

# TELEDETECTION RADAR : DE L'IMAGE D'INTENSITE INITIALE AU CHOIX DU MODE DE CALIBRATION DES COEFFICIENTS DE DIFFUSION $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$

Jean-Paul Rudant<sup>1</sup>, Pierre-Louis Frison<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Université Paris-Est, LaSTIG UPEM /IGN,  
5, Bd Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée  
jean-paul.rudant@u-pem.fr

**Résumé** : La période actuelle est caractérisée par une abondance de données radar libres d'accès dont l'utilisation est encouragée et facilitée par les agences spatiales, ces dernières mettant gratuitement à disposition des utilisateurs des logiciels de traitement et d'analyse d'images. Parallèlement, plusieurs sites académiques ou institutionnels proposent des ressources explicatives (cours, tutoriaux, logiciels) sur des sujets généraux ou ciblés destinés à faciliter l'usage des images dans la plupart des domaines d'application.

Dans cet article, nous souhaitons aborder et détailler un point particulier, celui de la correction des images, au travers des divers prétraitements logiciels proposés lors d'une séquence de géo-référencement-calibration des images. Cette séquence, qui couple des aspects géométriques et radiométriques, a pour objectif d'établir la correspondance entre les valeurs numériques pixellaires de l'image et les mesures physiques de coefficients de rétrodiffusion destinés à caractériser des états de surface. Cette calibration est, en particulier, indispensable pour pratiquer l'inversion de modèles physiques ainsi que la fusion d'informations issues de données multi-capteurs et/ou multi-temporelles.

Après avoir présenté les aspects généraux touchant à la puissance mesurée au niveau du capteur et les divers facteurs influençant cette mesure, nous nous focaliserons sur la pratique utilisateur, en discutant d'une part des différents choix de coefficients  $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$  offerts lors d'une calibration, et d'autre part de la prise en compte, ou non des effets de pente dans les corrections géométriques et radiométriques affectant l'image. Une attention particulière sera portée sur le coefficient  $\gamma^0$  dont les variations en fonction de l'incidence locale sont réputées très faibles dans le cas des forêts denses.

**Mots-clés** : Télédétection radar, effets du relief, coefficients de diffusion  $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$ , distorsions géométriques, distorsions radiométriques, calibration, géoréférencement, forêt dense.

**Abstract** : The current period is characterized by an abundance of free access radar data, the use of which is encouraged and facilitated by space agencies, the latter providing free software for image processing and analysis to users. At the same time, several academic or institutional sites offer explanatory resources (courses, software tutorials) on general or targeted topics intended to facilitate the use of images in most fields of application. In this paper, we wish to address and detail a particular point ; that of the physical concept of the radar measurement, through the various software processing proposed during a sequence of georeferencing-calibration of the images. This sequence, which combines geometrical and radiometric aspects, is found for applications relating to the characterization of the various media present on the surface of the ground or to facilitate the analysis of temporal sequences.

After presenting the general aspects related to the power measured at the sensor and the various factors influencing this measurement, we will focus on the user practice, by discussing the different choices of coefficients  $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$ , offered during a calibration following a geo-referencing, as well as on the taking into account, or not, slope effects in geometric and radiometric corrections affecting the image. Particular attention is paid to the coefficient  $\gamma^0$  whose variations as a function of local incidence are considered very low in the case of dense forests.

**Keywords** : Radar remote sensing, relief effects, scattering coefficients  $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$ , geometric distortions, radiometric distortions, calibration, geo-referencing, dense forest.

## Plan

### Introduction

#### I- Equation radar adaptée et simplifiée pour la télédétection des surfaces naturelles

- I-1 Trois remarques d'ordre général
- I-2 Les notations utilisées : (cf figures 2-5)
- I-3 Equation radar en configuration bi-statique
  - I-3-1 L'évaluation de  $P$ , puissance reçue par le capteur
  - I-3-2 Les termes  $\Sigma = SER, \sigma^0, \gamma^0$  et  $\beta^0$
- I-4 Equation radar en configuration mono-statique
  - I-4-1 Éléments géométriques, relation entre les trois surfaces associées à un même pixel, effets de pente sur l'échelle de restitution en géométrie sol
  - I-4-2 Analyse des facteurs influençant l'image d'intensité  $P$  en rétrodiffusion, relation entre distorsions radiométriques et géométriques dans les images
  - I-4-3 Les coefficients associés à la rétrodiffusion

#### II- Discussion relative à l'intérêt et aux usages des termes $\Sigma, \beta^0, \sigma^0, \gamma^0$ (configuration mono statique)

- II-1  $SER \Sigma$  et le coefficient  $\beta^0$
- II-2 Le coefficient  $\sigma^0$
- II-3 Le Coefficient  $\gamma^0$

#### III- Les modes de calibration pour $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$

- III-1 La démarche de calibration
- III-2 Différentes pratiques lors d'une calibration associée à un géoréférencement
- III-3 Cas d'usages de la calibration selon la nature du relief et les domaines d'applications.

#### IV-Conclusion

## Introduction

Le contexte dans lequel évolue l'usage des images de télédétection a beaucoup évolué ces dernières années. Le nombre de capteurs radar est toujours bien inférieur à celui des capteurs optiques mais l'offre radar s'est néanmoins beaucoup enrichie et les 3 bandes spectrales X ( $\lambda = 2.5$  cm), C ( $\lambda = 6$  cm), L ( $\lambda = 25$  cm) sont aujourd'hui présentes en orbite. D'autres capteurs dont le satellite BIOMASS en bande P ( $\lambda = 70$  cm) sont prévus dans un proche avenir ; ils viendront élargir la palette des outils disponibles. Parmi les satellites actuels, citons Sentinel-1 de l'Agence Spatiale Européenne, mis en orbite en 2014 dont la célébrité tient en partie au flux très important d'images, en accès libre, qui couvrent la terre entière avec une répétitivité de quelques jours, répétitivité inégale dans le passé. Dans ce même numéro de la RFPT, Jean Marie Nicolas et Florence Tupin dans *Un demi-siècle d'imagerie satellitaire radar* retracent l'histoire des capteurs micro-ondes et résument les principes du traitement de synthèse d'ouverture, traitement qui permet d'améliorer fortement la résolution spatiale kilométrique des données brutes.

Dans cet article, après avoir rappelé le cadre général des mesures radar effectuées en Télédétection, nous aborderons un problème rencontré par les utilisateurs d'images lorsqu'ils souhaitent sélectionner l'un des coefficients ( $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$ ), destiné à caractériser la surface étudiée. Le problème porte sur les possibilités de calibration de ces mesures selon que cette opération est menée conjointement ou non à un géoréférencement et que l'on dispose ou non d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

### I- Equation radar adaptée et simplifiée pour la télédétection des surfaces naturelles

#### I-1 Trois remarques d'ordre général

##### Equation radar, configurations bi-statique et mono-statique

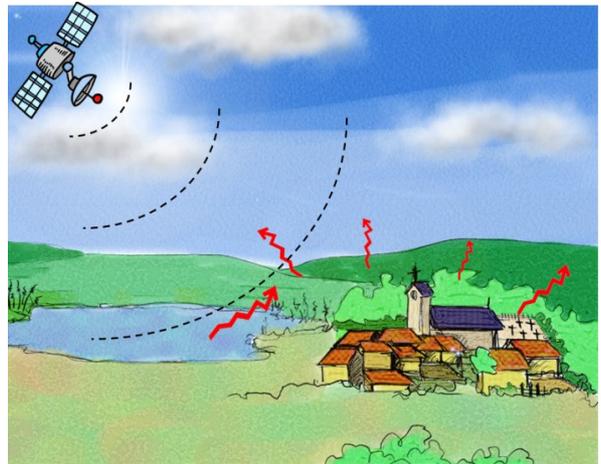
Avant de discuter plus avant des coefficients de diffusion et des modes de calibration, nous reviendrons à l'équation dite *équation radar* en la présentant sous un formalisme plus simple que l'équation habituelle, très « système » (Maitre 2000, Massonnet et Souyris 2008), et ainsi plus propice à une analyse des images. Il s'agit ici d'un point de vue « utilisateur ».

Nous supposerons au départ que le système imageur est bi-statique avec des antennes d'émission et de réception séparées. La configuration mono-statique sera introduite par la suite (le système bi-statique facilite la compréhension des processus lorsque l'on bascule au système mono-statique).

Prenant en compte au départ, le formalisme utilisé pour les cibles ponctuelles, nous l'adapterons au cas des cibles étendues correspondant aux paysages naturels.

##### Vocabulaire relatif à la mesure radar pour un pixel

L'impulsion émise, diffusée au sol, (cf. Fig. 1) reçue au niveau du capteur donne lieu à l'enregistrement de deux composantes pour l'écho (champ électrique), l'une en phase et l'autre en quadrature avec cette impulsion.



**Figure 1 :** Diffusion d'ondes radar sur une surface terrestre (Extrait de « la Guyane à travers les nuages »).

Cela explique le format des données radar *Single Look Complex* (parties réelle X et imaginaire Y) permettant de calculer une amplitude A et une phase  $\phi$ . Les explications qui suivent concernent les puissances transmises pour l'émission, réfléchi au sol, captée à la réception. A un facteur physique de proportionnalité près, nous confondrons intensité ( $I=A^2=X^2+Y^2$ ) et puissance P (proportionnelle au carré du champ) mesurée pour chaque pixel, ce qui constitue l'image I dite d'intensité. L'équation radar est destinée à expliquer la mesure pour un pixel à partir des paramètres « système » et des propriétés biogéophysiques des cibles (Ulaby, Long 2014, Baghdadi, Zribi 2016).

##### Mesure pour une cible ponctuelle et mesure pour une cible étendue

La manière d'aborder l'équation radar est différente selon que le pixel est constitué d'une cible ponctuelle ou d'une cible étendue.

Dans le cas d'une cible ponctuelle l'équation traduit la relation entre la surface équivalente radar (SER) de la cible, la puissance émise, et la puissance P mesurée à l'antenne de réception (Maitre 2000).

Dans le cas d'une cible étendue, la nature cohérente de l'onde entraîne un phénomène d'interférences entre les réponses des cibles élémentaires présentes dans la cellule de résolution. Il s'agit du phénomène de chatoiement, qui fait que l'intensité d'une zone homogène présente une forte variabilité entre pixels voisins avec un écart type égal à la valeur moyenne (Tupin 2014).

Dans le second cas, l'équation radar fournit également la SER (cf 1.3.2) correspondant au pixel considéré. Par contre, la caractérisation du milieu se fait grâce aux coefficients de diffusion  $\sigma^0, \gamma^0$  (cf 1.3.2) qui sont alors déterminés à partir de moyennes calculées sur un voisinage supposé présenter les mêmes caractéristiques macroscopiques que le pixel considéré. L'équation radar concerne alors une mesure moyenne de puissance, qui a pour objectif de réduire la variabilité due au chatoiement. Dans l'image réelle, le chatoiement se superpose

multiplicativement aux niveaux moyens envisagés précédemment.

L'écriture adaptée et simplifiée que nous proposerons concernera le cas des cibles étendues, cas le plus couramment rencontré lors de l'interprétation des images. La configuration « cible ponctuelle » sera, si nécessaire, signalée au cas par cas.

Dans la suite, nous noterons  $P$ , la puissance reçue au niveau du capteur sans distinguer les deux cas.

Pour les coefficients  $\sigma^0, \gamma^0$  la notion de moyenne spatiale sera sous entendue.

Soulignons que les pixels constitués d'une cible ponctuelle unique, fréquemment repérables par une forte puissance, échappent alors au phénomène de chatolement.

## I-2 Les Notations utilisées (cf figures 2-5)

Pour des raisons de clarté, malgré une certaine longueur, nous avons préféré regrouper la présentation des différents facteurs utilisés pour exprimer la mesure radar (en lien avec diverses propriétés énergétiques et géométriques), plutôt que les introduire progressivement.

### Facteurs géométriques généraux

$\vec{u}_i$  : vecteur unitaire du faisceau incident (dirigé de la source vers le sol, dans le demi-espace supérieur).

$\vec{u}_r$  : vecteur unitaire du faisceau réfléchi, du sol vers le capteur. L'usage de la notation  $(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  pour les vecteurs unitaires incident et réfléchi autorise une écriture compacte qui ne demande pas d'introduire les variables angulaires des coordonnées sphériques.

$i_0$  : angle d'incidence du faisceau pour un sol horizontal. A grande échelle, le sol horizontal est le niveau de référence local. A petite échelle (globale), il s'agit de l'ellipsoïde de référence.  $i_0$  augmente de manière continue en s'éloignant du Nadir, le long d'une ligne image au sein de la fauchée.

$p$  : angle définissant la pente transversale du terrain ; quantité algébrique :  $p > 0$  si la pente fait face à l'antenne,  $p < 0$  dans le cas contraire.

$\vec{n}$  : vecteur unitaire orthogonal à la surface du sol. ( $\vec{n} = \vec{n}_0$  dans le cas d'un sol horizontal).

$i_p = (-\vec{u}_i, \vec{n})$ , angle d'incidence locale ou en première approximation  $i_p = i_0 - p$  ; cette valeur est exacte pour une pente transverse à la direction du faisceau (pour un calcul complet, associant une pente dans la direction longitudinale, voir (Paquerault 1998).

$r = (\vec{n}, \vec{u}_r)$ , angle de réflexion. Dans le cas monostatique,  $\vec{u}_r = -\vec{u}_i$  et  $r = i_p$

$d_{aep}$  : distance antenne d'émission-pixel.

$d_{par}$  : distance pixel-antenne de réception.

$d_{rt}$  : dimension transversale du pixel en géométrie radar.  $d_{rt}$  est une constante du système.

$d_{st}$  : dimension transversale du pixel en géométrie sol ( $d_{sto}$  : valeur de  $d_{st}$  pour un sol horizontal).

$d_l$  : dimension pixel sol dans la direction longitudinale (avec  $d_{rl} = d_{sl}$ , égalité des dimensions longitudinales en géométries sol et radar en négligeant comme pour la détermination de  $i_p$  précédente, les effets du pendage dans la direction longitudinale).

$E_0$  : échelle de restitution de l'image pour un sol horizontal.

$E_p$  : échelle de restitution pour un sol de pente  $p$ .

$DG = E_0 / E_p$ , distorsion géométrique.

### Les surfaces associées à un même pixel pour une cible étendue

$S_{rad}$  : surface du pixel en géométrie radar (BCEF), valeur constante liée aux paramètres du système.

$S_p$  : surface du pixel au sol (ABCD).

$S_{po}$  : surface du pixel pour un sol horizontal.

$S_{ap}$  : surface apparente du pixel vu d'un point de l'espace (ADEF). Depuis une antenne,  $S_{ap}$  est obtenue en projetant la surface du pixel sol sur un plan perpendiculaire à la direction de cette antenne. Pour l'antenne de réception en configuration bi-statique,

$S_{ap} = S_p \cdot \cos(r)$  (Fig. 2), et  $S_{ap} = S_p \cdot \cos(i_p)$  (Fig. 4) en configuration mono-statique.

### Facteurs énergétiques et géométriques liés à la propagation entre antennes d'émission et de réception

$\Phi_r$  = densité de flux incident radar au niveau du sol ( $W/m^2$ ).  $\Phi_r$  est relatif à une surface perpendiculaire au faisceau.  $\Phi_r$  dépend de  $\vec{u}_i$  (influence du diagramme d'antenne), et de la distance antenne pixel  $d_{aep}$ , (influence en  $1/d_{aep}^2$ ).  $\Phi_r$  peut être considéré comme uniforme sur une portion limitée d'image.

$$\Phi_r = P_r / d_{aep}^2 \quad (1)$$

Où  $P_r$  ( $W / sr$ ) est la puissance rayonnée par l'antenne dans la direction du pixel

$R_{he}$  : réflectivité hémisphérique (= Puissance Réfléchie dans l'hémisphère supérieur / Puissance incidente). Ce facteur sans dimension, variable entre 0 et 1, est de la même famille que l'Albédo et le rapport (émittance / éclaircissement) en optique (cf Lettre associée). Ce facteur est spécifique aux cibles étendues.

$R_{he}$  dépend des caractéristiques diélectriques du milieu imagé pour une configuration géométrique macroscopique donnée (pour la longueur et la polarisation de l'onde) et de la direction du flux incident défini par  $\vec{u}_i$ .  $R_{he}$  pourra donc varier d'un pixel à l'autre mais restera stable pour un milieu homogène dont les caractéristiques macroscopiques seront elles-mêmes stables. Pour simplifier l'écriture, nous noterons simplement  $R_{he}(\vec{u}_i)$  dans la suite sans rappeler sa dépendance aux caractéristiques diélectriques du sol, ni à celles de l'onde ( $\lambda$ , polarisation).

$G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  : facteur directionnel de répartition de la puissance réfléchie dans le demi-espace supérieur. Il s'agit du diagramme du rayonnement réfléchi dont la valeur dépend de  $\vec{u}_r$  pour un  $\vec{u}_i$  donné ; (dimension  $1 / \text{stéradian} = 1 / sr = sr^{-1}$ ).  $G$  est équivalent au lobe d'une antenne, le pixel-sol jouant ici le rôle d'une antenne secondaire.

$G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  est tel que, pour  $\vec{u}_i$  donné,

$$\int_{1/2 \text{ espace supérieur}} G(\vec{u}_i, \vec{u}_r) d\omega(\vec{u}_r) = 1$$

Dans la suite,  $G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  caractérisera une cible étendue, mais son introduction pourrait concerner également une cible ponctuelle.  $G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  dépend en premier lieu des propriétés géométriques locales de la surface et donc de la rugosité, et/ou du couvert végétal en relation avec la longueur d'onde et la polarisation. Par exemple  $G$  aura une forme de lobe fin spéculaire pour une surface lisse (par rapport à la longueur d'onde) et sera plus proche d'une demi-sphère (isotropie) pour une surface très rugueuse ou

un couvert végétal dense. Par exemple, supposant une isotropie parfaite dans le demi-espace supérieur,  $G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  prendra la valeur constante  $(1/2\pi)$  pour toutes les directions de  $\vec{u}_r$  (pour  $\vec{u}_i$  donné).

Pour une zone macroscopiquement homogène,  $G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  conservera une valeur stable, comportement similaire à celui du facteur  $Rhe(\vec{u}_i)$ .

$\Delta S_{eff}$  : surface efficace d'ouverture du récepteur (dépend en particulier du diagramme de l'antenne de réception).

$\Delta\Omega_{par}$  : angle solide sous lequel l'antenne de réception est vue depuis le pixel.

$$\Delta\Omega_{par} = \Delta S_{eff} / d_{par}^2 \quad (2)$$

$P$  : puissance (W) reçue par le capteur en provenance du pixel.

### I-3 Equation radar en configuration bi-statique

#### I-3-1 L'évaluation de la puissance $P$ reçue par le capteur

Le bilan énergétique (émission, réflexion, réception)

Avec les notations précédentes :

Puissance reçue (en W) par un pixel (cible étendue)

$$\Phi_r \cdot S_p \cdot \cos(i_p)$$

Puissance réfléchie globalement dans le demi-espace supérieur (en W)

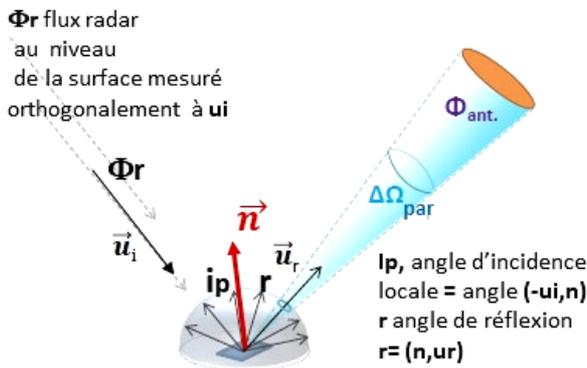
$$\Phi_r \cdot S_p \cdot \cos(i_p) \cdot R_{he}$$

Puissance reçue par le capteur (en W).

$$P = \Phi_r \cdot S_p \cdot \cos(i_p) \cdot Rhe(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, \vec{u}_r) \cdot \Delta\Omega_{par} \quad (3)$$

Cette équation constitue l'une des formes de **l'équation radar pour des cibles étendues**.

Notons que cette expression est également valable en optique en remplaçant  $\Phi_r$  par le flux solaire  $\Phi_s$ , pour une illumination directe et une atmosphère transparente.



**Figure 2** : Configuration bi-statique (les antennes d'émission et de réception sont différentes). Une partie du faisceau émis par l'antenne d'émission est réfléchi au sol vers l'antenne de réception (extraite de Training SAR-O1).

#### I-3-2 Les termes $\Sigma$ (= SER), $\sigma^0$ , $\gamma^0$ et $\beta^0$

Le terme  $\Sigma$  (= SER) :

La surface équivalente radar  $\Sigma$  (SER dans le vocabulaire usuel), correspondant à une cible quelconque (ponctuelle ou étendue), est déterminée pour une configuration

donnée des antennes émettrice et réceptrice. C'est la surface perpendiculaire au faisceau, qui réfléchissant la totalité de la puissance reçue (égale à  $\Sigma \cdot \Phi_r$ ) et la redistribuant de manière isotrope dans l'espace entier conduirait à une mesure identique au niveau de l'antenne.

Ce qui donne :  $P = \Sigma \cdot \Phi_r \cdot (1/4 \pi) \cdot \Delta\Omega_{par}$

$\Sigma$  est donc donnée par la relation suivante :

$$\Sigma = 4\pi \cdot P / (\Phi_r \cdot \Delta\Omega_{par}) \quad (4)$$

$\Sigma$  est liée à  $P$  par une relation du type

$$\Sigma = K \cdot P \text{ avec } K = 4\pi / (\Phi_r \cdot \Delta\Omega_{par})$$

où  $K$  varie mollement au sein de l'image en fonction de la forme des diagrammes d'antenne et du terme  $d_{sep}^2 \cdot d_{par}^2$  (cf. eq.1 et 2). Ainsi,  $\Sigma$  dépend comme  $P$  de la surface du pixel  $S_p$ , de son état, de son orientation relative par rapport au faisceau incident, par les facteurs  $R_{he}(\vec{u}_i)$  et  $G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  (cf. eq. 3).  $\Sigma$  présente un caractère bidirectionnel

Dans le cas d'une cible étendue, la combinaison des relations 4 et 3 donne pour  $\Sigma$  (m<sup>2</sup>) :

$$\Sigma = 4 \pi \cdot S_p \cdot \cos(i_p) \cdot R_{he}(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, \vec{u}_r) \quad (5)$$

Les coefficients  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$  :

Par définition, (Massonnet et Souyris 2008, Small 2011), les coefficients  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$  sont définis en rapportant la SER aux différentes surfaces associées au pixel.

Respectivement, pour  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$

$$\sigma^0 = \Sigma / S_p$$

$$\gamma^0 = \Sigma / S_{ap}$$

c'est-à-dire  $\gamma^0 = \sigma^0 / \cos(r)$  puisque  $S_{ap} = S_p \cdot \cos(r)$

Ce qui donne, selon la relation (5) :

$$\sigma^0 = 4 \pi \cdot \cos(i_p) \cdot Rhe(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, \vec{u}_r) \quad (6)$$

$$\gamma^0 = 4 \pi \cdot \cos(i_p) \cdot Rhe(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, \vec{u}_r) / \cos(r) \quad (7)$$

Retenons également une relation utile en pratique, la relation (4) donne  $\sigma^0 = \Sigma / S_p = K \cdot P / S_p$ , càd  $P = \sigma^0 \cdot S_p / K$ , ou encore, avec  $k = 1/K$  :

$$P = k \cdot \sigma^0 \cdot S_p \quad (8)$$

Les coefficients  $\gamma^0$ ,  $\sigma^0$  sont sans dimension et dépendent des mêmes facteurs physiques que les grandeurs  $R_{he}$  et  $G$ , introduites §I-2 lors de la présentation des notations.

Comme  $\Sigma$ , ils présentent un caractère bidirectionnel.

Le coefficient  $\beta^0$  ( $= \Sigma / S_{rad}$ ) relatif à la surface du pixel en géométrie radar ne présente pas d'intérêt ici. Par contre, nous retrouverons  $\beta^0$  en mode mono statique, cf. §I-4.

Rappelons que ces coefficients, en raison de leur dynamique très différente entre fortes valeurs pour des cibles anthropiques (par ex de 1 à 500, étendue 499) et faibles valeurs pour les paysages naturels (par ex de 0,002 à 1, étendue 0,998), sont usuellement exprimés en décibels,  $\sigma^0_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(\sigma^0)$  pour contracter les fortes valeurs et dilater les plus faibles (étendue portée à 27 dB dans notre exemple, aussi bien pour les fortes que pour les faibles valeurs).

Deux remarques à ce stade :

1- L'introduction de  $\Phi_r$  et  $\Delta\Omega_{par}$  dans l'équation radar simplifiée permet de ne pas détailler les mécanismes d'émission, de propagation et de réception propres aux

systèmes et antennes radar. Cette présentation simplifiée permet de se focaliser avant tout sur les mécanismes de diffusion à l'interface air-sol.

2- L'introduction pour  $\gamma^0$  de la surface apparente du pixel vue du capteur dans l'expression du flux reçu par ce dernier laisse présager une certaine similitude avec la luminance en optique. Nous reviendrons sur ce point dans une lettre séparée consacrée à la comparaison optique-radar.

#### I-4 Equation radar en configuration mono-statique

I-4-1 *Eléments géométriques, relation entre les surfaces associées à un même pixel, effets de la pente sur l'échelle de restitution en géométrie sol (Fig. 3, Fig. 4).*

##### Les 3 surfaces associées au pixel :

Dans la configuration mono-statique, les dimensions de pixel et surfaces associées, en géométrie sol, géométrie radar et surface apparente vue depuis l'antenne unique, sont liées par les relations suivantes (Fig. 3) :

$d_{st} = d_{rt} / \sin(i_p)$ , où  $d_{rt}$  est une constante système

$$AF = DE = d_{rt} / \tan(i_p)$$

La dimension longitudinale du pixel étant supposée la même dans les géométries sol et radar (cf I-2, et Fig. 5), nous obtenons :

$$S_p / S_{rad} = d_{st} / d_{rt} = 1 / \sin(i_p)$$

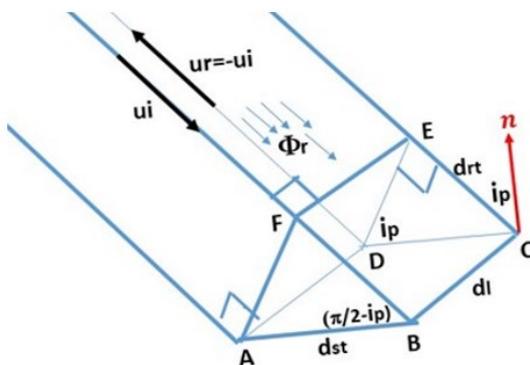
$$S_p = S_{rad} / \sin(i_p)$$

$$\text{et } S_{ap} = S_p \cdot \cos(i_p) = S_{rad} / \tan(i_p) \quad (9)$$

Pour un sol horizontal, nous avons :

$$S_{p0} / S_{rad} = 1 / \sin(i_0)$$

$$\text{et } S_{p0} / S_p = \sin(i_p) / \sin(i_0)$$



**Figure 3 :** Vue 3D en configuration mono-statique d'une cellule de résolution avec les différentes surfaces intervenant dans le calcul des coefficients de diffusion : dans ce cas antenne d'émission = antenne de réception.

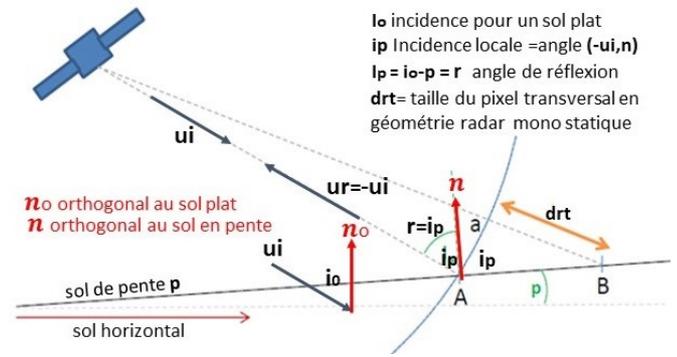
Surface du pixel au sol  $S_p = d_{st} \cdot d_l$  (surface ABCD)

Surface du pixel en géométrie radar  $S_{rad} = d_{rt} \cdot d_l$

(surface BCEF) ;

Surface apparente  $S$  du pixel vue de l'antenne unique

$S_{ap} = S_p \cos(i_p)$  (surface ADEF).



**Figure 4 :** Rétrodiffusion en configuration mono-statique, vue en coupe dans le plan d'incidence. Nous avons  $\vec{u}_r = -\vec{u}_i$  et égalité des angles d'incidence et de réflexion  $i_p = r$ . La trajectoire de l'antenne est perpendiculaire au plan de figure (adaptée de Training SAR-O1).

##### Effets de pente sur l'échelle de restitution $E$ :

Le facteur  $1/\sin(i_p) = d_{st} / d_{rt}$  module la taille du pixel sol dans la direction transversale. Ce terme n'étant pas constant en tous points, il en résulte des variations d'échelle au sein d'une même image lors d'une restitution cartographique sous forme papier ou numérique.

Notons  $E$ , l'échelle de restitution transversale. Soit  $a$ , la dimension transversale d'un pixel dans l'image restituée, l'échelle  $E$  aura pour valeur :

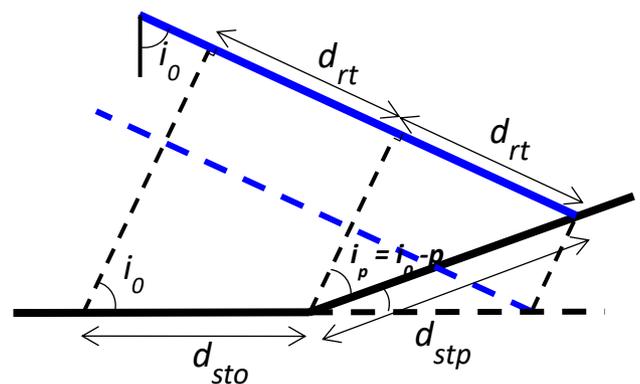
$E = a / d_{st} = a \cdot \sin(i_p) / d_{rt} = k \cdot \sin(i_p)$  où  $k = a / d_{rt}$  est une constante, avec  $E_0 = k \cdot \sin(i_0)$  pour un sol horizontal et  $E_p = k \cdot \sin(i_p)$  pour une pente  $p$ .

Pour un terrain globalement horizontal, cette échelle augmentera lentement sur une ligne image des points les plus proches aux plus éloignés, en suivant l'augmentation de  $i_0$  au sein de la fauchée.

Localement, entre une pente nulle et une pente  $p$ , nous aurons la relation entre échelles  $E_p$  et  $E_0$  :

$E_p = E_0 \cdot \sin(i_p) / \sin(i_0)$  (avec  $i_p = (i_0 - p)$ , et également

$E_p = E_0 \cdot S_{p0} / S_p$  selon (9).



**Figure 5 :** Vue transversale illustrant l'influence de la pente  $p$  sur la cellule de résolution transversale au sol  $d_{st}$ . La dimension transversale du pixel en géométrie radar  $d_{rt}$  est une constante du système.

En présence de relief, l'existence de pentes (positives pour une face orientée vers l'antenne et négatives dans le cas

contraire) va entrainer des variations de l'échelle de restitution au sein d'une même image.

Cette variabilité d'échelle est à l'origine de ce qu'on nomme habituellement « distorsion géométrique », (décalage vers l'antenne dans l'image, par rapport à leur position cartographique des points situés en altitude).

Considérons par exemple les pentes orientées vers l'antenne ( $p > 0, i_p < i_o$ ). La dimension transversale du pixel augmente en  $(\sin(i_o) / \sin(i_p))$  par rapport à un sol horizontal (cf Fig. 5) ; l'échelle  $E_p$  diminuant alors du facteur inverse  $(\sin(i_p) / \sin(i_o))$ . L'augmentation de la dimension transversale du pixel sol entraine une compression dans l'image ( $E_p < E_o$ ) puisqu'une même distance au sol demandera moins de pixels pour être représentée.

Pour les pentes opposées, le phénomène inverse apparait avec dilatation relative de la zone considérée dans l'image ; dans ce cas  $E_p > E_o$ .

Notons que, en l'absence de corrections adaptées, de type ortho-rectification, les variations d'échelle au sein d'une même image peuvent être très importantes.

Pour fixer les idées, en prenant pour  $i_o$  une valeur de  $30^\circ$ , le tableau ci-dessous donne la valeur de la distorsion géométrique.

$$DG = E_o / E_p = d_{st} / d_{sto} = \sin(i_o) / \sin(i_p) = S_p / S_{p0} \quad (10)$$

pour différentes valeurs de la pente variable de  $0$  à  $25^\circ$ , faisant face ou opposée au capteur (auquel cas  $p$  est négatif dans l'expression  $i_p=i_o-p$ ).

Pente	-25	-15	-5	0	+5	+15	+25
DG	0,61	0,71	0,88	1	1,18	1,92	5,88

**Tableau 1** : valeur de  $DG = E_o / E_p = \sin(i_o) / \sin(i_p) = (S_p / S_{p0})$  pour différentes valeurs de  $p$ , pour  $i_o=30^\circ$ .

Notons que des valeurs beaucoup plus importantes de distorsion peuvent être observées quand la pente frôle l'angle d'incidence  $i_o$ . (si la pente  $p$  est plus élevée que  $i_o$ , le relief est renversé dans les images et pour  $p = i_o$ ,  $DG$  devient (théoriquement) infinie).

#### I-4-2 Analyse des facteurs modulant l'image d'intensité $P$ en rétrodiffusion, relation entre distorsions radiométrique et géométrique dans les images

Rappelons que notre intérêt porte sur les cibles étendues et que le chatoiement est supposé gommé. Ce qui suit concerne des valeurs moyennes (ou espérance en probabilité).

Avec  $\vec{u}_r = -\vec{u}_i$ , (fig. 3 et fig. 4), l'équation (3), relative à la mesure effectuée  $P$  en configuration bi-statique devient :

$$P = \Phi_r \cdot S_p \cdot \cos(i_p) \cdot R_{he}(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, -\vec{u}_i) \cdot \Delta\Omega_{par} \quad (11)$$

D'après les relations (1) et (2), le produit  $\Phi_r \cdot \Delta\Omega_{par} = P_r \cdot S_{eff} / d^4$  (puisque en configuration mono-statique,  $d_{aep} = d_{par} = d$ ) contribue à  $P$  par le produit de deux diagrammes d'antenne identiques et du facteur  $1/d^4$ . Notons que dans les images d'intensité distribuées par les agences, les effets correspondants sont en général corrigés par les agences.

Passons en revue les contributions des autres termes.

Le terme  $\cos(i_p)$  varie en fonction de l'incidence au sein d'une image, plus ou moins fortement selon l'importance de la fauchée et la nature du relief. Par exemple pour un sol plat et pour une incidence  $i_o$  variant de  $29^\circ$  à  $46^\circ$  comme c'est le cas pour Sentinel-1,  $\cos(i)$  variera de  $\cos(29^\circ) = 0,875$  à  $\cos(46^\circ) = 0,695$  (soit une variation de 26% lors d'un déplacement des grandes aux petites incidences). Pour une pente  $p$  de  $25^\circ$  faisant face à l'antenne pour une incidence sol-plat de  $i_o = 30^\circ$ , le terme  $\cos(i_p)$  induira un facteur multiplicatif de  $\cos(5^\circ) / \cos(30^\circ) = 1,15$  par rapport au sol plat.

Le facteur  $R_{he}(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  est un terme qui varie d'un pixel à l'autre au sein de l'image, traduisant les changements des caractéristiques diélectriques et géométriques fines de la surface.

C'est le terme utilisé habituellement pour expliquer la variabilité dans les images d'intensité dues aux facteurs humidité, direction de visée, rugosité, végétation (mais comme nous le voyons dans ce paragraphe, ce n'est pas le seul qui influe sur  $P$ ).

Ce facteur dépend de manière plus ou moins fortement de la direction  $\vec{u}_i$ , donc de l'incidence locale  $i_p$  et de l'azimut de visée. Il croit en général lorsque l'incidence locale diminue. Nous discuterons plus loin du cas de la forêt dense ou il est réputé rester stable en fonction de l'incidence.

#### Rôle du facteur $S_p$ (Fig. 3 et Fig. 5)

Il s'agit d'un terme qui joue un rôle majeur en liaison avec le relief. Par rapport à un sol plat, l'effet lié à la variabilité de  $S_p$  est mesuré par le facteur  $(S_p / S_o)$  égal à la distorsion géométrique  $DG$  définie eq.10. Sans préjuger des autres facteurs contribuant à la variabilité radiométrique dans l'image, nous observerons donc une variabilité radiométrique  $DR_r$  due au relief égale à la distorsion géométrique définie càd :

$$DR_r = DG \quad (12)$$

Notons que les trois effets des termes  $\cos(i_p)$ ,  $R_{he} \cdot G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  et  $S_p$  liés à la pente discutés ci-dessus, agissent dans le même sens, ce qui amplifie l'effet global observé.

Par exemple, en reprenant les calculs précédents, pour la même incidence  $i_o$  de  $30^\circ$ , entre une surface horizontale et une pente de  $25^\circ$ , se multiplieront la variation de  $\cos(i_p)$  (égale à 1,15), celle de  $S_p$  (égale à 5,88) sans préjuger du facteur multiplicatif dû à  $(R_{he} \cdot G)$  qui sera au minimum 1, mais qui dans la majorité des cas sera supérieur à 1 et amplifiera un peu plus le phénomène.

Le contraste radiométrique total, entre zone de pente  $p$  et zone plate sera supérieur à  $DR_r (= DG)$ .

Le fait que la pente joue un rôle majeur dans la valeur de  $P$  amène à considérer fréquemment qu'une image d'intensité reflète principalement les effets du relief, et secondairement les autres propriétés de la surface.

Note : dans les calculs précédents apparaissent les deux termes  $\cos(i_p)$  et  $1 / \sin(i_p)$  que nous pourrions regrouper en un seul terme  $1 / \tan(i_p)$ . Mais l'origine des deux termes étant différente, direction du flux incident pour le premier et variation de surface du pixel pour le second, il nous a semblé préférable de considérer leurs rôles séparément.

Remarque : l'analyse visuelle de toutes ces contributions liées au relief dans l'image de  $P$  peut s'avérer délicate pour deux raisons :

- l'alternance de zones claires et foncées peut donner lieu à inversion lors de l'interprétation (talwegs vus comme des crêtes et réciproquement)
- visualiser l'image sur un écran demande de comprimer les valeurs numériques existant dans  $P$ , en général codées sur 2 octets, en une image codée sur 1 octet, ce qui conduit parfois à des saturations dans les zones dont les niveaux sont les plus élevés. Il en résulte une extension anormale de taches très claires dans les images, même après conversion des valeurs en dB.

#### I-4-3 Les coefficients associés à la rétrodiffusion

Avec  $\vec{u}_r = -\vec{u}_i$ , le coefficient  $\sigma^0$  (eq. 6) devient :

$$\sigma^0 = 4 \pi \cdot \cos(i_p) \cdot R_{he}(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, -\vec{u}_i) \quad (13)$$

Pour le coefficient  $\gamma^0$

$$\gamma^0 = \sigma^0 / \cos(i_p) = 4 \pi \cdot R_{he}(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, -\vec{u}_i) \quad (14)$$

Comparé à  $\sigma^0$ ,  $\gamma^0$  ne dépend plus du facteur  $\cos(i_p)$  lié à la direction du flux incident.

En exprimant  $\sigma^0$ ,  $\gamma^0$  en fonction de  $\beta^0$

$$\sigma^0 = \beta^0 \cdot \sin(i_p) \quad \text{et} \quad \gamma^0 = \beta^0 \cdot \tan(i_p) \quad (15)$$

Pour le coefficient  $\beta^0$  (cible étendue),

$$\beta^0 = \Sigma / S_{rad} = \Sigma / (S_p \cdot \sin(i_p)) = \sigma^0 / \sin(i_p)$$

Ce qui donne, avec (13)

$$\beta^0 = 4 \pi \cdot R_{he}(\vec{u}_i) \cdot \frac{G(\vec{u}_i, -\vec{u}_i)}{\tan(i_p)} \quad (16)$$

## II- Discussion relative à l'intérêt et aux usages des termes $\Sigma$ , $\beta^0$ , $\sigma^0$ , $\gamma^0$ (configuration mono statique, cible étendue)

### II-1 SER, $\Sigma$ et coefficient $\beta^0 = \Sigma / S_{rad}$

La surface  $S_{rad}$  du pixel en géométrie radar étant constante dans une même image,  $\beta^0$  suit les variations de  $\Sigma$  en lui étant proportionnel.  $\beta^0$  suit donc, comme  $\Sigma$ , les variations de la puissance reçue par l'antenne  $P$  après correction des effets de diagramme d'antenne et de distance évoqués (équation 4).

L'image de  $\beta^0$  est donc proche de l'image d'intensité initiale  $P$ .

Pour les cibles ponctuelles, seule la notion de SER  $\Sigma$  est utile (par exemple pour le choix de réflecteurs permanents en interférométrie)

### II-2 Le coefficient $\sigma^0$

Il est habituel de caractériser le comportement d'une surface naturelle homogène en rétrodiffusion par la donnée du coefficient  $\sigma^0$ , que l'on retrouve dans de nombreux ouvrages et publications de référence en fonction de divers paramètres liés au faisceau (longueur d'onde, polarisation, direction de visée) ou à la surface du sol (rugosité, humidité, biomasse, Ulaby et Long 2014).

Pour un type d'onde donné ( $\lambda$  et polarisation fixées),  $\sigma^0$  est donc le paramètre habituel destiné à caractériser la surface imagée.

L'équation (13) permet (au moins en partie) de séparer certains effets diélectriques et géométriques.

$R_{he}$  dépend principalement des propriétés diélectriques au sol, de l'incidence locale (donc de  $\vec{u}_i$ ), selon la longueur d'onde et la polarisation.

$G(\vec{u}_i, -\vec{u}_i)$  dépend pour sa part principalement des propriétés géométriques de la surface en liaison avec la direction de visée, la longueur d'onde et la polarisation.

Par exemple, l'analyse de la réponse d'une surface plus ou moins rugueuse et plus ou moins humide conduirait à séparer le facteur humidité par son influence sur  $R_{he}$  et le facteur rugosité par son influence sur la valeur en rétrodiffusion de l'indicatrice  $G(\vec{u}_i, -\vec{u}_i)$ .

La figure 6 (Frison et al., 1996) fournit une illustration de la décroissance de  $\sigma^0$  avec l'incidence locale pour 4 différents types de surface. Ces mesures ont été effectuées avec le diffusiomètre de ERS1 (bande C, polar VV). Entre 15° et 55°, on peut observer une chute de  $\sigma^0$  d'environ 2,3 dB pour les forêts denses et de 8,5 dB pour les déserts.

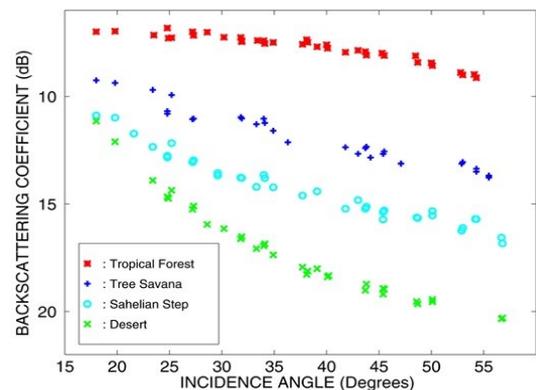


Figure 6 : Variations de  $\sigma^0$  avec l'incidence pour 4 types d'occupation du sol.

### II-3 Le Coefficient $\gamma^0$

Dans le cas particulier des forêts denses, le coefficient  $\gamma^0$  est fréquemment utilisé. Son intérêt est le suivant. Comparé à  $\sigma^0$  le terme  $\cos(i_p)$  n'apparaît plus.

La décroissance lente de 2,3 dB observée pour la forêt (Fig. 6) s'explique, aux incertitudes près, par la décroissance du facteur cosinus, de  $\cos(15^\circ) = 0,965$  à  $\cos(55^\circ) = 0,573$ , ce qui correspond à

$10 \cdot \log_{10}(0,573/0,965) = -2,2$  dB. La variation de  $\gamma^0$  avec l'incidence sera donc faible, voire nulle sur la forêt. Cette propriété fait la réputation du coefficient  $\gamma^0$  qui est en général retenu pour les études concernant l'influence d'autres variables (biomasse, humidité), en bande C, polar VV, et également dans les autres bandes et polarisation.

Reprenons la relation (14) :  $\gamma^0 = 4 \pi \cdot R_{he}(\vec{u}_i) \cdot G(\vec{u}_i, -\vec{u}_i)$ . Cette indépendance de  $\gamma^0$  à l'incidence sur les forêts peut être interprétée de la manière suivante :

- d'une part, la réflectivité hémisphérique  $R_{he}$  est peu sensible à l'incidence dans la mesure où le feuillage se comporte comme un nuage isotrope de cibles élémentaires, le facteur  $R_{he}$  atteignant un palier correspondant à la saturation pour un nuage de profondeur

et de densité de cibles suffisantes (ceci est d'autant plus réaliste que la longueur d'onde est petite, donc moins vrai a priori pour la bande P pour des biomasses modérées).

- d'autre part, le facteur  $G(\vec{u}_i, \vec{u}_r)$  prend une valeur constante indépendante de la direction de  $\vec{u}_i$ , voisine de  $(1/2\pi)$  pour une rétrodiffusion isotrope, pour les mêmes raisons que précédemment avec une densité de cibles suffisamment importante.

Avec ces hypothèses :

$$\gamma^0 = 4\pi \cdot Rhe(\vec{u}_i) \cdot (1/2\pi) = 2 \cdot Rhe(\vec{u}_i).$$

Numériquement pour une valeur usuelle de  $\gamma^0 = -6dB$ , c'est-à-dire 1/4 en valeur naturelle, on obtient  $Rhe = 0,125$  (ou 12,5%, valeur plausible).

Notons que ces ordres de grandeur sont valables également pour  $\sigma^0$ , puisqu'avec les mêmes hypothèses de saturation du signal et d'isotropie, on obtient

$$\sigma^0 = 4\pi \cdot \cos(i_p) \cdot Rhe \cdot (1/2\pi) = 2 \cdot Rhe \cdot \cos(i_p)$$

d'où  $Rhe = 10^{\gamma^0 dB/10} / 2 \cos(i_p) \approx 0,1$  (10%) pour des incidences de 30° et des  $\sigma^0$  usuels de -6 à -8dB.

### III- Les modes de calibration pour $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$ (configuration mono-statique)

#### III-1 la démarche de calibration

Pour pouvoir procéder à la calibration des images, il est nécessaire que le système radar global ait lui-même donné lieu à une calibration, afin que l'ensemble des *paramètres dits systèmes* soient connus. Il s'agit par exemple de la puissance émise, des diagrammes d'antenne... Cette étape prend appui sur les réponses observées sur des cibles ponctuelles parfaitement définies ou des cibles étendues de référence (forêt équatoriale par exemple). Il s'agit d'une démarche technique sophistiquée, décrite pour le capteur Sentinel-1 sur le site <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/cal-val-activities>.

Une fois cette étape franchie, il est possible d'envisager la calibration des images, tâche qui échoit à l'utilisateur.

Il s'agit d'une opération disponible sur les logiciels usuels de traitement des images de télédétection.

D'une manière générale, la calibration revient à déterminer la *SER*,  $\Sigma$ , en fonction de la mesure *P*. Comme cela a été évoqué au début de ce §, cela demande de connaître les caractéristiques « système » (puissance émise, diagrammes d'antenne en émission et réception), et la géométrie d'acquisition (distance entre l'antenne et le sol, angle d'incidence, surface du pixel en géométrie radar).

L'intérêt majeur de cette opération est de permettre la comparaison entre mesures effectuées à partir de capteurs différents et/ou de séquences diachroniques d'images, et de répondre au besoin de valeurs exactes pour inverser des modèles physiques. Ce peut être aujourd'hui le cas pour de nombreuses images Sentinel-1 disponibles en tous points du globe.

Une fois déterminée  $\Sigma$ , les valeurs de  $\beta^0, \sigma^0, \gamma^0$  s'en déduisent (cf eq. 15).

La détermination de  $\Sigma$ , donc celle de  $\beta^0$  ne pose pas de problème particulier. L'affaire est moins simple pour  $\sigma^0$  et

$\gamma^0$  car il est nécessaire de connaître l'incidence locale  $i_p$ , ce qui demande une connaissance précise du relief.

#### Qu'en est-il en pratique ?

*En l'absence de MNT*, le calcul rigoureux est impossible en zone de relief. Seule  $i_0$  pourra être utilisée et les calculs de calibration se feront donc comme si le sol était horizontal (la surface de référence peut être locale ou, dans le cas d'une analyse plus globale coïncider avec l'ellipsoïde de référence).

*Si l'on dispose d'un MNT*, comme par exemple le MNT SRTM, au pas de 30 m et de précision altimétrique décimétrique (aujourd'hui le plus utilisé malgré une résolution parfois insuffisante), il est possible, soit d'effectuer le calcul en utilisant une incidence  $i_p$  déduite du MNT, soit de se contenter d'un calcul avec une incidence  $i_0$ .

Introduisons deux notations pour distinguer les valeurs calibrées correctement en utilisant la valeur  $i_p$  pour l'incidence et les valeurs calculées en utilisant l'incidence sol plat horizontal  $i_0$ .

Nous noterons, selon l'équation (15) :

$$\sigma_{calibré\_sol\_plat}^0 = \beta^0 \cdot \sin(i_0) \quad (17)$$

$$\gamma_{calibré\_sol\_plat}^0 = \beta^0 \cdot \tan(i_0) \quad (18)$$

$$\sigma_{calibré\_relief}^0 = \beta^0 \cdot \sin(i_p) = \sigma_{calibré\_sol\_plat}^0 \cdot (\sin(i_p)/\sin(i_0)) \quad (19)$$

$$\text{Ou encore } \sigma_{calibré\_relief}^0 = \sigma_{calibré\_sol\_plat}^0 \cdot (S_{p0}/S_p)$$

$$\gamma_{calibré\_relief}^0 = \beta^0 \tan(i_p) = \sigma_{calibré\_sol\_plat}^0 (\tan(i_p)/\tan(i_0)) \quad (20)$$

En présence de relief, nous avons vu que le facteur  $\beta^0 = \Sigma / S_{rad}$  suit globalement les variations de la mesure *P*. Les facteurs  $\sin(i_0)$  et  $\tan(i_0)$  varient lentement dans une image, les effets du relief se retrouvent donc pleinement dans les images de  $\gamma^0$  et  $\sigma^0$  calibrées en supposant le sol plat.

Les valeurs calculées en utilisant l'incidence locale réelle  $i_p$  donnent des valeurs proches de la réalité (aux incertitudes près liées à celles des pentes); les facteurs  $(\sin(i_p)/\sin(i_0)) = (S_{p0}/S_p)$  et  $(\tan(i_p)/\tan(i_0))$  intervenant comme termes correctifs respectivement pour  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$ .

Insistons sur le fait que les facteurs correctifs introduits (par exemple  $(S_{p0}/S_p)$  dans le cas de  $\sigma^0$ ) conduisent à des valeurs de  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$  correspondant à l'incidence locale  $i_p$ , et non à  $i_0$  (selon les relations des eq. 13 et eq. 14 ou tous les facteurs concernés dépendent de  $i_p$ ).

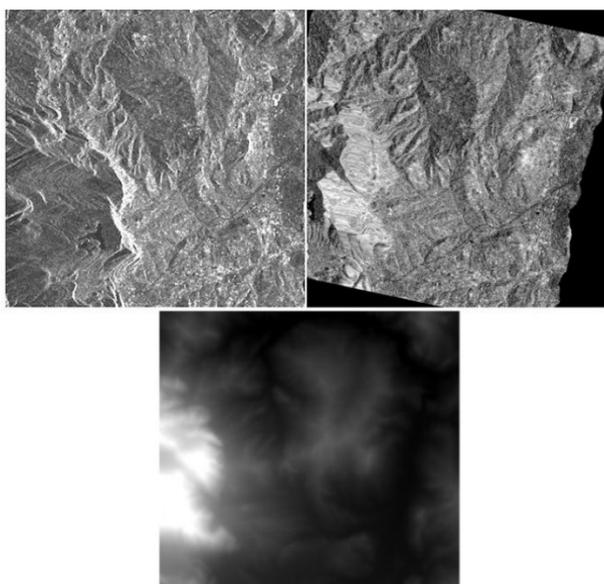
#### III-2 Différentes pratiques lors d'une calibration associée à un géoréférencement

Distinguons les 3 cas les plus fréquents :

Cas 1 : Quel que soit le relief, géoréférencement et calibration sont opérés pour un terrain supposé plat. En tous points, les calculs sont effectués avec l'incidence  $i_0$  correspondant à une surface horizontale. Dans ce cas, les distorsions géométriques et radiométriques persistent à l'issue de l'opération. Seule est modifiée l'orientation géographique générale de l'image.

Nous avons vu que, dans ce cas, les effets du relief se retrouvent pleinement sans correction dans les images de  $\gamma^0$  et  $\sigma^0$  calibrées « sol plat ».

**Cas 2 :** Opération partagée : le géoréférencement prend en compte le MNT disponible pour corriger les effets géométriques de compression et de dilatation dans l'image selon l'orientation des pentes. Par contre, comme dans le cas 1, les valeurs de  $\gamma^0$  et  $\sigma^0$  (eq. 17 et eq. 18) ne sont pas corrigées radiométriquement, la surface du pixel étant supposée être partout celle du pixel pour une pente nulle. Les distorsions géométriques sont ainsi réduites (jamais parfaitement car le MNT disponible présente des imperfections par rapport au relief perçu par l'image, avec un calcul de pente approché par rapport à la réalité). Par contre la réorganisation des pixels dans l'image corrigée géométriquement va conserver les valeurs initiales des coefficients  $\gamma^0$  et  $\sigma^0$  (par exemple très élevés dans les zones de compression et étaler ces valeurs lors de la décompression). La figure 7 présente ce cas sur une zone de l'île de la Réunion.

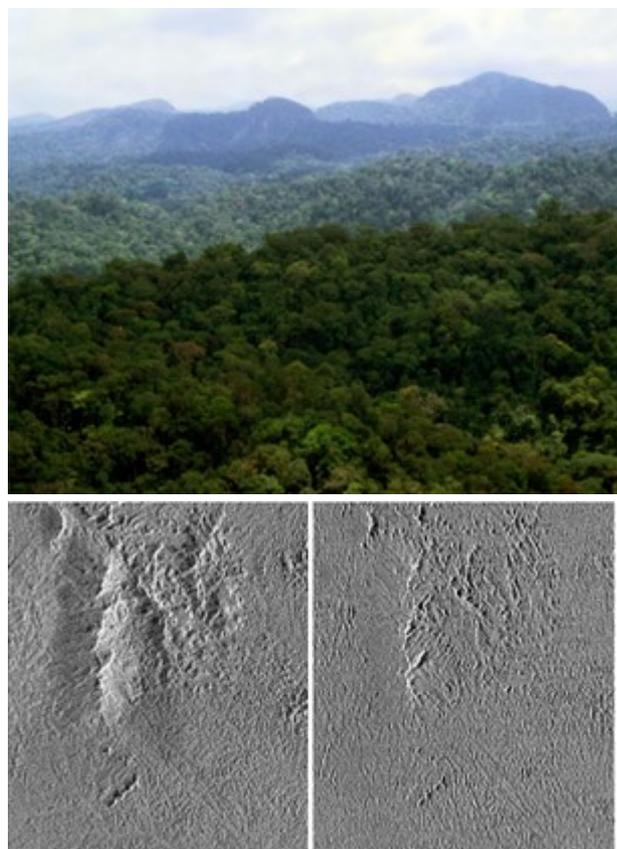


**Figure 7 :** En haut à gauche, image d'origine, en bas MNT (en niveau de gris) utilisé pour la correction géométrique, en haut à droite, image corrigée géométriquement mais calibrée en prenant en compte l'incidence locale « sol plat horizontal »  $i_0$  (document VisioTerra).

**Cas 3 :** le traitement est ici le plus complet. Les distorsions géométriques sont corrigées et les coefficients  $\gamma^0$  et  $\sigma^0$  le sont également en prenant en compte l'incidence locale réelle. Cela conduit à une réduction des effets liés au paramètre  $S_p$ , effets aussi bien géométriques que radiométriques. Insistons une nouvelle fois sur le fait qu'après ces corrections radiométriques les valeurs obtenues pour  $\gamma^0$  et  $\sigma^0$  sont les valeurs correspondant à l'incidence locale réelle  $i_p$ , valeurs qui peuvent être différentes des valeurs observées pour un terrain plat lorsque  $i_p$  égale  $i_0$ . En dehors du cas particulier des forêts denses, la calibration n'effacera pas complètement les

effets du relief car les contrastes liés aux variations des coefficients avec l'incidence locale persisteront (cf. Fig. 6).

La figure 8 illustre le cas 3 dans une région de Guyane Française où un relief modéré est couvert de forêt dense. La correction géométrique accompagnée d'une calibration radiométrique efface quasiment complètement les effets du relief car la forêt se comporte comme un couvert homogène. Il ne reste que des artefacts localisés, dus aux imperfections du MNT SRTM dont la résolution spatiale ne permet pas de suivre les pentes de manière assez détaillée.



**Figure 8 :** Paysage de Guyane : Image ERS en bande C, polarisation VV, incidence moyenne  $i_0 = 23^\circ$ , sur un relief modéré couvert de forêt dense. En bas : à gauche, image initiale, à droite  $\gamma^0$  après des corrections radiométriques prenant en compte l'incidence locale. Les corrections radiométriques sont globalement inversées des distorsions géométriques. L'image devient très peu contrastée. Les artefacts liés à l'imperfection du MNT SRTM utilisés sont perceptibles.

### III-3 Cas d'usages de la calibration selon la nature du relief et les domaines d'applications

En terrain plat,  $i_p = i_0$ , il n'y a pas de problème particulier. Nous sommes dans le cas 1 vu au III-2. La calibration conduit aux valeurs de  $\sigma^0(i_p)$  et  $\gamma^0(i_p)$  correspondant à l'incidence  $i_p = i_0$  dans l'image.

Les variations des coefficients sont liées aux variations des paramètres physiques dont dépendent  $R_{he}$  et  $G$ , (eq. 13 et 14) qui caractérisent les états de surface, paramètres que l'on cherche précisément à connaître dans les applications. Dans ce cas, les résultats obtenus sont donc corrects.

En présence de relief : Dans l'image  $P$  d'origine ainsi que dans l'image de  $\beta^0$  les effets du relief sont souvent dominants.

Effectuer une calibration de  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$  en supposant la surface horizontale nous conduit à des images reflétant quasiment à l'identique les effets perturbateurs du relief dans la radiométrie (cas 1 et 2 § III.2). En prenant en compte l'incidence locale réelle, (cas 3) la majeure partie des effets radiométriques liés au relief risque de disparaître (c'est le cas pour la forêt).

Le choix à opérer va alors dépendre de l'application. Nous distinguerons deux grands domaines, celui de la géomorphologie où la perception du relief présente souvent un intérêt prioritaire et celui de la cartographie de l'occupation du sol où l'intérêt principal se situe au contraire dans le suivi des variations de  $\sigma^0(i_p)$  et  $\gamma^0(i_p)$ , après correction des effets de pente.

*Pour une application de type géologie-géomorphologie*, les cas 1 ou 2 seront retenus. Dans le cas 1, les compressions dilatations d'images subsisteront, accompagnées des effets radiométriques correspondants. Dans le cas 2, les distorsions géométriques seront corrigées mais les distorsions radiométriques liées aux pentes resteront présentes (ce cas correspond à la figure 7).

*Si l'on s'intéresse avant tout à l'occupation du sol*, le cas 3 s'imposera, avec un traitement en  $\sigma^0$  pour une occupation du sol diversifiée et en  $\gamma^0$  pour un couvert de forêt dense. La figure 8, présente (à gauche) une image adaptée à une interprétation géomorphologique (pas de correction radiométrique) et à droite, l'image précédente traitée selon la procédure exposée cas 3 § III.2 pour un suivi de l'occupation du sol. Aucune parcelle déboisée n'apparaît. L'homogénéité de la forêt a pour conséquence une réponse quasi constante après les corrections radiométriques prenant en compte les pentes.

#### Note sur l'offre logicielle :

Le logiciel SNAP ([step.esa.int/main/toolboxes/snap](http://step.esa.int/main/toolboxes/snap)) permet les calibrations pour  $\beta^0$  et de type sol plat pour  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$ . Pour  $\gamma^0$ , SNAP permet, en plus une calibration prenant en compte l'incidence locale calculée grâce au MNT disponible (il s'agit de la procédure de « *terrain flattening* », Small 2011).

Avec SNAP, les calculs de  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$  sont effectués pour chaque pixel pris isolément. L'opération fournit une image présentant du chatoiement. Dans ce cas, pour comparer les valeurs de  $\sigma^0$  et  $\gamma^0$  aux bases de données usuelles, l'utilisateur doit effectuer des moyennes de valeurs sur les zones homogènes étudiées afin de réduire la variabilité des mesures.

La bibliothèque OTB ([www.orfeo-toolbox.org](http://www.orfeo-toolbox.org)) autorise tous les choix exposés (et beaucoup d'autres), à condition de bien maîtriser son utilisation.

## **IV- Conclusion**

Il est important de connaître les différentes possibilités offertes pour la calibration des images radar afin d'exploiter plus facilement les mesures quantitatives restituées à l'issue des traitements. Cela est d'autant plus nécessaire que l'on souhaite inverser des modèles physiques ou fusionner des informations issues de données multi-capteurs et/ou multi-temporelles, que l'analyse soit menée par traitement numérique ou par photo-interprétation.

Pour exploiter les réponses de cibles ponctuelles, le coefficient  $\beta^0$  sera privilégié, car il est proportionnel à la surface équivalente radar du pixel cible.

Pour certaines applications comme la géomorphologie, une calibration simplifiée pour  $\sigma^0$ , supposant le terrain plat, sera suffisante car elle conservera les effets du relief.

Dans le cas plus général d'études concernant les propriétés bio-géophysiques de la surface du sol, une calibration de  $\sigma^0$  corrigeant les effets du relief permettra de se référer, pour comparaison, aux bases de données existantes, afin de nourrir l'interprétation des images.

Dans le cas particulier des forêts denses, une calibration du coefficient  $\gamma^0$ , corrigeant également des effets du relief, présentera l'intérêt de fournir une valeur variant très peu avec l'incidence et donc susceptible de différencier plusieurs types de forêts homogènes.

## **Références**

- Baghdadi N., Zribi M., 2016, Observation des surfaces continentales par télédétection micro-onde, Techniques et méthodes, IST Editions, vol. 2, 420 p.
- Frison P.-L. and Mougin E., 1996: Monitoring global vegetation dynamics with ERS-I wind scatterometer data. Int. J. Remote Sensing, vol. 17, n° 16, 3201-3218 p.
- Maitre H. (sous la direction de), 2000, Traitement des images de radar à synthèse d'ouverture, Hermès, 352 p.
- Massonnet D., Souyris J.-C., 2008. Imaging with synthetic aperture radar. EFPL Press, 250 p.
- Small D., 2011, Flattening Gamma : Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, NO. 8, august 2011, 3081-3093 p.
- Tupin F., Nicolas J.-M., Inglada J., (sous la direction de), 2014, Imagerie de télédétection, Hermès, 370 p.
- Ulaby F.T., Long D.G., Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing, 984 p. The university of Michigan press, 2014.

## **Sur le web**

- RUS-training*, 2018 (de SAR01 à SAR09)  
<https://rus-training.eu/course/sar-01-introduction-des-images-radar>
- Paquerault, thèse* 1998  
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00005664>
- La Guyane à travers les nuages*, CD Bilingue 2002  
Rudant J.P., Classeau N., Trebossen H.  
[https://earth.esa.int/documents/10174/1861927/French\\_Guyana\\_ERS](https://earth.esa.int/documents/10174/1861927/French_Guyana_ERS)

**Remerciements** : Nous tenons à remercier le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et le Centre National d'Etude Spatiale pour leur soutien dans le cadre de nos travaux touchant à la télédétection radar.