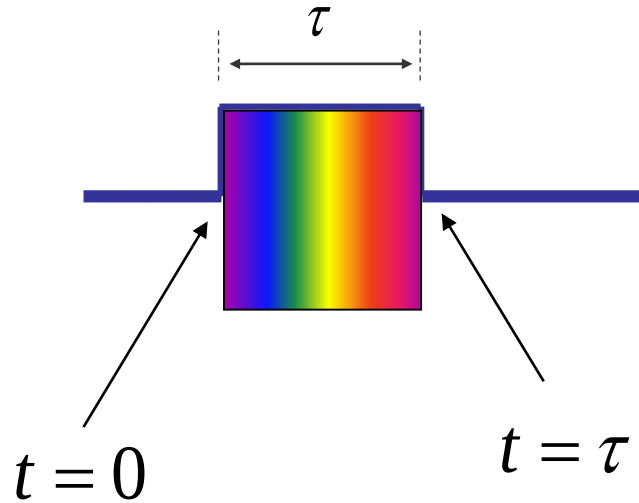


Onde modulée en fréquence = onde « colorisée »



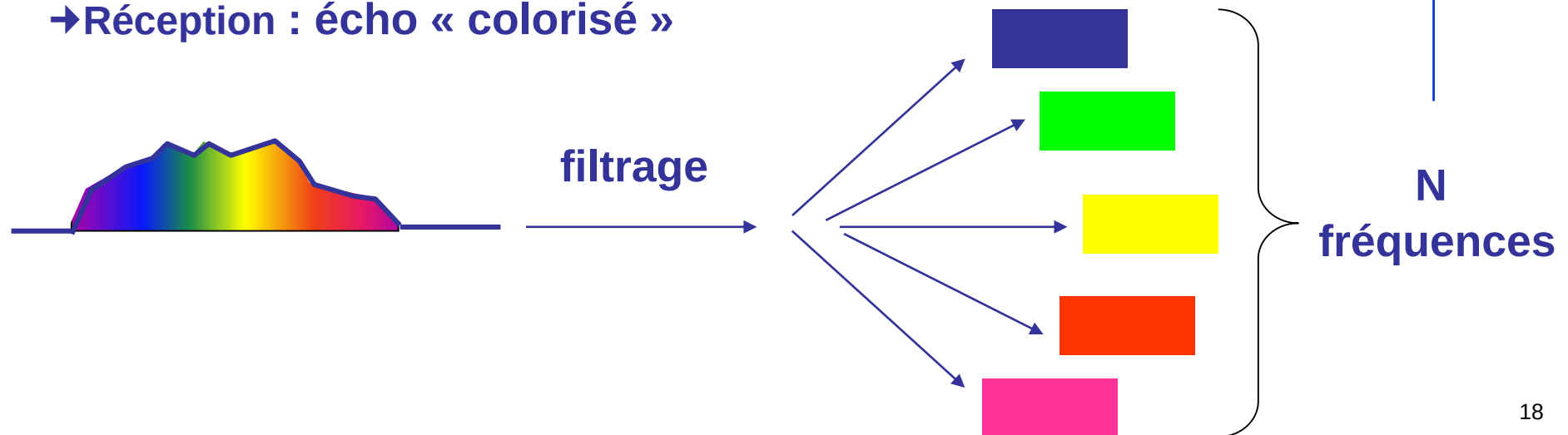
Une interprétation naïve de la compression d'impulsion ... (2/2)

→Echo émis (énergie : $E = P_c \cdot \tau$, P_c est la puissance crête)



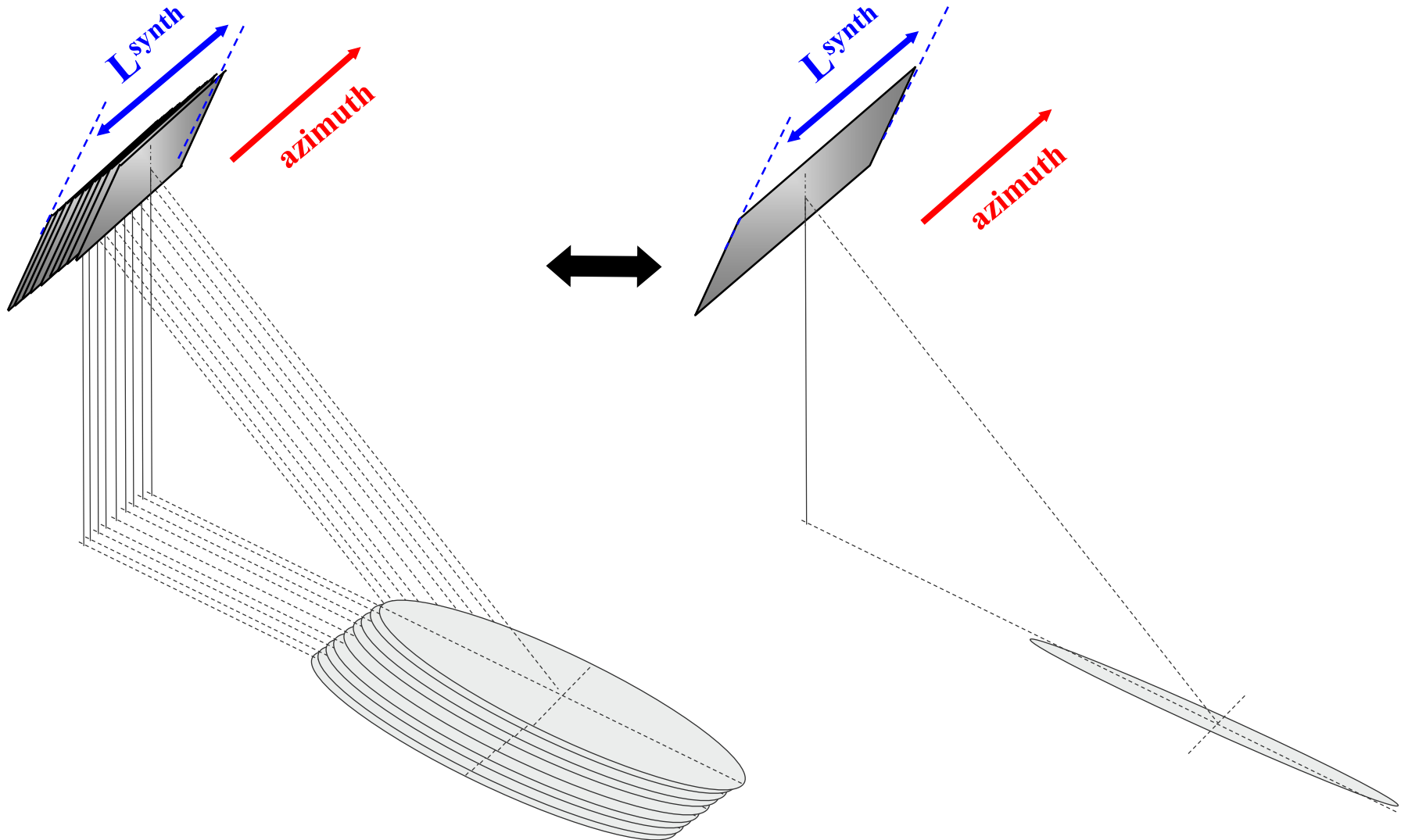
Résolution temporelle : τ / N

→Réception : écho « colorisé »

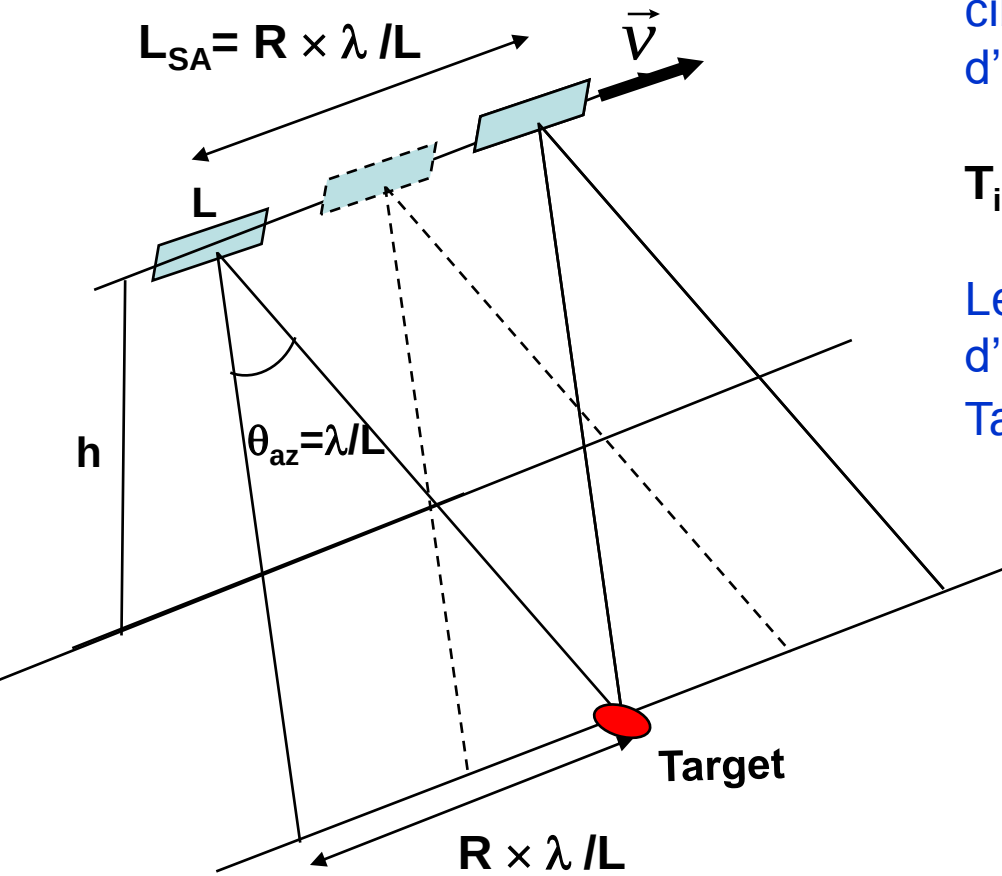


Montée en résolution : azimuth

→ utilisation du mouvement d'antenne



Montée en résolution azimuth : principe de la synthèse SAR

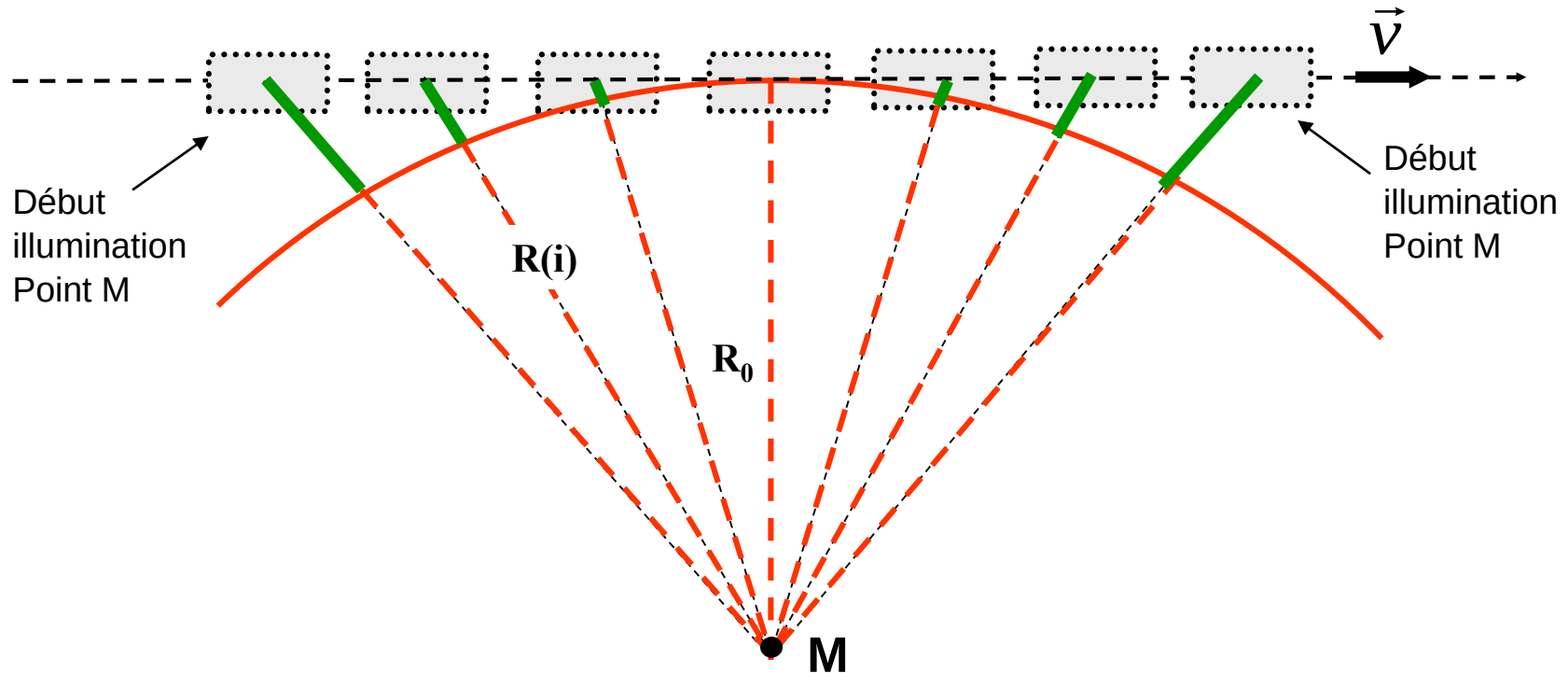


Addition cohérente d'échos provenant d'une cible M donnée, et recueillis durant le temps d'illumination :

$$T_{ill} \approx R \times \lambda / L / V$$

Le résultat est équivalent à la réception d'un signal par une "grande" antenne, de Taille : $R \times \lambda / L$

Synthèse SAR (approche géométrique)



$$R(i) = R_0 + \delta R(i)$$

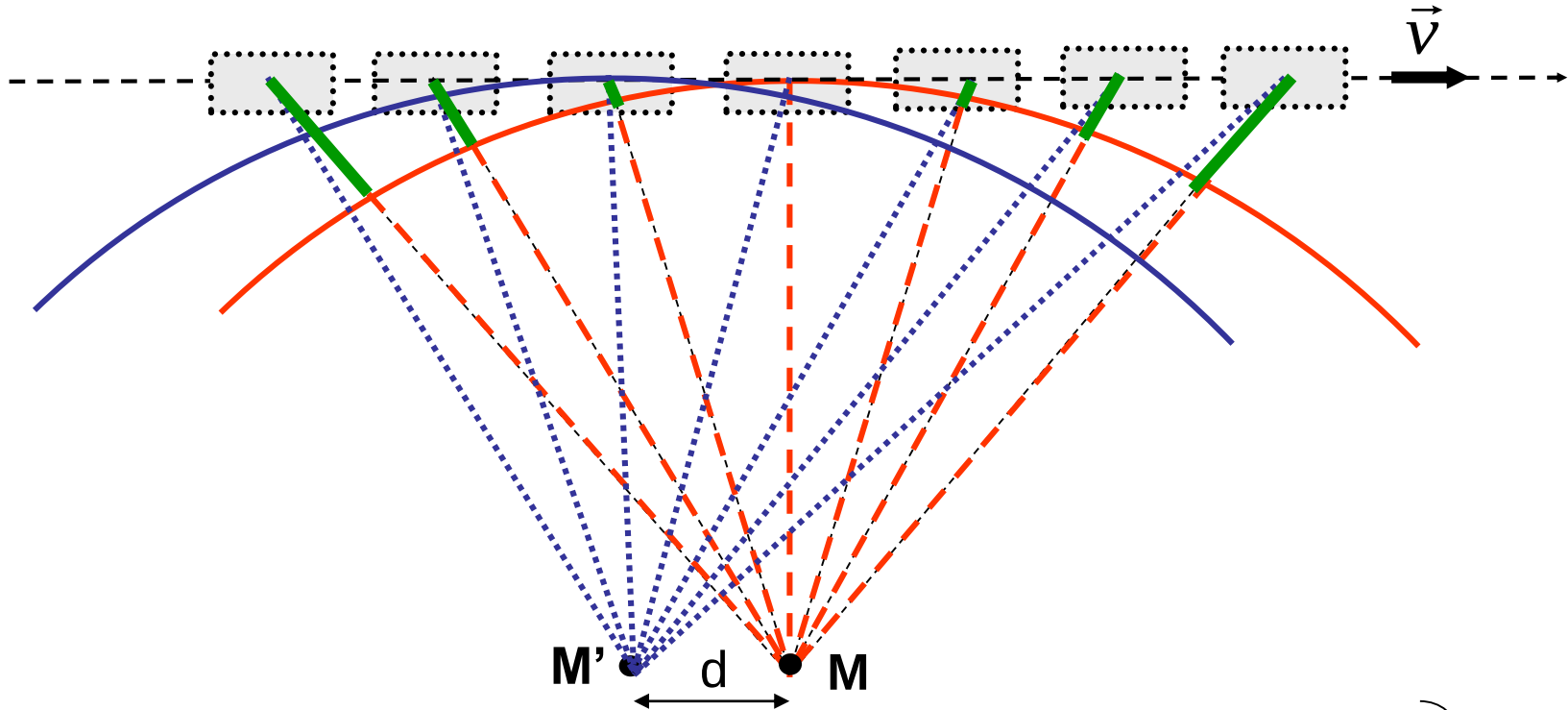
$$\Rightarrow \Phi(i) = \Phi_0 + \delta \Phi(i) \Rightarrow S^{\text{rec}}(i) = S_0 \cdot \exp(j \cdot \Phi(i)) = \exp(j \cdot (\Phi_0 + \delta \Phi(i)))$$

$$\Rightarrow \text{Réponse au point M} = \sum S^{\text{rec}}(i) \cdot \exp(-j \cdot \delta \Phi(i)) = N \cdot S_0 \cdot \exp(j \cdot \Phi_0)$$

Compensation
du
« trajet vert »

Synthèse SAR (approche géométrique)

... Que se passe-t-il sur un point voisin (M') ?

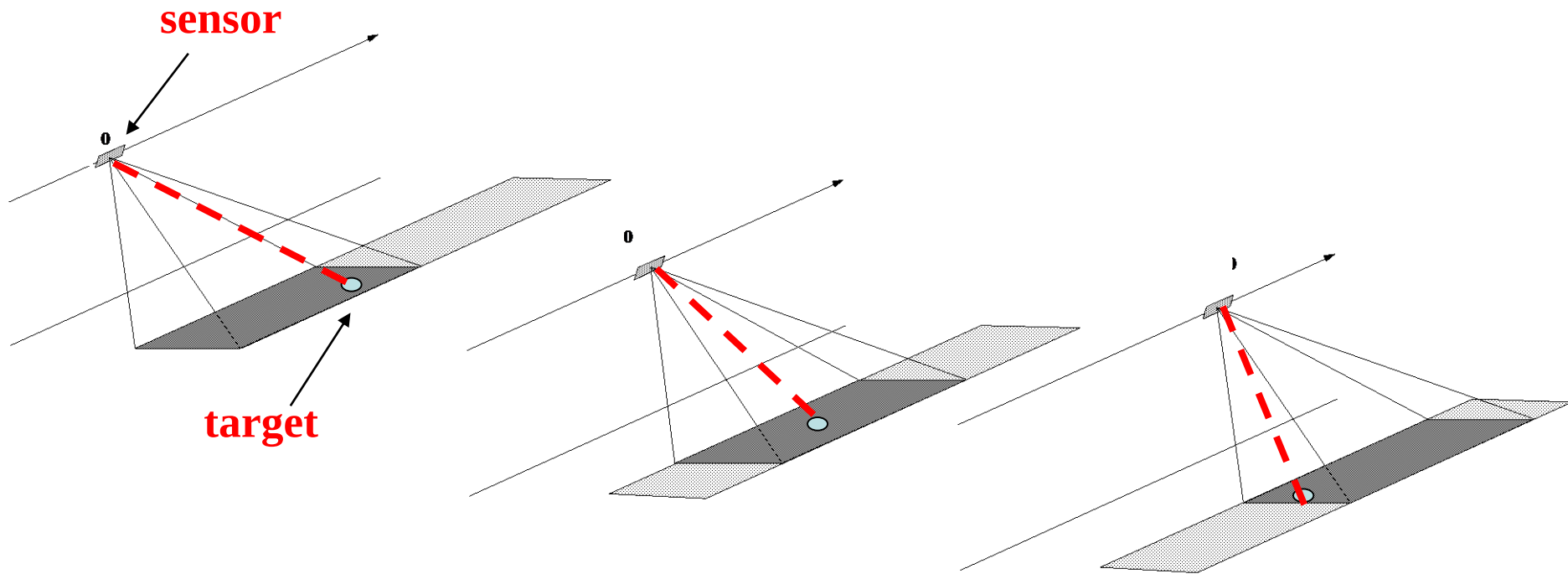


La **correction « verte »** n'est plus optimale en M' , et il persiste un résidu de phase après avoir appliqué la correction adaptée au point M

Compensation
du
« trajet vert »

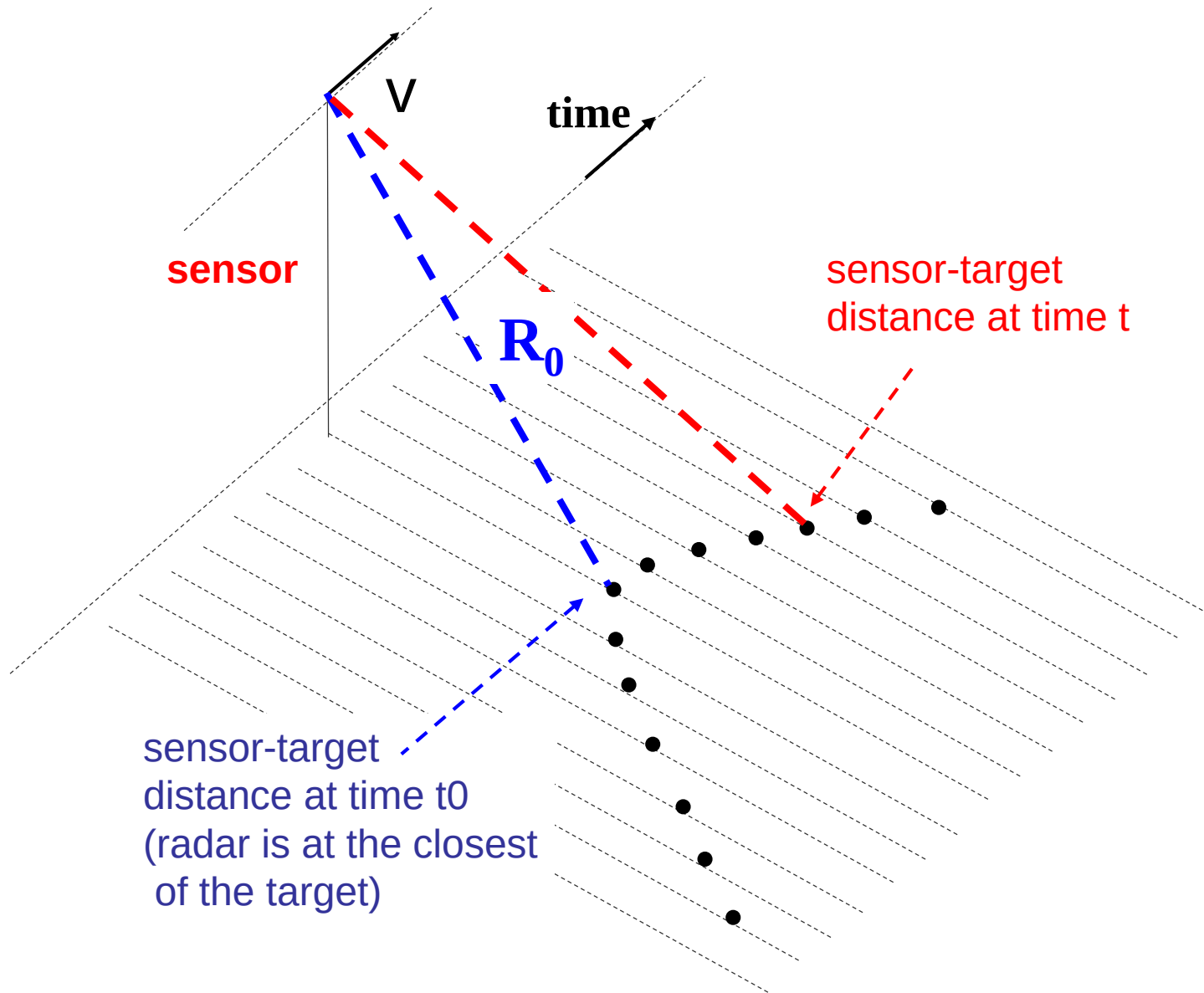
Analyse Doppler

Variations distance sensor-target



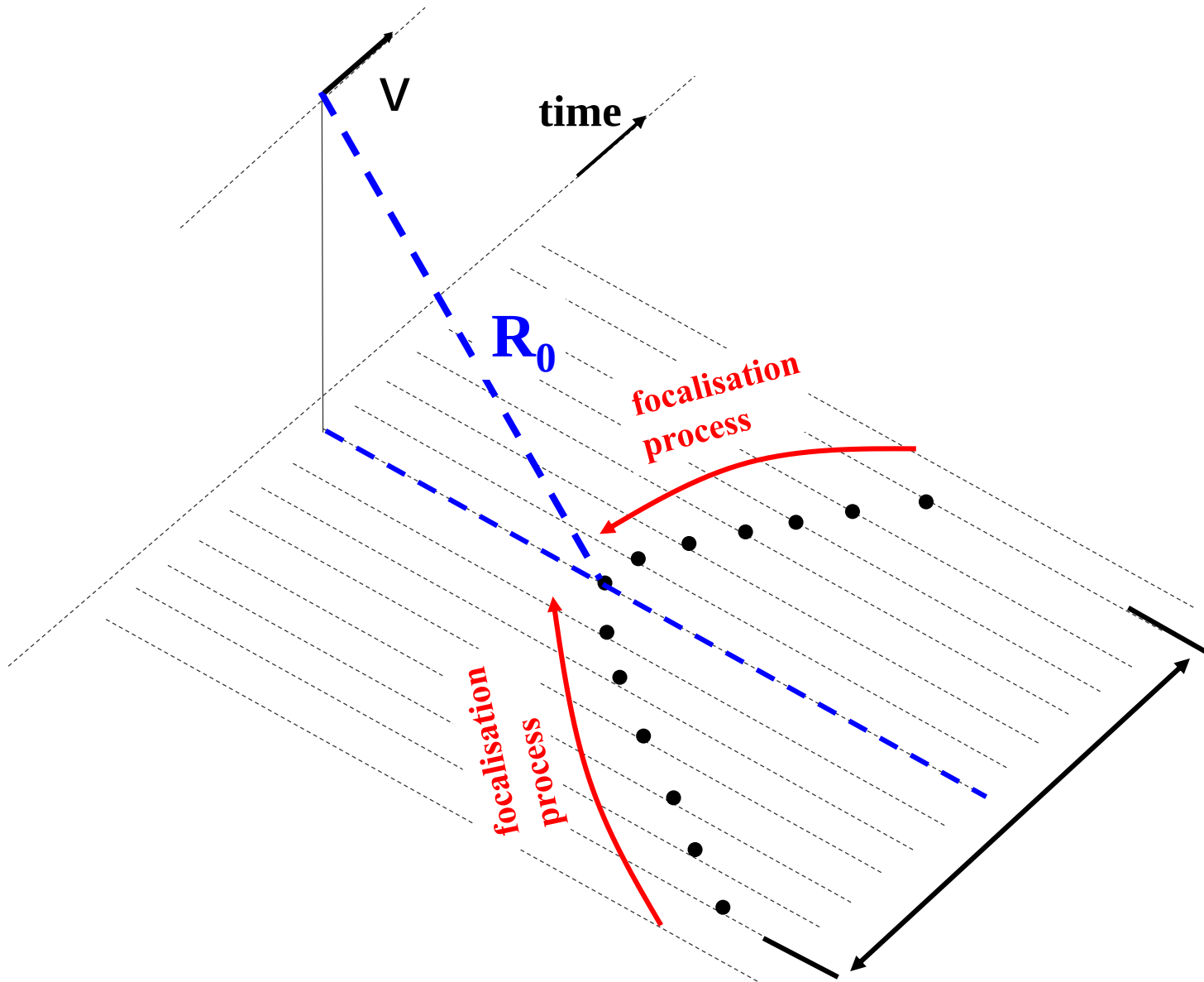
Analyse Doppler

Variations distance sensor-target

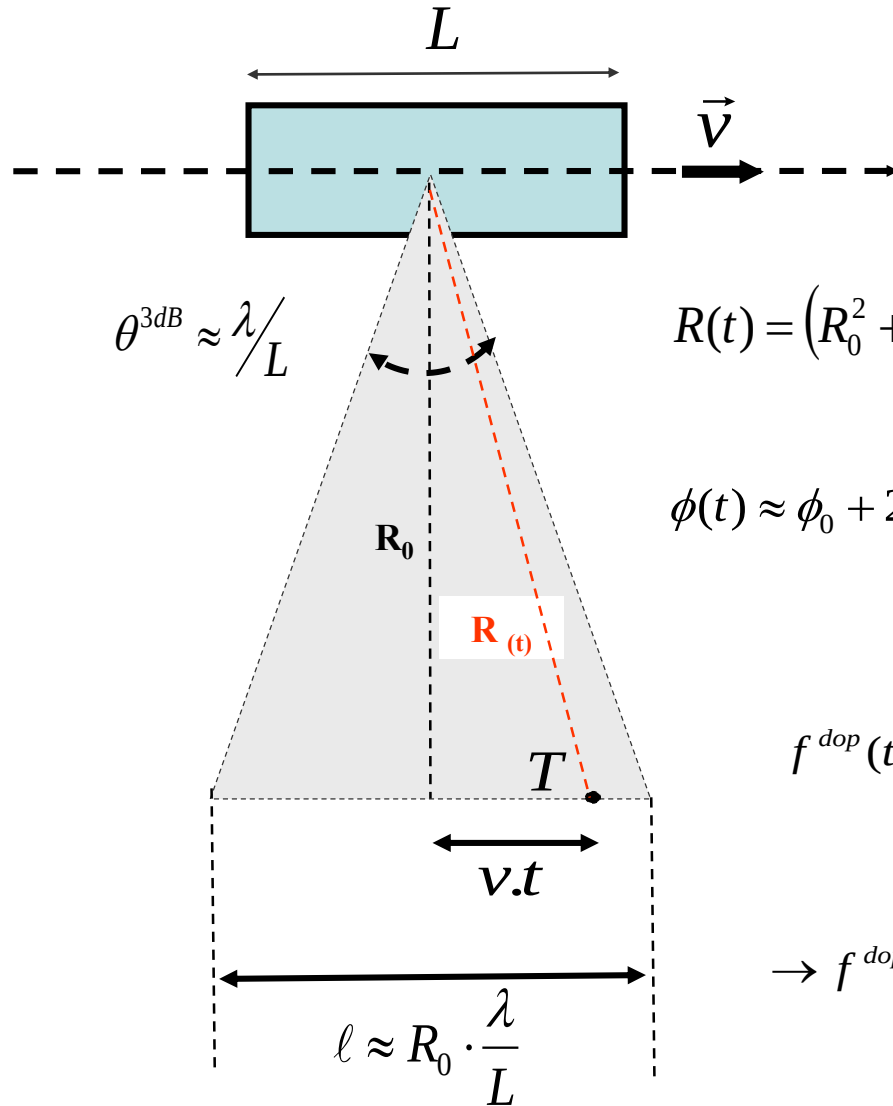


Doppler analysis

Variations distance sensor-target : procès de focalisation



➔ Traitement Doppler : analyse quantitative



$$R(t) = \left(R_0^2 + v^2 \cdot t^2 \right)^{1/2} \approx R_0 + v^2 \cdot t^2 / 2R_0$$

Distance instantanée

$$\phi(t) \approx \phi_0 + 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (R_0 + v^2 \cdot t^2 / 2R_0)$$

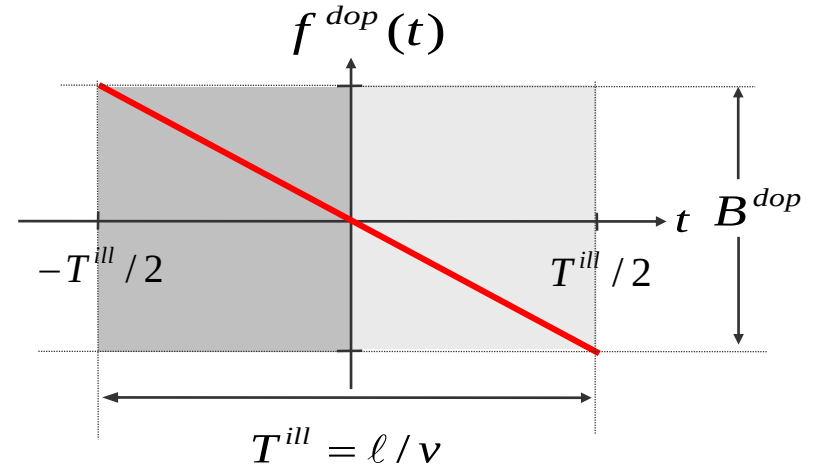
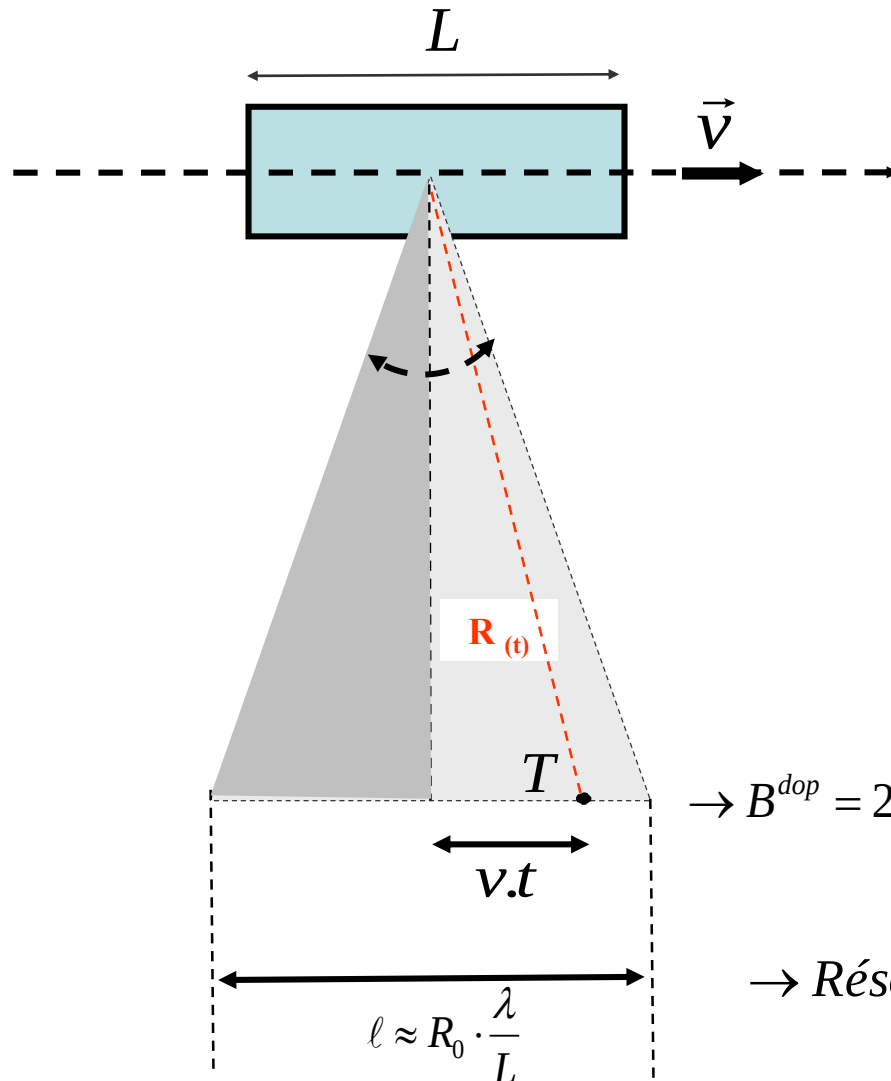
Phase instantanée

$$f^{dop}(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Fréquence Doppler instantanée

$$\rightarrow f^{dop}(t) = -2 \cdot \frac{v^2 \cdot t}{\lambda \cdot R_0}$$

➔ Mouvement d'antenne : Analyse Doppler



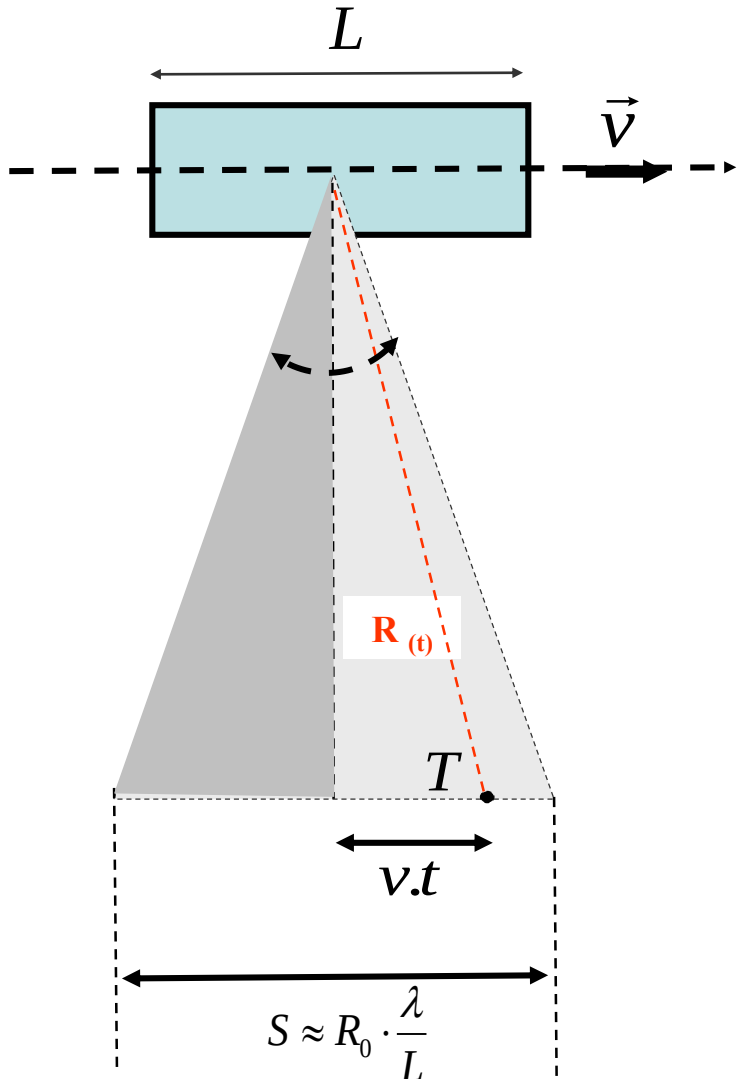
$$f^{dop}(t) = -2 \cdot \frac{v^2 \cdot t}{\lambda \cdot R_0}$$

$$\rightarrow B^{dop} = 2 \cdot \frac{v^2 \cdot T^{ill}}{\lambda \cdot R_0} = 2 \cdot \frac{v^2}{\lambda \cdot R_0} \cdot R_0 \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot \frac{1}{v} = 2 \cdot \frac{v}{L}$$

Bande Doppler totale

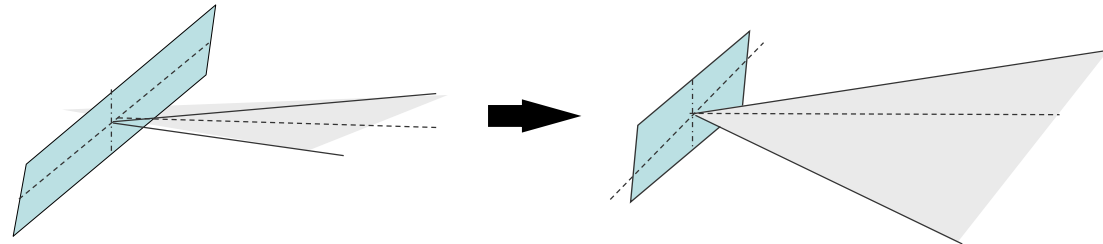
$$\rightarrow \text{Résolution azimuth} = \frac{1}{B^{dop}} \cdot v = \frac{L}{2} \quad !!$$

Résolution azimuth et taille d'antenne ...



L Res. azi $(L/2)$

MAIS :

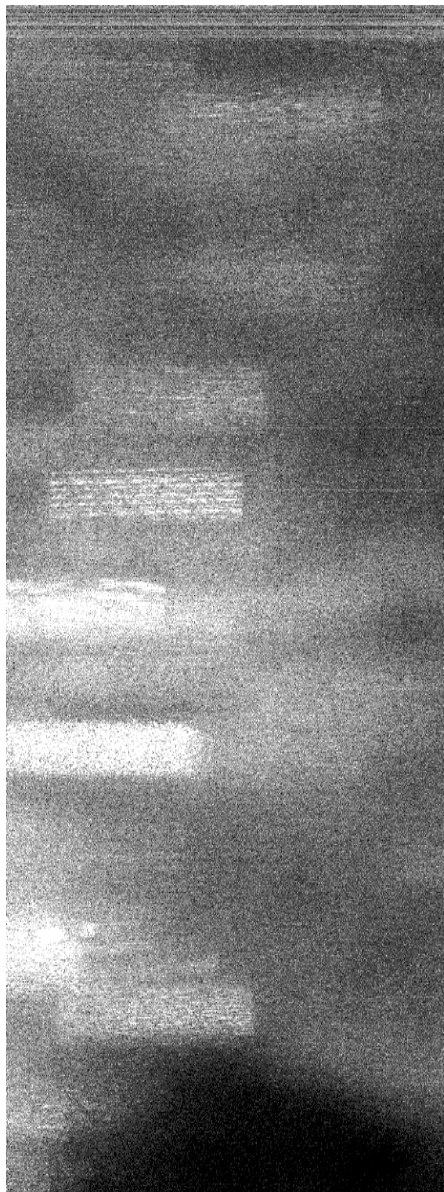


(perte de directivité)

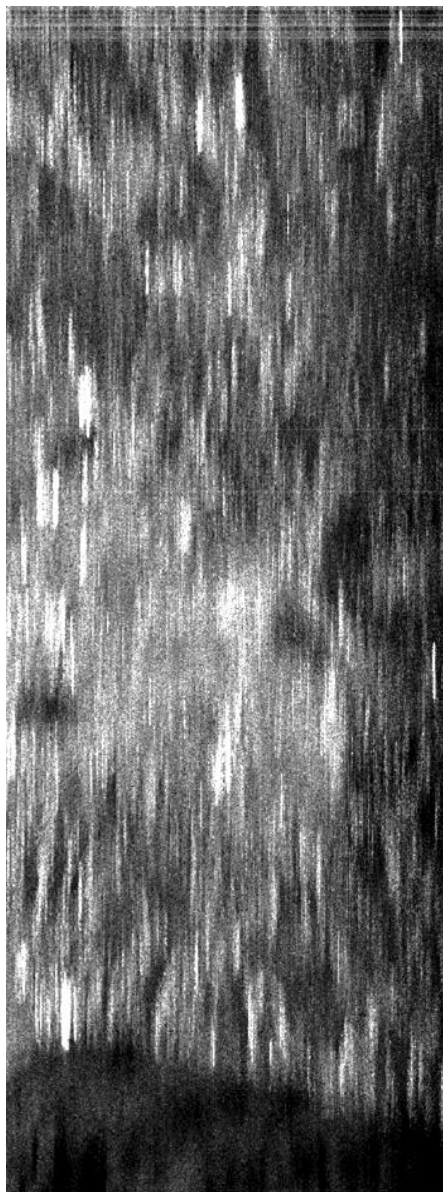
Effondrement du bilan de liaison

Compromis à établir entre propriétés géométriques (la résolution) et radiométriques (bilan de liaison) → **optimisation de L**

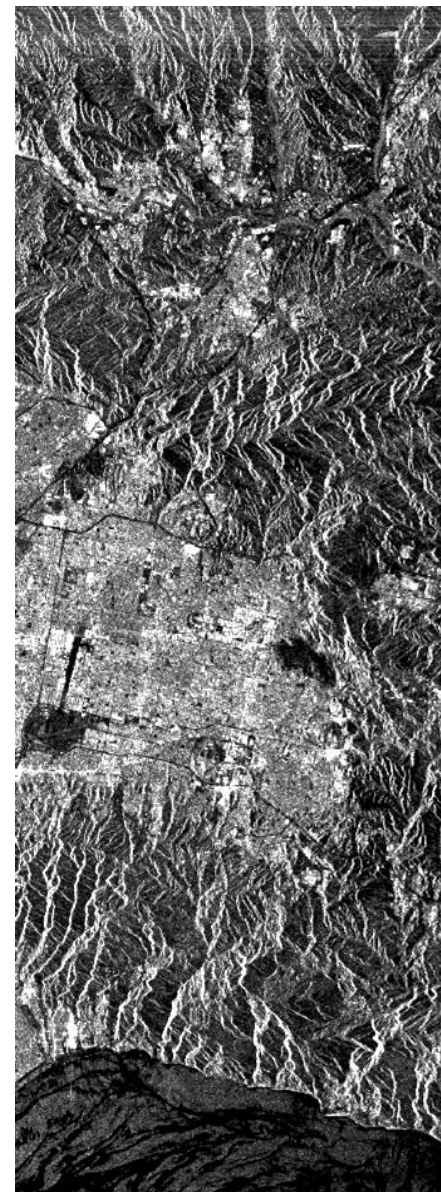
Azimuth



Raw data



Raw data after range compression



Slc data.

Traitement SAR : synthèse des résultats

Taille pixel en azimuth = v/PRF

Taille pixel en distance = $c/2/F_s$ (au sol : $c/2/F_s/\sin\theta$)

pixel size $\neq$ résolution !

Résolution azimuth (avant traitement) = $R\lambda/L$

Résolution distance (avant traitement) = $c\tau/2$ (au sol : $c\tau/2 / \sin\theta$)

Résolution azimuth (après traitement SAR) = $L/2$

Résolution distance (après compression distance) = $c/2/B$
(projection au sol : $c/2/B/\sin\theta$)

$$\longrightarrow \begin{aligned} v/PRF &\approx L/2 \\ c/2/F_s &\approx c/2/B \rightarrow F_s \approx B \end{aligned}$$

SAR Processing : gains en résolution (également appelés gains de compression)

- En distance :

Résolution avant traitement / résolution après traitement :

$$(c\tau/2) / (c/2/B) = N_d = B.\tau$$

- En azimut :

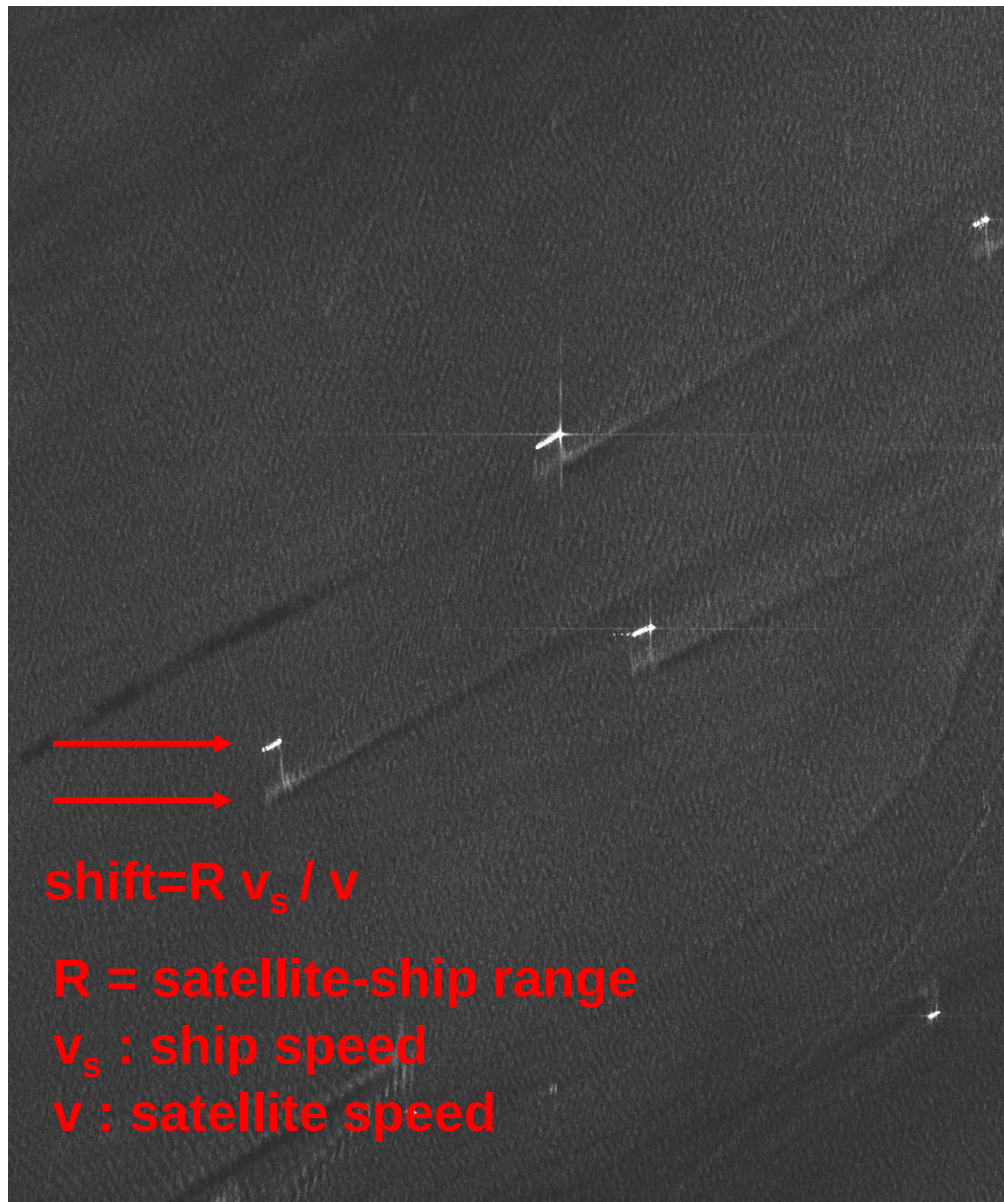
Résolution avant traitement / résolution après traitement :

$$(R\lambda/L) / (L/2) = N_a = 2R\lambda/L^2$$

Rem : critère de Shannon : $PRF=2v/L \rightarrow L^2=4v^2/PRF^2$

$$\rightarrow N_a = \lambda.R.PR^2/2v^2$$

Traitement SAR : comportement de la cible en mouvement



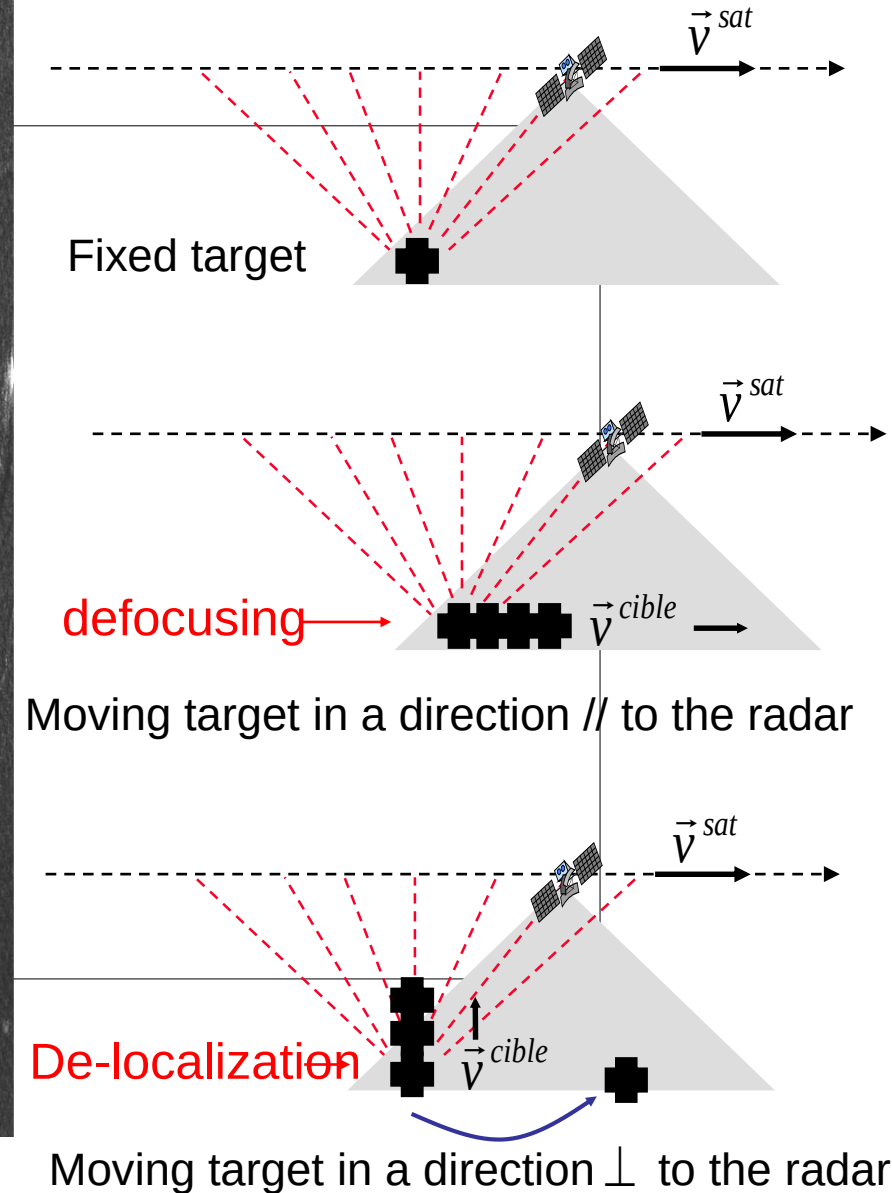
$$\text{shift} = R v_s / v$$

R = satellite-ship range

v_s : ship speed

v : satellite speed

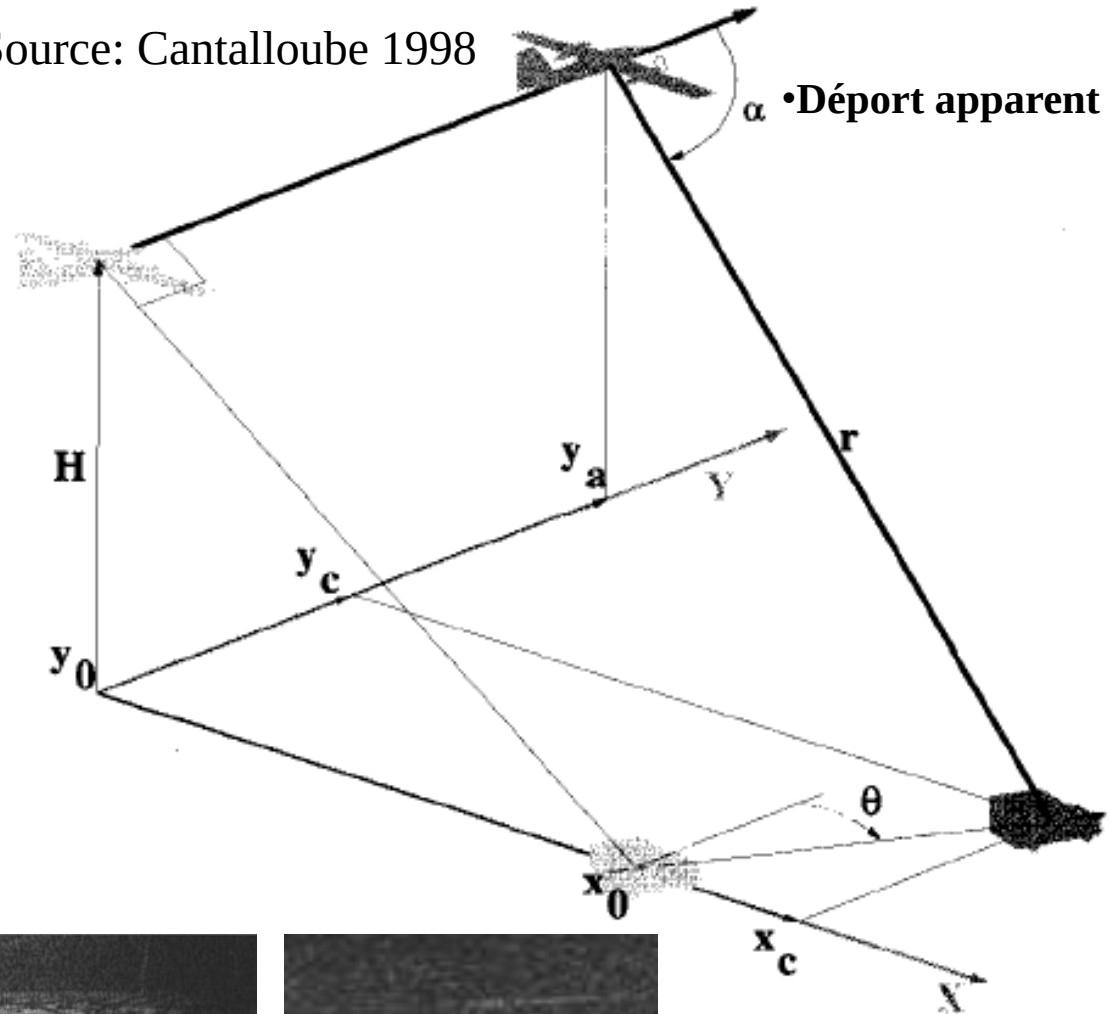
TERRASAR-X stripmap, Gibraltar



•Moving Target: delocalization & defocalisation

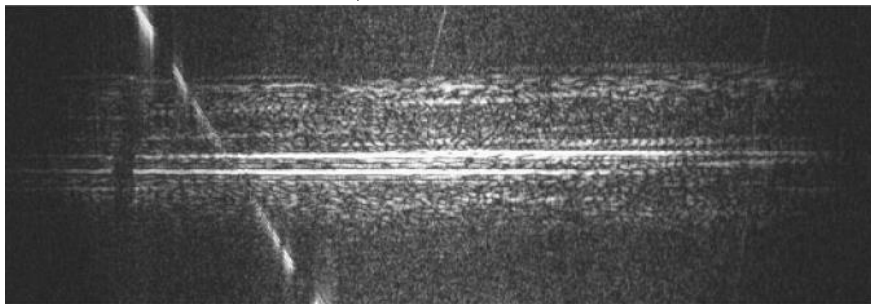
•Source: Cantalloube 1998

•Déport apparent



•azimuth

•range

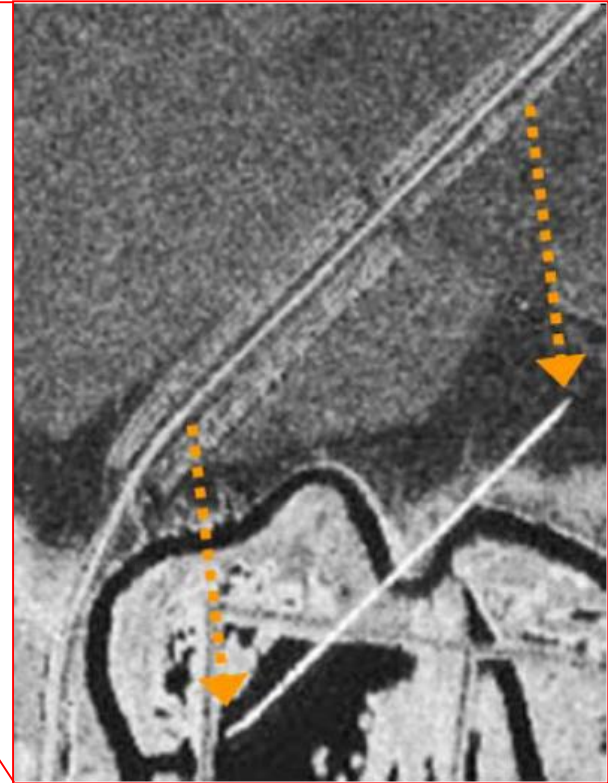


•a moving car.....

and

when the car stops

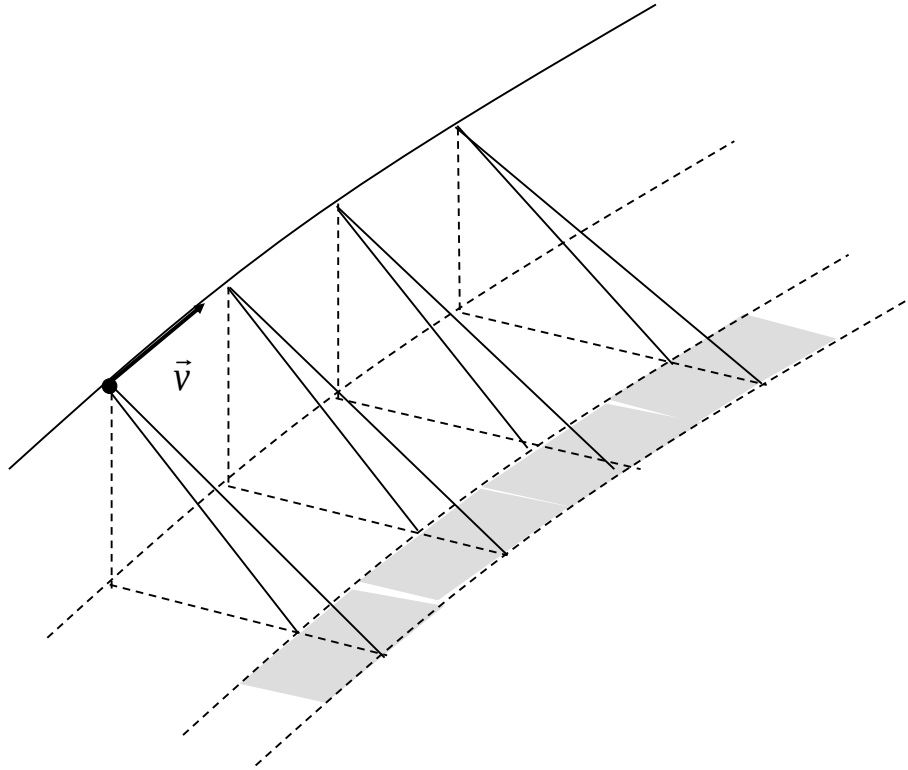
- TerraSAR-X moving target



- Moving train $v=40$ km/h,
- displacement= 800m

- First TSX image- 19 June 2007-
- South Russian Steppes, DLR

Mode classique : stripmap



Résolution $\sim 3\text{m}$

Fauchée : 100-300 Km

Modes spéciaux : spotlight

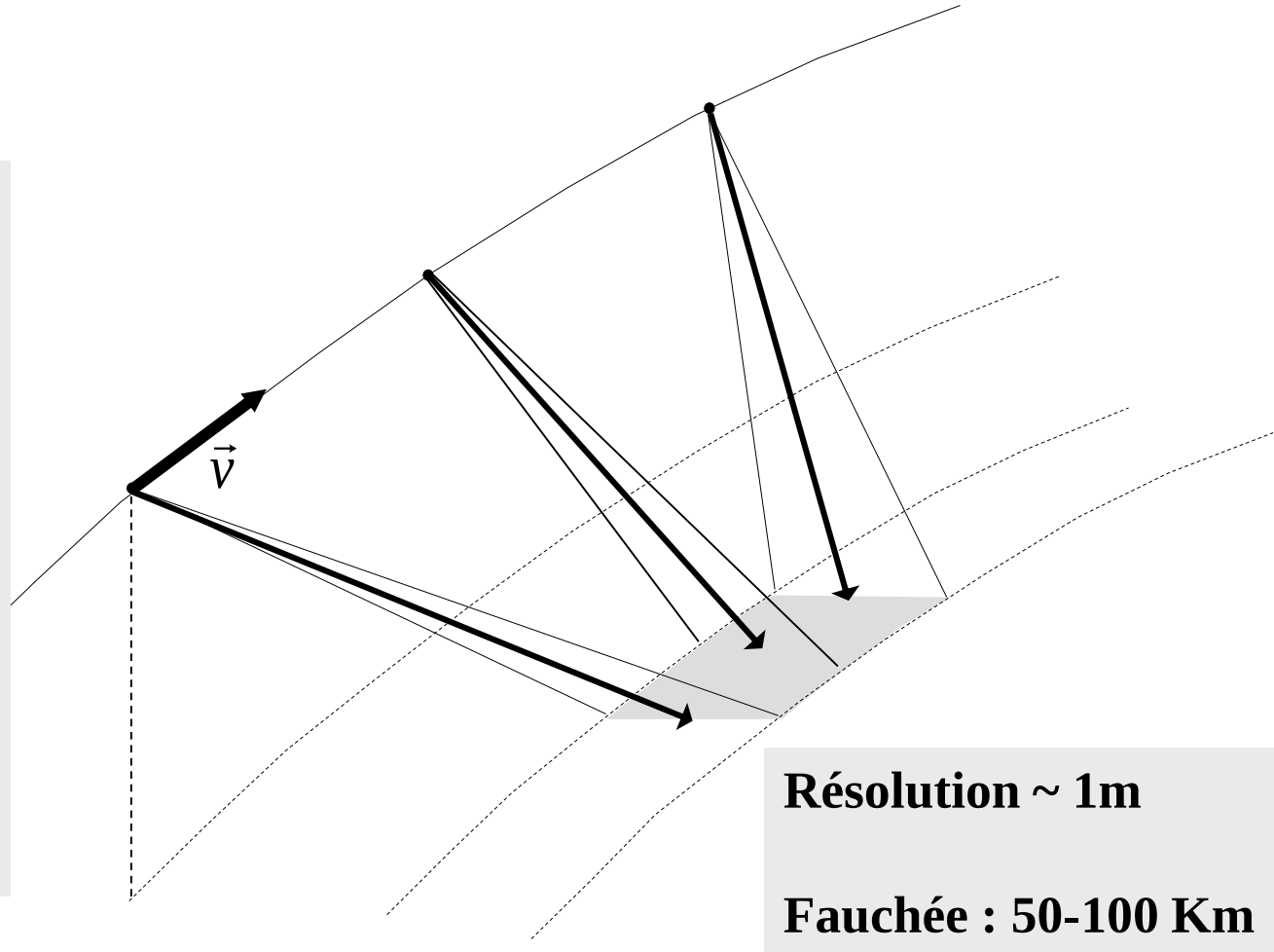
Illumination time ↗

Doppler bandwidth ↗

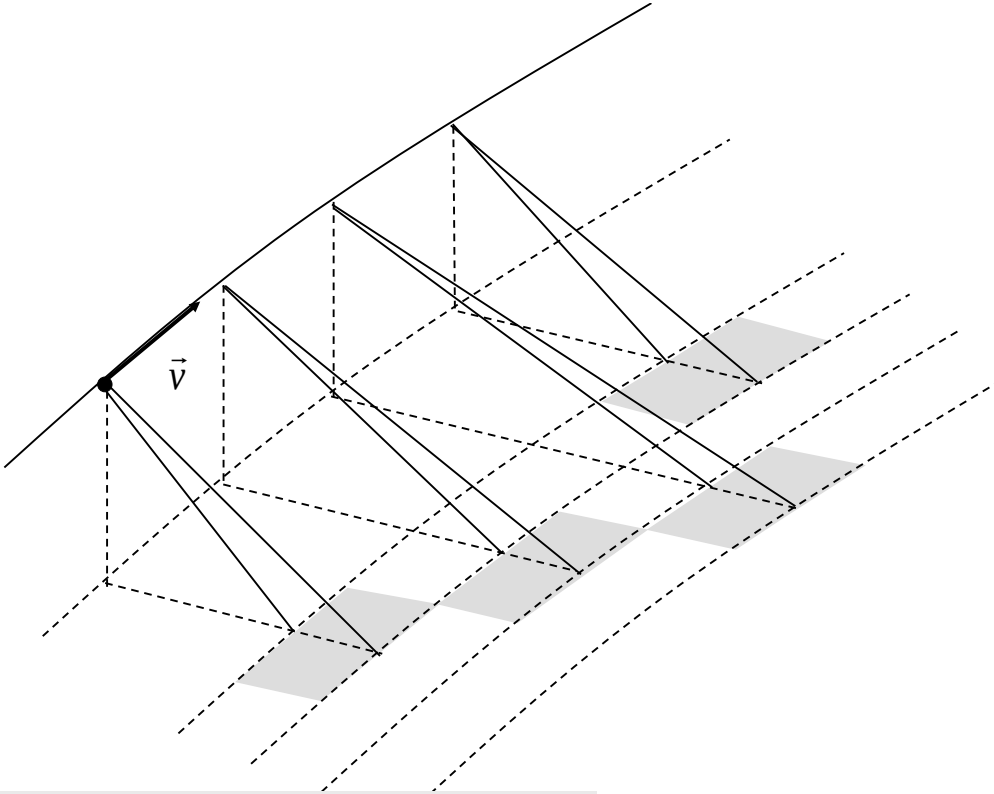
Azimuth resolution ↗

Azimuth coverage ↘

Swath →



Modes spéciaux: scansar



Illumination time ↘

Doppler bandwidth ↘

Azimuth resolution ↘

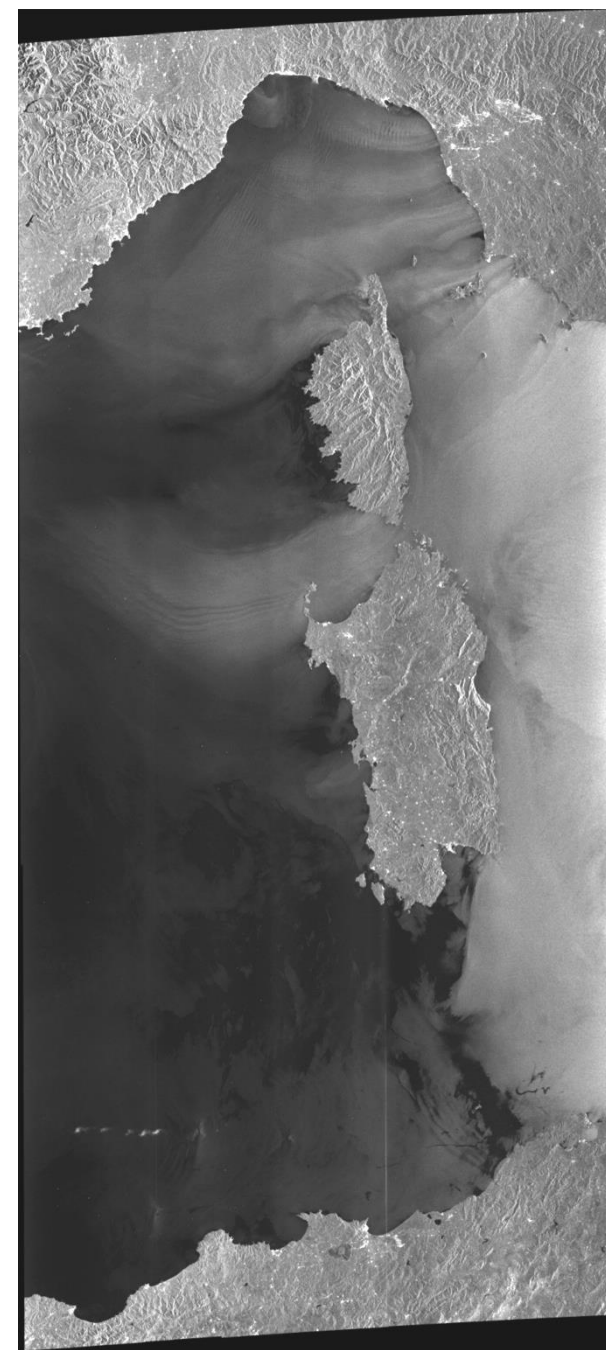
Azimuth coverage →

Swath ↗

Résolution $\sim 100\text{m}$

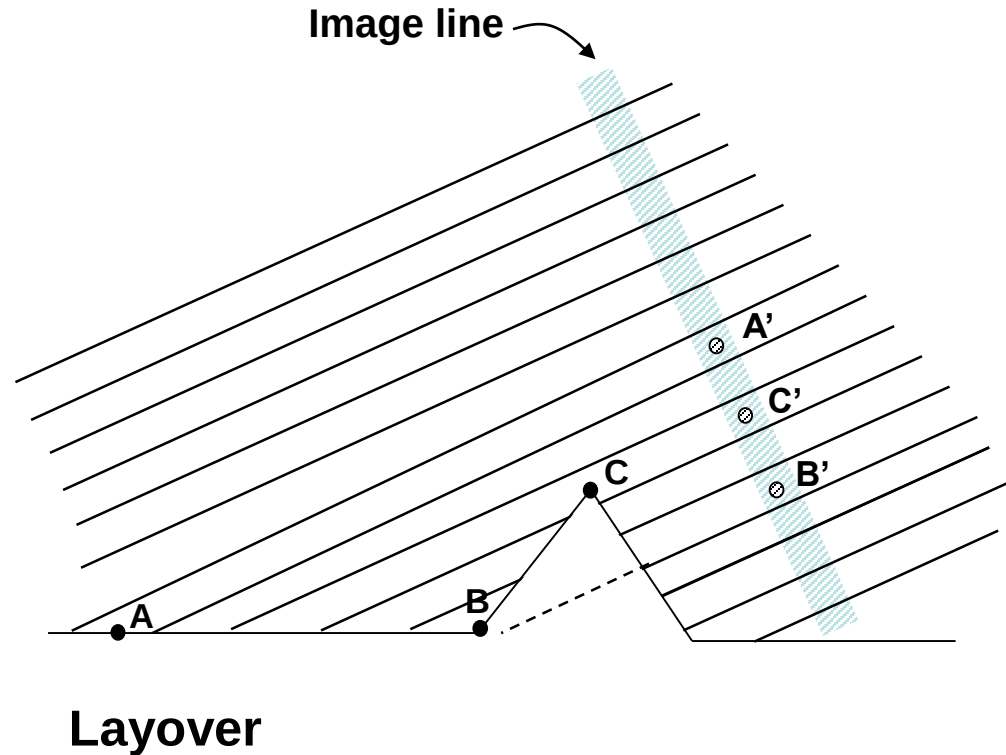
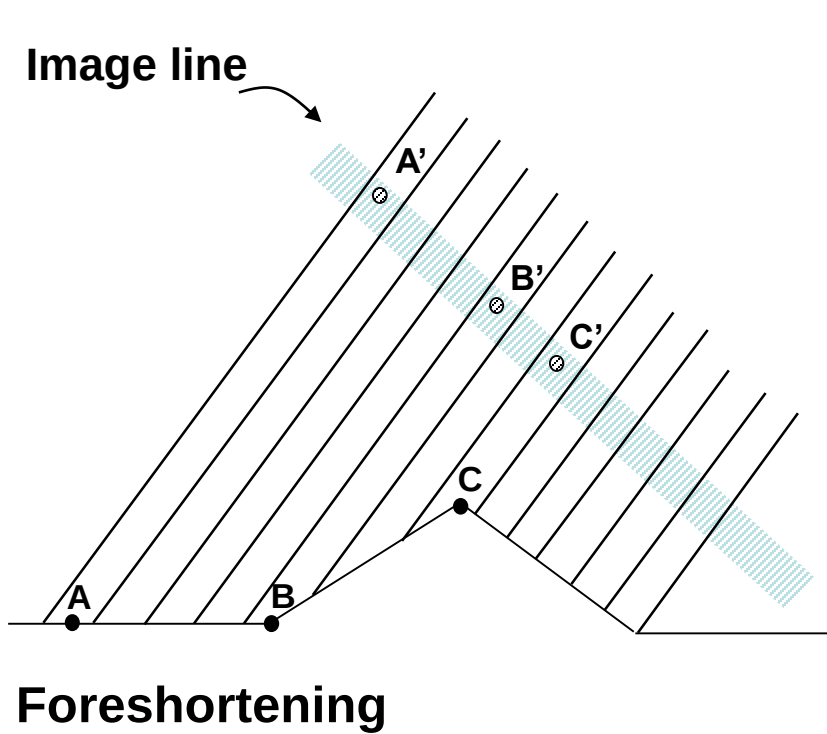
Fauchée : 300-500 Km

Scansar/Radarsat Corse-Sardaigne →



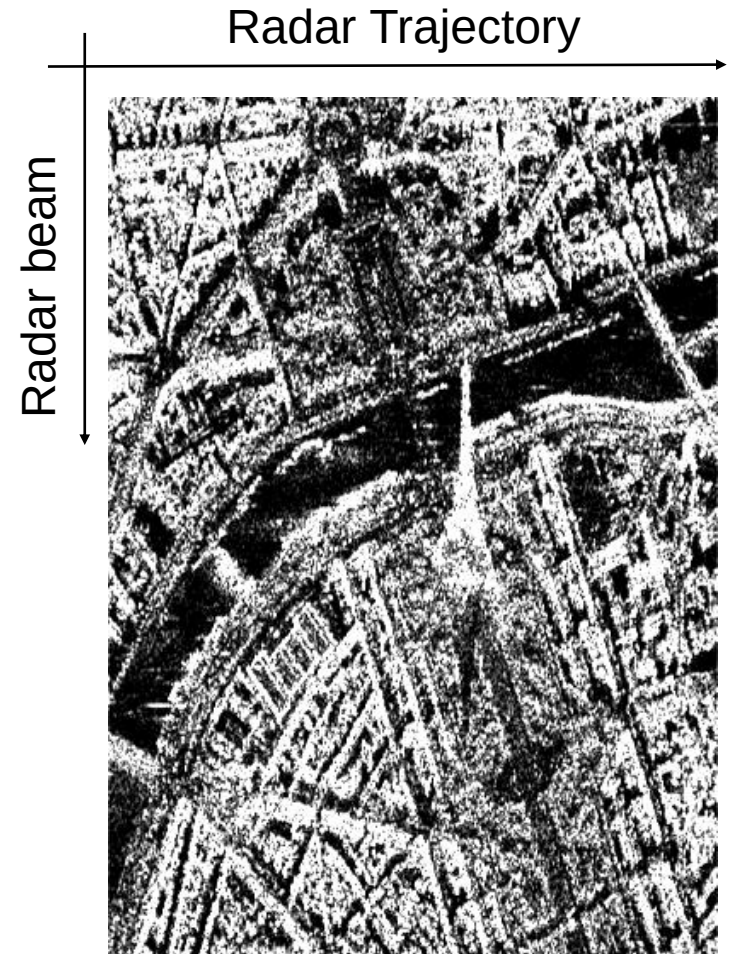
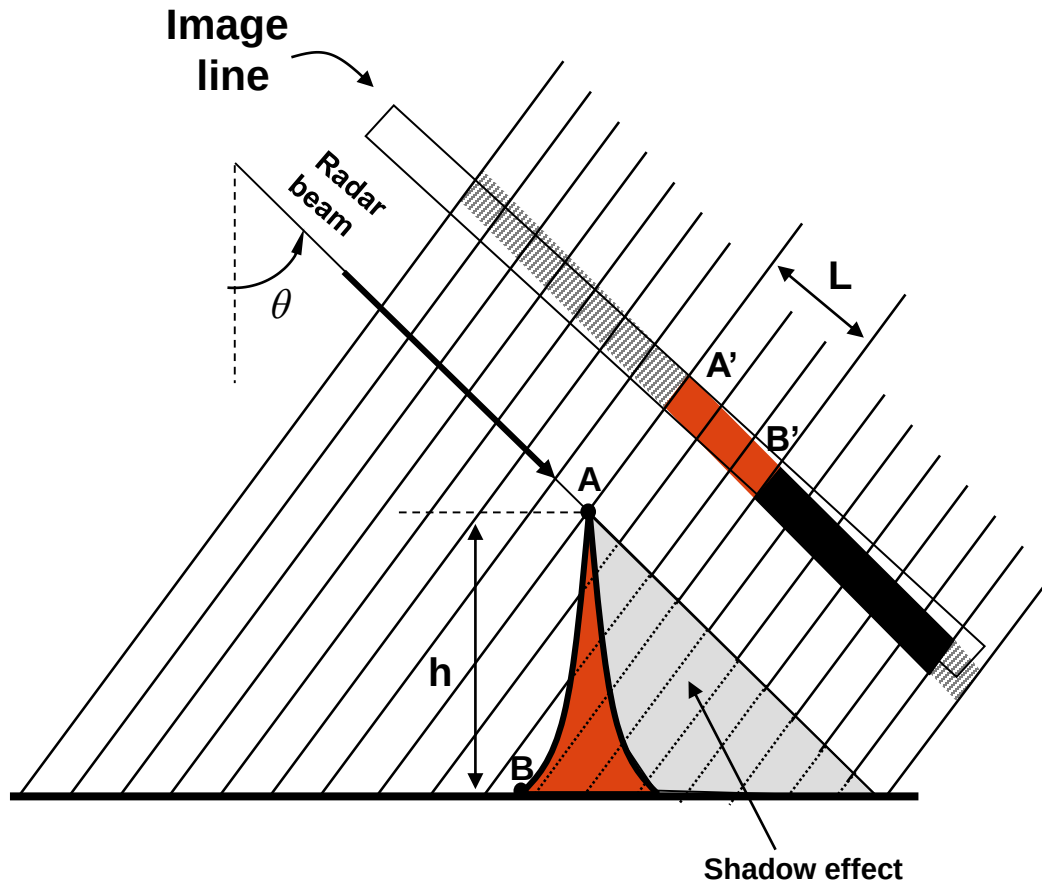
Qualité Image: géométrie

→ effets foreshortening et layover

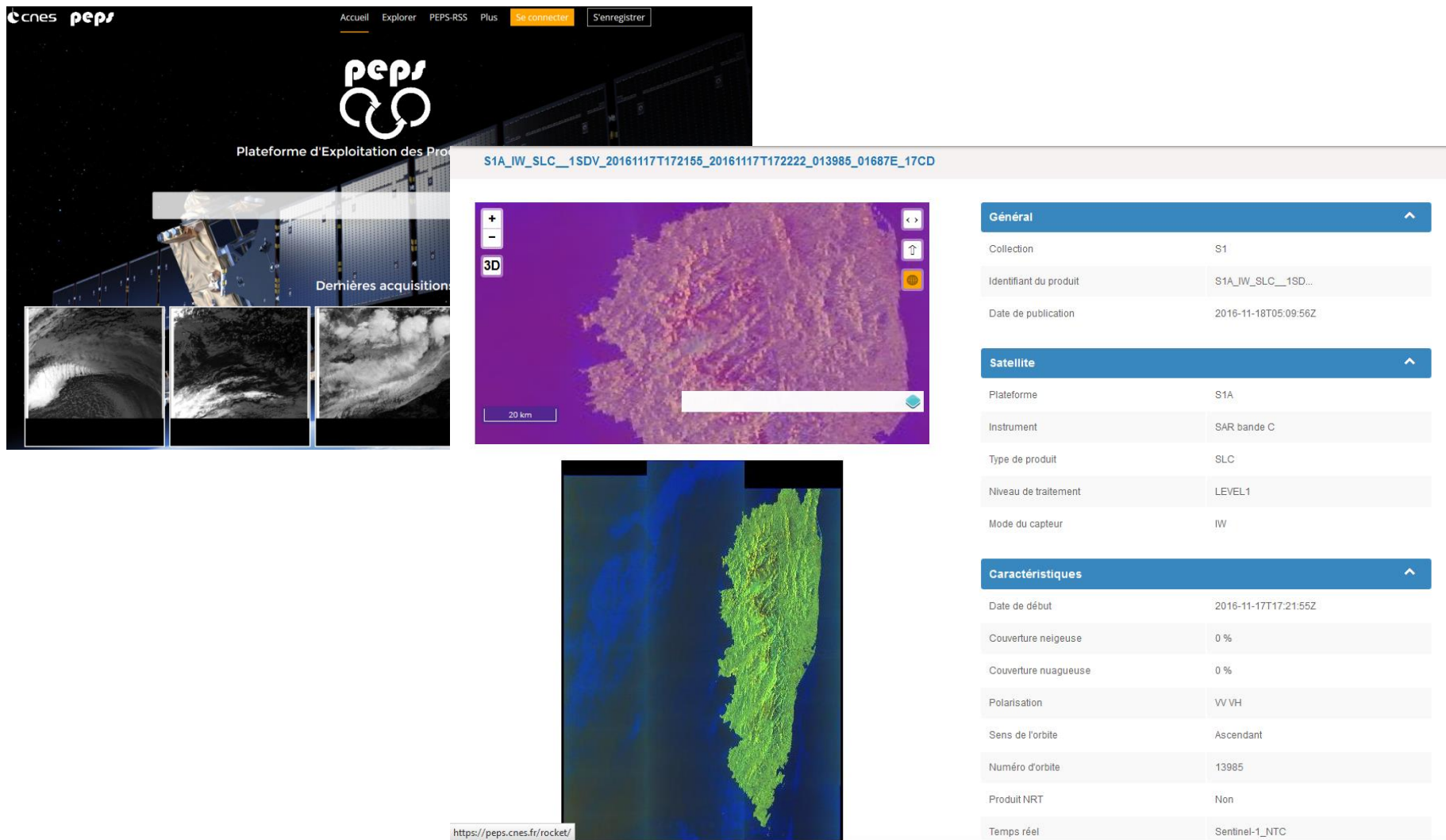


Qualité Image: géométrie

→ exemple de l'effet layover



PEPS: Plateforme CNES d'Exploitation des Produits Sentinelles



The screenshot displays the PEPS web interface. The top navigation bar includes 'Accueil', 'Explorer', 'PEPS-RSS', 'Plus', 'Se connecter', and 'S'enregistrer'. The main content area shows a satellite image with a 3D elevation overlay. The right sidebar contains metadata for the selected product, including 'Général', 'Satellite', and 'Caractéristiques' sections.

Général

Collection	S1
Identifiant du produit	S1A_IW_SLC__1SDV_20161117T172155_20161117T172222_013985_01687E_17CD
Date de publication	2016-11-18T05:09:56Z

Satellite

Plateforme	S1A
Instrument	SAR bande C
Type de produit	SLC
Niveau de traitement	LEVEL1
Mode du capteur	IW

Caractéristiques

Date de début	2016-11-17T17:21:55Z
Couverture neigeuse	0 %
Couverture nuageuse	0 %
Polarisation	VV VH
Sens de l'orbite	Ascendant
Numéro d'orbite	13985
Produit NRT	Non
Temps réel	Sentinel-1_NTC

- Accès libre aux données S 1-A, 1-B, 2-A, 2-B, 3-A, 3-B
- <https://peps.cnes.fr>



ENGINEERING SCIENCES

Electrical Engineering



IMAGING WITH SYNTHETIC APERTURE RADAR

Didier Massonnet & Jean-Claude Souyris

EPFL Press
Distributed by CRC Press



ANNEX 1 : Adaptative filter theory

Annexe 1 : Filtre adapté

signal reçu = superposition du signal utile (rétro-diffusé par la cible) et du bruit

thermique ➔ Filtrage nécessaire (représentation dans le domaine de Fourier)

$$\begin{array}{ccc} s(t) \leftrightarrow S(f) & & s_f(t) \leftrightarrow S_f(f) = S(f) \cdot H(f) \\ + & \xrightarrow{\boxed{H(f)}} & + \\ n(t) \leftrightarrow g_n(f) & & n_f(t) \leftrightarrow g_{n_f}(f) = g_n(f) \cdot |H(f)|^2 \end{array}$$

Filtrage adapté (optimal) : filtre $H(f)$ qui maximise le rapport :

Puissance crête du signal / Puissance moyenne du bruit

Rem : $S(f)$ est la Transformée de Fourier de $s(t)$

Annexe 1 : Filtre adapté

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df \quad \text{et} \quad P_c(t) = \frac{s^2(t)}{2}$$

Après filtrage on a :

$$s_f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) H(f) e^{j2\pi ft} df \quad \text{et} \quad B = \int_0^{\infty} g_n(f) |H(f)|^2 df$$



$$\frac{S}{B} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) H(f) e^{j2\pi ft} df \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} g_n(f) |H(f)|^2 df} \leq \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |H(f) \sqrt{g_n(f)}|^2 df \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{S(f)}{\sqrt{g_n(f)}} e^{j2\pi ft} \right|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} g_n(f) |H(f)|^2 df}$$

D'après Schwartz, il y a égalité si :

$$H(f) \sqrt{g_n(f)} = k \frac{S^*(f)}{\sqrt{g_n(f)}} e^{-j2\pi ft}$$

Annexe 1 : Filtre adapté → Application à la modulation de chirp

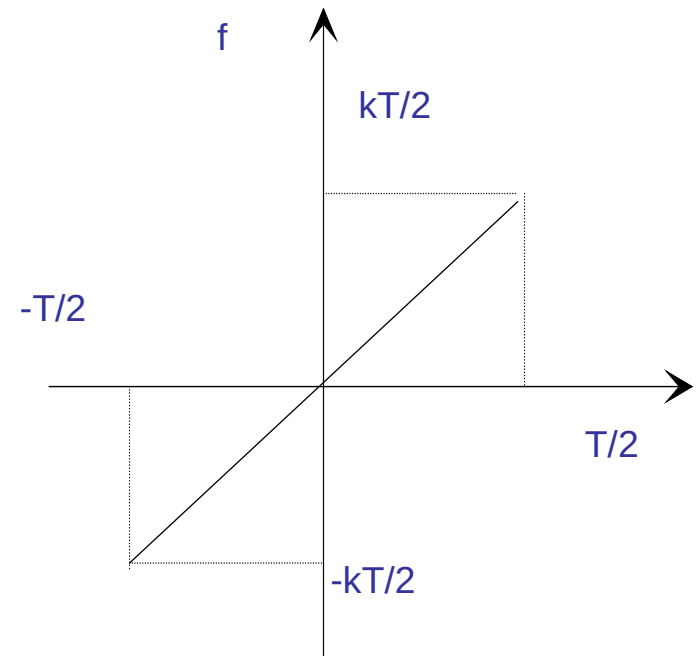
- Impulsion rectangulaire modulée en fréquence (chirp) :

$$s(t) = \text{rect}_T(t) \cdot \cos \left(2\pi \left[f_0 t + \frac{k}{2} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 \right] \right) = \Re_e \left(\tilde{s}(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t} \right)$$

Avec : $\tilde{s}(t) = \text{rect}_T(t) \cdot e^{j\pi k(t-T/2)^2} \leftrightarrow |\tilde{S}(f)| \approx C^{te} \text{ sur } [-kT/2; kT/2]$

- Modulation linéaire de fréquence :

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = k(t - T/2)$$



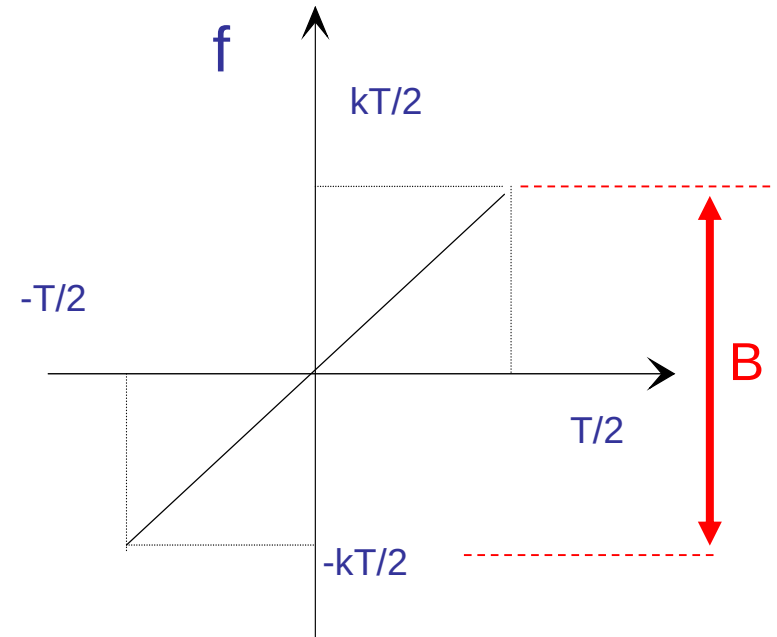
Annexe 1 : Filtre adapté → Application à la modulation de chirp

- Filtre adapté : $\tilde{H}_{FA}(f) = \tilde{S}^* \cdot e^{-j2\pi ft}$

Sortie du filtre (réponse impulsionnelle) :

$$y_{FA}(t) = TF^{-1}(\text{rect}_{\Delta f}(f)) = a \frac{\sin(\pi \cdot \Delta f \cdot t)}{\pi \cdot \Delta f \cdot t}$$

avec $\Delta f = kT = B$ (bande chirp)



(Largeur de la réponse est inversement proportionnelle à la bande explorée – Résolution temporelle résultante en $1/B$)

ANNEX 2 : Fourier Transform

FOURIER TRANSFORM

I. PERIODIC FUNCTION

“Any real deterministic, square integrable signal , with period T , can be described by superposing a set of discrete sine wave functions” :

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X_k \cdot \exp\left(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{t}{T}\right)$$

With :

$$X_k = \frac{1}{T} \cdot \int_{\alpha}^{\alpha+T} s(t) \cdot \exp\left(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{t}{T}\right) \cdot dt$$

FOURIER TRANSFORM

II. NON PERIODIC FUNCTION

The concept of Fourier series can be extended to non-periodic real functions.

For this, we introduce a 'gate' function such that: $\Pi(t/T)$

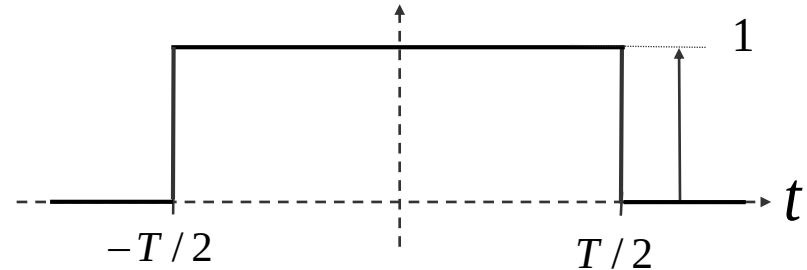
$$s(t, T) = s(t) \cdot \Pi(t/T)$$

$s(t, T)$ is a periodic function of period T :

Taking the limit

:

$$s(t) = \lim_{T \rightarrow +\infty} s(t, T) \cdot \Pi(t/T)$$



... The spectrum of rays becomes denser as T increases, so that at the limit we end up with a continuous spectrum of rays.

FOURIER TRANSFORM

II. NON PERIODIC FUNCTION

... Thus the *non-periodic* signal is described in the frequency domain by the superposition of an *infinity* of sine waves whose amplitudes are : $|S(f)| \cdot df$

The Fourier transform $S(f)$ of $s(t)$ is given by :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot dt$$

With :

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) \cdot \exp(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot df$$

FOURIER TRANSFORM : Properties

- $\forall (\alpha, \beta) \in \mathbb{C}^2, \alpha \cdot s(t) + \beta \cdot u(t) \rightarrow \alpha \cdot S(f) + \beta \cdot U(f)$ (linearity)

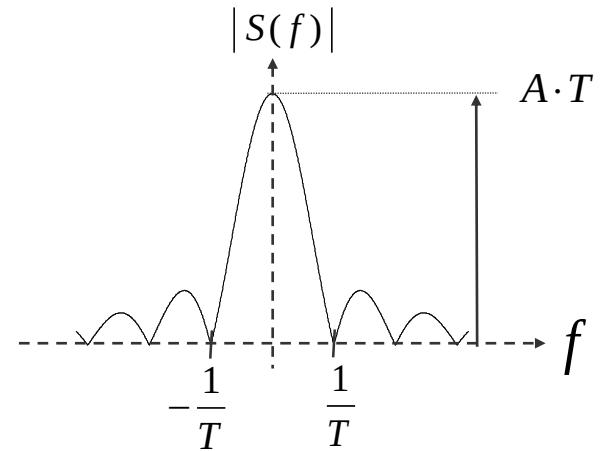
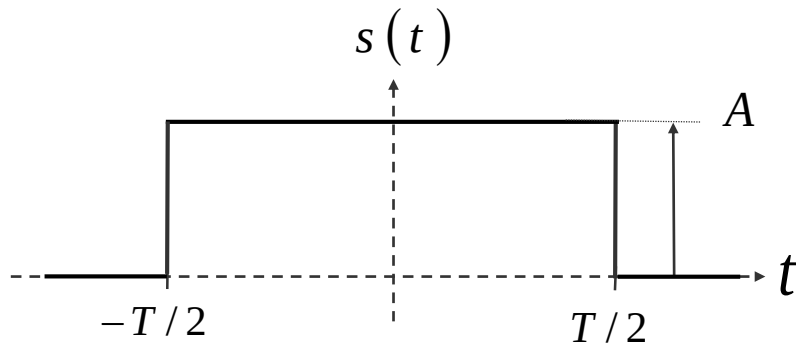
- $s(t) \cdot u(t) \rightarrow S(f) * U(f)$

With :
$$s(t) * u(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t') \cdot u(t - t') \cdot dt'$$

- $s(t - a) \rightarrow \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot a) \cdot S(f)$

- $\exp(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_d \cdot t) \cdot s(t) \rightarrow S(f - f_d)$

FOURIER TRANSFORM

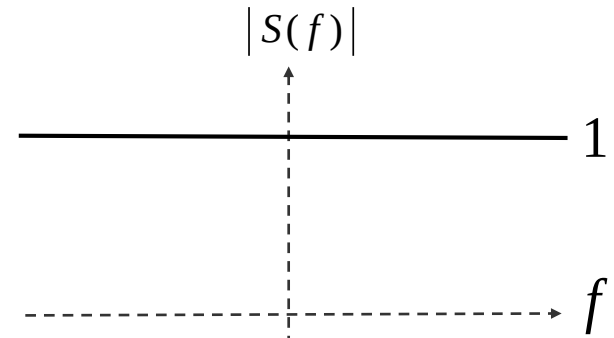
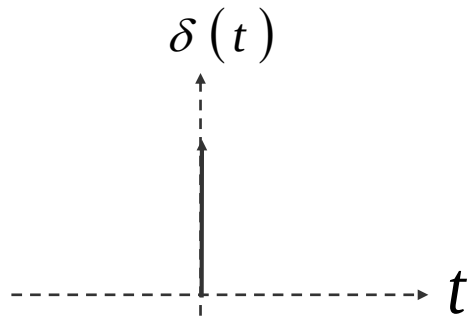


GATE FONCTION



SINC FONCTION

FOURIER TRANSFORM

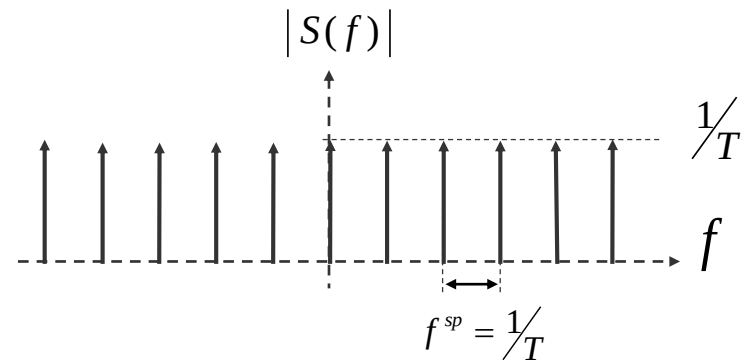
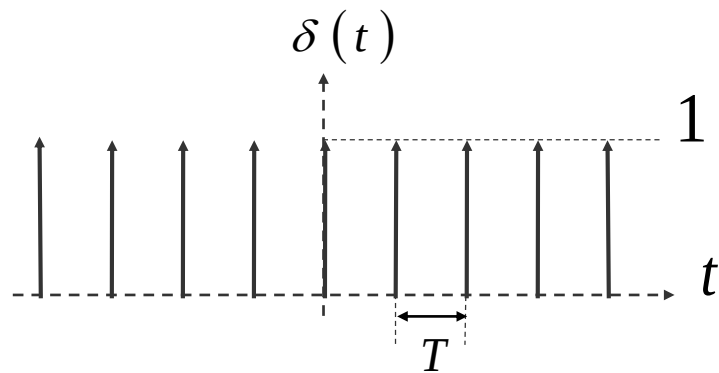


DIRAC FONCTION



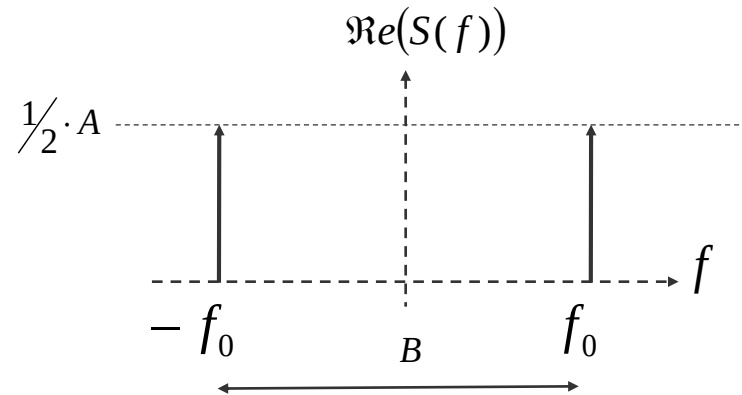
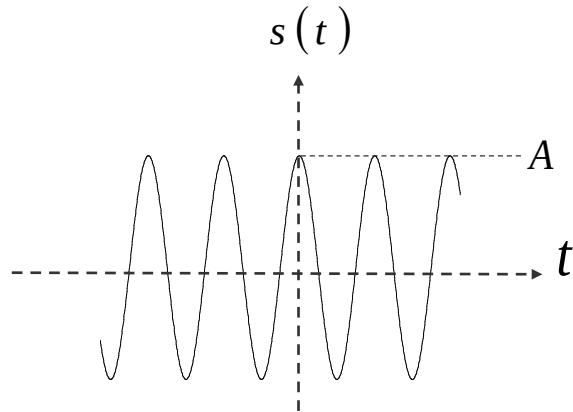
Contant FONCTION

FOURIER TRANSFORM

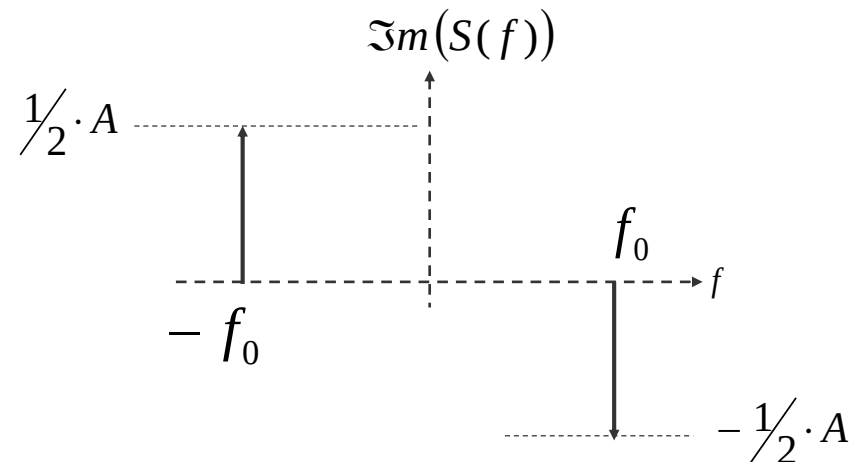
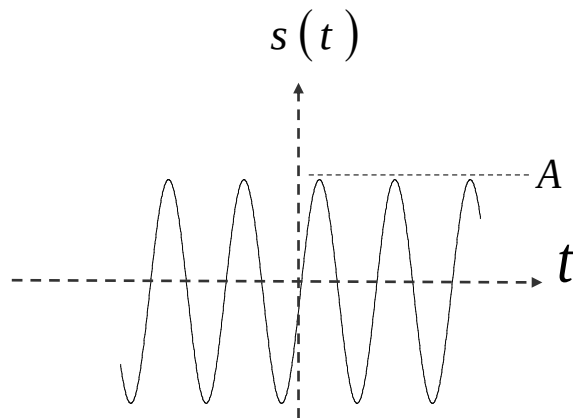


COMB FONCTION (T) $\longrightarrow$ COMB FONCTION (1/T)

FOURIER TRANSFORM

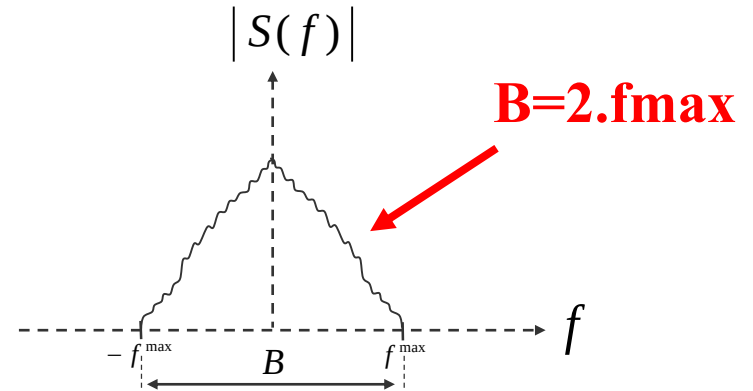
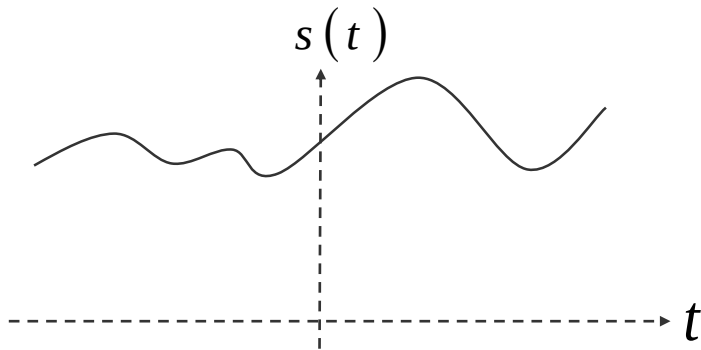


COS FONCTION (f_0) $\longrightarrow$ **Sym AIR DIRAC (f_0)**



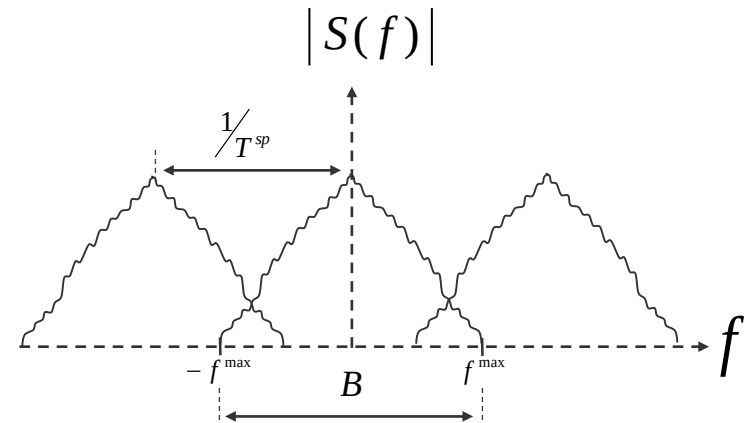
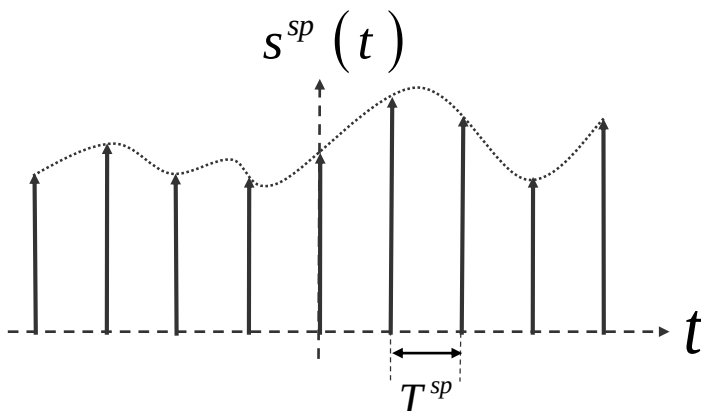
COS FONCTION (f_0) $\longrightarrow$ **Anti-Sym - PAIR DIRAC (f_0)**

FOURIER TRANSFORM



$s(t)$ – limited bandwidth $\longrightarrow$

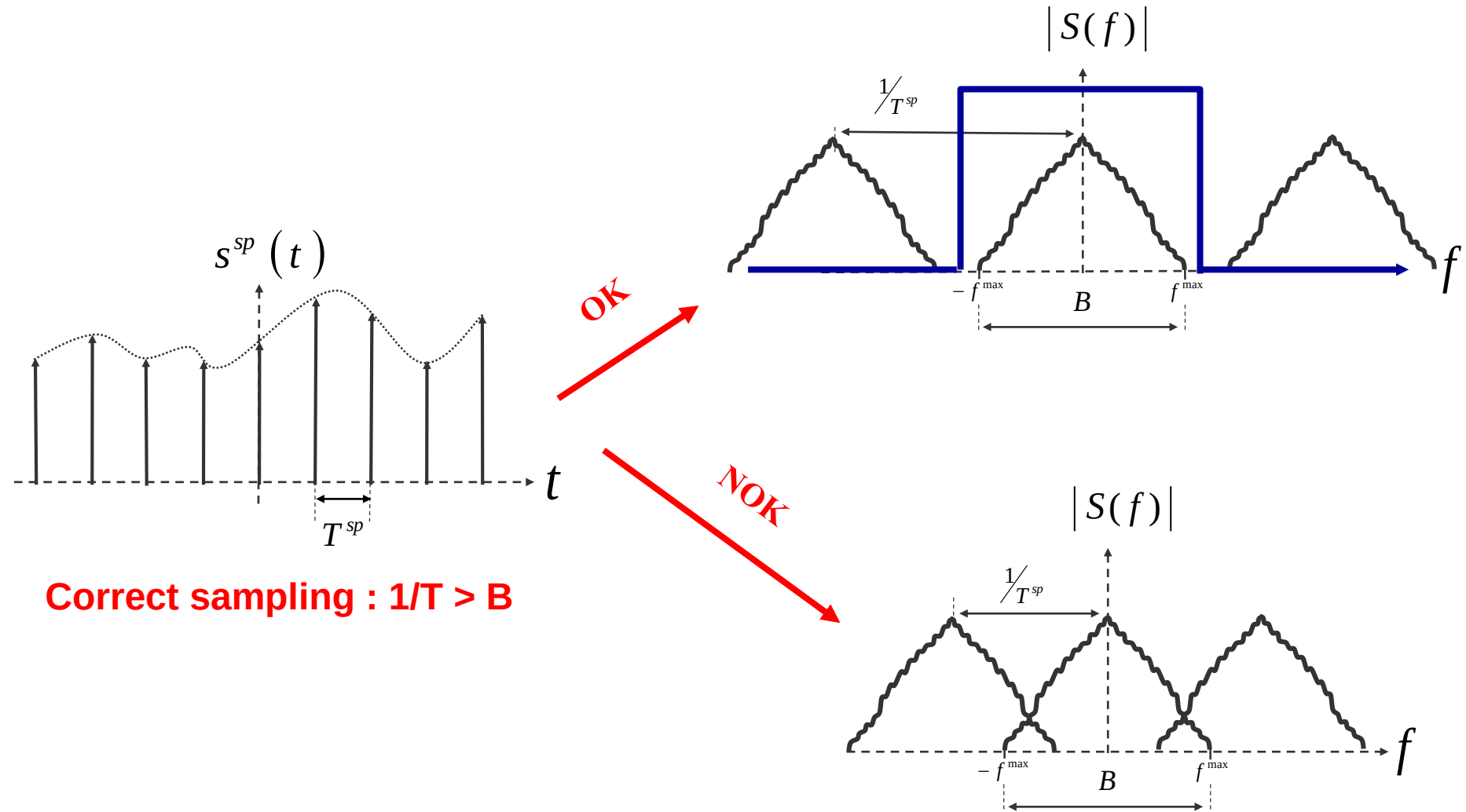
$S(f)$

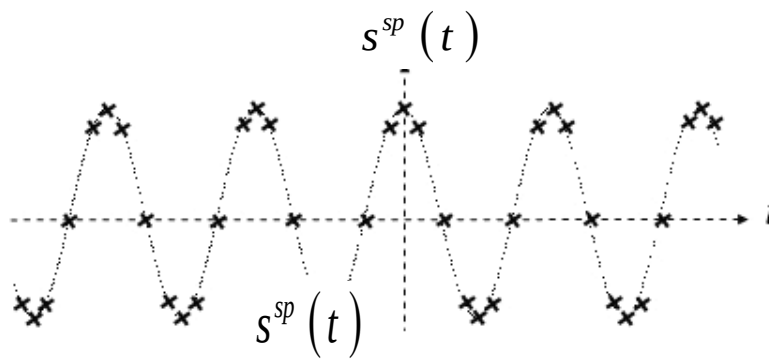


Sampling of $s(t)$ $\longrightarrow$

Periodic $S(f)$

FOURIER TRANSFORM : sampling theorem (Shannon)

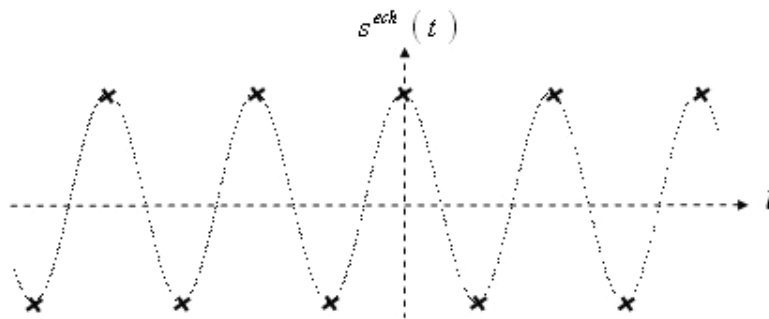




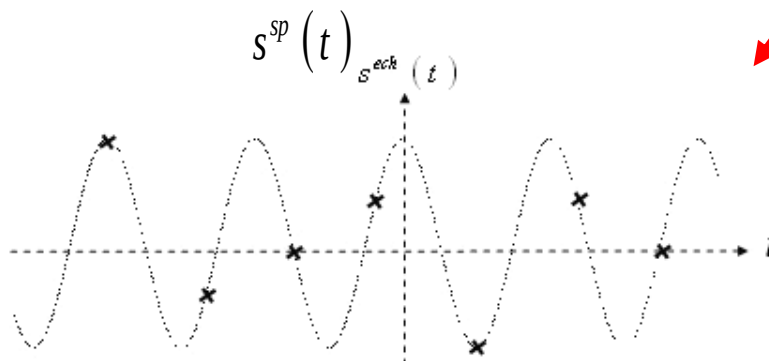
OK ($f_{ech} > 2.f_0$)

FOURIER TRANSFORM :

sampling theorem
applied to a sine
function

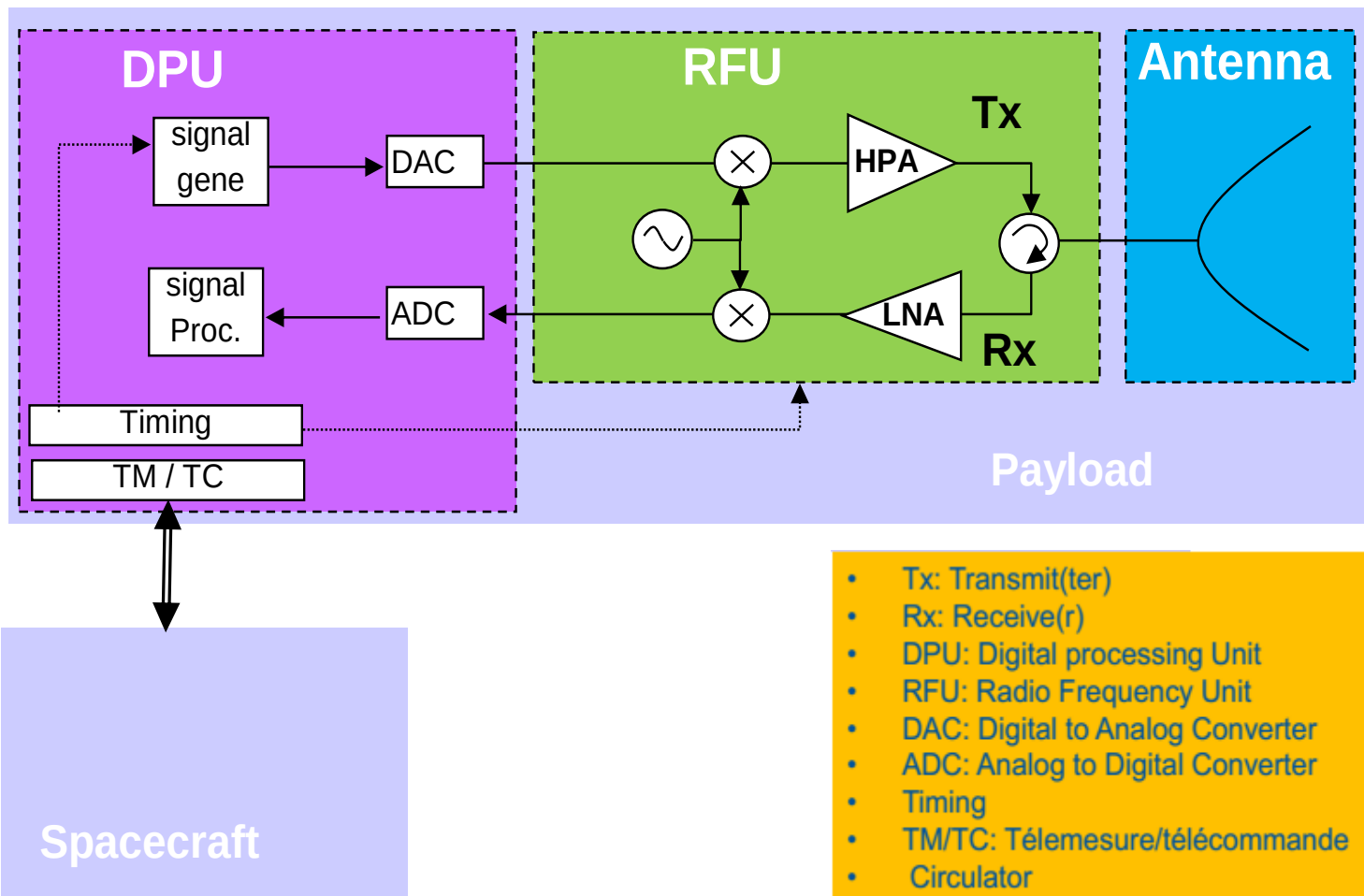


NOK



•Principle Architecture

- Three main subsystems :
 - Digital Processing Unit
 - Radio Frequency Unit
 - Antenna subsystem



Taille de pixel / résolution avant traitement

Taille pixel azimuth = v/PRF

Taille pixel distance = $c/2/F_s$
(projection au sol : $c/2/F_s/\sin\theta$)

Approx : A few meters
(space borne system)

Taille pixel $\neq$ résolution !

Résolution azimuth (avant traitement) = $R\lambda/L$

Résolution distance (avant traitement) = $c\tau/2$
(projection au sol : $c\tau/2 / \sin\theta$)

Approx : A few km
(space borne system)