

Simulation à l'aide d'un modèle numérique de terrain des échos de sol détectés par un radar météorologique

Christian ROUX (1), Thierry LEBEL (1), Christian DEPRAETERE (1) et Hervé ANDRIEU (2)

RÉSUMÉ

La possibilité de simuler des cartes d'écho de sol, qui font obstacle à la mesure de la pluie par un radar météorologique, est étudiée en s'appuyant sur l'information topographique fournie par un modèle numérique de terrain. Une carte de visibilité du relief par le faisceau radar pour un site de tir donné est tout d'abord calculée. Cette carte est ensuite convertie en une carte d'indice d'écho, par le biais d'une intégration simplifiée de l'équation fournissant la puissance rétrodiffusée du signal en fonction des caractéristiques de l'antenne émettrice d'une part et de la cible rétrodiffusante d'autre part. La validité des cartes obtenues est analysée à travers une étude de cas ayant pour cadre la campagne de qualification d'un radar hydrométéorologique menée conjointement par le Laboratoire Associé de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand et l'Institut de Mécanique de Grenoble sur la région des Cévennes (sud-est de la France).

MOTS-CLÉS: Radar — Modèle numérique de terrain — Echos de sol.

ABSTRACT

SIMULATION WITH A DIGITAL ELEVATION MODEL OF GROUND CLUTTER OBSERVED BY A METEOROLOGICAL RADAR SYSTEM

A method based on the topographic information given by a digital elevation model is proposed to simulate the ground clutter observed by a meteorological radar system. The first step is the computation of the interception map of the relief by the radar beam. This map is subsequently transformed into a map of echo index using a simplified integration of the equation linking the backscattered power with the characteristics of the antenna and the target. The accuracy of the simulated maps is analysed, using the data of the Cevennes Experiment carried out in South-eastern France by the Laboratoire Associé de Météorologie Physique and the Institut de Mécanique de Grenoble.

KEY WORDS: Radar — Digital elevation model — Ground clutter.

1. LE RELIEF: UN OBSTACLE A LA MESURE DES PRÉCIPITATIONS PAR RADAR

Du fait de sa grande couverture et de sa bonne résolution spatiales le radar météorologique connaît un développement croissant pour la mesure pluviométrique. Cette mesure s'appuie sur la propriété des hydrométéores à réfléchir les ondes électromagnétiques de longueur d'onde appropriée (le plus couramment entre 3 et 10 cm). Si l'on met de côté les difficultés liées d'une part à l'électronique du système et d'autre part à la calibration de la puissance rétrodiffusée (c'est-à-dire sa transformation en intensité de pluie), un des principaux obstacles à la mise en œuvre de cette mesure est la présence de reliefs susceptibles d'intercepter une partie du signal incident.

Lorsque l'interception se produit aux distances auxquelles on mesure les précipitations (5 à 200 km), cela se traduit par des zones d'écho indésirables sur l'écran de visualisation du signal rétrodiffusé: on parle d'échos de sol. Ces échos de sol ont de plus pour effet de créer des zones d'ombre au sein desquelles d'éventuelles précipitations ne peuvent être détectées (fig. 1).

(1) ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex.

(2) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, BP 19, 44340 Bouguenais (Détaché à l'Institut de Mécanique de Grenoble pendant l'expérience Radar-Cévennes).

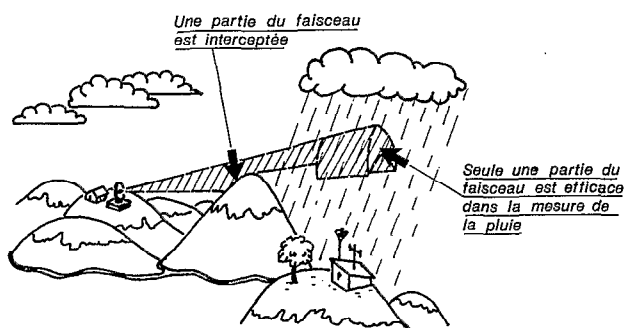


FIG. 1. — Echos de sol et effets de masque.

L'intérêt du radar météorologique est particulièrement marqué dans les zones d'accès difficile, notamment en régions montagneuses où une estimation précise en temps réelle des précipitations spatiales est un facteur déterminant pour la prévision des crues. On comprend donc l'intérêt d'évaluer les sites les plus favorables à l'implantation d'un radar dans de telles régions, c'est-à-dire ceux pour lesquels les échos de sol parasitent le moins les échos de précipitation.

Une telle évaluation passe par deux étapes:

- déterminer les obstacles «vus» par le faisceau radar, qui composeront la carte d'intervisibilité et permettront de délimiter les zones masquées;
- quantifier la puissance rétrodiffusée par ces obstacles, pour établir si elle est du même ordre de grandeur que celle résultant de précipitations.

Ce qui pourrait n'être qu'un problème géométrique simple est en réalité compliqué par l'inégale répartition de l'énergie au sein du faisceau incident. Ce faisceau est obtenu par focalisation d'un rayonnement électromagnétique isotrope à l'aide d'une antenne parabolique. Le faisceau ainsi obtenu est caractérisé par le diagramme de rayonnement d'antenne (fig. 2) sur lequel on distingue: 1. le faisceau principal, centré autour de l'axe de l'antenne et dont la partie utile est définie comme la zone pour laquelle l'énergie est supérieure à la moitié de la valeur maximale située sur l'axe. On parle «d'ouverture à 3 db», car le rapport des flux de puissance rayonnée (le gain) est mesuré en décibels, un gain de - 3 db étant équivalent à un rapport de flux de puissance de 1/2; 2) les lobes secondaires qui sont des pics locaux d'énergie rayonnée mais au sein desquels le gain est malgré tout faible (- 30 db au maximum, soit 1/1 000 de la densité de puissance rayonnée sur l'antenne). Néanmoins ce sont ces lobes secondaires qui compliquent la détermination des zones d'écho de sol significatives, car comme le montre le diagramme de la figure 2 ils peuvent intercepter des obstacles situés à plusieurs kilomètres, bien en dessous de la limite inférieure du faisceau utile. Si ces obstacles remplissent totalement les lobes secondaires, la puissance qu'ils rétrodiffusent peut être comparable à celle rétrodiffusée par des nuages précipitants.

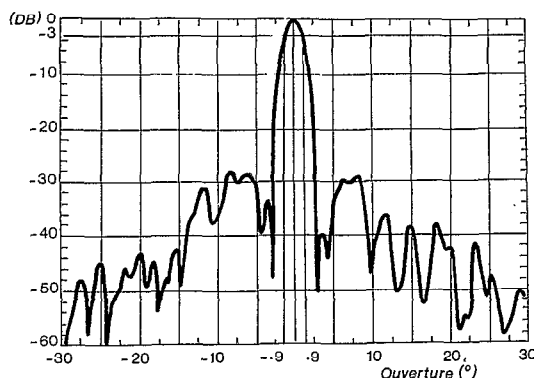


FIG. 2. — Diagramme de rayonnement (ondes de polarisation horizontales) de l'antenne du radar Anatol utilisé pour l'expérience radar-Cévennes.

C'est pour fournir un outil d'évaluation a priori des zones masquées du faisceau principal d'une part (intervisibilité) et des zones d'échos du sol susceptibles d'être confondus avec des échos de précipitation d'autre part que nous propo-

sons ici d'employer un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Le MNT permet en effet de simuler l'emplacement de ces zones pour une situation et un angle de site donnés du radar. Cette démarche a déjà été employée lors de l'expérience du «North West Weather Radar Project» (1985) en Grande-Bretagne. Sur 12 sites présélectionnés sur la carte, 3 ont été retenus à la suite de tests sur MNT avant d'être examinés sur le terrain (CROWTHER et RYDER, 1985).

2. GÉNÉRALITÉS SUR LES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN

Les MNT sont des fichiers de données comportant le champ des altitudes d'une région déterminée mesurées ou interpolées aux nœuds d'une grille régulière. L'information topographique ainsi consignée se prête aisément à un traitement informatique.

Ces MNT peuvent être obtenus à partir de couples de photographies aériennes ou de vues satellitaires mais la méthode la plus répandue repose sur l'exploitation de courbes de niveaux numérisées.

On peut extraire de ces fichiers les altitudes moyennes, les orientations, les pentes et les courbures correspondant à chaque maille du modèle. Dans le logiciel Lamont (DEPRAETERE, 1989) qui a été utilisé ici, l'altitude moyenne sur un pixel est calculée par la moyenne arithmétique des altitudes des quatre nœuds qui le délimitent. Les pentes, les orientations et les courbures sont calculées à partir de l'exploration d'une fenêtre 3×3 centrée sur la maille concernée.

3. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

3.1. CALCUL DE LA CARTE D'INTERVISIBILITÉ

L'intervisibilité peut être traitée soit en travaillant sur les nœuds du MNT, soit sur les pixels. Des essais comparatifs ont montré l'équivalence des deux procédés dès que le pas du MNT est assez fin. A chaque pixel de coordonnées (i,j) dans la grille associée au MNT correspond un angle de vue depuis le radar dont la tangente s'écrit:

$$\text{Angle } (i,j) = \frac{\text{Altitude du pixel} - \text{Altitude du radar}}{\underbrace{((i - i_0)^2 + (j - j_0)^2)^{1/2}}_{\text{distance radar-pixel}}}$$

(i_0, j_0) : coordonnées du radar dans le MNT.

La recherche des points visibles s'effectue en examinant successivement les quatre quadrants constituant le MNT et dont les sommets sont représentés par le radar (fig. 3). Dans chaque quadrant, l'exploration se fait ligne à ligne ou colonne à colonne suivant l'orientation de sa bissectrice, le point de départ se situant au niveau du radar.

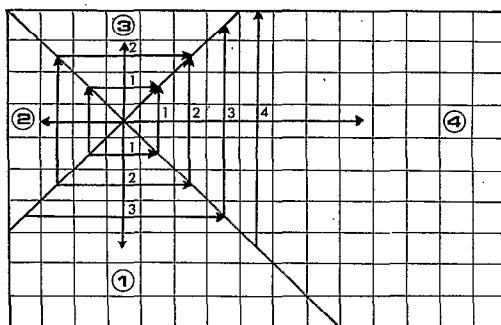


FIG. 3. — Mode de scrutation du MNT.

Un premier test détermine si le pixel se situe à l'intérieur du faisceau radar; si cela est le cas, un second test précise si ce pixel est effectivement vu depuis le radar c'est-à-dire s'il n'est pas masqué par un autre pixel qui se

situerait entre le radar et lui, comme cela est illustré sur la figure 4. Lorsqu'un pixel est masqué, on le marque et on lui attribue artificiellement un angle de visibilité qui est celui du pixel qui le masque, ce qui évite d'avoir à réexplorer l'ensemble de la trajectoire pour chaque nouveau pixel testé.

Lors de cette première étape, une carte de points d'intersection entre la topographie et le faisceau radar est réalisée; une couleur différente est affectée aux pixels du MNT suivant la partie du faisceau qui les rencontre: faisceau utile à 3 dB, bordure du faisceau principal jusqu'à 10 db, lobes secondaires.

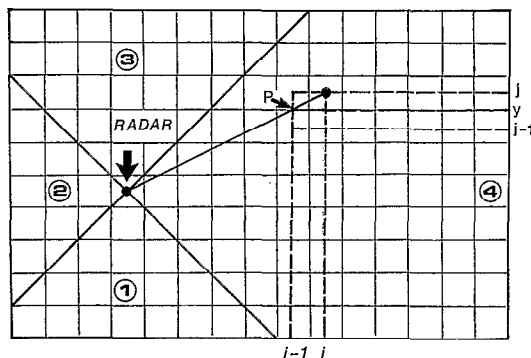


FIG. 4. — Test de la visibilité d'un pixel (i, j). Le centre du pixel est visible si son angle de visibilité est supérieur à celui du point P. L'angle de visibilité de celui-ci est estimé par interpolation linéaire entre les angles de visibilité des points (i-1, j) et (i-1, j-1).

3.2. CALCUL DE L'ÉNERGIE RÉTRODIFFUSÉE PAR LE RELIEF

Une fois détectés les pixels du MNT vus par les différentes composantes du faisceau radar (pixels «échos de sol»), on superpose la grille du MNT sur la grille polaire radar (fig. 5).

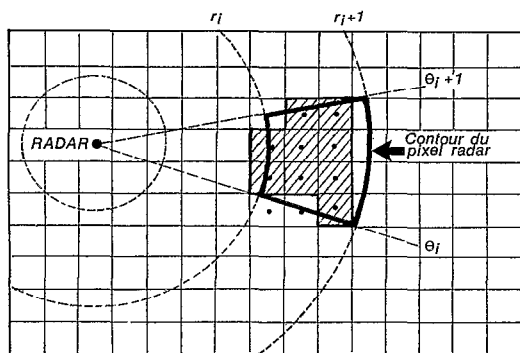


FIG. 5. — Superposition de la grille polaire radar et de la grille MNT. On considère qu'un pixel MNT appartient au pixel radar quand son centre se situe à l'intérieur du pixel radar.

On peut alors évaluer grossièrement l'énergie rétrodiffusée par le relief au niveau de chaque pixel radar, grâce à une prise en compte simple des principaux facteurs jouant sur la rétrodiffusion, c'est-à-dire en se limitant aux facteurs géométriques et à la répartition de l'énergie dans le faisceau.

Considérons l'équation de base du radar: l'énergie rétrodiffusée par une cible radar ponctuelle, P_r , s'exprime par (SAUVAGEOT, 1982):

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_0^2 \cdot f^4(\Theta, \Phi) \cdot \lambda^2 \cdot L_r}{(4\pi)^3} \cdot L^2(r) \cdot \frac{\sigma}{r^4} \quad (1)$$

- P_t : puissance d'émission du radar en kW;
 G_0 : gain de l'antenne;
 $f^2(\Theta, \Phi)$: fonction d'antenne;
 Θ, Φ : coordonnées polaires dans un repère sphérique centré au foyer de l'antenne;
 λ : longueur d'onde en cm;
 L_r : facteur de perte dû à la largeur finie de la bande du récepteur;
 $L^2(r)$: facteur d'atténuation du signal avec la distance;
 σ : section efficace de rétrodiffusion de la cible en cm^2 ;
 r : distance de la cible par rapport au radar.

Si on exprime r en km, P_r est obtenu en 10^{-17} w, ce qui donne une idée du rapport puissance émise/puissance reçue.

On peut faire à ce stade quelques hypothèses simplificatrices.

On suppose tout d'abord que l'atténuation est négligeable: $L^2(r) = 1$. On considère d'autre part que l'aptitude du sol à rétrodiffuser l'énergie incidente est constante. Cette hypothèse est très forte mais en pratique il est difficile de prendre en compte les variations provoquées par les particularités de l'obstacle: nature du sol, couvert végétal, état d'humidité... Ainsi, pour une cible élémentaire de surface S , et de section efficace de rétrodiffusion σ , seules seront prises en compte son orientation par rapport au radar et sa position dans le faisceau de celui-ci.

Par conséquent:

$$\sigma = C_S \cdot \delta S$$

C_S : constante caractéristique du sol;

δS : projection de la surface de la cible sur le plan, perpendiculaire à la droite radar-cible.

L'équation (1) devient donc:

$$P_r = C_r C_s \cdot \frac{f^4(\Theta, \Phi)}{r^4} \cdot \delta S \quad (2)$$

avec:

$$C_r = \frac{P_t \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot L_r \cdot L^2(r)}{(4\pi)^3}$$

Pour des raisons de commodité, chaque maille du MNT est considérée comme une cible élémentaire. Connaissant l'ouverture du faisceau et la résolution radiale du radar, il reste à sommer les signaux rétrodiffusés élémentaires sur tout le pixel radar:

$$P_r = C_r C_s \cdot \sum_{ir=1}^n \frac{f^4(\Theta_{ir})}{r_{ir}^4} \cdot \delta S_{ir} \quad (3)$$

ir : pixels MNT appartenant au pixel radar et vus par le faisceau.

La fonction d'antenne $f^2(\Theta, \Phi)$ est considérée comme symétrique: on peut dès lors la noter $f^2(\Theta)$ et la modéliser par interpolation linéaire à partir d'un certain nombre de points remarquables du diagramme d'antenne dans le plan horizontal (fig. 2).

Pour une facette donnée du MNT on montre que:

$$\delta S = m^2 * \cos \alpha * \cos \beta / \cos p$$

avec:

m : côté d'une maille;

α : angle que fait dans le plan vertical la projection de la droite radar-pixel avec la normale au pixel;

β : angle que fait dans le plan horizontal la projection de la droite radar-pixel avec la normale au pixel;

p : pente du pixel.

3.3. CALCUL DES INDICES D'ÉCHO

Comme on l'a rappelé en introduction, les échos de sol peuvent être confondus avec des précipitations sur un écran de visualisation radar. Les chaînes de traitement du signal radar qui fournissent ces images et permettent également de les archiver sous forme numérique, commencent par transformer la puissance rétrodiffusée en une mesure qui intègre les caractéristiques du radar selon la relation suivante:

$$Z = (r^2 \cdot P_r) / (C_z \cdot K^2) \quad (4)$$

avec :

$$C_z = \frac{P_t \cdot G_0^2 \cdot L_r \cdot \tau \cdot \Theta_0^2}{\lambda^2} \frac{C \cdot \pi^3}{1\,024 \text{ Ln } 2}$$

K^2 : facteur diélectrique de l'eau,

C : vitesse de la lumière,

τ : durée d'impulsion.

Z est obtenu en m^6/m^3 pour des unités de longueur en mètre et P_r et P_t exprimés dans la même unité. La chaîne de numérisation fournit une valeur de Z intégrée sur un pixel radar.

En injectant dans (4) P_r exprimé par (3), on obtient une valeur simulée Z^* , que l'on appellera Indice d'Echo (IE):

$$Z^* = \frac{r^2}{K_2} \cdot \frac{C_r}{C_z} \cdot C_s \cdot \sum_{ir=1}^n \frac{f^4(\Theta_{ir})}{r_{ir}^4} \cdot \delta S_{ir}$$

soit :

$$Z^* = 3,85 \cdot 10^{-11} \cdot \sigma_0 \frac{r^2}{K^2} \cdot \frac{\lambda^4}{\tau \cdot \Theta_0^2} \cdot F(f,r,n) \quad (5)$$

avec :

$$F(f,r,n) = \sum_{ir=1}^n \frac{f^4(\Theta_{ir})}{r_{ir}^4} \cdot \delta S_{ir}$$

$F(f,r,n)$ est une fonction de la position de chaque pixel dans le faisceau, du diagramme d'antenne (f), de la distance du centre du pixel radar au radar (r) et du nombre de pixels MNT (n) lui appartenant.

On peut alors comparer Z^* facteur de réflectivité simulé associé aux échos de sol, avec Z facteur de réflectivité mesuré en effectuant par exemple des tours d'antenne radar par ciel clair, moyennant le calage de σ_0 , section efficace de rétrodiffusion (la quantité $10 \log \sigma_0$ est généralement de l'ordre de -20 db en zone de montagne).

4. SIMULATION DES ÉCHOS DE SOL DU RADAR DE L'EXPÉRIENCE RADAR-CÉVENNES

4.1. MATÉRIEL UTILISÉ

Les simulations ont été réalisées à partir d'un MNT au pas de 100 m couvrant la zone des Gardons. Le MNT a été numérisé sur la base d'une carte en courbes de niveaux avec une équidistance de 40 m (la vue perspective résultant de cette numérisation est donnée à la figure 6). Le radar Anatol du Laboratoire Associé de Météorologie Physique était situé pour la durée de l'expérience sur le causse de l'Hospitalet (fig. 6).

En prenant $K^2 \approx .93$, et pour les caractéristiques du radar Anatol ($\lambda = 10 \text{ cm}$; $\tau = 0,5 \mu\text{s}$; $\Theta_0^2 = 1,8^\circ$), les indices d'écho sont déduits des puissances rétrodiffusées simulées par la relation suivante:

$$\text{soit :} \quad Z^* = 8,38 \cdot 10^{12} \cdot \sigma_0 \cdot r^2 \cdot F(f,r,n) \quad (Z^* \text{ en } \text{mm}^6/\text{m}^3)$$

ou, en dbZ, pour une valeur de référence $Z_0 = 1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$:

$$Z^* (\text{dbZ}) = 10 \log (8,38 \cdot 10^{12}) + 10 \log (\sigma_0) + 20 \log (r) + 10 \log (F(f,r,n)) \quad (6)$$

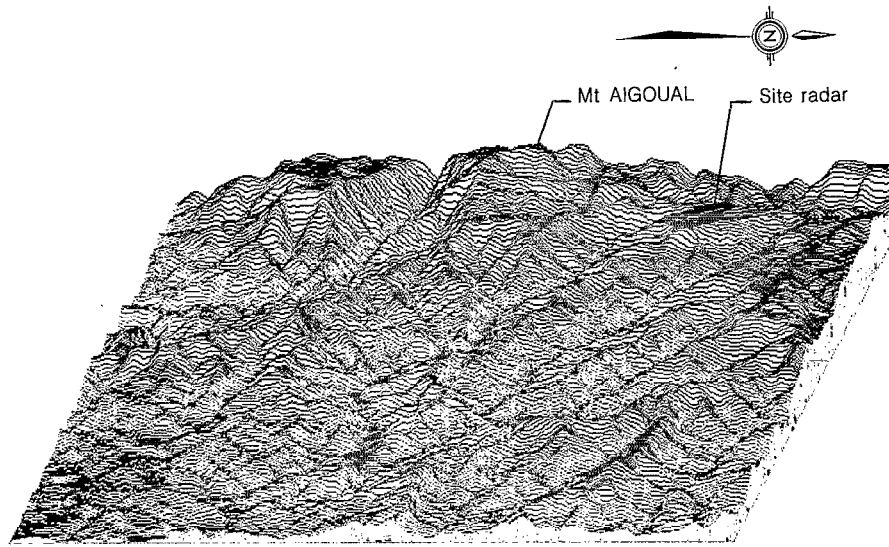


FIG. 6. — Vue en perspective isométrique de la zone couverte par le MNT des Gardons.

Pour $10 \log \sigma_0 = -20$, on obtient:

$$Z^* \text{ (dbZ)} = 109 + 10 \log (F(f,r,n) \cdot r^2) \quad (7)$$

Pour des obstacles situés dans le faisceau principal ($f \approx 1$), si on considère en première approximation que les distances r_{ir} des pixels MNT au radar sont peu différentes de r et que les surfaces sont voisines de la surface du pixel MNT (10^4 m^2), la quantité $[F(f,r,n).r^2]$ se réduit à:

$$F(f,r,n).r^2 \approx 10^4 \sum_{ir=1}^n \frac{1}{r^2}$$

Donc dans l'expression (7), Z^* varie linéairement avec $\log (1/r)$, puisque la surface du pixel radar sur lequel est intégré F (et donc n , nombre de pixels MNT composant ce pixel radar) varie linéairement avec r . La relation est bien entendu moins simple dès lors que d'une part les n pixels MNT ne sont pas nécessairement tous vus par le faisceau et que d'autre part, si ils ne se situent pas dans sa partie principale, la pondération par la fonction d'antenne joue un grand rôle.

Les cartes d'indices d'écho, calculés en utilisant la formule non simplifiée (6), ont été comparées à des images radar obtenues en effectuant des tours d'antenne par temps clair et pour des sites de tir de 1, 2, 3, 4 et 5°. Sur les figures 7a et 7b ont fait figurer à gauche les cartes en isolignes tracées à partir des valeurs mesurées de Z , et à droite les cartes en mode raster obtenues par simulation.

Les cartes d'indice d'écho ont été représentées sur la base d'une échelle à 3 niveaux (gris clair: $IE < 47 \text{ dB}$; gris foncé: $47 < IE < 63 \text{ dB}$; noir: $IE > 63 \text{ dB}$), et les cartes d'échos fixes mesurés, avec 6 niveaux d'isolignes: 39, 47, 55, 63, 71, 79.

4.2. DISCUSSION DES RÉSULTATS

La comparaison des cartes d'indice d'écho (simulation) avec celles d'échos de sol (radar) montre que dans l'ensemble la simulation des zones d'écho et de leur intensité relative est correcte, malgré des discordances locales à étudier plus en détail. Pour ce faire on a repéré sur la figure 7, les principales zones d'échos par un numéro.

Faisceau principal

Considérons les défauts affectant les échos d'intensité importante sur les images à 1° et 2°: il s'agit des zones d'écho 1, 2 et 3 générées par le faisceau principal. Les différences observées sont dues à une approximation médiocre

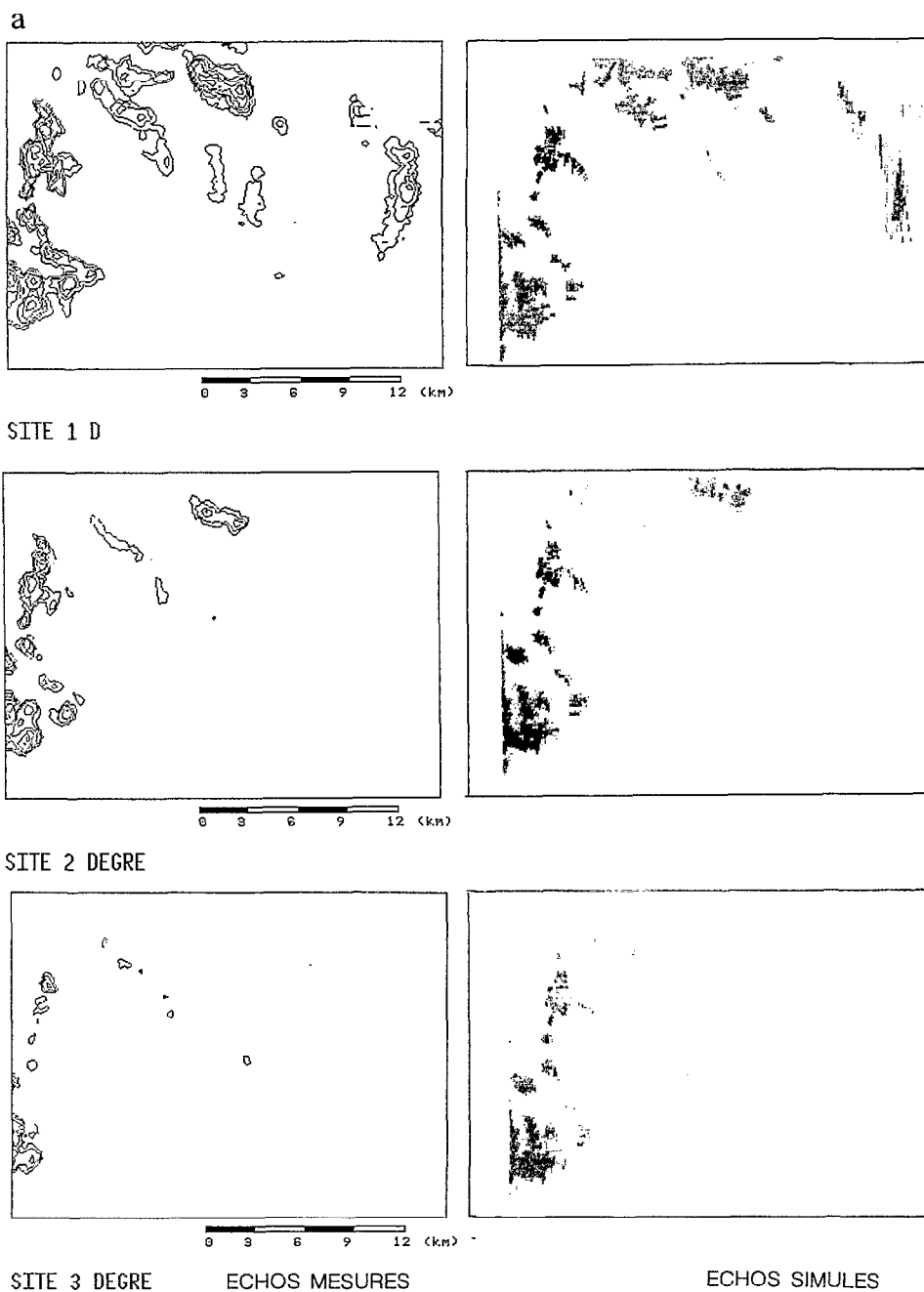


FIG. 7 a. — Sites de tir de 1, 2 et 3 degrés.

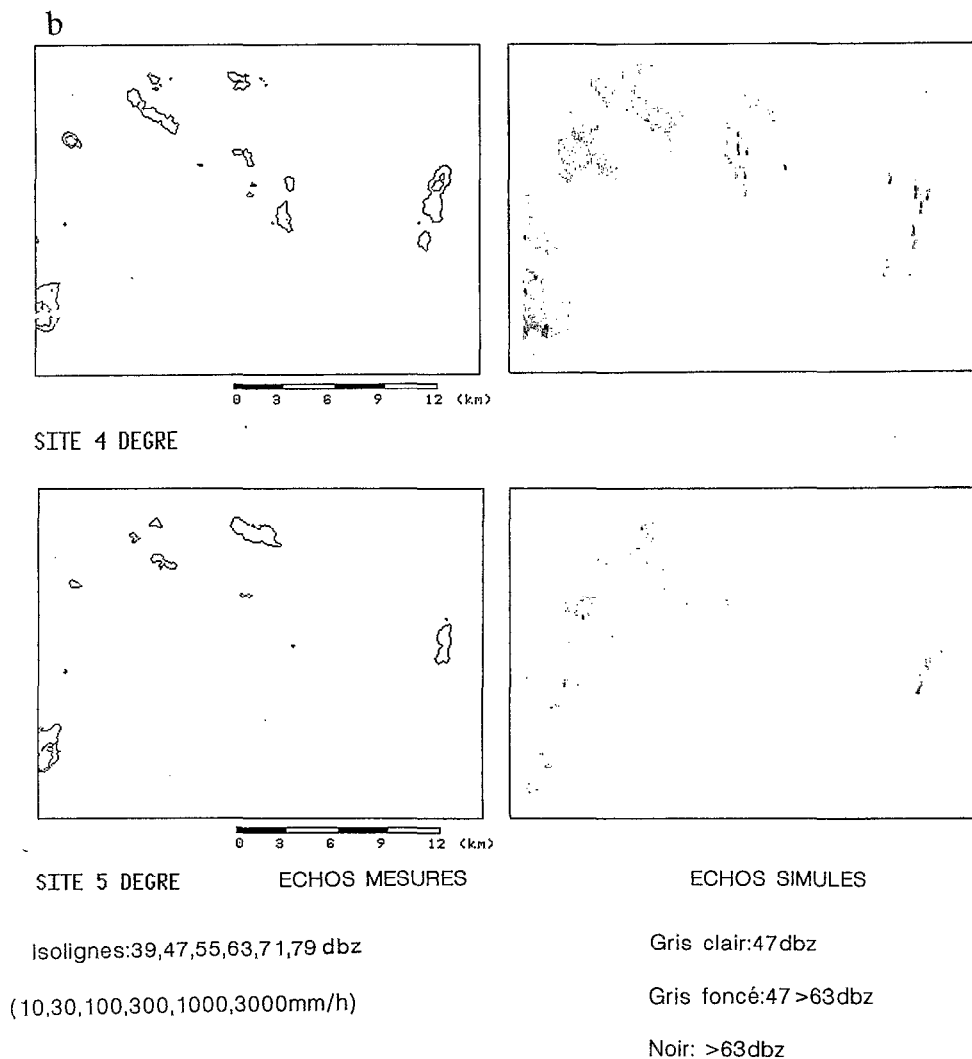


FIG. 7 b. — Sites de tir de 4 et 5 degrés.

FIG. 7. — Echos de sol et indices d'échos simulés.

du champ de visibilité depuis le radar. La maille de 100 m impose en effet un lissage très important du tour d'horizon à proximité du radar: voici quelques ordres de grandeur concernant la discrétisation du tour d'horizon en fonction de la distance au radar:

100 m:	8 pixels/360°;
200 m:	16 pixels/360°;
300 m:	24 pixels/360°;
1 000 m:	80 pixels/360°;
4 500 m:	360 pixels/360°.

Le nombre de point pris en compte pour représenter le tour d'horizon est donc très faible à proximité du radar et croît avec la distance; c'est seulement à 4 500 m du radar que l'on dispose d'environ 1 pixel par degré de tour d'antenne, et un obstacle excessivement lissé dans le voisinage immédiat du radar va perturber le calcul du champ de visibilité de celui-ci (fig. 8).

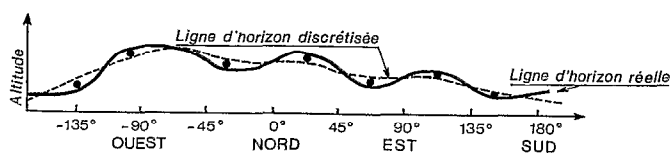


FIG. 8. — Illustration du manque de précision pour représenter un tour d'horizon proche du radar. Ici 8 pixels MNT seulement sont disponibles, d'où une approximation importante

Lobes secondaires

Les échos de lobes secondaires (zones 4, 6 et en partie 5) sont simulés par le modèle mais avec moins de précision que les échos du faisceau principal. L'évolution de ces zones pour les angles de tir supérieurs à 2° est remarquable. La zone d'écho n° 4 présente une extension importante sur l'image des échos de sol à 1° ; cette extension décroît sur les images à 2 et 3° puis reprend de l'importance à 4° avant de recommencer à décroître à 5° . Les images d'indice d'écho, bien que peu précises pour représenter cette zone 4 reproduisent timidement ce phénomène: des échos supplémentaires apparaissent sur l'image à 4° par rapport à l'image à 3° .

Les zones d'échos observées n° 5 et 6 présentent une évolution similaire, partiellement reproduite sur la carte des échos simulés. La fluctuation de l'étendue de ces zones en fonction de l'angle de tir s'explique par la répartition de l'énergie dans les lobes secondaires, ces différents lobes étant séparés par des minimums relatifs: il arrive donc qu'en augmentant le site, un lobe secondaire jusque là «inefficace» se mette à intercepter le relief.

En ce qui concerne les différences entre échos mesurés et échos simulés, il faut noter que la répartition d'énergie qui a été adoptée pour cette étude (symétrique par rapport à l'axe) est une simplification, et qu'il serait préférable de prendre en compte la répartition réelle de cette énergie en discrétisant la fonction d'antenne dans les deux dimensions.

Une autre source d'erreur importante tient aux hypothèses simplistes d'homogénéité que nous avons faites sur les propriétés de réflectance de la cible par rapport aux ondes radar, les conséquences relatives de ces hypothèses se faisant plus fortement ressentir pour de faibles niveaux de puissance rétrodiffusée.

Enfin, un dernier point est à considérer, certainement non négligeable et qui a trait aux cartes d'échos de sol mesurés. A 10 kilomètres du radar et avec une ouverture de 2° , le faisceau a une largeur de 350 mètres. Chaque pixel de la grille radar initiale est ensuite affecté à une maille de grille cartésienne (200 X 200 m), et du fait de l'inadéquation entre les deux découpages beaucoup de trous sont bouchés par interpolation. Cette préparation n'est pas neutre et contribue à déformer les échos fixes. Un traitement effectué directement à partir de la grille polaire radar initiale pourrait permettre d'éviter en partie ces distorsions.

5. CONCLUSION

Cette étude a montré qu'il était possible d'approcher d'une manière simple les problèmes d'écho de sol à l'aide d'un MNT. Les seuls facteurs géométriques ont permis de simuler assez bien les zones d'échos de sol avec toutefois des limites en ce qui concerne les échos de faible intensité dus aux lobes secondaires.

Dans sa formulation actuelle très simplifiée, la méthode peut déjà contribuer à sélectionner un site optimum minimisant les échos de sol et les effets de masque qui leur sont associés.

L'étude mériterait néanmoins d'être poursuivie afin d'affiner le calcul de ces indices d'écho. Il serait également intéressant d'utiliser un MNT à maille plus fine afin de se libérer le plus possible des erreurs géométriques et de faire apparaître plus nettement l'influence des autres facteurs.

REMERCIEMENTS: Cette étude a été rendue possible grâce au travail des équipes de recherches du Laboratoire Associé de Météorologie Physique (Clermont-Ferrand), de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont et de l'Institut de Mécanique de Grenoble. Nous tenons à remercier vivement M. POINTIN (LAMP), M. FOURNET-FAYARD (OPGC), M. CREUTIN (IMG) ainsi que toutes les personnes associées à la mise en œuvre et au suivi des campagnes Radar-Cévennes 86-88.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 15 juin 1989

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEU (H.), CREUTIN (J.D.), LEOUSSOF (J.), POINTIN (Y.), 1988. — Cévennes 86-88: a french hydrometeorological experiment to evaluate weather radar capabilities for medium elevation mountain hydrology *in*: Hydrology of Mountainous Areas, Czechoslovakia, 22 p. (à paraître).
- CROWTHER (L.), RYDER (P.), 1985. — North West Weather Radar Project, Report of the Steering Group, North West Water Authority — Meteorological Office. 73 p.
- DEPRAETERE (C.), 1989. — Logiciel d'Application pour Modèle Numérique de Terrain (LAMONT), Note Technique OVNIH n° 4, Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, Montpellier.
- POINTIN (Y.), FOURNET-FAYARD (J.), RAMOND (D.), MICHEL (G.), BARTHOUT (J.L.), DELRIEUX (G.), CREUTIN (J.D.), ANDRIEU (H.), 1987. — Campagne Radar-Cévennes 86 — Qualification d'un radar météorologique à diversité de polarisation pour la mesure des précipitations en hydrologie, Note OPGC, Avril.
- SAUVAGEOT (H.), 1982. — Radarmétéorologie — Télédétection active de l'atmosphère, Eyrolles, Paris, 296 p.