

Translation et rotation des spectres des gouttes de pluie dans des averses de nuages stratiformes et de nuages convectifs

Lateral and rotary movement of raindrop spectra in showers from stratiform and convective clouds

G. Donnadiou

Institut et Observatoire de Physique du Globe du Puy-de-Dôme
Université de Clermont-Ferrand II
12, av. des Landais, 63000 Clermont-Ferrand

1. Introduction

Les appareils relativement récents qui permettent de connaître d'une manière automatique et continue les spectres de distribution des diamètres D_i des gouttes de pluie au sol ont rendu possible l'étude systématique de leurs variations en fonction du temps.

Les représentations plane ou en perspective de ces spectres ont pour inconvénient qu'il est difficile d'en comparer un grand nombre et de les présenter pour toute la durée d'une précipitation. En partant du fait que la plupart d'entre eux peuvent être approximés par une loi exponentielle de la forme

$$n(D_i) = N_0 e^{-\lambda D_i},$$

Waldvogel (1974) a proposé une paramétrisation à la fois simple et quantitative pour représenter les variations temporelles des 2 paramètres N_0 et λ les caractérisant. La procédure de cette paramétrisation consiste, à partir des taux de comptage $N(D_i)$ obtenus, à calculer :

- les concentrations $n(D_i)$ correspondantes,
- puis les valeurs de la teneur en eau $W = \pi/6 \sum_i n(D_i) D_i^3$
- et du facteur de réflectivité $Z = \sum_i n(D_i) D_i^6$;

Si les concentrations $n(D_i)$ suivent la loi exponentielle

$$n(D_i) = N_0 e^{-\lambda D_i}$$

on a :

$$W = \pi N_0 / \lambda^4 = f_1(N_0, \lambda)$$

et $Z = 720 N_0 / \lambda^7 = f_2(N_0, \lambda).$

Il est alors aisé de calculer :

$$N_0 = f_3(Z, W)$$

et $\lambda = f_4(Z, W).$

Etant d'usage courant d'exprimer $n(D_i)$ et N_0 en $m^{-3} mm^{-1}$, λ en mm^{-1} , W en $mm^3 m^{-3}$ et Z en $mm^6 m^{-3}$ Waldvogel obtient :

$$N_0 = 446 (W/Z)^{4/3} \cdot W$$

et $\lambda = 6,12 (W/Z)^{1/3}.$

Au cours des 2^e et 3^e Campagnes Internationales PAP (Projet d'Augmentation des Précipitations) à Valladolid (Espagne) on a procédé, à l'aide du spectropluviomètre VIDIAZ et d'un disdromètre de Joss-Waldvogel, à des mesures systématiques des spectres des gouttes lors des situations donnant des précipitations au sol. Nous avons utilisé cette paramétrisation pour analyser les variations temporelles de N_0 et de λ et nous les avons comparé à celles des intensités de précipitation R (mm/h) obtenues avec les 2 appareils.

Après avoir montré que les 2 dispositifs utilisés sont tout à fait aptes à l'analyse des variations temporelles de ces 3 paramètres et que ceux-ci sont fortement corrélés, on détermine la relation qui les lie : étant trouvée tout à fait semblable à celle que l'on établit théoriquement, on analyse alors les conséquences de cette dernière sur les variations de R et des spectres des gouttes.

2. Variations temporelles de R , N_0 et λ obtenues avec le disdromètre et le spectropluviomètre

Ces 2 dispositifs ayant déjà fait l'objet de nombreuses descriptions (entre autre Joss-Waldvogel, 1967 ; Waldvogel, 1974 pour le disdromètre et Donnadiou, 1978, 1980 pour le spectropluviomètre) nous n'en rappelons que brièvement, en annexes 1 et 2, les principales caractéristiques.

Les figures 1 et 2 présentent les valeurs des paramètres R , N_0 et λ obtenues avec le disdromètre (trait continu) et avec le spectropluviomètre (pointillé) res-

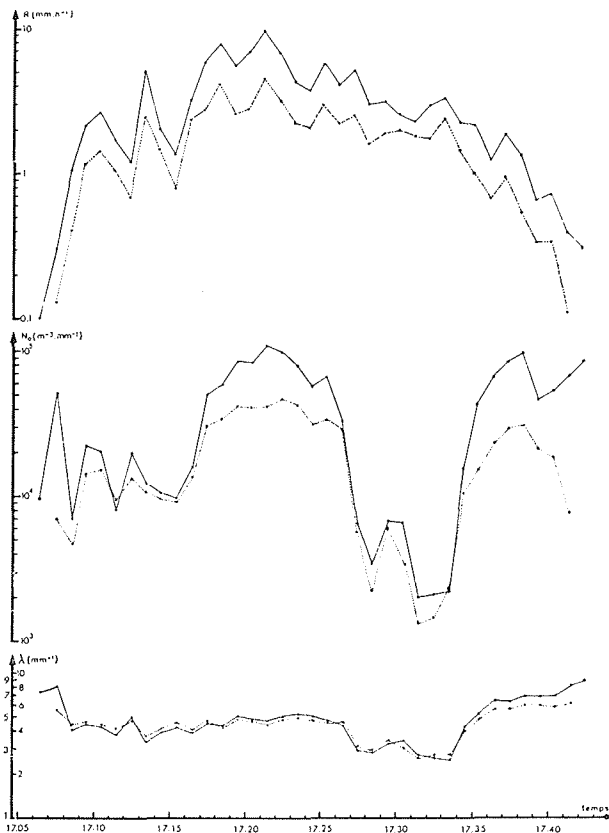


Figure 1 – Paramètres R , N_0 et λ obtenus au cours d'une pluie de nuages stratiformes, en trait continu avec le disdromètre et en pointillé avec le spectropluviomètre (21 février 1980).

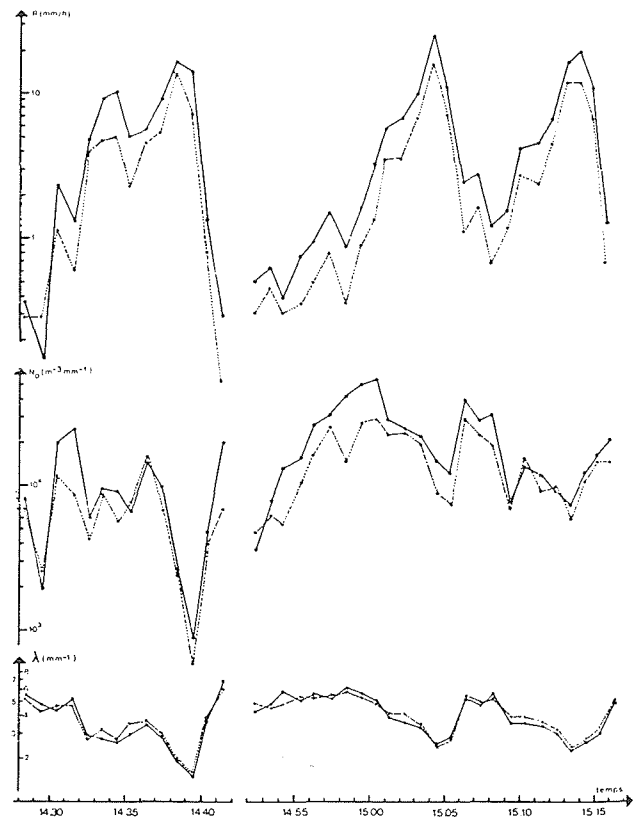


Figure 2 – Paramètres R , N_0 et λ obtenus au cours d'une pluie de nuages convectifs, en trait continu avec le disdromètre et en pointillé avec le spectropluviomètre (11 mai 1981).

pectivement au cours d'une averse de nuages stratiformes (21 février 1980 – Campagne PAP 80) et d'une averse orageuse (11 mai 1981 – Campagne PAP 81). On voit sur ces figures que, pour la presque totalité des points, chaque paramètre varie d'une minute à l'autre de manière identique, qu'il résulte d'une mesure par l'un ou l'autre des appareils. En d'autres termes, ces variations sont bien *réelles* et les caractéristiques des 2 dispositifs (en particulier leur surface d'échantillonnage) sont bien adaptées pour *voir* ces variations d'une minute à l'autre.

Remarque :

On observe sur ces 2 figures que le spectropluviomètre donne des valeurs de R plus faibles que celles obtenues avec le disdromètre. Il en est de même pour le paramètre N_0 lorsque celui-ci est très grand. Par contre, les 2 appareils donnent du paramètre λ des valeurs très semblables. Par suite de son principe de fonctionnement, le spectropluviomètre présente un temps de blocage entraînant des comptages par défaut. De plus, son seuil de détection en diamètre est plus élevé que celui du disdromètre. Il s'en suit, pour le spectropluviomètre, une sous-estimation systématique des valeurs de R . Le fait que les 2 appareils donnent des valeurs de λ très semblables confirme l'hypothèse que les gouttes non comptées par le spectropluviomètre suivent une loi de distribution semblable à celle des gouttes enregistrées (Donnadieu, 1982). Il permet aussi d'expliquer les sous-estimations des valeurs du paramètre N_0 lorsque celui-ci est très grand : en effet,

pour les grandes valeurs de N_0 , le rapport $W_{\text{spectro}}/W_{\text{disdro}}$ est trouvé égal à 0,5 environ. La paramétrisation de Waldvogel implique alors que les valeurs de N_0 obtenues avec le spectropluviomètre seront environ 2 fois plus faibles que celles obtenues avec le disdromètre.

3. Relations entre les paramètres R , N_0 et λ

Durant la Campagne PAP 81, 29 enregistrements continus représentant plus de 14 heures de fonctionnement ont été obtenus avec le disdromètre pour les 15 journées où l'on a observé de la pluie au sol (pluie de différents types). Pour chaque enregistrement ont été calculés les fonctions d'ajustement (au sens des moindres carrés) de la forme $Y = AX^B$ où X et Y représentent les différents paramètres physiques et radioélectriques de la pluie, ainsi que les coefficients de corrélation entre X et Y . (Campistron *et al.*, 1981*). A partir des résultats obtenus pour ces 29 enregistrements nous avons porté, dans le tableau I, les coefficients de corrélation r (extrêmes et moyens) pour les relations : λ - R , N_0 - R et λ - R/N_0 .

On note, qu'en moyenne, il n'y a pratiquement aucune corrélation entre N_0 et R et qu'elle est assez

* Campistron B., H. Sauvageot, G. Despaux et G. Donnadieu, 1981 : Caractéristiques granulométriques des précipitations à Villanubla au cours de la Campagne PAP 81 – Document de travail I.O.P.G., n° 81-17.

Tableau I

relation	coefficient de corrélation		
	r extrêmes		r moyen
$\lambda - R$	0,95	0,22	0,66
$N_0 - R$	0,95	0,0007	0,22
$\lambda - R/N_0$	0,999	0,997	0,998

faible entre λ et R . Par contre, λ et R/N_0 sont fortement corrélés. Cette forte corrélation nous a conduit à calculer la fonction d'ajustement moyenne

$$\lambda = A(R/N_0)^B$$

de ces 29 enregistrements; avec les unités courantes pour R, N_0 et λ on obtient :

$$A = 0,67 \text{ avec } \Delta A/A < 3 \%$$

et $B = -0,207$ avec $\Delta B/B < 1 \%$.

La très faible variabilité des coefficients A et B nous permet de conclure que la relation entre R, N_0 et λ est pratiquement indépendante du type de pluie. En l'écrivant, sous une autre forme, on obtient :

$$R = N_0/(6,9 \lambda^{4,8}).$$

Remarque :

Hauser et Amayenc (1980), au cours d'observations dans un orage à l'aide d'un radar Doppler en visée verticale, notent aussi qu'il n'y a aucune corrélation significative entre N_0 et R . En prenant en compte la variabilité de N_0 , ils trouvent une relation $\lambda - R/N_0$ implicitement en accord avec l'expression $\lambda - R$ de Marshall-Palmer (1948); sous une autre forme avec les unités courantes, leur relation s'écrit :

$$R = N_0/(8,6 \lambda^5).$$

R, N_0 et λ peuvent être reliés théoriquement par une expression semblable à celle déduite des expériences. Avec les unités utilisées, l'intensité de précipitation s'écrit par définition :

$$R(\text{mm/h}) = 0,0036 (\pi/6) \sum_i n(D_i) D_i^3 V(D_i)$$

où $V(D_i)$ est la vitesse de chute (en m/s) des gouttes de diamètre D_i ; si l'on adopte pour $n(D_i)$ la loi exponentielle :

$$n(D_i) = N_0 e^{-\lambda D_i}$$

et pour $V(D_i)$, comme il est d'usage courant, une loi puissance :

$$V(D_i) = K D_i^\alpha$$

il vient :

$$R(\text{mm/h}) = 0,0036 (\pi/6) K \Gamma(4 + \alpha) N_0 / (\lambda^{4+\alpha})$$

où $\Gamma(4 + \alpha)$ est la fonction d'Euler. En prenant, par

exemple, pour K et α les valeurs proposées par Spilhaus (1948), on obtient :

$$R = N_0 / (10 \lambda^{4,5})$$

relation tout à fait comparable à celle déduite des expériences.

4. Variations de l'intensité de précipitation et des spectres des gouttes

Nous allons voir, à partir de cette relation théorique, comment se traduit une augmentation de l'intensité de précipitation sur la forme des spectres des gouttes. Ces expériences ayant été effectuées au cours de campagnes d'étude d'un site en vue du Projet d'Augmentation des Précipitations, il nous est apparu naturel de nous intéresser à des augmentations de R .

La relation $R = N_0 / (10 \lambda^{4,5})$ permet d'écrire pour 2 instants t_1 et t_2 :

$$R(t_2)/R(t_1) = [N_0(t_2)/N_0(t_1)] \cdot [\lambda(t_1)/\lambda(t_2)]^{4,5} \quad (1)$$

Si l'on adopte, comme il est entré dans l'usage, d'exprimer en dB les rapports des paramètres R, N_0 et λ et d'utiliser le symbole Δ pour traduire les variations temporelles de ces paramètres, (1) s'écrit alors :

$$\Delta R = \Delta N_0 - 4,5 \Delta \lambda$$

ΔR (en dB) positif signifie que R , en passant de l'instant t_1 à l'instant t_2 a augmenté. La figure 3 représente schématiquement (en coordonnées log-normale) les 5 manières possibles pour que 2 spectres correspondent à des augmentations de R . Notons que les représentations 1 et 2 sont respectivement celles de Marshall-Palmer (1948) et de Sekhon et Srivastava (1971).

Comme le spectropluviomètre et le disdromètre voient d'une manière identique les variations temporelles de R, N_0 et λ , les données d'un des 2 appareils suffisent pour étudier ces variations. A partir des résultats obtenus avec le disdromètre, nous avons calculé, *de minute en minute*, les valeurs de $\Delta R, \Delta N_0$ et $4,5 \Delta \lambda$ pour les 2 pluies analysées.

a) Pluie de nuages stratiformes

La figure 4 représente en fonction du temps, d'une part ΔR , d'autre part ΔN_0 et $4,5 \Delta \lambda$; les 5 évolutions possibles des spectres correspondant à des augmentations de R s'y trouvent implicitement et la relation

$$\Delta R = \Delta N_0 - 4,5 \Delta \lambda$$

y est vérifiable avec un bon accord. On voit aussi, vers 17 h 27 et 17 h 34, les 2 changements rapides et importants des spectres des gouttes qui ont fait l'objet d'un précédent article (Donnadieu, 1982).

Au cours de cette averse on dénombre, en une ou plusieurs minutes, 3 augmentations importantes de R (égales ou supérieures à 4 dB). Alors que la 2^e augmentation de R (6,2 dB en une minute) à 17 h 13 est due à une diminution à la fois de N_0 et de λ (schéma 4 de la figure 3), la 1^{re} (4 dB en 2 minutes) à 17 h 09 et 17 h 10 et la 3^e (7,6 dB en 3 minutes) à partir de 17 h 16 corres-

pondent à des augmentations de N_0 avec λ pratiquement constant (schéma 3 de la figure 3). Malgré le nombre limité de cas observés dans cette averse, il semble que l'on peut conclure qu'une augmentation importante de

l'intensité de précipitation est plutôt due à une augmentation de N_0 avec λ presque constant. En d'autres termes, il y aurait translation des spectres suivant le schéma 3 de la figure 3. Notons que ce résultat est en

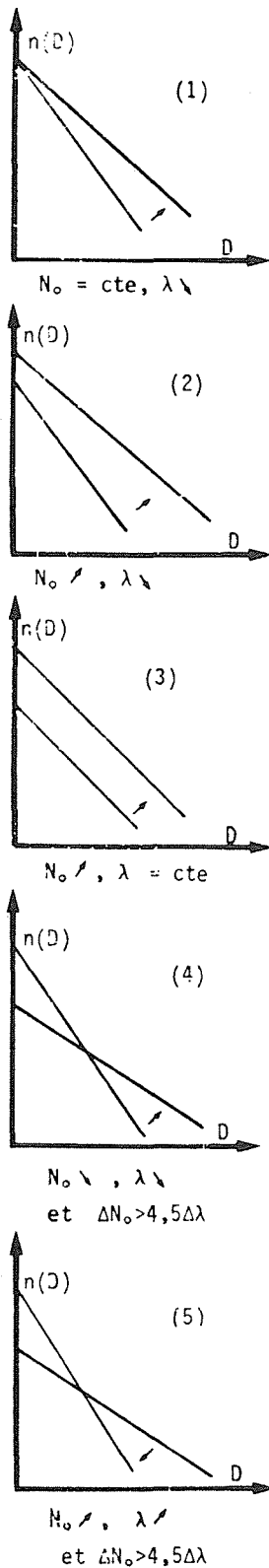


Figure 3 - Evolution des spectres des gouttes correspondant à des augmentations de l'intensité de précipitation (coordonnées : log-normale).

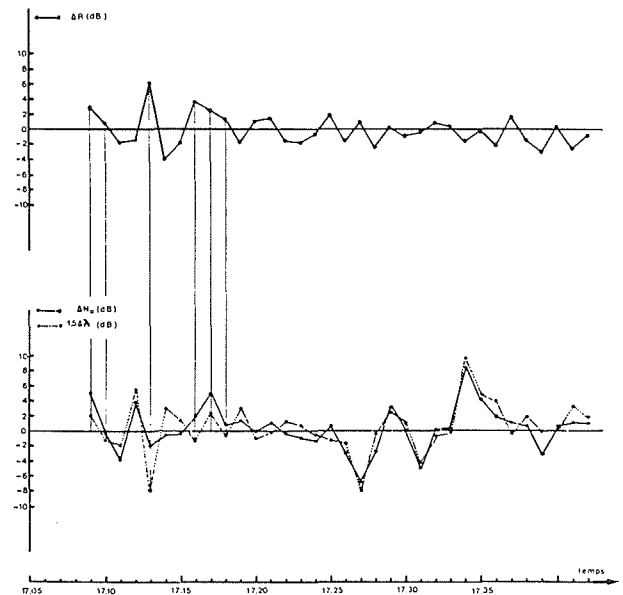


Figure 4 - ΔR , ΔN_0 et $4,5 \Delta \lambda$ pour la pluie de nuages stratiformes du 21 février 1980.

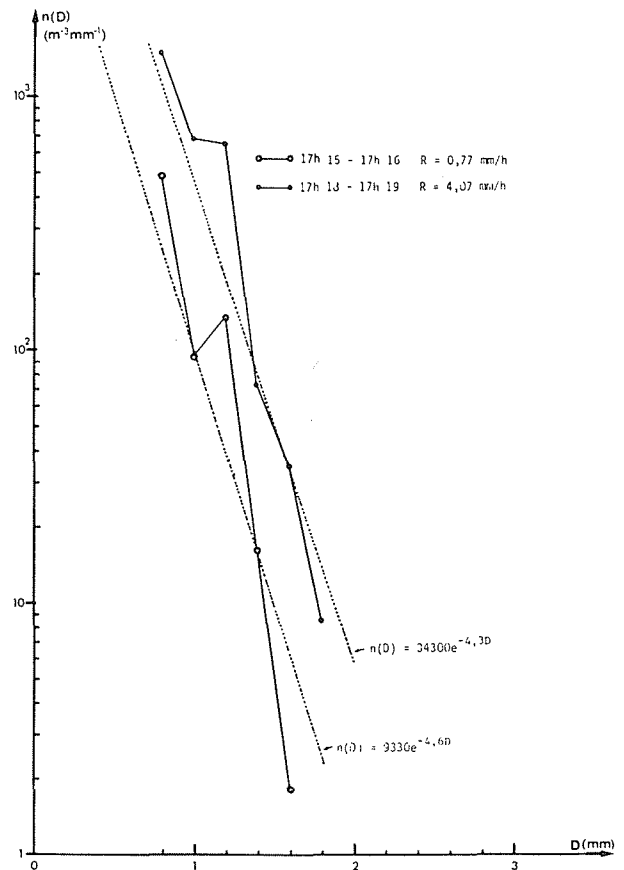


Figure 5 - Spectres des gouttes de pluie correspondant à une augmentation de l'intensité de précipitation de 7,2 dB en 3 minutes au cours de la pluie de nuages stratiformes (les droites en pointillé représentent les distributions $n(D) = N_0 e^{-\lambda D}$ déduites de la paramétrisation de Waldvogel).

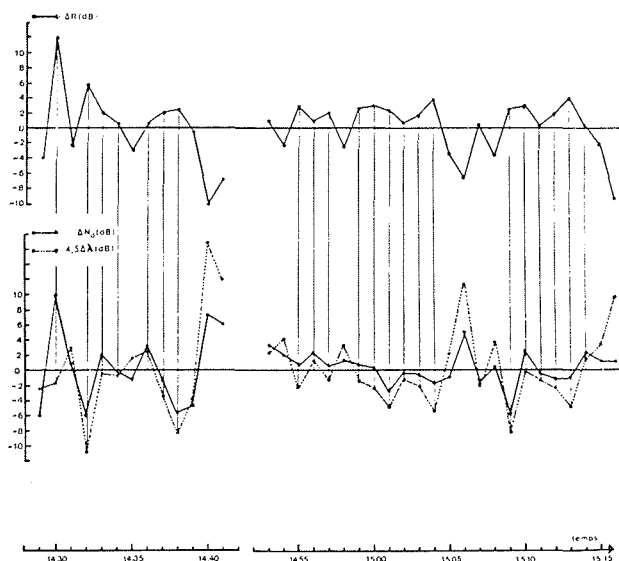


Figure 6 – ΔR , ΔN_0 et $4,5 \Delta \lambda$ pour la pluie de nuages convectifs du 11 mai 1981.

accord avec les distributions des gouttes à 750 mètres au-dessus du sol déduites d'observations par radar Doppler dans des pluies de ce type (Caton, 1966).

Pour illustrer ce résultat, nous avons porté sur la figure 5, les distributions obtenues avec le spectropluviomètre au cours de la 3^e augmentation de R . Les droites en pointillé représentent les fonctions

$$n(D) = N_0 e^{-\lambda D}$$

déduites de la paramétrisation de Waldvogel. Si leur pente est assez comparable, ces droites ne semblent pas représenter au mieux les spectres expérimentaux : en effet, un ajustement à l'œil donnerait une pente plus grande. La gamme peu étendue des diamètres des gouttes observées explique peut être la sous-estimation de λ obtenue par cette paramétrisation.

b) Pluie de nuages convectifs

La figure 6 représente les valeurs de ΔR , ΔN_0 et $4,5 \Delta \lambda$ obtenues pour l'averse du 11 mai 1981. Comme sur la figure 4, les 5 évolutions possibles des spectres correspondant à des augmentations de R s'y trouvent aussi d'une manière implicite et la relation

$$\Delta R = \Delta N_0 - 4,5 \Delta \lambda$$

est encore vérifiable avec un bon accord. On dénombre, sur cette figure, 6 augmentations de R (en une ou plusieurs minutes) supérieures à 4 dB. Alors que la 1^{re} et la 4^e correspondent à des augmentations de N_0 et des diminutions de λ (schéma 2 de la figure 3), les 4 autres sont dues à des diminutions à la fois de N_0 et de λ suivant le schéma 4. On peut donc conclure que pour une pluie de nuages convectifs une augmentation importante de l'intensité de précipitation est plutôt due à une diminution de N_0 et de λ . En d'autres termes, il y aurait rotation des spectres suivant le schéma 4 de la figure 3.

Pour illustrer ce résultat, nous avons porté sur la figure 7, les distributions obtenues avec le spectropluviomètre entre 15 h 01 et 15 h 02 ($R = 3,45$ mm/h) et

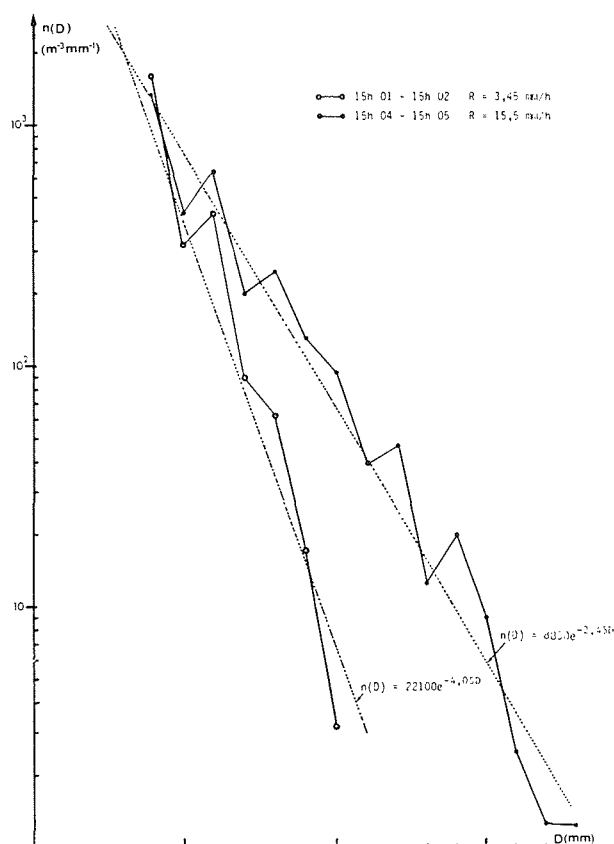


Figure 7 – Spectres des gouttes de pluie correspondant à une augmentation de l'intensité de précipitation de 6,5 dB en 3 minutes au cours de la pluie de nuages convectifs (les droites en pointillé représentent les distributions $n(D) = N_0 e^{-\lambda D}$ déduites de la paramétrisation de Waldvogel).

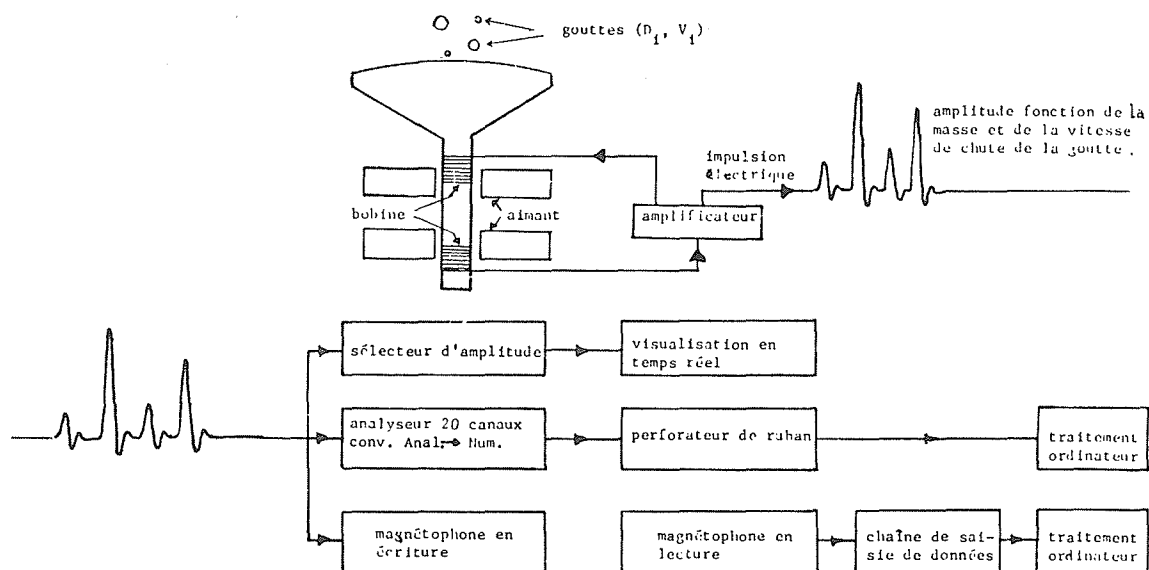
3 minutes après lorsque l'intensité atteint 15,5 mm/h (augmentation de 6,5 dB). Les droites en pointillé représentant les fonctions $n(D) = N_0 e^{-\lambda D}$ déduites de la paramétrisation de Waldvogel sont, pour cet exemple, très représentatives des spectres expérimentaux.

6. Conclusions

Après avoir trouvé que le spectropluviomètre VIDIAZ et le disdromètre de Joss-Waldvogel sont tout à fait aptes à analyser des variations temporelles de l'intensité de précipitation R et des paramètres N_0 et λ caractérisant la fonction de distribution des gouttes de pluie, on a établi la relation qui lie ces paramètres et montré sur 2 exemples qu'une augmentation importante de R est plutôt due à une augmentation de N_0 avec λ presque constant pour une pluie de nuages stratiformes et à une diminution de N_0 et de λ pour une pluie de nuages convectifs. L'analyse en cours de 2 autres journées de mesures semble permettre la confirmation de ces résultats. D'une manière plus générale, on peut alors conclure que toute variation importante d'intensité de précipitation sera plutôt due à une translation des spectres des gouttes pour une pluie de nuages stratiformes et à une rotation de ces spectres pour une pluie de nuages convectifs.

ANNEXE 1

DISDROMÈTRE DE JOSS-WALDVOGEL



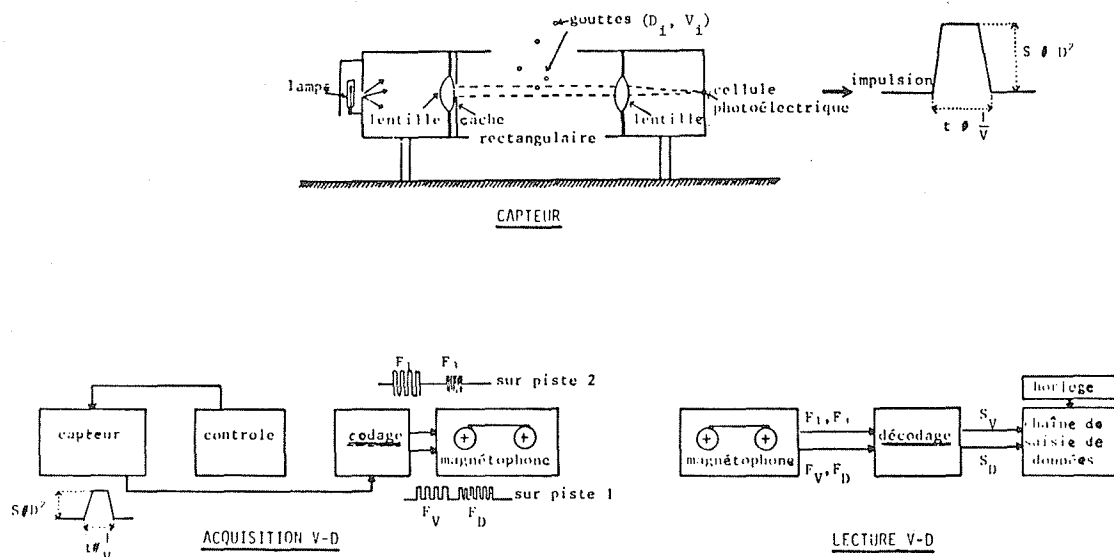
CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

Surface de captation : 50 cm²
 Seuil de détection : 300 μ
 Précision sur D ~ 5 %

Taux de comptage : plusieurs centaines de gouttes/sec.
 Enregistrement automatique sur longue période (ruban)
 Fonctionnement : secteur ou batterie

ANNEXE 2

SPECTROPLUVIOMÈTRE VIDIAZ



CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

Surface de captation : 80 cm²
 Seuil de détection : 600 μ
 Précision sur V et D ~ 4 à 5 %

Taux de comptage maximum ~ 80 à 110 gouttes/sec.
 Durée d'un enregistrement continu : 1 heure
 Fonctionnement autonome

Références

- CATON P.G.E. — A study of raindrop-size distribution in the free atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 92, pp. 15-30 (1966).
- DONNADIEU G. — Mesure de la vitesse terminale des gouttes de pluie au sol à l'aide du spectropluviomètre VIDIAZ. *J. Rech. Atmos.*, 12, pp. 245-259 (1978).
- DONNADIEU G. — Comparison of results obtained with the VIDIAZ spectropluviometer and the Joss-Waldvogel rainfall disdrometer in a "rain of a thundery type". *J. Appl. Met.*, 19, pp. 593-597 (1980).
- DONNADIEU G. — Observation de deux changements des spectres des gouttes de pluie dans une averse de nuages stratiformes. *J. Rech. Atmos.*, 16, pp. 35-45 (1982).
- HAUSER D., AMAYENC P. — Drop-size distributions and vertical air motions in a thunderstorm as inferred from Doppler radar observations at vertical incidence. *J. Rech. Atmos.*, 14, pp. 439-455 (1980).
- JOSS V.J., WALDVOGEL A. — Ein Spektrograph für Niederschlagstropfen mit automatischer Auswertung. *Pure Appl. Geophys.*, 68, pp. 240-246 (1967).
- MARSHALL J.S., PALMER V.M.K. — The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 5, pp. 165-166 (1948).
- SEKHON R.S., SRIVASTAVA R.C. — Doppler radar observations of drop-size distribution in a thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, 28, pp. 983-994 (1971).
- SPHILHAUS A.F. — Raindrop-size, shape and falling speed. *J. Meteor.*, 5, pp. 108-110 (1948).
- WALDVOGEL A. — The N_0 jump of raindrop spectra. *J. Atmos. Sci.*, 31, pp. 1067-1078 (1974).

Discussion

Président : P. GUILLOT

M. AMAYENC. — Dans la méthode de WALDVOGEL, les paramètres N_0 et λ sont obtenus en considérant la distribution exponentielle qui aurait la même réflectivité et la même teneur en eau que celle observée. Ce n'est donc pas vraiment un ajustement et on peut se demander si, dans la réalité, les distributions sont vraiment d'allure exponentielle.

M. DONNADIEU. — Dans la majorité des cas, disons 90 % des cas, les spectres expérimentaux suivent bien une loi exponentielle.

M. AMAYENC. — Les résultats présentés par M. DONNADIEU recourent ce que l'on trouve assez systématiquement avec des radars en tir vertical, à savoir : absence de corrélation entre le paramètre N_0 et l'intensité des précipitations et une bonne

corrélation, au contraire, entre le paramètre de pente λ et le rapport R/N_0 .

M. DONNADIEU. — En ce qui concerne l'expérience sur la pluie de nuages convectifs du 11 mai 1981, on peut constater, sur la figure 2, qu'au début de la deuxième averse (14 h 55 environ), l'augmentation de l'intensité de précipitation correspond plutôt à une augmentation de N_0 à λ constant (ce qui est caractéristique des pluies de type stratiforme), et qu'ensuite seulement, aux environs de 15 heures, on observe une pluie de nature convective avec diminution simultanée de N_0 et de λ . Ces constatations sont en accord avec les observations effectuées vers 13 heures lors du vol de l'avion instrumenté de l'E.E.R.M. : on note en particulier la présence de cumulus, cumulus congestus et cumulonimbus dans une couche de stratocumulus d'épaisseur moyenne 600 mètres.

Abstract

Lateral and rotary movement of raindrop spectra in showers from stratiform and convective clouds

Since the relatively recent appearance of apparatuses which give automatic and continuous information on distribution spectra for rain droplet diameters D_i it has been possible to systematically study diameter variations in function of time. Basing himself on the fact that the majority of these spectra can be approximated by an exponential law $n(D_i) = N_0 e^{-\lambda D_i}$, Waldvogel (1974) proposed a both simple and quantitative parametrisation for representing the variations in time typical of the 2 parameters N_0 and λ . During the 2nd and 3rd International PAP Campaigns (Projet d'Augmentation des Précipitations) the VIDIAZ spectral rain-gauge and a Joss-Waldvogel disdrometer were used to systematically measure droplet spectra of precipitation from stratiform and convective clouds. We have applied this parametrisation to analyse variations over time of N_0 and λ and have compared them with those of precipitation intensities R mm/h) obtained on two apparatuses.

For these two types of rain the 2 devices used are first shown to be entirely suitable for analysing variations over time of these 3 parameters by virtue of their characteristics and for a sampling period set at one minute. These 2 types of rain are then shown to be closely correlated and the relationship linking them is determined; this is found to be extremely similar to the relationship which can be established theoretically. By application of this theoretical relationship to the 2 situations analysed it is then found that a large increase in R is due to an almost constant increase of N_0 to λ in the case of rain from stratiform clouds and to a diminution of N_0 and λ in the case of rain from convective clouds. Finally, in a more general way, the conclusion is drawn that any important variation in precipitation intensity is due to lateral movement of the droplet spectra in the case of rain from stratiform clouds and to a rotary movement of such spectra in the case of rain from convective clouds.