

IMPORTANCE DES CORRECTIONS RADIOMÉTRIQUES DUES AU RELIEF POUR LES DONNÉES SAR DU SATELLITE ERS-1 : APPLICATIONS À L'HYDROLOGIE

**D. TROUFLEAU¹, A. BEAUDOIN¹, A. VIDAL¹, M.S. MORAN², D.C. GOODRICH³,
J. WASHBURN⁴**

RÉSUMÉ

Ce papier présente une méthode d'utilisation des images SAR du satellite ERS-1 pour la détermination de l'humidité de surface du sol (0-5 cm) en zone semi-aride, sur un bassin versant de l'Arizona (Walnut Gulch). Le principal objectif est de démontrer la nécessité de calibrer les données brutes de l'image en tenant compte de l'aire de rétrodiffusion de chaque pixel. Une nouvelle méthode de correction se basant sur une simulation d'aire à partir d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) est ainsi testée et montre que le coefficient de calibration peut alors varier dans une gamme de 8 dB sur le bassin versant. L'analyse des résultats montre qu'il est également possible de tenir compte de la dépendance angulaire du coefficient de rétrodiffusion σ^0 avec l'angle d'incidence local.

La comparaison des rétrodiffusions brutes et calibrées avec des données terrain d'humidité du sol permet de montrer l'amélioration de la relation σ^0 -humidité avec les données calibrées et d'en déduire une relation statistique. Une sensibilité de 0,19 dB/% d'humidité est ainsi déterminée. Malgré la variabilité spatiale d'autres paramètres influant sur le σ^0 , tels que la rugosité du sol et la quantité de végétation, cette relation permet d'établir en supposant ces paramètres stables dans le temps des cartes d'évolution de l'humidité du sol à partir de ratios d'images entre différentes dates.

¹Cemagref-Engref Laboratoire Commun de Télédétection, Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier cedex 5.

²USDA-ARS U.S. Water Conservation Laboratory, 4331 E. Broadway, Phoenix, Az., 85044 USA.

³USDA-ARS Southwest Watershed Research Center, 2000 E. Allen, Tucson, Az., 85719 USA.

⁴Univ. of Arizona, Dept. of Hydrology and Water Resources, Tucson, Az., 85719 USA.

INTRODUCTION

Les régions arides et semi-arides sont généralement soumises à un régime de précipitations très particulier, tant du point de vue spatial que temporel. De récentes expérimentations pluridisciplinaires menées dans ces zones (Hapex-Sahel 92, Monsoon 90) ont permis d'étudier précisément la distribution des pluies dans le temps et dans l'espace. Elles ont notamment montré la difficulté à prédire, mais aussi à mesurer, l'extrême variabilité spatiale des précipitations lors d'un événement pluvieux, et ce à l'échelle de quelques kilomètres seulement (GOUTORBE *et al.*, 1994, KUSTAS *et al.*, 1991). Cette répartition hétérogène des pluies affecte bien entendu fortement le fonctionnement hydrologique de ces zones mais également les échanges de masse et d'énergie à l'interface sol-végétation-atmosphère pour lesquels la disponibilité en eau des surfaces joue un rôle prépondérant (MONTENY *et al.*, 1994).

La télédétection apparaît alors comme un outil intéressant pour accéder à cette variabilité surtout si l'on considère l'apport des micro-ondes actives qui ont montré leur sensibilité à l'humidité de surface du sol dans des zones de faible couvert végétal. À cet égard, le développement récent des radars à synthèse d'ouverture (SAR), embarqués sur des plates-formes spatiales, garantit dès maintenant (ERS-1, JERS-1) ou dans un futur proche (ERS-2, Radarsat) l'acquisition d'images radar dans des configurations multiples (bande, angle d'incidence, polarisation) et complémentaires du point de vue d'une exploitation thématique. Pourtant, l'un des aspects limitants de ces images, en zone de relief est la présence de distorsions radiométriques et géométriques particulièrement sévères résultant essentiellement de la configuration des pentes vis-à-vis de la géométrie de visée du radar. Ainsi, ces distorsions rendent la plupart du temps impossible la comparaison du signal radar entre différents points de l'image et encore moins entre des images acquises dans des configurations distinctes.

L'objectif principal de cette présentation est donc de montrer qu'il est possible d'obtenir des données de rétrodiffusion radar calibrées en terrain accidenté à partir des images SAR ERS-1 et d'un modèle numérique de terrain (MNT). L'algorithme utilisé pour cette calibration a été récemment développé pour le suivi de forêts tempérées en zones de relief (BEAUDOIN *et al.*, 1994) et a produit des résultats prometteurs à cette occasion. Il nous permettra ici de montrer l'importance des corrections radiométriques induites par le relief puis d'introduire les possibilités d'exploitation des données calibrées dans une thématique et un contexte différents : la cartographie de l'humidité superficielle du sol en zone semi-aride.

SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES

LE BASSIN VERSANT DE WALNUT GULCH

Le site d'étude choisi est un bassin versant instrumenté par l'USDA-ARS (US Department of Agriculture, Agricultural Research Service) dans la partie sud-est de l'Arizona près de Tombstone. De nombreuses expérimentations menées sur ce site (Monsoon 90, Walnut Gulch 92) ainsi qu'un suivi hydrologique continu ont fourni un jeu de données important permettant la caractérisation hydrologique, biologique et climatique de ce milieu semi-aride. L'environnement climatique est notamment caractérisé par une saison de « mousson » en juillet et août qui concentre les 2/3 des précipitations annuelles (entre 250 et 500 mm) et où la température de l'air dépasse souvent 45°. La végétation est de type désertique, la strate herbacée étant dominante dans la partie Est et associée à divers buissons et épineux dans la partie Ouest. Le sol de texture sableuse est caractérisé par une capacité au champ relativement faible (entre 20 et 25 % d'humidité volumique) et une quantité variable d'éléments grossiers en surface modifiant sa rugosité (tableau 1).

Tableau 1

Principales caractéristiques de surface (sol et végétation) mesurées en 1990 sur 8 sites de mesure distribués sur le bassin versant de Walnut Gulch

sites	biomasse sèche (g/m ²)	% buisson (biomasse)	débris (g/m ²)	fraction de couvert (%)	fraction de rocs en surface (%)	texture		
						sable (%)	limon (%)	argile (%)
MF1	228,7	99	96,8	28	46	66	24	10
MF2	289,9	72	94,8	51	48	69	20	11
MF3	228	89	32,3	42	45	71	20	9
MF4	224,8	24	48,6	62	59	73	22	5
MF5	102,3	33	57,4	44	54	69	20	11
MF6	458,6	92	57,1	38	52	67	25	8
MF7	140,2	67	155,2	32	10	80	14	6
MF8	1033	99	95,8	40	58	72	20	8

Quant au MNT utilisé, celui-ci a été réalisé par l'USDA d'après les cartes topographiques de l'USGS au 1/10000^e au pas de 40 m et référencé dans le système UTM zone 12. Les altitudes sont globalement croissantes d'Ouest en Est et s'échelonnent entre 1 200 m et 1 900 m.

LES DONNÉES SAR ERS-1

À l'occasion de l'expérimentation Walnut Gulch 92, sept images radar d'ERS-1 ont été acquises durant la saison humide pour deux configurations différentes correspondant à deux traces différentes du satellite en orbite descen-

dante (figure 1). Dans la configuration 1 (jours 135, 170, 240, 275, 310), seule la partie ouest du bassin versant est visible et l'angle d'incidence moyen au niveau du site est de 21,4 degrés. Dans la configuration 2 (jours 116, 291), la totalité du bassin versant est couverte par l'image radar pour un angle moyen de 25,8 degrés. La figure 2 situe la date d'acquisition des images par rapport à l'évolution de l'humidité du sol et l'occurrence des pluies.

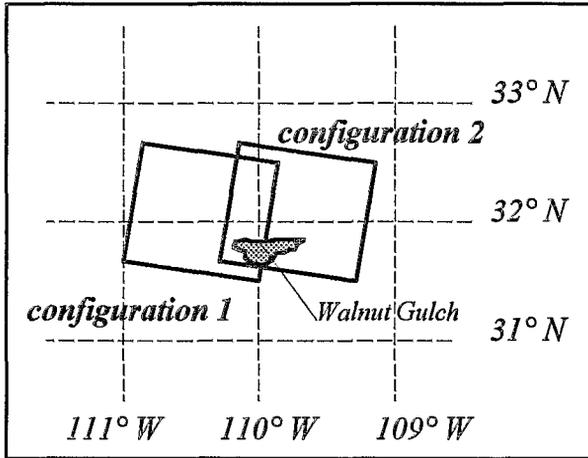


Figure 1 :

Cadres des images ERS-1 utilisées pour l'étude.

Config. 1 = jours 135, 170, 240, 275 et 291

Config. 2 = jours 116 et 310.

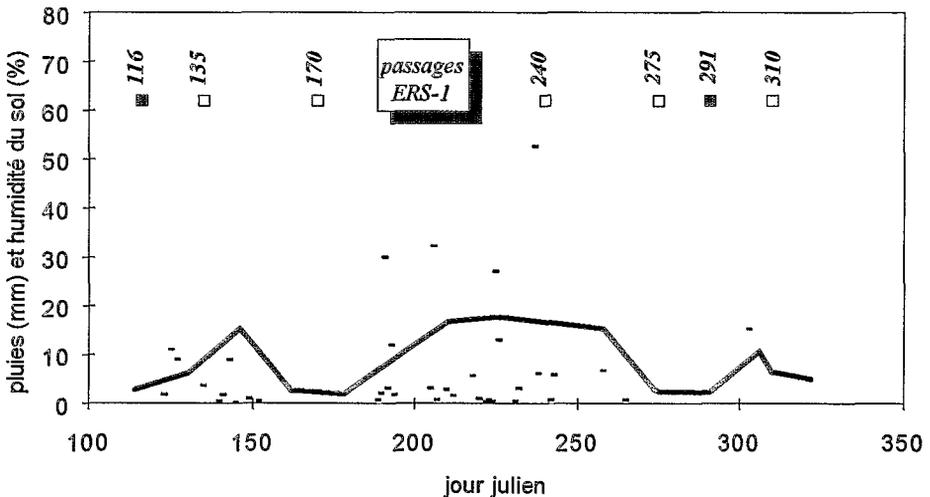


Figure 2 :

Humidité du sol [0-5 cm] (ligne continue) et précipitations (points sur un des sites du bassin versant). L'acquisition des images radar ERS-1 est symbolisée par un carré vide pour la configuration 1 et par un carré plein pour la configuration 2.

Pour chaque configuration, une composition colorée multitemporelle peut être obtenue en superposant les images par simple translation (ligne, colonne) avec un RMS (Root Mean Square) entre les points de contrôle, généralement inférieur à un pixel.

MÉTHODE DE CORRECTION DES IMAGES RADAR

LE SIGNAL RADAR

Les produits SAR PRI (SAR PRrecision Image) fournis par l'ESA sont des images radar codées en amplitude de telle sorte que l'intensité du signal rétrodiffusé se déduit du compte numérique CN de chaque pixel par :

$$I = CN^2 = \bar{I} \cdot S \quad (1)$$

I étant l'intensité du pixel mesurée par le capteur et S un bruit multiplicatif (de moyenne unitaire) résultant des interférences entre les ondes rétrodiffusées par les multiples diffuseurs au sein d'un même pixel et qui peuvent agir de manière constructive ou destructive (speckle). L'équation radar permet alors de faire apparaître que l'intensité du pixel soit proportionnelle au coefficient de rétrodiffusion radar σ^0 et à l'aire de la cible :

$$\bar{I} = K \int \frac{G^2(\theta) \sigma^0(\eta) dA}{R^3} \quad (2)$$

où R est la distance cible-capteur, $G(\theta)$ la variation angulaire du gain d'antenne et dA un élément d'aire à l'intérieur du pixel vu sous un angle par le capteur (d'où un angle d'incidence local équivalent η) possédant un coefficient de rétrodiffusion propre $\sigma^0(\eta)$ (figure 4). Les données PRI de l'ESA étant déjà corrigées depuis le 1er septembre 1992 de R et de $G(\theta)$ et σ^0 pouvant être considéré comme constant à l'intérieur d'un pixel, l'équation (2) se simplifie suivant :

$$\bar{I} = K \sigma^0(\eta) \int dA \quad (3)$$

En terrain plat, l'angle d'incidence (entre la direction d'incidence et le rayon terrestre) est égal à l'angle d'incidence local η (entre la direction d'incidence et la normale au lieu) (figure 4) et l'aire totale de rétrodiffusion peut alors être simplement estimée par :

$$\int dA = A(\alpha) = \frac{\delta_a \delta_r}{\sin \alpha} \quad (4)$$

avec δ_a et δ_r les dimensions azimutales et radiales du pixel (12,5 m pour ERS-1). Ainsi l'ESA fournit-elle une constante de calibration $K_{ESA} = K \cdot A_{ref}$ incluant ce facteur d'aire calculé pour un angle de référence $\alpha_{ref} = 23^\circ$ (i.e. $A_{ref} = 400 \text{ m}^2$). En combinant (3) et (4), l'intensité d'un pixel est alors reliée à σ^0 en n'importe quel point de la scène caractérisé par son angle d'incidence α :

$$\bar{I} = K_{ESA} C_{ESA} \sigma^0(\eta), \quad C_{ESA} = \frac{A(\alpha)}{A_{ref}} = \frac{\sin \alpha_{ref}}{\sin \alpha} \quad (5)$$

En terrain accidenté par contre, l'équation (4) n'est plus valable et l'aire totale de rétrodiffusion varie non seulement avec la position radiale du pixel dans l'image mais également avec la pente locale et la courbure de cette pente. Le facteur de correction C_a est donc cette fois défini tel que :

$$\bar{I} = K_{ESA} C_a \sigma^0(\eta), \quad C_a = \frac{\int dA}{A_{ref}} \quad (6)$$

On peut ainsi en combinant cette équation avec (1) obtenir l'expression finale de σ^0 en dB à partir des comptes numériques de l'image :

$$\sigma^0(\eta) = 10 \log \left(\frac{CN^2}{K_{ESA}} \right) + C_a + S' \quad (dB) \quad (7)$$

avec
$$C_a = -10 \log(C_a) = 10 \log \left(\frac{A_{ref}}{\int dA} \right) \quad (dB) \quad (8)$$

et
$$S' = -10 \log(S) \quad (dB) \quad (9).$$

Relativement peu d'auteurs se sont intéressés à l'estimation de l'aire de rétrodiffusion en zone de relief (JUNG, 1990 ; HOLECZ *et al.*, 1993 ; VAN ZYL *et al.*, 1993). La méthode proposée ici se base sur des simulations d'image d'aire dans l'espace radar (axes radial et azimuthal) à partir d'un modèle numérique de terrain et des paramètres orbitaux d'ERS-1.

SIMULATION DE L'IMAGE D'AIRES

L'algorithme utilisé se base sur le concept « d'intégration de facettes » décrit par BEAUDOIN *et al.* (1994) et auquel on pourra se reporter pour plus de détails. Le principe en est illustré dans les figures 3 et 4 et brièvement décrit ci-dessous :

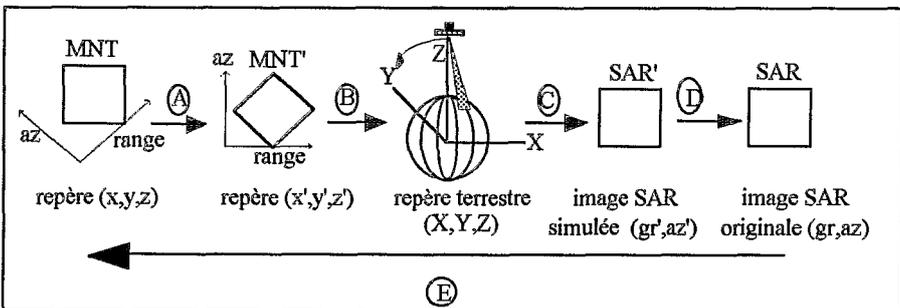


Figure 3 : Les différentes étapes d'une simulation d'image d'aire.

— le MNT dans une projection cartographique donnée (ici UTM zone 12) est tourné et rééchantillonné dans l'espace radar (axe y parallèle à l'axe azimutal i.e. à la trace du satellite et axe x parallèle à l'axe radial (range), grille de 12,5x12,5m) par interpolation bilinéaire ;

— le nouveau MNT est projeté dans un système cartésien d'origine le centre de la terre, ce dernier étant assimilé à une sphère. La figure 4 décrit alors la configuration dans laquelle est calculée la simulation de la surface contribuant au signal rétrodiffusé. Une ligne « azimutale » de l'image radar est située entre deux lignes du MNT et chacun des pixels de cette ligne correspond au signal intégré entre deux « portes » radar consécutives (i.e. sur la durée d'échantillonnage du capteur) interceptant le MNT en X_{min} et X_{max} . Suivant la forme du terrain et la valeur des pentes, le pixel inclut donc un nombre variable de facettes du terrain dans la direction radiale. La pente de chaque facette i peut être décomposée en une composante radiale θ_{ri} et azimutale θ_{ai} données par le MNT alors que l'aire de base de chaque facette est fixe et égale à $\delta_a \delta_r$. La surface élémentaire de chaque facette est alors estimée par :

$$\Delta A_i = \frac{\delta_r}{\cos(\theta_{ri})} \frac{\delta_a}{\cos(\theta_{ai})} \quad (10)$$

et l'angle d'incidence local est défini comme l'angle entre la normale au lieu et la direction d'incidence :

$$\eta_i = \arccos\left(\frac{\vec{n} \cdot \vec{i}}{|\vec{n}| |\vec{i}|}\right) = \arccos\left(\frac{\tan \theta_{ri} \sin \alpha_i + \cos \alpha_i}{\sqrt{\tan^2 \theta_{ri} + \tan^2 \theta_{ai} + 1}}\right) \quad (11)$$

L'intégrale de l'équation (3) est alors approchée par une sommation discrète des N facettes élémentaires ΔA_i incluses dans ce pixel tandis que l'angle d'incidence local est moyenné sur ces mêmes N facettes :

$$A = \sum_{i=1}^N F_i \Delta A_i \quad (12)$$

$$\eta = \sum_{i=1}^N F_i \eta_i \quad (13)$$

où F_i est la fraction de facette réellement incluse dans le pixel. L'angle d'incidence local n'intervient pas dans le calcul du facteur de correction C'_a mais sera utilisé par la suite pour analyser certains résultats, notamment la dépendance angulaire du coefficient de rétrodiffusion $\sigma^o(\eta)$.

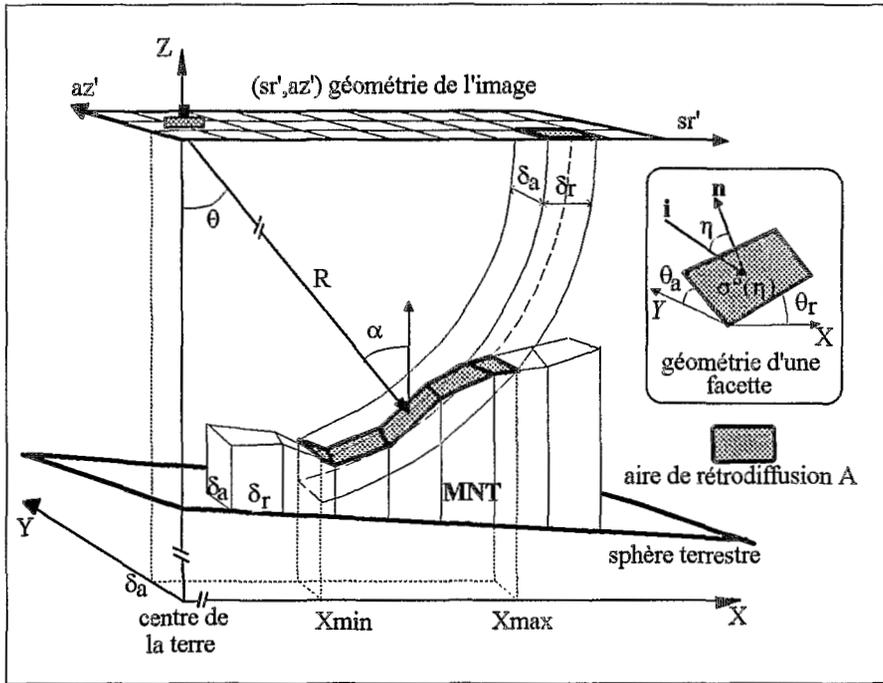


Figure 4 :

Représentation de la méthode d'intégration par facettes à partir d'un modèle numérique de terrain.

— Une pseudo-image radar est ainsi produite pixel par pixel dans l'espace radar (azimut \times radial). La valeur de chaque pixel représentant l'aire totale de rétrodiffusion, cette pseudo-image correspond en fait d'après l'équation (3) à une image radar codée en intensité, sans effet de speckle et sur une surface de σ^0 constant.

— La dernière étape consiste à superposer l'image d'aire obtenue à l'image radar initiale à l'aide de quelques points d'amer par une transformation polynomiale d'ordre un et une interpolation bilinéaire.

CORRECTION RADIOMÉTRIQUE ET GÉOMÉTRIQUE

La correction radiométrique permet d'obtenir des comptes numériques calibrés indépendants de l'aire de rétrodiffusion contribuant au signal radar et dont le carré, aux effets de speckle près, est directement proportionnel à σ^0 (équations (1) et (6)) :

$$CN' = \frac{CN}{\sqrt{C_a}} \quad (14)$$

Enfin, une correction géométrique correspondant à l'étape *E* de la figure 3, peut alors être effectuée afin de géoréférencer chacun des pixels dans le système cartographique de départ (UTM zone 12). Cette étape étant encore en cours d'implémentation, la correction a été effectuée en utilisant le modèle analytique de GUINDON et ADAIR (1992) disponible sur un logiciel commercial. Ce géoréférencement nous sera utile par la suite pour situer certains sites où ont été effectuées les mesures au sol.

RÉSULTATS

CALIBRATION DES IMAGES SAR

La figure 5 présente un extrait de l'image ERS-1 acquise le jour 170 avant et après la calibration résultant de l'équation (14) ainsi que la simulation d'aire issue du MNT. Il apparaît clairement que l'image non calibrée fait avant tout ressortir les distorsions dues au relief, matérialisées sur l'image par les nombreux liserés blancs. Ceux-ci correspondent aux flancs exposés au radar, où la radiométrie est saturée et la géométrie comprimée (d'où l'aspect de liseré) alors que les flancs opposés voient leur radiométrie diminuer et leur géométrie dilater.

L'image d'aire, pseudo-image radar sans speckle sur une zone de σ^0 constant, reproduit parfaitement ces figures et la superposition entre les deux images peut être réalisée avec une RMS de moins de un pixel. L'image calibrée fait alors disparaître ces artefacts et homogénéise les tons de l'image. Le peu de contraste de l'image dans cette zone, ajouté à l'effet de speckle, rend difficile l'interprétation visuelle, mais l'utilisation d'un filtre adaptatif de type Frost permet de faire apparaître certaines zones homogènes.

Les statistiques réalisées sur l'ensemble du bassin versant montrent ainsi que l'aire de rétrodiffusion moyenne peut varier de 160 m² à plus de 4 000 m² avec une valeur moyenne de 440 m² pour la configuration 1 et de 365 m² pour la configuration 2. Le coefficient de calibration C'_a exprimé en dB, qui se déduit de l'aire de rétrodiffusion (équation (8)) est représenté en fonction de l'angle d'incidence local dans la figure 5 sous la forme d'un histogramme bidimensionnel (grisé proportionnel au nombre de points représentés).

Cette figure montre clairement l'erreur qui peut être commise en négligeant la correction d'aire sur le σ^0 . Une gamme de 8 dB au total est observée sur cette zone, le facteur de calibration variant de -4 dB pour les pentes orientées face au radar à +4 dB pour les pentes opposées, en passant par 0 lorsque η s'approche de 23° (terrain plat). La courbe d'ajustement au nuage de points est très proche d'une courbe $10\log[\sin(\eta)/\sin(23)]$ qui serait la généralisation du facteur de correction donné par l'ESA en terrain plat (équation (5)) et où α serait remplacé par η . Néanmoins, la dispersion des points autour de cette valeur moyenne (gamme de 3 dB à 20°) illustre le fait que des variables autres que η interviennent dans le coefficient C'_a , ne serait-ce que par l'effet de la courbure du terrain sur l'aire de rétrodiffusion qui ne peut être pris en compte par un η moyen.

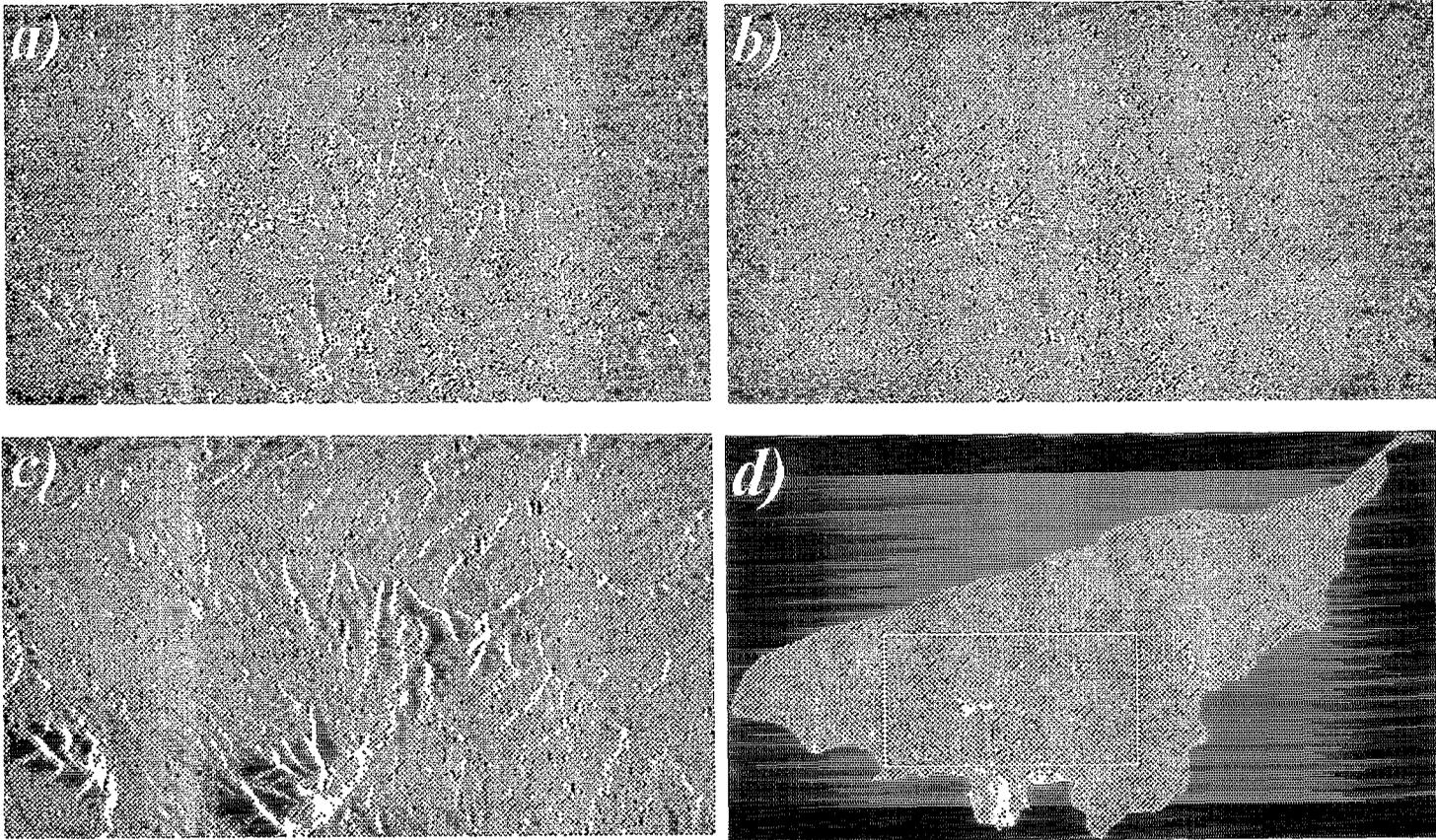


Figure 5 :

Extrait d'une image ERS-1 (jour 170) 700 x 400 pixels dans la géométrie radar initiale (azimutal,radial) avec illumination de la droite (orbite descendante). a) image brute, b) image calibrée, c) image d'aire issue du MNT. d) représente la totalité du bassin versant obtenue sur l'image du jour 116 après calibration et filtre de Frost (fenêtre 9 x 9) ; le cadre délimite la zone extraite dans les images a, b, c. La ville de Tombstone, Az. est repérable au centre du cadre en blanc.

DÉPENDANCE ANGULAIRE DU σ^0

Le calcul simultané d'une image d'angle d'incidence local nous permet d'étudier le comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion après calibration. Sur la figure 5 on peut en effet constater que le passage de l'image brute à l'image corrigée ne s'accompagne pas partout d'une disparition complète des effets du relief, notamment dans le cas des flancs exposés au radar qui conservent une radiométrie légèrement plus forte que leur environnement immédiat. Ces zones, où la correction d'aire est la plus forte (≈ -4 dB), correspondent à un angle d'incidence particulièrement faible ($\approx 10^\circ$), ce qui semble confirmer la théorie et les résultats expérimentaux ayant démontré la tendance générale de σ^0 à décroître avec η (ULABY *et al.*, 1986). La forme des courbes dépend de nombreux paramètres et, à configuration radar constante, l'humidité et la rugosité de surface du sol ainsi que la quantité de végétation sont les paramètres essentiels de ces relations.

Ne disposant pas de suffisamment de données terrain pour maîtriser la variabilité de ces trois paramètres, une zone « visuellement » homogène d'environ 100 000 pixels a été sélectionnée sur une image radar pour extraire l'histogramme bidimensionnel de $\sigma^0(\eta)$ (figure 7). Malgré une dispersion assez forte des points, celui-ci illustre parfaitement le comportement attendu de σ^0 en fonction de η . Deux familles de courbes semblent ainsi se dessiner correspondant vraisemblablement à des conditions de surface différentes. Des données terrain complémentaires pourront nous permettre par la suite de mieux quantifier sur ce type de milieu les effets d'angle d'incidence local et d'ajouter une étape supplémentaire de correction aux données ERS-1 tenant compte de la relation $\sigma^0(\eta)$.

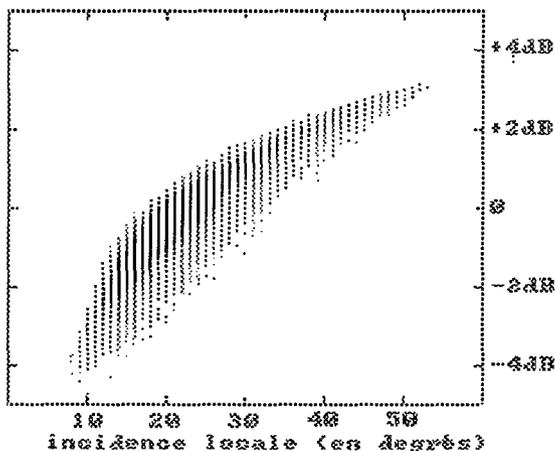


Figure 6 :

Histogramme bidimensionnel du facteur de correction C'_a (dB) en fonction de l'angle d'incidence local η pour la configuration 1.

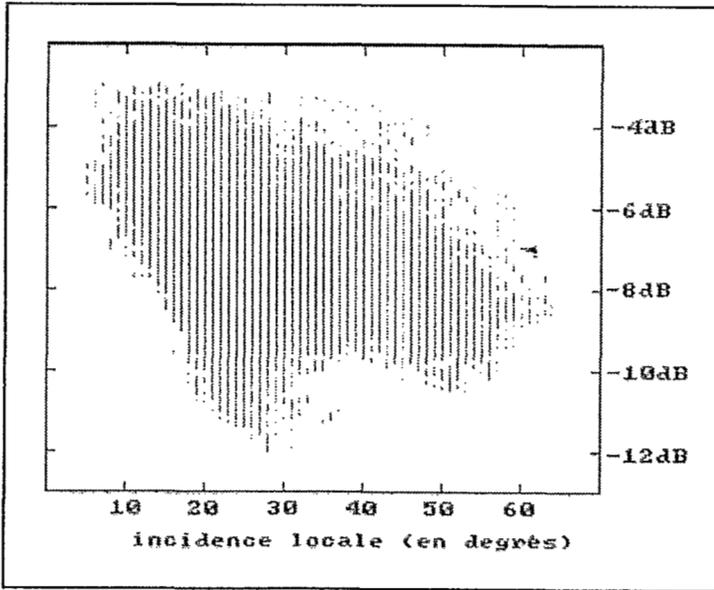


Figure 7 :

Histogramme bidimensionnel de σ^0 (η) en fonction de l'angle d'incidence local sur une zone extraite de l'image calibrée (jour 116, configuration 2) après un filtre de Frost 9×9 .

ASPECTS HYDROLOGIQUES

Des prélèvements gravimétriques d'humidité du sol ont été effectués sur certains des sites, mentionnés au paragraphe : le bassin versant de Walnut Gulch, à l'occasion de quelques passages du satellite. Ces sites ont pu être repérés sur les images géoréférencées et le coefficient de rétrodiffusion calibré a été extrait sur chacun d'eux en moyennant le carré des comptes numériques sur une cible d'une centaine de pixels pour diminuer l'incertitude sur la détermination de σ^0 due au speckle. Les résultats sont reportés sur la figure 8.

La comparaison des deux graphiques de cette figure permet de mettre en évidence une diminution de la dispersion des points après calibration. La dispersion résiduelle résulte vraisemblablement de la non correction d'angle d'incidence local (paragraphe : aspects hydrologiques) mais surtout des variations de paramètres de surface auxquels le σ^0 est également sensible. La biomasse étant très faible sur l'ensemble du bassin versant (tableau 1), c'est essentiellement la rugosité du sol qui est susceptible de modifier la sensibilité du signal radar à

l'humidité du sol. En attendant de pouvoir quantifier plus précisément ces effets, une relation statistique peut être établie (figure 8) donnant une sensibilité de 0,19 dB/%. Il est alors possible de produire des ratios d'images entre deux dates et de relier l'évolution de σ^0 en dB à une variation d'humidité du sol. À ce stade de l'étude, une telle carte a été produite entre les dates 170 (conditions sèches) et 240 (conditions humides) et l'évolution du signal entre ces deux dates varie de +1 dB à +5 dB (soit une variation d'environ 20 % d'humidité), suivant des zones bien délimitées. La suite de l'étude permettra alors de déterminer si ces zones

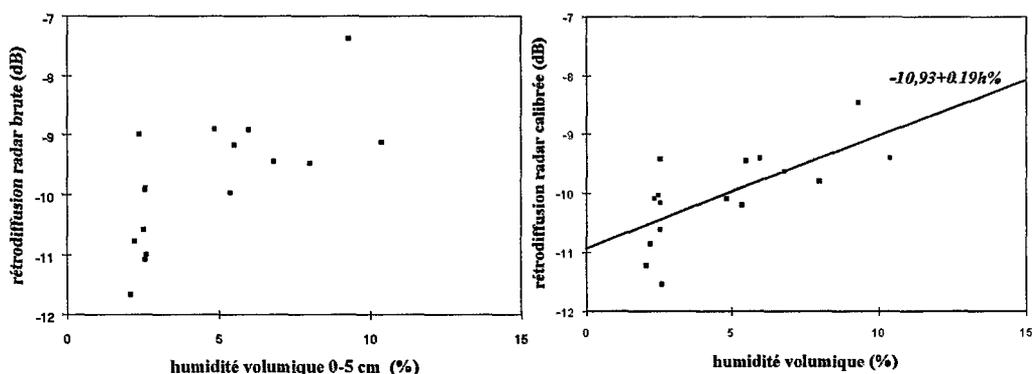


Figure 8 :

σ^0 en fonction de l'humidité volumique de surface 0-5 cm, d'après les prélèvements gravimétriques effectués sur les sites 1 à 8 et les images des jours 135, 240, 275, 310 (configuration 1) et 291 (configuration 2).

peuvent être reliées à la distribution des pluies intervenues entre les deux dates ainsi qu'aux caractéristiques hydrologiques de surface (capacité de rétention du sol, drainage, ruissellement).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a avant tout démontré la nécessité d'inclure une procédure de calibration rectifiant les effets de variation d'aire de rétrodiffusion pour les données radar acquises en zone de relief. La gamme de 8 dB du facteur de correction obtenue sur Walnut Gulch est en effet de l'ordre de grandeur de la variabilité initiale du signal radar sur une image. Cette méthode de calibration permet ainsi d'obtenir des images corrigées du relief quelle que soit la géométrie de visée du capteur et d'exploiter alors pleinement des données multi-temporelles (traces différentes, orbites descendantes ou ascendantes) et multi-sources (SAR aéroportés ou sur d'autres plates-formes satellitaires). Néanmoins, l'algorithme

utilisé nécessite une comparaison avec les méthodes de calibration existantes (bien que peu nombreuses : méthode du plan tangent, VAN ZYL *et al.*, 1993) pour démontrer pleinement les avantages apportés par cette méthode. Une correction de l'évolution de σ en fonction de l'angle d'incidence local semble également nécessaire pour compléter la procédure de correction.

L'utilisation des données calibrées dans un cadre hydrologique a alors montré qu'il était possible de relier le σ à l'humidité superficielle du sol en zone semi-aride par une relation statistique simple révélant ici une sensibilité de 0,19 dB/% d'humidité. Les cartes d'évolution de l'humidité du sol obtenues par ratio d'images devront être validées à partir d'autres données terrain (répartition des pluies) afin de tester la réelle influence d'autres paramètres de surface tels que la rugosité du sol et la quantité de végétation.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce aux images SAR ERS-1 fournies par Guy Duchossois de l'Agence Spatiale Européenne. Il rentre également dans le cadre de financements du Nasa Interdisciplinary Research Program in Earth Sciences (Nasa Ref. Num. IDP-88-086), Nasa Eos Program (Nasa Ref. Num. NAG-W2425) et NSF (BSC-8920851). Enfin, les auteurs tiennent à remercier Sylvain Labbe (LCT) pour sa précieuse collaboration à l'élaboration du poster.

BIBLIOGRAPHIE

- BEAUDOIN A., PIET L., STUSSI N., DESHAYES M., 1994. Use of multi-temporal ERS-1 SAR data for the monitoring of temperate forests on hilly terrain. *Proc. Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Nordwijk, Holland, 11-15 Jul 1994, in press.
- GOUTORBE J.P., LEBEL T., TINGA A., BESSEMOULIN P., BROUWER J., DOLMAN A.J., ENGMAN E.T., GASH J.H.C, HOEPFFNER M., KABAT P., KERR Y.H., MONTENY B., PRINCE S., SAID F., SELLERS P., WALLACE J.S., 1994. Hapex-Sahel : a large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Annales Geophysicae*, 12 : 53-64.
- GUINDON B., ADAIR M., 1992. Analytic formulation of spaceborne SAR image geocoding and « value-added » product generation procedures using digital elevation data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, jan 92, 18(1) : 2-12.
- HOLECZ F., MEIER E., NÜESH D., 1993. Post-processing of relief induced radiometric distorted spaceborne SAR imagery, in *SAR Geocoding : data and systems*, Chap. 14, Gunter Shreier Éd., 298-352.
- JUNG C., 1990. Étude et correction de l'influence du relief sur la radiométrie d'une image radar à ouverture synthétique par simulation de la réponse radar à partir d'un modèle numérique de terrain. *Thèse de doctorat de l'université de Paris VII*, Paris, juin 1990, 164 p.
- KUSTAS W.P. et al., 1991. An interdisciplinary field study of the energy and water fluxes in the atmosphere-biosphere system over semi-arid rangelands : description and some preliminary results. *Bulletin American Meteorological Society*, nov. 91, 72(11) : 1683-1705.
- MONTENY B., LHOMME J.P., CHEBOUNI G., AMADOU M., TROUFLEAU D., BRUNEL J.P., BESSEMOULIN P., SICOT M., GALLE S., LOYD C., SAID F., 1994. Les interactions surface continentale-atmosphère en milieu sahélien. Passage de l'échelle stationnelle à l'échelle régionale. *Journées Hydrologiques de l'Orstom*, 13-14 sept. 1994.

- ULABY F.T., MOORE K., FUNG A.K., 1986. Microwave remote sensing. *Artech House, Nordwood, MA.*
- VAN ZYL J.J., CHAPMAN B.D., DUBOIS P., SHI J., 1993. The effect of topography on SAR calibration. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, sept. 93, 31(5) : 1036-1043.