

**LABORATOIRE D'ETUDE DES TRANSFERTS
EN HYDROLOGIE ET DANS L'ENVIRONNEMENT
CNRS/URA 1512, INPG, UJF
BP 53X, 38041 GRENOBLE Cedex**

**UTILISATION DU RADAR METEOROLOGIQUE
POUR LES BESOINS HYDROLOGIQUES
D'UNE REGION DE MONTAGNE**

J.D. CREUTIN (1), G. DELRIEU (1), H. ANDRIEU (2), D. FAURE (2)

(1) LTHE Equipe Hydrométéorologie

(2) LCPC / Division Eau

RESUME DU RAPPORT

1. INTRODUCTION

Le besoin de surveillance hydrométéorologique en montagne n'est contesté par personne. Les régions montagneuses sont exposées périodiquement à des situations pluvieuses dangereuses (la région Rhône-Alpes a été touchée dans les années récentes à de multiples reprises notamment par des orages d'été). La détection immédiate de ces fortes intensités de pluie à l'aide de radars, sans prétendre être la seule façon de se protéger contre ces phénomènes, serait certainement un moyen appréciable pour déclencher des alertes aux populations.

La satisfaction de ce besoin nécessitait d'abord un effort de recherche car il n'existait pas en France de savoir faire en ce domaine et le réseau de radars de Météo France n'était pas adapté (il ne l'est pas plus aujourd'hui - voir en conclusion). Cette étude a donc eu pour objectif d'identifier les méthodes permettant l'utilisation du radar météorologique en montagne à des fins hydrologiques et de les valider.

Pour atteindre cet objectif trois étapes ont été nécessaires :

- réaliser une expérience pour laquelle le site d'implantation et le protocole d'exploitation du radar soient adaptés à une zone montagneuse choisie. Cette expérience a été menée dans les Cévennes entre 1986 et 1988.
- mettre au point les méthodes d'analyse du signal radar permettant de passer de la puissance rétrodiffusée par l'atmosphère à l'intensité de pluie correspondante.
- valider ces méthodes au moyen de mesures classiques réalisées au sol à l'aide de pluviomètres.

Il était impossible de mener ce projet de recherche sans la collaboration de plusieurs équipes. Ainsi, à l'équipe Hydrométéorologie du LTHE se sont jointes l'équipe radar du Laboratoire de Météorologie Physique de Clermont Ferrand pendant la durée de l'expérience et, pour l'ensemble du projet, la Division Eau du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes. De même les financements nécessaires ont été trouvés auprès de plusieurs organismes. Outre le contrat Etat-Région Rhône-Alpes, le SRETIE du Ministère de l'Environnement, le CNRS et le Programme Climatologie de la CEE ont apporté leur concours financier à ce projet.

2. EXPERIENCE CEVENNES 1986-1988

Pendant trois années (1986 à 1988) le radar Anatol du LAMP de Clermont-Ferrand a été installé pendant les mois d'Automne sur la Corniche des Cévennes (voir figures 1 et 2). Il s'agit d'un radar bande S (10 cm de longueur d'onde) à diversité de polarisation (il mesure donc deux paramètres au lieu d'un seul comme les radars classiques). Depuis son point d'implantation (lieu dit l'Hospitalet), il donnait une couverture complète des bassins de la Cèze, des Gardons et du Vidourle, c'est à dire de l'ensemble du département du Gard.

Au cours de cette campagne de mesures, quatre épisodes pluvieux significatifs ont été suivis correspondant à des situations météorologiques dites cévenoles (perturbations d'échelle synoptique dont le blocage au niveau de la région permet une forte alimentation en air chaud et humide venant du sud et entraînant des précipitations intenses, durables et largement réparties). Les situations convectives moins organisées n'ont pas pu être suivies compte tenu du fonctionnement sur alerte météorologique de l'expérience ; l'orage du 5 octobre 1988 n'a donc malheureusement pas été enregistré (voir le tableau 1 pour le détail des données disponibles).

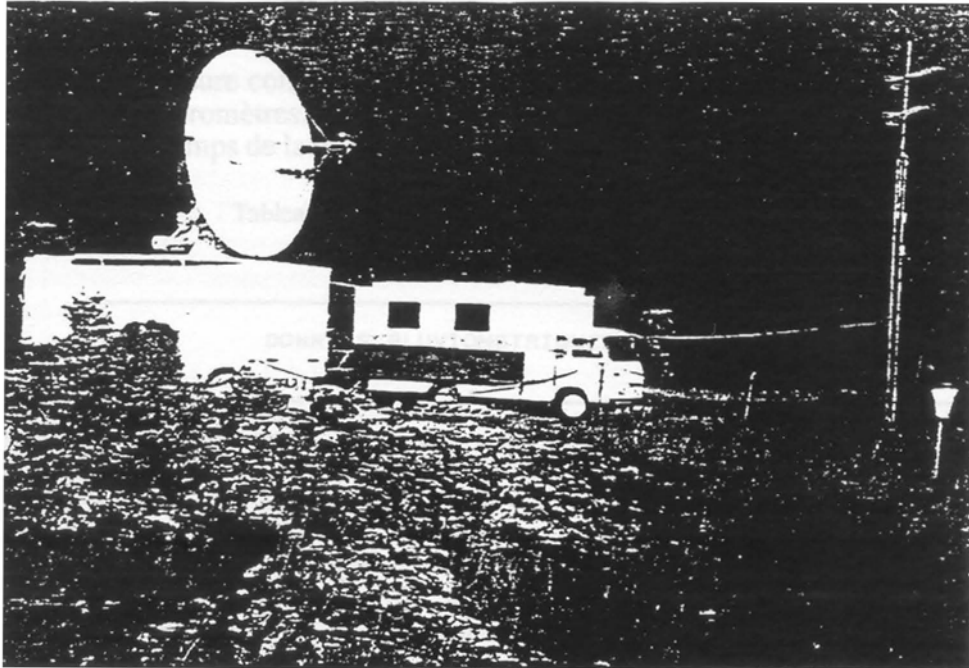


Figure 1 - Le radar mobile Anatol.

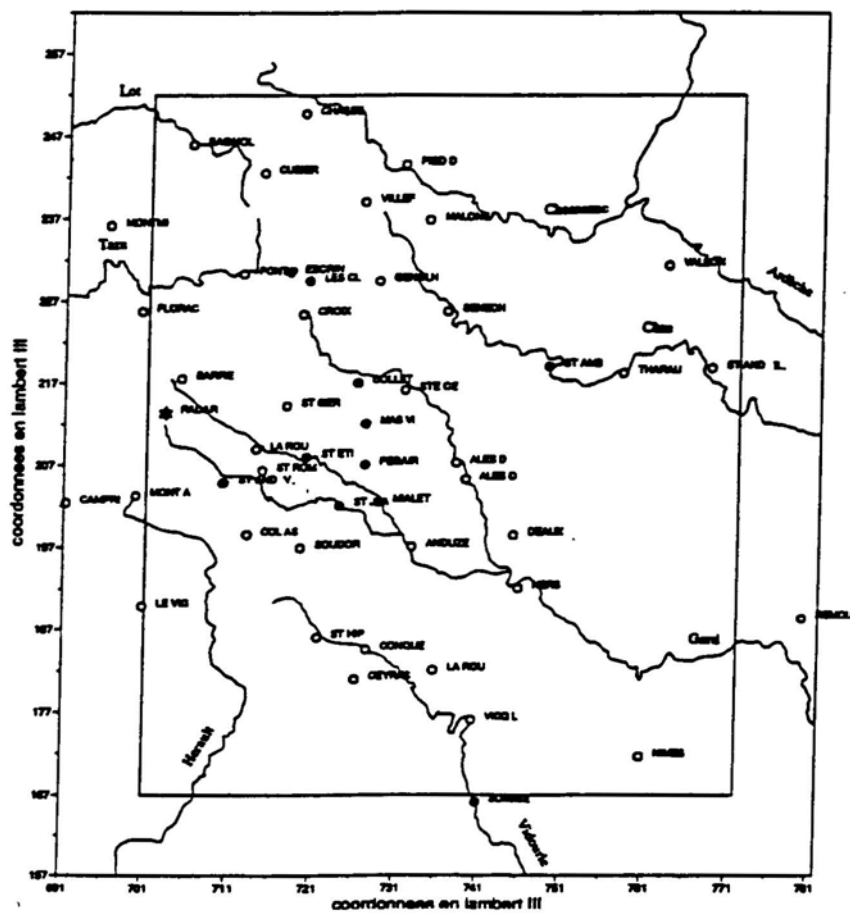


Figure 2 - Carte sommaire de la zone d'étude (le rectangle intérieur figure la zone couverte par les images radar après prétraitement).

Le dispositif de mesure comprenait, outre le radar, un réseau d'environ 50 pluviomètres enregistreurs et deux disdromètres. Ces appareils mesurent la distribution granulométrique des précipitations au pas de temps de la minute.

Tableau 1 - Evénements pluvieux analysés.

durée du suivi	DONNEES PLUVIOMETRIQUES SOL			ENREGISTREMENTS RADAR
	48 pluvio. horaires intensité maxi en mm/h	109 pluvio. journaliers hauteur d'eau maxi par évén. en mm	lame d'eau moyenne (évén) en mm	
du 11 (7h) au 15 nov. 86 (7h)	34. St Jean	512. Mt Aigoual	135. (96h)	48 h de suivi 38 h exploitées en continue
du 2 (7h) au 6 oct. 87 (7h)	42. Pied de Borne	370. Mt Aigoual	114. (96h)	35 h de suivi dont 32 h exploitées
du 9 (7h) au 12 oct. 88 (7h)	116. (223 en 2 h) St A. de Roqu	337. St A. de R.	75. (72h)	20 h de suivi dont 17 h exploitées
du 18 (7h) au 20 oct. 88 (7h)	41. Sénéchas	164. Pont de M.	57. (48h)	11 h de suivi dont 9 h exploitées

3. ANALYSE DU SIGNAL RADAR

L'objectif étant de qualifier le radar pour les applications opérationnelles à l'hydrologie de montagne, les lignes directrices de l'analyse du signal radar ont été les suivantes :

- proposer des méthodes d'analyse ne demandant pas d'autres informations que celles fournies par le radar. En particulier il s'agissait d'éviter le recours aux mesures pluviométriques sol qui constitue classiquement le moyen privilégié d'étalonnage pour les applications hydrologiques mais qui, dans la pratique opérationnelle, complique singulièrement les systèmes et donc les fragilise.
- rendre ces méthodes automatisables sur des ordinateurs de puissance "ordinaire" (type station de travail).
- réaliser une maquette informatique montrant la faisabilité pratique de ces méthodes d'analyse.

La première ligne est la plus caractéristique de cette étude et elle en constitue certainement l'apport original. Pour en comprendre le développement il est nécessaire de considérer successivement les différentes sources d'erreur de la mesure radar.

a) Défaut d'étalonnage du radar

L'ensemble des caractéristiques d'un radar est résumé par une constante C que l'on appelle constante d'étalonnage et qui relie la grandeur effectivement mesurée Pr ou puissance rétrodiffusée par l'atmosphère à la grandeur qui nous intéresse Z ou réflectivité électromagnétique : $Pr = C Z/r^2$ où r représente la distance radar cible.

Il est évident que toute erreur sur l'établissement de cette constante aura des répercussions sur l'ensemble de l'analyse du signal quelle qu'en soit la qualité. Il est par ailleurs très difficile d'obtenir un système radar stable dans le temps (fidélité de la mesure) et d'établir la valeur absolue de cette constante (exactitude de la mesure). Ces affirmations, a priori surprenantes, se comprennent mieux lorsque l'on considère la complexité du système émetteur-récepteur-antenne-système d'acquisition sur lequel une dizaine de paramètres doivent être contrôlés. Il faut regretter que pendant la campagne de mesure des Cévennes la stabilité du radar n'ait pas fait l'objet d'un contrôle régulier.

Il peut paraître séduisant de déterminer C directement en fonction de la grandeur que l'on souhaite obtenir in fine, l'intensité de précipitation R. C'est la voie classique qui consiste à combiner mesures radar et mesures pluviométriques sol. Mais compte-tenu de la très forte non-linéarité des autres sources d'erreurs (voir les paragraphes suivants), cette correction ne peut s'appliquer que de manière globale à un ensemble de mesures afin de diminuer l'effet de ces erreurs. Elle ne peut donc se concevoir que comme une méthode de contrôle a posteriori.

La méthode la plus sûre de contrôle de C est certainement la mesure de la puissance rétrodiffusée par une cible de réflectivité connue ou pour le moins stable dans le temps. En zone montagneuse les plus fortes détections de sol peuvent constituer de telles cibles. La stabilité de certains échos de sol a été analysée (voir figure 3) et deux conclusions ont pu être tirées :

- la constante C du système utilisé fluctuait de manière significative au fil des heures au sein d'un évènement pluvieux
- le niveau moyen de C diffère sensiblement d'un évènement à l'autre.

Ce constat doit être vu de deux façons :

- il est impossible d'utiliser un radar en mode opérationnel sans contrôler sa stabilité. En d'autre termes l'utilisation des données du radar Anatol sans prise en compte des variations de C aurait conduit à un désastre (sous-estimation des intensités de pluie d'un facteur 3 à 10 !). Les détections de sol, si elles sont suffisamment puissantes, sont certainement un bon moyen d'ajuster C sans recourir à une information extérieure. Des études en ce sens se poursuivent au LTHE.
- malgré cette instabilité les données collectées pendant l'expérience constituent un matériau tout à fait digne d'analyse fine a posteriori. En effet les méthodes de traitement proposées ne dépendent pas d'erreurs multiplicatives et la validation avec les mesures sol a été faite en intégrant ces erreurs d'étalonnage.

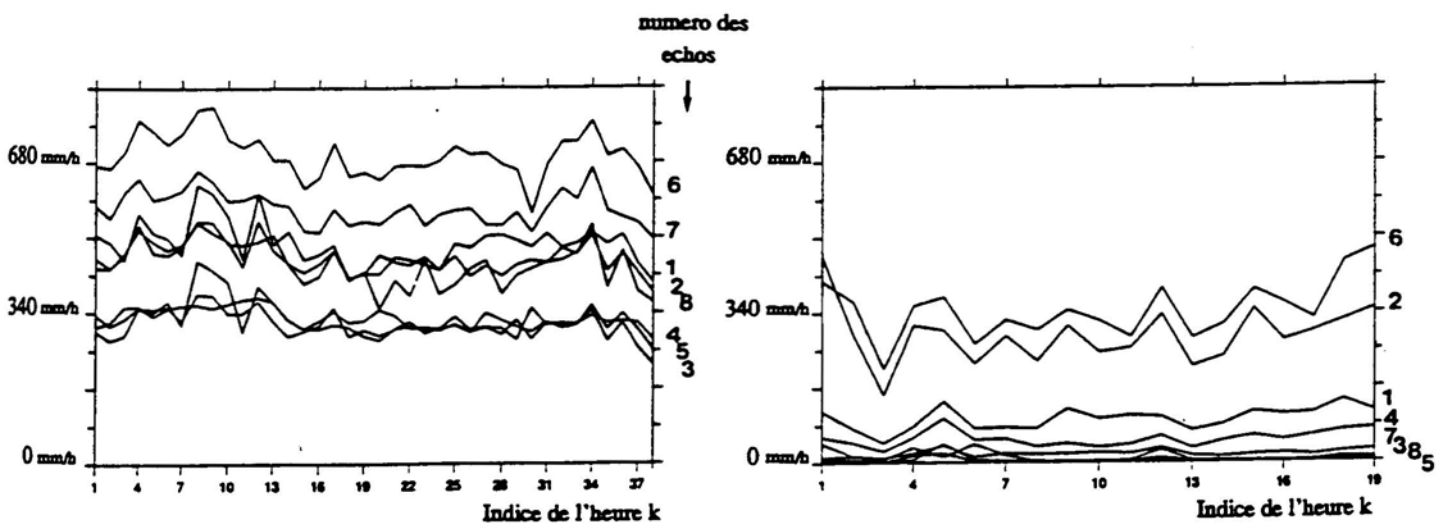


Figure 3 - Valeurs des équivalents pluviométriques de huit détections de sol au cours du temps pour les évènements pluviométriques de novembre 1986 et d'octobre 1988.

b) Relation réflectivité-intensité

Le radar météorologique fournit une mesure de la réflectivité électromagnétique Z de la portion d'atmosphère illuminée par son faisceau. Compte-tenu de la longueur d'onde choisie (10 cm dans le cas du radar Anatol) la réflectivité mesurée est celle des gouttes de pluie dont le diamètre est supérieur à 0.2 mm. Cette grandeur est égale au moment d'ordre 6 de la distribution granulométrique des gouttes. Elle n'est qu'indirectement liée à l'intensité de pluie R qui est égale environ au moment d'ordre 3.5 de cette même distribution. Pour établir cette relation Z - R , il est en principe nécessaire de connaître la distribution granulométrique de la pluie mesurée, ce qui est impossible dans la pratique. La solution retenue dans l'expérience des Cévennes a été de mesurer en un point l'évolution temporelle des spectres de gouttes à l'aide d'un disdromètre. Ces données permettent de déterminer une relation Z - R empirique (voir figure 4) d'après laquelle est calée une relation moyenne représentative du type de pluie rencontré. Dans le cas des Cévennes, la relation ainsi établie s'écrit : $Z = 613.R^{1.38}$ alors que la relation classiquement utilisée dite de Marshall-Palmer s'écrit : $Z = 200.R^{1.6}$.

Cette différence pose évidemment problème. Des études se poursuivent au LTHE pour analyser de manière plus fine la source de telles différences. Elles portent notamment sur l'influence du type de capteur utilisé pour réaliser les mesures. Dans le cadre de cette étude la relation locale a été préférée à la relation standard établie au Canada pour des pluies stratiformes.

De façon plus générale, ce résultat plaide pour la pratique de ce type de mesure très fine des précipitations au sol en parallèle à toute mesure radar.

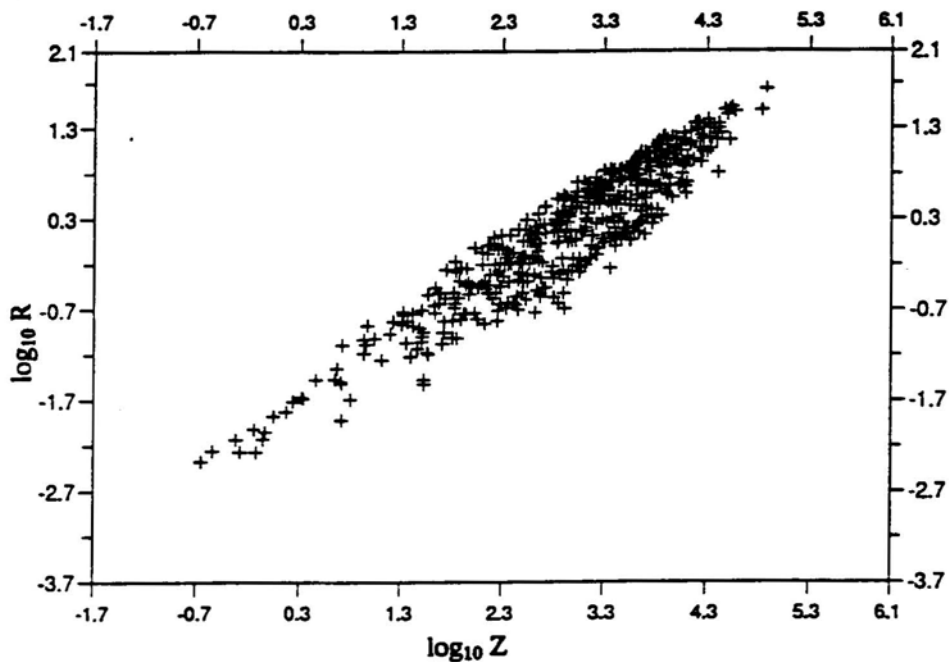


Figure 4 - Relation empirique Z - R pour une intégration des mesures sur des intervalles de temps de 5 minutes et pour 50 heures d'enregistrement.

c) corrections d'ordre géométrique

Les antennes utilisées en météorologie concentrent l'essentiel de la puissance émise en un faisceau conique d'angle au sommet environ 2 degrés. En région montagneuse l'interception de ce faisceau par le relief engendre deux types de problèmes :

- la détection du sol elle même rend inexploitable les mesures affectées. En effet la réflectivité de l'écran que constitue le relief concerné est généralement beaucoup plus importante que celle de la pluie occupant le volume libre et il est donc très délicat d'identifier la part due à cette dernière.

- au delà d'une zone d'interception partielle par le relief, seule une partie de la puissance initialement émise continue de cheminer dans l'espace. Ceci conduit à une sous-estimation des précipitations. Par analyse d'un relief numérisé il est possible de déterminer l'effet d'interception et de calculer des facteurs correctifs (voir figure 5).

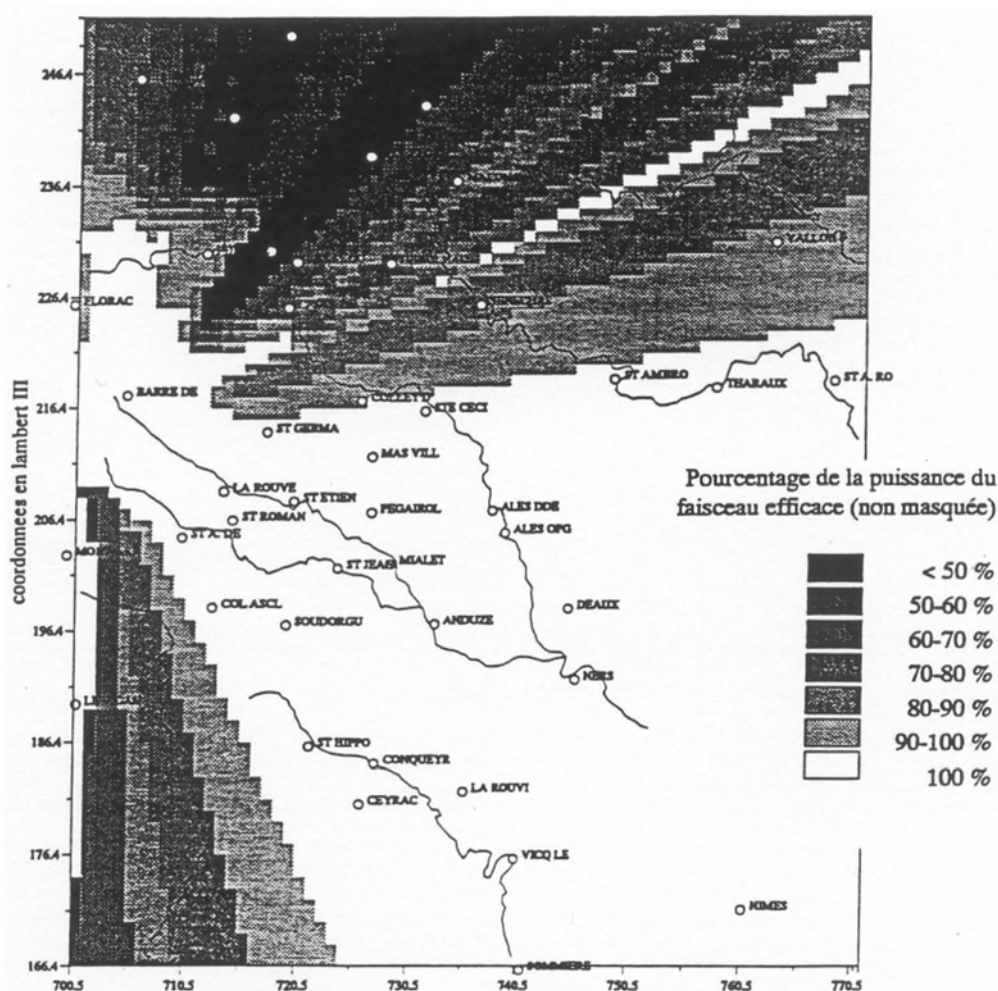


Figure 5 - Pourcentage de puissance efficace du faisceau radar lorsque l'antenne explore avec un site de 1 degré

d) Profils verticaux de réflectivité

L'atmosphère possède une organisation verticale dont les caractéristiques les plus pertinentes pour la mesure radar sont les suivantes :

- l'altitude maximale des précipitations au-dessus de laquelle les longueurs d'ondes utilisées ne permettent plus de détection.
- l'altitude de l'isotherme 0 degré qui est la zone où se produit la fusion des cristaux de glace. Les particules en fusion sont très fortement réfléchives et provoquent une saturation du signal radar sans rapport avec l'intensité réelle des précipitations.

Le faisceau radar explore l'atmosphère à des altitudes croissantes et suivant une intégration verticale croissante lorsque l'on s'éloigne du site radar. Les mesures réalisées lors d'une exploration d'antenne vont donc concerner des gammes d'altitude et des modes d'intégration différents suivant l'éloignement au radar. L'image produite est fortement hétérogène et nécessite une correction prenant en compte à la fois la géométrie du faisceau et la structure verticale de l'atmosphère qui varie au cours du temps.

Une méthode automatique d'identification des profils verticaux de réflectivité a été mise au point par le LTHE et le LCPC (voir figure 6). Sa validation a montré la nécessité forte de pratiquer ce type de correction notamment en zone de montagne.

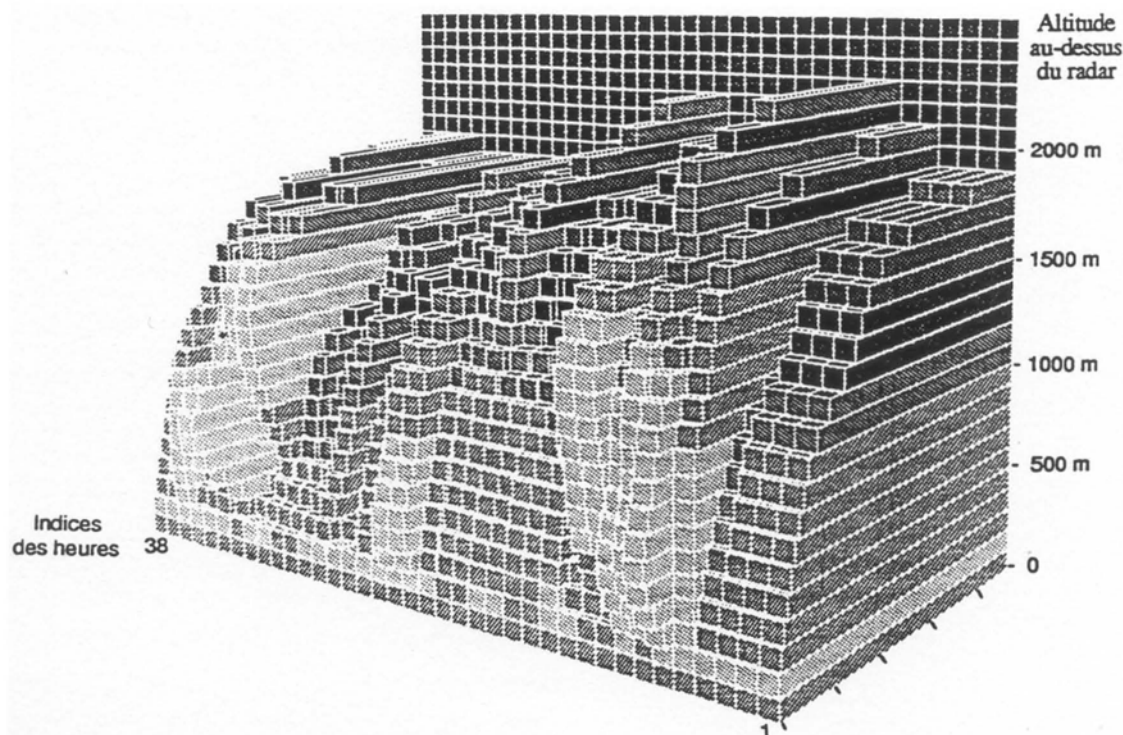


Figure 6 - Profils verticaux de réflectivité horaires identifiés pendant l'épisode pluvieux de novembre 1986.

4. VALIDATION DES ESTIMATIONS RADAR

Compte tenu de l'état actuel des modèles hydrologiques utilisés de façon opérationnelle, il est raisonnable de considérer que des estimations de la lame de pluie moyenne sur des bassins versants de quelques dizaines à quelques centaines de km² sont les données requises en entrée de ces modèles. La validation des estimations radar a donc été entreprise sur cette base (voir figure 7).

Il n'existe évidemment pas de référence exacte à laquelle comparer les estimations produites à l'aide des données radar. Dans cette étude les données pluviométriques sol ont été utilisées pour constituer une base de validation en prenant les précautions suivantes :

- les méthodes utilisées pour corriger les données radar n'utilisent pas directement les données sol. Cela paraît être une précaution élémentaire mais elle est très difficile à prendre car le besoin d'étalonner la mesure radar est souvent impératif (voir en 3-a).
- la référence tirée des données sol doit être associée à une incertitude (variance d'erreur par exemple) prenant en compte les erreurs de mesure ponctuelle due aux capteurs mais surtout les erreurs d'interpolation commises en intégrant sur des bassins versants à partir d'un réseau de points de mesure.

Cette dernière précaution est tout à fait originale. Elle a pu être mise en pratique à l'aide d'une approche géostatistique. Moyennant certaines hypothèses d'homogénéité statistique des données, elle permet de fournir des estimations satisfaisant un critère d'optimalité et de leur associer un index de précision : la variance d'erreur.

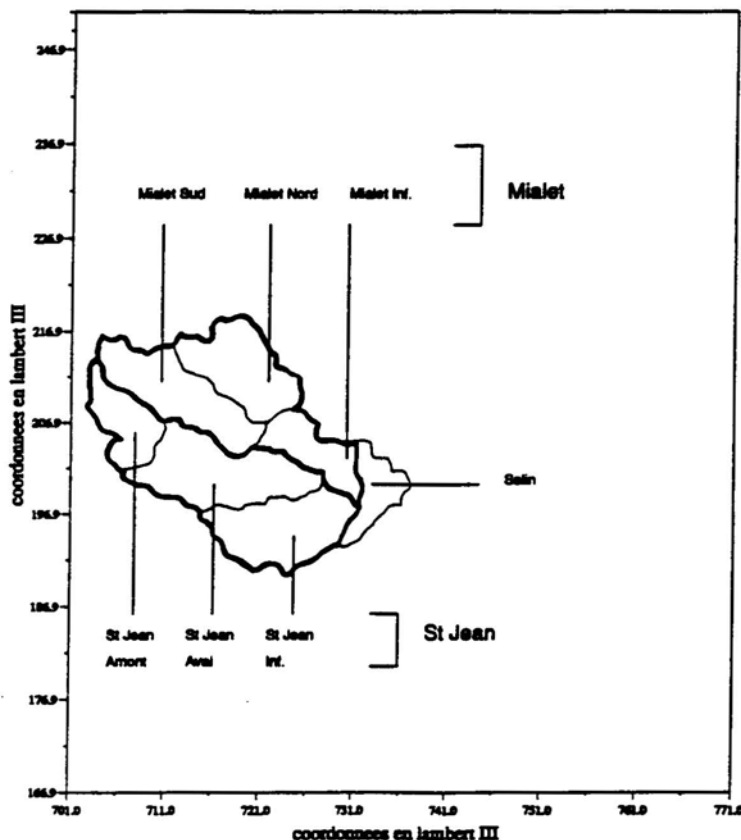


Figure 7 - Bassins et sous-bassins du Gardon d'Anduze ayant servi de base de validation avec le Gardon d'Alès, la Cèze et le Vidourle.

Ainsi il est possible de substituer aux courbes classiques montrant l'évolution dans le temps du rapport entre la mesure radar et la mesure sol, la double courbe montrant l'évolution de l'intervalle dans lequel se situe avec une certaine probabilité (80% dans le cas de la figure 8) le rapport entre la mesure radar et la vraie valeur de la lame d'eau. Il est ainsi possible de distinguer des périodes de fonctionnement du radar pendant lesquelles la mesure radar n'a pas de raison d'être remise en cause par la référence sol (heures indicées 1 à 37 par exemple pour lesquelles une valeur de 1 du rapport ne peut pas être remis en cause) et des périodes pendant lesquelles les estimations radar sont suspectes (46 à 64 par exemple).

La conclusion de cette validation est double :

- les traitements du signal radar évoqués en 3 sont absolument indispensables. Différents essais de validation pratiqués avec et sans ces corrections le montrent.
- à condition de disposer d'un système radar stable (ce qui n'a été que momentanément le cas pour le radar Anatol) il est parfaitement possible de substituer l'information radar à celle d'un réseau de pluviomètres de densité considérée comme forte tel que celui des Cévennes.

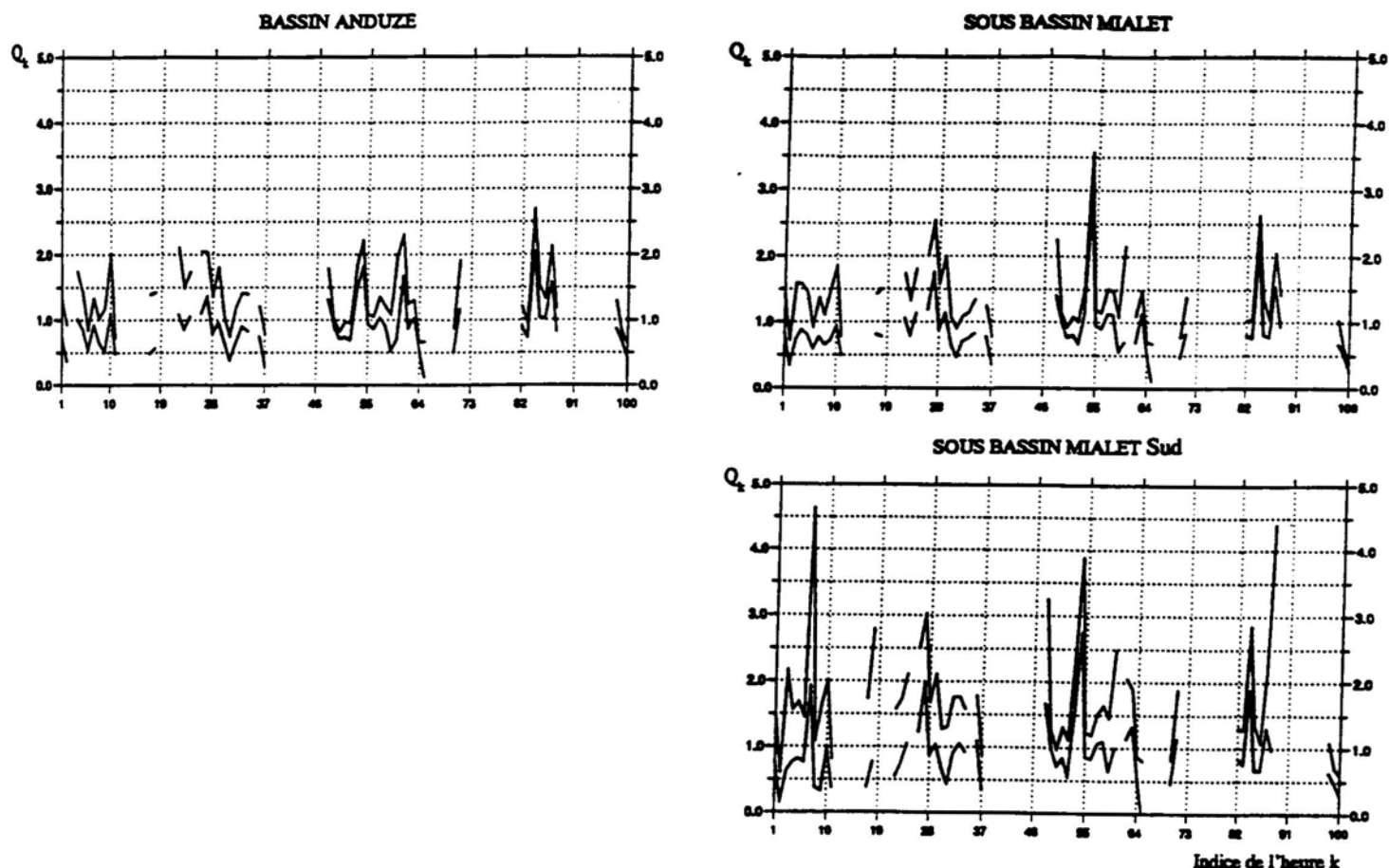


Figure 8 - Intervalles de confiance dans lesquels se situent au cours du temps 80 % des rapports entre la lame d'eau déduite des mesures radar et la lame d'eau vraie.

5 . . CONCLUSION

Par son contenu à la fois expérimental et théorique l'étude présentée a permis de développer en Rhône-Alpes une compétence unique en France dans le domaine de l'hydrologie radar en montagne.

Malheureusement il n'est pas possible d'appliquer ce savoir faire à notre région. En effet le réseau de 12 radars de Météo France qui a pour objectif une couverture aussi large que possible du territoire français, s'est cantonné aux régions à faible relief où le taux de couverture utile pour chaque radar est le plus grand. En conséquence les régions montagneuses sont très mal surveillées. De plus les protocoles d'exploration de l'atmosphère et les modes de traitement de l'information radar sont inadaptés aux problèmes posés par la montagne.

Nous nous efforcerons donc dans un avenir proche de formuler un projet visant à améliorer cette situation.