

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME

EXIGENCE PARTIELLE POUR L'OBTENTION DU GRADE DE

MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

( M. Sc. A )

PAR

DU NGUYEN-DANG , B. Sc.

ÉTUDES DES MÉTHODES PAR IMPACT ET À L'HUILE UTILISÉES  
POUR DÉTERMINER LE DIAMÈTRE DES GOUTTELETTES DANS LES  
BROUILLARDS NATURELS ET ARTIFICIELS

DECEMBRE 1987



## *Mise en garde/Advice*

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le docteur Jean-Louis Laforte, professeur titulaire au département des sciences appliquées de l'Université du Québec à Chicoutimi. J'ai bénéficié tout au long de cette recherche de ses conseils judicieux, ses critiques constructives et ses précieuses sources d'informations.

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT.....	II
TABLE DES MATIERES .....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	VI
LISTE DES FIGURES .....	VIII
RESUME .....	XII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....	2
1.1 Mise en situation .....	2
1.2 Objectifs du mémoire.....	5
1.3 Plan du mémoire .....	6
CHAPITRE 2 REVUE DES METHODES DE MESURE DE LA TAILLE DE GOUTTELETTES .....	9
2.1 Classification générale des méthodes.....	9
2.2 Méthode par immersion .....	9
2.3 Méthode par impact .....	13
2.3.1 Revêtements composés de particules microscopiques .....	13
2.3.1.1 Oxyde de magnésium .....	13
2.3.1.2 Noir de fumée .....	16
2.3.1.3 Collargol .....	17
2.3.2 Revêtements composés de matières gélatineuses .....	18
2.3.2.1 Gélatine.....	18
2.3.2.2 Gélatine et Collargol.....	19
2.3.2.3 Gélatine et Naphthol green B .....	19
2.3.3 Revêtement : feuille d'aluminium .....	20

CHAPITRE 3 MONTAGES ET MESURES EXPERIMENTALES....	24
3.1 Génération de gouttelettes .....	24
3.1.1 Spectre de gouttelettes .....	24
3.1.2 Gouttelettes uniformes .....	24
3.2 Photographie des gouttelettes dans l'air ....	27
3.2.1 Description du montage.....	27
3.2.2 Mesure de la taille des gouttelettes .....	29
3.2.3 Précision de la mesure .....	32
3.3 Echantillonnage des gouttelettes par impact ..	32
3.3.1 Dispositif échantillonneur .....	32
3.3.2 Procédures d'échantillonnage .....	36
3.3.3 Dimensions des traces laissées par les gouttelettes .....	36
3.4 Préparation des lamelles .....	39
CHAPITRE 4 MESURE DES GOUTTELETTES AVEC LA METHODE PAR IMMERSION .....	41
4.2 Choix d'une huile .....	41
4.2.1 Stabilité des gouttelettes dans l'huile ...	41
4.2.2 Mobilité des gouttelettes dans l'huile ....	47
4.2.2.1 Déplacement horizontal.....	47
4.2.2.2 Déplacement vertical .....	49
4.2.2.3 Position des gouttelettes dans le film d'huile .....	51
4.2.3 Sélection du type d'huile .....	52
4.3 Vérification de l'uniformité des gouttelettes et de la stabilité du générateur .....	52
4.4 Corrélation entre le diamètre des gouttelettes emprisonnées dans l'huile et celui mesuré à partir d'une photographie .....	55
4.4.1 Jet de gouttelettes uniformes .....	55
4.4.1.1 Effet de la taille des gouttelettes .....	55
4.4.1.2 Effet de la vitesse d'impact .....	57

4.4.2 Spectre de gouttelettes .....	57
4.4.2.1 Procédures expérimentales particulières ..	57
4.4.2.2 Effet de la vitesse .....	62
CHAPITRE 5 MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES AVEC LES METHODES PAR IMPACT.....	66
5.1 Mesures avec le jet de gouttelettes uniformes..	66
5.1.1 Effet du revêtement,du support et de la vitesse d'impact .....	66
5.1.2 Effet de la grosseur des gouttelettes .....	75
5.2 Mesure avec le spectre de gouttelettes .....	82
CHAPITRE 6 DISCUSSIONS .....	85
6.1 Méthode par impact .....	85
6.1.1 Jet de gouttelettes uniformes .....	85
6.1.2 Spectre de gouttelettes .....	87
6.1.3 Sources d'erreurs.....	88
6.1.3.1 L'évaporation des gouttelettes dans l'air	88
6.1.3.2 L'erreur statistique .....	91
6.1.3.3 L'erreur dans la détermination du diamètre de gouttelettes .....	91
6.1.3.4 Captation des gouttelettes sur la lamelle .....	92
6.1.3.5 L'effet de la superposition des gouttelettes .....	99
6.2 Méthode à l'huile .....	101
6.2.1 L'évaporation des gouttelettes dans l'air .	104
6.2.2 La dissolution des gouttelettes dans l'huile	104
6.2.3 L'erreur statistique .....	105
6.2.4 L'erreur dans la détermination du diamètre	105
6.2.5 L'effet du coefficient de captation des gouttelettes .....	105
6.2.6 L'effet de la coalescence des gouttelettes	105
CHAPITRE 7 CONCLUSION .....	113
REFERENCES .....	117

## LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE 2 METHODE DE MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES

Tableau 2.1 Comparaison des facteurs de correction k correspondant aux différentes méthodes par impact .....	22
--	----

## CHAPITRE 3 MONTAGES ET MESURES EXPERIMENTALES

Tableau 3.1 Diamètres des gouttelettes uniformes produites en fonction de la fréquence et de l'amplitude des oscillations imposées à l'aiguille.....	28
Tableau 3.2 Précision dans la détermination de la taille des gouttelettes .....	33
Tableau 3.3 Vitesse du jet d'air mesurée en fonction de la pression .....	34
Tableau 3.4 Evaluation de la précision dans la détermination de la taille des impressions .....	37

## CHAPITRE 4 MESURES DES GOUTTELETTES AVEC LA METHODE PAR IMMERSION

Tableau 4.1 Densité et viscosité des huiles choisies pour l'étude de la stabilité des gouttelettes .....	42
Tableau 4.2 Diamètres moyens des gouttelettes produites par le générateur de gouttelettes uniformes mesurés lors de trois échantillonnages (mesures effectuées sur photos à 96X ) .....	53

## CHAPITRE 5 MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES AVEC LA METHODE PAR IMPACT

Tableau 5.1 Résumé des principales méthodes de mesure par impact déjà expérimentées avec leur facteur de correction .....	67
---	----

## CHAPITRE 6 DISCUSSIONS

Tableau 6.1 Valeur moyenne du facteur de correction k mesuré avec un jet de gouttelettes uniformes de 46 à 149 $\mu$ m à des vitesses d'impact de 4 à 30 m/s .....	86
--	----

Tableau 6.2 Diamètres volumiques moyens déterminés par la méthode au collargol à 17, 25 et 35m/s .....	98
Tableau 6.3 Diamètres volumiques moyens d'un spectre de gouttelettes déterminé par la méthode à l'huile à 4 et 17m/s .....	111

## LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE 3 MONTAGES ET MESURES EXPERIMENTALES

Figure 3.1	Schéma du générateur de gouttelettes uniformes .....	26
Figure 3.2	Montage servant à photographier les gouttelettes dans l'air .....	30
Figure 3.3	Photo de deux gouttelettes prise avec le montage décrit à la figure 3.2 .....	31
Figure 3.4	Montage utilisé pour la mesure des diamètres des gouttelettes par impact .....	35
Figure 3.5	Traces des gouttelettes obtenues avec la méthode au collargol sur verre .....	38

## CHAPITRE 4 MESURES DES GOUTTELETTES AVEC LA METHODE PAR IMMERSION

Figure 4.1	Gouttelettes uniformes de 153 microns déposées sur un film d'huile Aeroshell SAE 100W .....	43
Figure 4.2	Variation de la taille des gouttelettes uniformes de 70 microns observées pour les quatre types d'huile expérimentés .....	45
Figure 4.3	Photos de gouttelettes entre 5 et 65 $\mu\text{m}$ dans l'huile Aeroshell SAE 100W <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 30 secondes après l'impact</li> <li>b) 180 secondes après l'impact .....</li> </ul>	46
Figure 4.4a	Photographie de gouttelettes 65 $\mu\text{m}$ dans l'huile Aeroshell SAE 100W 29 secondes après l'impact : <ul style="list-style-type: none"> <li>* déplacement de 28 <math>\mu\text{m}</math> par rapport au repère ..</li> </ul>	48
Figure 4.4b	Photographie de gouttelettes 65 $\mu\text{m}$ dans l'huile Aeroshell SAE 100W 370 sec après l'impact: <ul style="list-style-type: none"> <li>* déplacement de 167 <math>\mu\text{m}</math> par rapport au repère ..</li> </ul>	48
Figure 4.5	Photo de gouttelettes dans l'huile: <ul style="list-style-type: none"> <li>a,b : gouttelettes en suspension dans l'huile</li> <li>c,d,e,f : gouttelettes aplatis sur la surface de la lameille .....</li> </ul>	50
Figure 4.6	Photo des gouttelettes de 153 $\mu\text{m}$ en suspension dans l'huile (vue de profil de la couche d'huile) .....	51

Figure 4.7 Photo des gouttelettes entre 95 et 97 microns à la sortie du générateur de gouttelettes uniformes .....	54
Figure 4.8 Corrélation entre le diamètre réel des gouttelettes uniformes mesuré par photographie et celui de la gouttelette emprisonnée dans le film d'huile .....	56
Figure 4.9 Rapport entre le diamètre des gouttelettes mesuré par photographie et celui déterminé par la méthode à l'huile .....	58
Figure 4.10 Montage servant à photographier et échantillonner les spectres de gouttelettes .....	59
Figure 4.11a Photographie de gouttelettes se déplaçant dans l'air .....	61
Figure 4.11b Photographie de gouttelettes provenant de la même source captées dans l'huile .....	61
Figure 4.12 Rapport entre le diamètre volumique moyen déterminé à partir des photographies et celui déterminé par la méthode à l'huile .....	63
Figure 4.13 Comparaison des spectres de gouttelettes mesurés par la méthode photographique et par la méthode à l'huile .....	64
 CHAPITRE 5 MESURES DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES AVEC LES METHODES PAR IMPACT	
Figure 5.1 Photographies des traces des gouttelettes obtenues avec différents revêtements et substrats :	
a) collargol sur verre	
b) collargol sur film d'estar	
c) noir de fumée sur verre .....	69
Figure 5.2 Revêtement noir de fumée avec les impressions déformées à la vitesse d'impact de 25m/s ....	70
Figure 5.3 Facteur de correction k mesuré pour différentes combinaisons " revêtement-substrat " avec des gouttelettes uniformes de 118µm .....	71
Figure 5.4 Effet de la vitesse d'impact sur le facteur de correction k observé pour différents revêtements avec de gouttelettes uniformes de 69µm .....	73

Figure 5.5	Effet de la vitesse d'impact sur le facteur de correction $k$ observé pour différents revêtements avec des gouttelettes uniformes de $149\mu\text{m}$ .....	74
Figure 5.6	Effet de la grosseur des gouttelettes sur le facteur de correction mesuré à $15\text{m/s}$ avec différents revêtements .....	76
Figure 5.7	Effet de la grosseur des gouttelettes sur le facteur de correction mesuré à $25\text{m/s}$ avec différentes revêtements .....	77
Figure 5.8	Facteur de correction $k$ mesuré en fonction de la vitesse avec les gouttelettes uniformes de $46$ à $149$ microns percutant sur un revêtement de collargol sur une lamelle de verre .....	79
Figure 5.9	Facteur de correction $k$ mesuré en fonction de la vitesse avec les gouttelettes uniformes de $46$ à $149$ microns percutant sur un revêtement de collargol sur film d'estar .....	80
Figure 5.10	Facteur de correction $k$ mesuré en fonction de la vitesse avec les gouttelettes uniformes de $46$ à $149$ microns percutant sur un revêtement de noir de fumée sur une lamelle de verre .....	81
Figure 5.11	Facteur de correction $k$ mesuré en fonction de la vitesse avec un spectre de gouttelettes .....	83

## CHAPITRE 6 DISCUSSIONS

Figure 6.1	Diminution du diamètre des gouttelettes par évaporation dans l'air .....	90
Figure 6.2	Coefficient de captation des gouttelettes sur une plaque de $25\text{mm}$ de largeur ( d'après Langmuir ,1946 ).....	93
Figure 6.3	Spectre de gouttelettes mesuré à $17\text{m/s}$ avec la méthode au collargol avant et après la correction du coefficient de captation de gouttelettes..	95
Figure 6.4	Spectre de gouttelettes mesuré à $25\text{m/s}$ avec la méthode au collargol avant et après la correction du coefficient de captation des gouttelettes .....	96

Figure 6.5 Spectre de gouttelettes mesuré à 35m/s avec la méthode au collargol avant et après la correction du coefficient de captation de gouttelettes .....	97
Figure 6.6 Cas types de superposition de gouttelettes....	100
Figure 6.7 Comparaison des résultats publiés obtenus par la méthode à l'huile et les méthodes non - captives .....	103
Figure 6.8 Comparaison des histogrammes de gouttelettes déterminés avec la méthode à l'huile et avec le FSSP par Stallabrass (a) et par holographie par Gates (b) .....	106
Figure 6.9 Spectre de gouttelettes mesuré avec la méthode à l'huile à 4m/s avant et après la correction de l'effet du coefficient de captation et celui de la superposition des gouttelettes .....	109
Figure 6.10 Spectre de gouttelettes mesuré avec la méthode à l'huile à 17m/s avant et après la correction de l'effet du coefficient de captation et celui de la superposition des gouttelettes.....	110

## RESUME

Les méthodes par impact utilisant un support recouvert d'une substance déformable constituent des méthodes relativement simples et rapides pour déterminer la taille des gouttelettes dans les brouillards naturels et artificiels. Cependant l'exactitude des mesures obtenues avec ces différentes méthodes, en particulier la méthode à l'huile, a récemment été l'objet d'une remise en cause. D'autre part, les effets de la vitesse d'impact et de la grosseur des gouttelettes sur la taille des traces laissées sur un revêtement n'ont pas toujours été étudiés d'une façon systématique. Pour cette raison, le présent travail a été entrepris en vue d'étudier d'une part la corrélation entre les diamètres des gouttelettes mesurés à l'aide des méthodes par impact les plus courantes et les diamètres réels déterminés à partir d'une photographie et d'autre part les effets potentiels des facteurs tels la vitesse d'impact et la taille des gouttelettes. Les mesures ont été réalisées avec des gouttelettes de 6 à  $149\mu\text{m}$  se déplaçant à des vitesses allant de 4 à 30 m/s. Deux sources sont utilisées, l'une donnant un jet de gouttelettes uniformes et l'autre un spectre uniformément distribué.

Pour réaliser ces objectifs, nous avons mis au point un générateur de gouttelettes uniformes et une technique

permettant de photographier les gouttelettes dans l'air. Le comportement des gouttelettes dans l'huile est également étudié afin de choisir le type d'huile le plus stable. Ensuite, nous avons étudié la méthode à l'huile et deux méthodes par impact avec le jet de gouttelettes uniformes et avec le spectre de gouttelettes. Cette étape nous a permis de déterminer précisément la taille des gouttelettes emprisonnées dans l'huile et celles des traces laissées sur les revêtements.

Avec la méthode au collargol sur verre, en utilisant le jet de gouttelettes uniformes, le diamètre des traces est d'environ trois fois le diamètre réel de la gouttelette et cela pour toutes les vitesses d'impact et pour toutes les grossesures mentionnées. En utilisant un spectre de gouttelettes, si on ne tient pas compte des traces laissées par la superposition des gouttelettes, le diamètre volumique moyen obtenu est également d'environ trois fois celui du spectre de gouttelettes.

Avec la méthode à l'huile, en utilisant les gouttelettes uniformes, les gouttelettes captées et en suspension dans l'huile gardent à peu près le même diamètre qu'elles ont dans l'air. Cependant, avec un spectre de gouttelettes, le diamètre volumique moyen calculé à partir des gouttelettes captées

est surestimé de 1,2 à 1,6 fois par rapport à celui déterminé à partir d'une photographie. Cette différence est attribuée principalement à la présence des grosses gouttelettes formées par coalescence qu'on ne peut identifier et de ce fait éliminer.

La méthode du noir de fumée donne des résultats similaires à ceux obtenus avec la méthode à l'huile mais avec une fluctuation beaucoup plus considérable. Cette fluctuation devient importante particulièrement aux basses vitesses et les superpositions ne peuvent être facilement identifiées. D'autre part ce type de revêtement est fragile à vitesse d'impact plus élevée que 25m/s, ce qui rend la méthode difficile à utiliser.

En conclusion, la méthode au collargol ressort ici comme étant la seule méthode parmi les méthodes étudiées qui donne un rapport constant entre le diamètre des gouttelettes et celui des traces. Elle représente donc une méthode simple et satisfaisante pour déterminer la taille des gouttelettes.

# CHAPITRE

1

Chapitre 1  
INTRODUCTION

1.1 MISE EN SITUATION

Il existe un grand nombre de méthodes qui ont été développées pour déterminer la taille des gouttelettes. Parmi ces méthodes, les méthodes par immersion et par impact sont couramment utilisées par les chercheurs pour déterminer la taille des gouttelettes d'eau dans les brouillards naturels et artificiels.

La méthode par immersion consiste à capturer les gouttelettes échantillonnées dans un liquide visqueux comme l'huile de castor, le silicone, ou un mélange huile-paraffine. On photographie les gouttelettes ainsi capturées et on détermine leur grosseur à partir des photos agrandies à un taux de grossissement convenable. Avec cette méthode on considère que les gouttelettes capturées ont la même grosseur que les gouttelettes originales. Cette méthode offre l'avantage de ne pas nécessiter de calibration et de demander un équipement simple. Par contre, les gouttelettes capturées s'évaporent rapidement et pour cette raison, elles doivent donc être photographiées dans un délai assez court de l'ordre de la minute.

La méthode par impact, pour sa part, consiste à faire percuter les gouttelettes sur un substrat recouvert d'une mince couche d'une substance visqueuse comme la gélatine (Garland, 1971; Jiusto, 1967) ou un produit constitué de particules microscopiques comme l'oxyde de magnésium (Maruyama, 1954; May, 1950), le noir de fumée (Vonnegut, 1946), le collargol (Godard S., 1960), ou une mince couche d'un colorant bleu "water-blue dye" (Okita T., 1958). Après l'impact, la gouttelette laisse une impression permanente et le diamètre de l'impression est proportionnel au diamètre réel de la gouttelette. Les avantages de cette méthode par rapport à la méthode par immersion sont que les lamelles peuvent être conservées très longtemps et que les mesures peuvent être faites directement sur les échantillons à l'aide d'un microscope sans avoir recours à la méthode photographique. Cette méthode, cependant, nécessite la détermination d'un facteur de calibration, le facteur de correction, qui est le rapport entre le diamètre réel de la gouttelette et le diamètre de l'impression. Ce dernier est très souvent déterminé en comparant le diamètre volumique moyen mesuré par la méthode par immersion avec celui des traces laissées par des gouttelettes produites par des gicleurs hydrauliques ou pneumatiques. Comme les gouttelettes sont multidimensionnelles, cette détermination nécessite la mesure d'un grand nombre d'impressions ce qui demande beaucoup de temps. Le résultat ne représente de plus qu'une valeur statistique.

Vonnegut (1946), Neiburger (1949), et Clague (1965) ont utilisé la méthode au noir de fumée dans les brouillards naturels en utilisant le même facteur de correction que celui déterminé en laboratoire sans tenir compte des effets des conditions propres au milieu de mesure. Or, Squires (voir Mossop, 1983) a trouvé que le facteur de correction avec une lamelle recouverte de noir de fumée diminue avec une augmentation de la vitesse d'impact et de la grosseur des gouttelettes.

Avec le développement de nouveaux appareils de mesure, la méthode par immersion a fait l'objet d'une remise en cause. Gall et Floyd (1971), en utilisant simultanément une technique holographique et la méthode par immersion, ont trouvé que le diamètre moyen des gouttelettes mesuré par la méthode à l'huile est 1,6 fois plus élevé que celui des gouttelettes mesuré par la technique holographique. Plus récemment, Keller (1978) en utilisant un compteur de particules type "FSSP" (Forward Scattering Spectrum Probe) en parallèle avec la méthode à l'huile, a trouvé que le diamètre mesuré par la méthode à l'huile est 1,8 fois plus élevé que le diamètre mesuré avec le FSSP. Enfin, Stallabrass (1986) a trouvé que le diamètre volumique moyen obtenu par la méthode à l'huile est de 1 à 2 fois plus élevé que celui mesuré par le FSSP.

Tous ces travaux soulèvent deux questions importantes:

1- Est-ce que la méthode par immersion a besoin ou non d'un facteur de correction ?

2- Est-ce que la vitesse d'impact, la grosseur des gouttelettes ou le substrat affecte le facteur de correction des méthodes par immersion et par impact ?

## 1.2 OBJECTIFS DU MEMOIRE

Le présent mémoire vise essentiellement à répondre à ces deux questions, d'où les deux objectifs suivants:

1- Déterminer précisément quel est le facteur de correction de la méthode à l'huile. A cette fin, nous avons envisagé de comparer la grosseur d'une gouttelette mesurée précisément par la méthode photographique à celle mesurée avec les méthodes par immersion et par impact.

2- Déterminer les effets de la vitesse des gouttelettes, de leur grosseur et des substrats. De façon à éviter les fluctuations statistiques propres à un spectre de gouttelettes, nous avons choisi d'utiliser des gouttelettes uniformes pour vérifier les effets de chacun de ces paramètres.

De façon à réaliser les deux objectifs proposés, on devra:

1- Concevoir et construire un générateur de gouttelettes uniformes.

2- Mettre au point une technique photographique précise et rapide pour déterminer la grosseur des gouttelettes.

3- Réaliser un montage où l'on peut faire varier la vitesse des gouttelettes.

### 1.3 PLAN DU MEMOIRE

Le présent travail se divise en sept chapitres : le premier chapitre fait ressortir les problèmes rencontrés dans la mesure de la taille des gouttelettes. Le chapitre 2 passe en revue les principaux travaux réalisés sur la mesure de la taille des gouttelettes par immersion et par impact. Au chapitre 3 les montages expérimentaux sont décrits entre autres le générateur de gouttelettes uniformes , le montage photographique, le dispositif échantillonneur des gouttelettes et la procédure utilisée pour déterminer avec exactitude et rapidité le facteur de correction avec les deux méthodes de mesure. Le chapitre 4 présente les résultats de l'étude de la méthode par immersion. On tentera de répondre à la question à savoir si cette méthode a besoin ou non d'un facteur de correction en étudiant le comportement des gouttelettes d'eau dans l'huile. Les effets du type d'huile, de la vitesse d'impact et de la grosseur des gouttelettes seront également étudiés sur le rapport " grosseur réel des gouttelettes/ grosseur des gouttelettes dans l'huile " . Le chapitre 5

présente les effets sur le facteur de correction des méthodes par impact de divers facteurs comme la vitesse d'impact, la grosseur des gouttelettes et des substrats. Au chapitre 6, les résultats seront analysés et discutés en fonction des sources d'erreurs potentielles propres à chaque méthode. Finalement, le mémoire se termine avec le chapitre 7 qui présente les conclusions générales de l'étude.

# **CHAPITRE**

**2**

## Chapitre 2

### REVUE DES METHODES DE MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES

#### 2.1 CLASSIFICATION GENERALE DES METHODES

Il existe un grand nombre de méthodes qui ont été développées pour la mesure de la taille des gouttelettes d'eau dans les brouillards naturels et artificiels. Simmons (1984) a classé ces méthodes en deux groupes, les méthodes "captives" et les méthodes "non-captives" :

- les méthodes "captives" nécessitent la captation des gouttelettes soit par immersion, par impact, par solidification, par momentum, par décharge électrique et par transfert de chaleur.

- les méthodes "non-captives" ne nécessitent pas la captation des gouttelettes. Ce sont : la méthode photographique, la méthode holographique et la méthode au Laser.

Dans le présent chapitre, nous parlerons surtout de la méthode par immersion ainsi que des principales méthodes par impact couramment utilisées.

#### 2.2 METHODE PAR IMMERSION

Fuchs et Petrjanoff (1937) ont été les premiers à utiliser la méthode par immersion pour déterminer le spectre de gouttelettes des brouillards naturels. Le principe de la méthode

développée par ces deux auteurs consiste à emprisonner les gouttelettes dans un liquide visqueux sans les dissoudre. La technique se compose d'abord d'exposer au brouillard une lamelle recouverte d'un mélange de vaseline et d'huile minérale, et par la suite, d'examiner les gouttelettes échantillonées au microscope où elles sont comptées et mesurées.

Une variante de cette méthode est celle développée par Golitzine (1951) qui a exposé des lamelles de verre recouvertes d'une couche d'huile Shell Spirax 250 devant un jet de gouttelettes. Les gouttelettes capturées dans la couche d'huile sont photographiées et mesurées au microscope.

En raison de la simplicité de l'équipement nécessaire pour effectuer les mesures, les méthodes par immersion sont encore couramment utilisées par les chercheurs pour déterminer la taille des gouttelettes dans les brouillards et dans les nuages. Les chercheurs ont utilisé différents types de liquide d'immersion qu'ils jugeaient être les plus appropriés pour éviter la disparition des gouttelettes. Les principaux liquides utilisés sont : l'huile de castor (Warner, 1969), le silicium (Edward, 1955; Pinnick, 1981), l'huile lubrifiante (Golitzine, 1951). Dans cette méthode, on considère que les gouttelettes ne sont pas déformées par les liquides utilisés et pour cette raison, aucun facteur de correction n'est appliqué.

Avec les récents progrès en optique et en électronique, plusieurs nouveaux appareils ont été développés pour usage en laboratoire ainsi que sur les avions. Ces appareils utilisent des méthodes "non-captives" pour déterminer les spectres de gouttelettes des nuages. D'après Gayet (1976), parmi ces nouveaux appareils, il y a les compteurs de Ryan, de Sylverman et de Knollenberg.

Plusieurs études ont été réalisées pour comparer les mesures données par la méthode par immersion avec les mesures de ces nouveaux appareils. Plus récemment, Gall et Floyd (1971), en utilisant la technique holographique pour déterminer le diamètre moyen d'un spectre de gouttelettes, ont obtenu des valeurs de 1,6 fois inférieures à celles obtenues avec la méthode à l'huile. La technique holographique consiste à envoyer des gouttelettes dans une section d'essai illuminée par deux faisceaux Laser. La présence des gouttelettes provoque une perturbation de la diffusion d'un faisceau Laser. On enregistre le régime perturbé et le régime de référence (non-perturbé) sur une pellicule de haute résolution. Le film, une fois développé, donne un hologramme qui permet de reconstituer l'image des gouttelettes en trois dimensions. A l'aide d'une caméra vidéo on peut fixer ces images sur l'écran d'un téléviseur pour déterminer ensuite la grosseur des gouttelettes.

Keller (1977), utilisant des compteurs de gouttelettes du type OAP (Optical Array Probe) et du type FSSP (Forward Scattering Spectrum Probe), a trouvé que le diamètre volumique moyen (diamètre correspond à 50% du volume accumulé) mesuré par ces compteurs étaient environ 1,8 fois plus petit que la valeur obtenue par la méthode par immersion. Il explique cette différence par l'évaporation et la coalescence des plus petites gouttelettes dans le liquide.

Gates (1983) a de nouveau comparé les diamètres mesurés par la technique holographique à ceux obtenus avec la méthode par immersion (huile Shell Spirax 250). En comparant les résultats donnés par les deux méthodes, Gates a trouvé que la dimension mesurée par la méthode holographique était de 1,6 à 1,8 fois plus faible que celle obtenue par la méthode par immersion. Il a conclu que la méthode par immersion surestime la dimension des gouttelettes en raison de la coalescence ou de l'évaporation des gouttelettes captées.

Stallabrass (1986), utilisant un compteur de gouttelettes de type FSSP (Forward Scattering Spectrum Probe), a trouvé lui aussi que, dépendant du spectre de gouttelettes, le diamètre volumique moyen obtenu par la méthode par immersion est de 1 à 2 fois plus élevé que celui mesuré par le FSSP. Contrairement à Keller et Gates, Stallabrass attribue cette différence aux erreurs causées par l'hétérogénéité du faisceau Laser et par la calibration du compteur FSSP.

### 2.3 METHODE PAR IMPACT

La méthode par impact consiste à faire percuter des gouttelettes sur une lamelle enduite d'un revêtement déformable. Les gouttelettes d'eau, après l'impact, laissent des traces permanentes qui sont proportionnelles à leur grosseur de sorte qu'on peut les examiner au microscope et en mesurer les diamètres. Si le rapport entre la grosseur des gouttelettes et le diamètre des traces est connu, on peut déterminer la grosseur des gouttelettes à partir de la mesure de ces traces. Selon le type de revêtement utilisé, les méthodes par impact peuvent être classées en 3 groupes :

- les revêtements composés de particules microscopiques : oxyde de magnésium, noir de fumée, collargol..
- les revêtements composés de matières gélatineuses : gélatine, gélatine et Napthol green B,..
- les revêtements métalliques : feuille d'aluminium

#### 2.3.1 REVETEMENTS COMPOSES DE PARTICULES MICROSCOPIQUES

##### 2.3.1.1 OXYDE DE MAGNESIUM

Cette méthode utilise une lamelle de verre recouverte d'une mince couche d'oxyde de magnésium. Les gouttelettes d'eau, après l'impact sur le revêtement, laissent des impressions bien définies et permanentes de sorte qu'on peut examiner et mesurer leur diamètre avec un microscope. Le diamètre des impressions laissées sur le revêtement n'est pas réellement

celui des gouttelettes originales et il faut introduire un facteur de correction. Le premier utilisateur de cette méthode est May (1950), qui introduit dans sa méthode un facteur de correction donnant le rapport des dimensions "gouttelettes/ impressions" pour la gamme de diamètres se situant entre 10 et 200  $\mu\text{m}$  (cette gamme est caractéristique des gouttelettes de nuages).

Pour la détermination du facteur de correction, May utilise des gouttelettes produites à l'aide d'un disque tournant à haute vitesse et il considère que la grosseur de ces gouttelettes est uniforme. Pour évaluer le facteur de correction, la lamelle est divisée en trois parties :

- une première partie recouverte d'une mince couche d'oxyde de magnésium.
- une seconde partie recouverte d'une couche d'un mélange huile-vaseline.
- une dernière partie laissée vierge.

Les traces des gouttelettes sur la partie vierge ont une forme plano-convexe. On mesure leur diamètre et leur épaisseur à l'aide d'un microscope et par calculs, on déduit le diamètre réel. Cette méthode s'appelle la "méthode de longueur-focale", elle ne s'applique pas pour des gouttelettes d'eau mais seulement pour des gouttelettes d'un liquide non volatil

comme l'huile. Après l'exposition de la lamelle, on applique sur la seconde partie de la lamelle une autre couche du même mélange huile-vaseline mais plus chaud, ce qui a pour effet de faire fondre la couche déjà existante et de forcer les gouttelettes à reprendre leur forme sphérique initiale. Après un délai d'au moins 24 heures, on mesure au microscope la dimension de ces gouttelettes qui correspond à la dimension réelle des gouttelettes. On mesure aussi au microscope les empreintes des gouttelettes laissées sur la première partie de la lamelle, celle recouverte d'oxyde de magnésium. Sur chaque partie de la lamelle, on prend le diamètre moyen de dix gouttelettes en prenant soin d'éliminer les gouttelettes déformées, les gouttelettes hors de la gamme considérée ou encore celles qui ne sont pas très bien définies. Le facteur de correction  $k$  est déterminé en faisant le rapport du diamètre moyen mesuré au microscope au diamètre moyen des traces laissées sur le film d'oxyde de magnésium. Dans certain cas, on utilise la méthode " longueur-focale " pour fin de vérification.

D'après les résultats de May, le facteur de correction  $k$  avec la méthode de  $MgO$  vaut en moyenne 0,86. De plus, il est indépendant de la vitesse d'impact et de la grosseur des gouttelettes.

Maruyama (1954) a utilisé cette méthode avec un revêtement  $MgO$  pour dimensionner des gouttelettes de quelques micro-

mètres à 600  $\mu\text{m}$ . Ce dernier a trouvé que le facteur de correction diminue de 0,60 à 0,44 lorsque les gouttelettes passent de 10 à 600  $\mu\text{m}$ .

### 2.3.1.2 NOIR DE FUMEE

La méthode du noir de fumée a été développée en 1946 par le Département de météorologie du MIT ( Massachusetts Institute of Technology ) (Vonnegut, 1946). La méthode consiste à laisser percuter des gouttelettes sur une lamelle de verre recouverte d'une mince couche de noir de fumée produite par une lampe au kérosène. Après exposition de la lamelle, les gouttelettes laissent des impressions permanentes, faciles à identifier au microscope.

La calibration a été déterminée avec des gouttelettes d'une solution "non-évaporée" ( eau additionnée de 10 % de LiCl ) percutant à 40m/s deux lamelles : l'une recouverte d'une couche de noir de fumée, l'autre recouverte de vaseline. Le facteur de correction trouvé par le MIT est de 0,8 , ce facteur est principalement utilisé lors d'essais en vol pour déterminer la taille des gouttelettes d'eau dans les nuages.

Pour le même type de revêtement, Squires (voir Mossop, 1983) a trouvé que le facteur de correction est de 0,42 pour les gouttelettes de 10  $\mu\text{m}$  et de 0,22 pour les gouttelettes

de 1000  $\mu\text{m}$  à une vitesse d'impact de 57 m/s. A une vitesse de 77m/s, le facteur de correction est de 0,35 et 0,22 respectivement.

### 2.3.1.3 COLLARGOL

La méthode au collargol a été mise au point par S. Godard (1960) où la couche de revêtement est une solution diluée de collargol dans l'eau (10 %) appliquée sur une lamelle de verre ou sur un film d'acétate de cellulose. La gouttelette d'eau donne une trace composée d'une plage circulaire encerclée d'un anneau très sombre.

L'étalonnage est obtenu en recueillant sur un réseau de fils d'araignée les gouttelettes produites par pulvérisation. Les fils d'araignées sont préalablement placés dans une enceinte où l'air est saturé de vapeur d'eau. Un dispositif approprié permet d'appliquer très délicatement la lamelle recouverte de collargol contre les fils d'araignée. L'opération est filmée à l'aide d'une caméra-microscope. Le film obtenu montre successivement les images des gouttelettes puis celles des traces laissées sur la lamelle au collargol. Les empreintes laissées sur le film de collargol sont de 3 à 4 fois plus élevées que les gouttelettes captées sur les fils d'araignée, ce qui donne un facteur de correction compris entre 0,31 et 0,37 .

D'après les travaux de Godard, la nature du support (lamelle de verre ou film d'acétate de cellulose) ainsi que la concentration en collargol ne modifient pas de manière sensible le résultat final. Godard a montré également que la valeur de  $k$  établie pour une vitesse d'impact pratiquement nulle (gouttelettes immobilisées sur fils) reste encore applicable à une vitesse d'impact de 6 m/s.

### 2.3.2 REVETEMENT COMPOSE DE MATERIES GELATINEUSES

#### 2.3.2.1 GELATINE

La technique utilisant une pellicule de gélatine a été développée par le Groupe de Météorologie de l'Université de l'Etat de Pennsylvanie ( Jiusto, 1965) pour mesurer les spectres de gouttelettes d'eau dans les nuages. La solution étalée sur les lamelles de verre est une solution aqueuse de 15 à 20 % de gélatine. Les empreintes des gouttelettes d'eau laissées sur les lamelles après l'impact apparaissent comme des cratères dont le diamètre est proportionnel à la dimension original des gouttelettes.

La calibration de la méthode a été réalisée dans une soufflerie en plaçant deux lamelles côte-à-côte, l'une recouverte d'une couche de gélatine et l'autre d'un film d'huile de silicium. Le diamètre mesuré sur cette dernière est considéré comme le diamètre réel. Les gouttelettes plus grosses que 50  $\mu\text{m}$  sont produites par un gicleur et les vitesses varient de 25 à 60 m/s. Pour leur part, les gouttelettes inférieures

à 50  $\mu\text{m}$  sont produites par un tube capillaire chargé électriquement. La vitesse d'impact maximale atteinte par ces gouttelettes est de 20 m/s .

Les diamètres des traces dans la gélatine sont en moyenne deux fois plus grands que ceux des gouttelettes dans la couche d'huile, ce qui donne un facteur de correction de 0,5. Enfin, les résultats montrent que le facteur de correction est indépendant de la vitesse d'impact et de la grosseur des gouttelettes.

### 2.3.2.2 MELANGE GELATINE ET COLLARGOL

Cette méthode présentée par L.Godard (1959), utilise une solution aqueuse de gélatine( 5 % ) mélangée à une solution aqueuse de collargol( 5 % ). Le mélange est appliqué sur une plaque de verre ou sur un support flexible où il sèche rapidement.

La calibration est effectuée en comparant les mesures des diamètres à celles obtenues par la méthode par immersion en utilisant une huile de silicium. Le facteur de correction k déterminé est compris entre 0,40 et 0,45 .

### 2.3.2.3 GELATINE ET NAPHTHOL GREEN B

H.F. Lidell et N.W. Wootten (1957) utilisent une solution Naphthol Green B ( 5% ) avec une solution aqueuse de gélatine (4 % ) pour préparer le revêtement. Ce mélange est versé sur une lamelle de verre, drainé par le côté et finalement séché.

Pour trouver le facteur de correction, ils ont utilisé un brouillard artificiel dans une enceinte fermée. Les gouttelettes de ce brouillard sont échantillonnées par un impacteur en cascade à 4 lamelles de verre, la moitié de chaque lamelle étant recouverte du mélange gélatine-naphthol green B. Immédiatement après l'échantillonnage, on retire les lamelles et on verse sur la moitié recouverte d'huile une autre couche du même mélange afin d'éviter l'évaporation des gouttelettes. Ensuite, par la méthode microscopique, on détermine le diamètre du spectre de gouttelettes donné par le film d'huile et celui donné par la couche sensible Naphthol green B. Le facteur de correction trouvé ou le rapport des deux mesures varie de 0,37 à 0,42 et est indépendant de la grosseur et de la vitesse d'impact des gouttelettes.

### 2.3.3 REVETEMENT : FEUILLE D'ALUMINIUM

Dans les années 60, la compagnie Meteorology Research Inc. (Californie) a commercialisé un instrument pour échantillonner les grosses gouttes de nuages. Il consiste essentiellement en un cylindre dont la surface comporte des rainures très fines ( 4 rainures du millimètre ). On recouvre cette surface avec une feuille d'aluminium. Lorsqu'une goutte frappe cette feuille, elle enfonce la feuille dans les rainures du cylindre créant une empreinte très visible sur la feuille d'aluminium. La dimension de cette empreinte dépend de la grosseur de la goutte.

La calibration de cet appareil a été réalisée au Naval Research Laboratory ( Washington D.C ) par R.M. Shecter et R.G. Russ (1970). D'après ces derniers, pour des gouttes de 0,5 à 5 mm et des vitesses d'impact de 67 à 118 m/s, le facteur de correction pour cette méthode varie de 0,77 à 1,00. Le tableau 2.1 compare les valeurs du facteur de correction k trouvées avec les différentes méthodes de mesure de la taille des gouttelettes décrites précédemment.

En résumé :

1- La méthode par immersion suppose que les gouttelettes captées dans un liquide visqueux ne se déforment pas et conservent leur grosseur initiale. Cette méthode nécessite de photographier rapidement les gouttelettes avant qu'elles ne disparaissent.

2- Les méthodes par impact sont plus faciles à mettre en œuvre que la méthode à l'huile et assurent des échantillons permanents. Ces méthodes nécessitent cependant la détermination d'un facteur de correction, ce facteur de correction étant indépendant de la grosseur des gouttelettes et de la vitesse par impact. Par contre, certains chercheurs ont trouvé qu'il varie en fonction de ces deux paramètres.

3- L'effet du substrat sur le facteur de correction n'a pas attiré l'attention des chercheurs.

Tableau 2.1 Comparaison des facteurs de correction k  
 correspondant aux différentes méthodes  
 par impact

AUTEUR	METHODE	FACTEUR DE CORRECTION k		
		Types gouttes	Mesure du diam. réel	Valeur k
May	MgO	Uniforme	Immersion	0,86
Vonnegut	Noir de fumée	Spectre	Immersion	0,80
Godard	Collargol	Spectre	Fils d'araignée	0,31 à 0,37
Jiusto	Gélatine	Spectre	Immersion	0,5
Lidell & Wootten	Gélatine et Naphthol Green	Spectre	Immersion	0,42 à 0,37
Shecter	Feuille d'aluminium	Spectre	Mgo	0,77 à 1,0

$$k = \frac{\text{diamètre (gouttelette)}}{\text{diamètre (impression)}}$$

# CHAPITRE

3

## Chapitre 3

### MONTAGES ET MESURES EXPERIMENTALES

Les mesures des diamètres réels des gouttelettes et de leurs traces laissées sur les différents revêtements expérimentés ont nécessité la construction de différents montages ainsi que la mise au point de techniques de mesure appropriées. Ce chapitre présente une description des montages expérimentaux utilisés ainsi que des diverses manipulations impliquées dans la préparation des lamelles.

#### 3.1 GENERATION DES GOUTTELETTES

Deux sortes de gouttelettes ont été produites : les gouttelettes uniformes et un spectre de gouttelettes.

##### 3.1.1 SPECTRE DE GOUTTELETTES

Le spectre de gouttelettes est obtenu à partir des gouttelettes produites par un humidificateur à l'air frais Hanscraft modèle 3972 fabriqué par Hanscraft Co. Inc. Les gouttelettes de ce spectre sont comprises entre 5 et 65 micromètres pour une teneur en eau d'environ 0,1 à 0,3 g/m<sup>3</sup>.

##### 3.1.2 GOUTTELETTES UNIFORMES

La production de gouttelettes uniformes a nécessité la fabrication d'un générateur construit à partir du modèle décrit par Mason (1963).

La figure 3.1 présente une vue générale des diverses composantes du générateur :

- un ballon A rempli d'eau relié à une seringue B munie d'une valve de contrôle.

- une aiguille hypodermique C à laquelle est fixée un tube capillaire flexible D qui a un diamètre extérieur de 130 micromètres et un diamètre intérieur de 30 micromètres, produisant une fine colonne de liquide.

- un fausset en plexiglas E dont l'une des extrémités est cimentée à la membrane d'un haut-parleur F. Près de l'autre extrémité, on perce un trou G de 300 micromètres de diamètre pour y laisser traverser le tube capillaire D. Cet arrangement a pour but de transmettre au tube capillaire la vibration mécanique de la membrane du haut-parleur.

- le générateur d'impulsions H ( General Radio modèle GR1340 ) est employé pour faire vibrer la membrane du haut-parleur à une fréquence de 0,2 Hz à 20 MHz.

Lorsque la seringue est alimentée en eau avec des impulsions mécaniques à des fréquences entre 100 et 400 Hz, un ou deux jets de gouttelettes uniformes sont projetés dans l'air par l'extrémité du tube capillaire. En synchronisant la fréquence d'illumination du stroboscope à la fréquence de résonnance du tube capillaire, le jet d'eau principal apparaît immobile montrant une succession de gouttelettes identiques équidistantes entre elles.

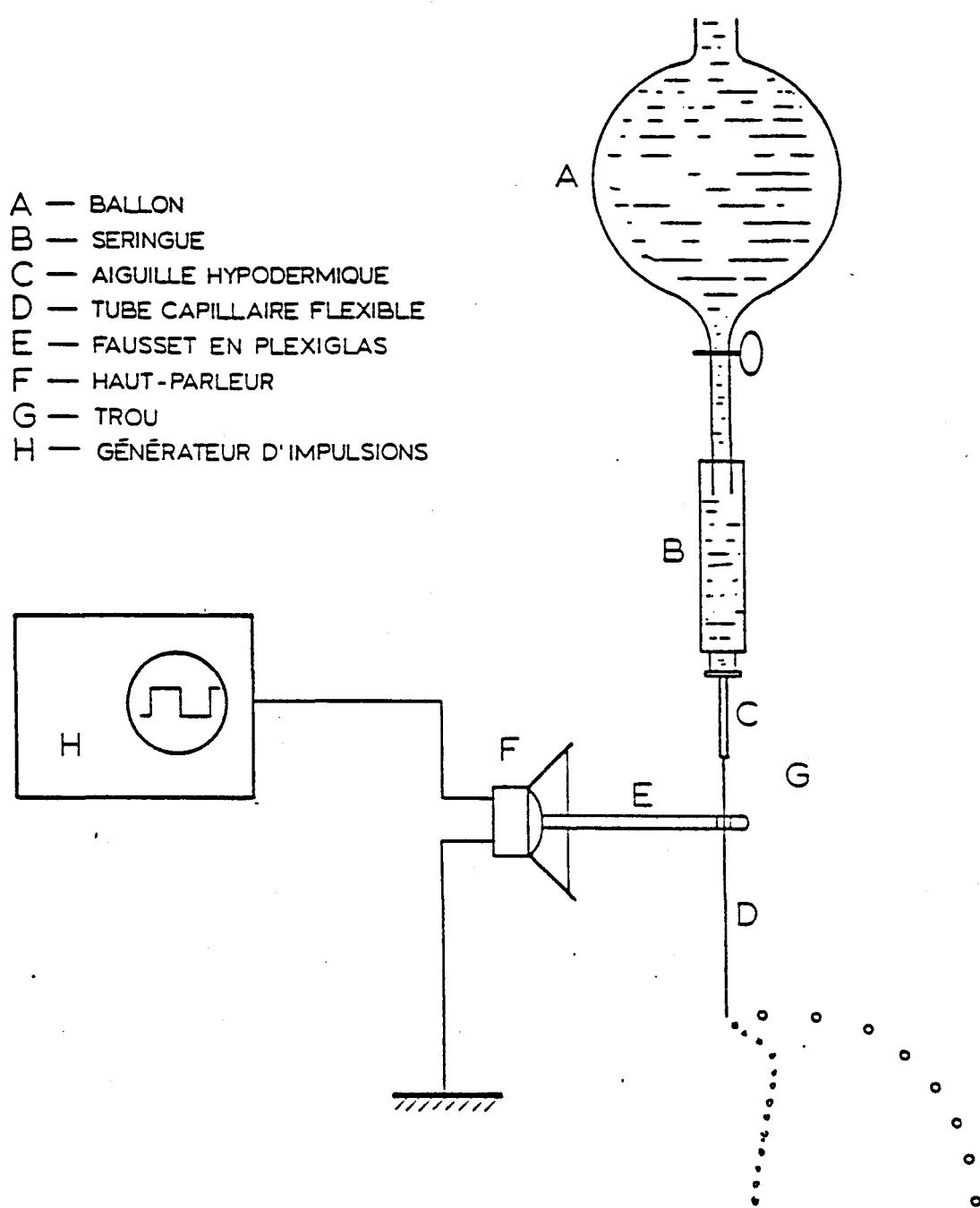


Figure 3.1 Schéma du générateur de gouttelettes uniformes

D'après Mason (1963), le générateur peut produire des gouttelettes uniformes de 80 à 200 micromètres à une fréquence de vibration d'environ de 300 Hz avec une aiguille hypodermique standard no.30 ( diamètre de 140 micromètres ). Nous avons expérimenté ce type d'aiguille mais elle a eu tendance à casser après quelques heures d'utilisation. Afin de corriger ce problème, l'aiguille a été rallongée par un tube capillaire flexible D. Cette modification a augmenté la durabilité du générateur et la gamme de gouttelettes produites varie entre 43 et 165 micromètres. On fait varier la grosseur des gouttelettes produites en jouant sur la fréquence, la durée et l'amplitude des vibrations de l'aiguille. Le tableau 3.1 présente la taille des gouttelettes générées avec le générateur opéré dans trois conditions de fonctionnement.

### 3.2 PHOTOGRAPHIE DES GOUTTELETTES DANS L'AIR

#### 3.2.1 DESCRIPTION DU MONTAGE

Le montage qui sert à photographier les gouttelettes dans leur état libre dans l'air est schématisé à la figure 3.2. Ce montage a été placé dans une chambre à l'abri des courants d'air et des vibrations naturelles mécaniques. Il se compose des parties suivantes :

- une caméra-microscope E modèle Wild W400 ; il s'agit d'un microscope avec objectif de distance focale variable pouvant donner des grossissements de 6,3 à 32X. Une caméra F est intégrée à ce microscope de sorte que l'on peut examiner

Tableau 3.1 Diamètre des gouttelettes uniformes  
 produites en fonction de la fréquence et  
 de l'amplitude des oscillations imposées à  
 l'aiguille

FREQUENCE DE VIBRATION (Hz)	AMPLITUDE (Volts, pour une charge de 50Ω)			
	2	4	6	8
	Diamètre des gouttes générées (μm)			
200	n.d.	n.d.	n.d.	69
250	79	123	137	149
		46 *	87 *	84 *
300	95	118	155	153
		65 *	83 *	94 *

a/ \* gouttelettes du jet secondaire

b/ le diamètre des gouttelettes a été déterminé  
 au microscope.

et prendre des photos simultanément. Le temps d'exposition de la caméra est ajustée automatiquement sur un pupitre de contrôle.

- un stroboscope A modèle Strobotac 1538A pouvant illuminer à un rythme de 110 à 15000 c/s .

- un receptacle B en bois limitant le faisceau lumineux du stroboscope.

- un condenseur optique C .

### 3.2.2 MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES

Le générateur est orienté de façon que les gouttelettes soient dirigées sur un plan perpendiculaire à l'axe de l'objectif de la caméra. Lorsque la fréquence d'illumination est un multiple de la fréquence de résonnance du tube capillaire, les gouttelettes apparaissent immobiles et la mise au point est alors très facile à exécuter. Grâce à un oculaire muni d'un micromètre, on peut évaluer directement la grosseur des gouttelettes au microscope.

Pour avoir des photos des gouttelettes lorsque la mise au point est faite, on ajuste la fréquence d'illumination du stroboscope à 110 Hz et on prend des photos par la technique du " simple éclair ". Le film utilisé est le Kodak Technical Pan film 2415, le développement est fait avec le développeur D.19 pour maximiser les contrastes. Nous obtenons pour chaque négatif une ou deux images des gouttelettes, celles-ci apparaissent comme des cercles parfaits. Seules les images

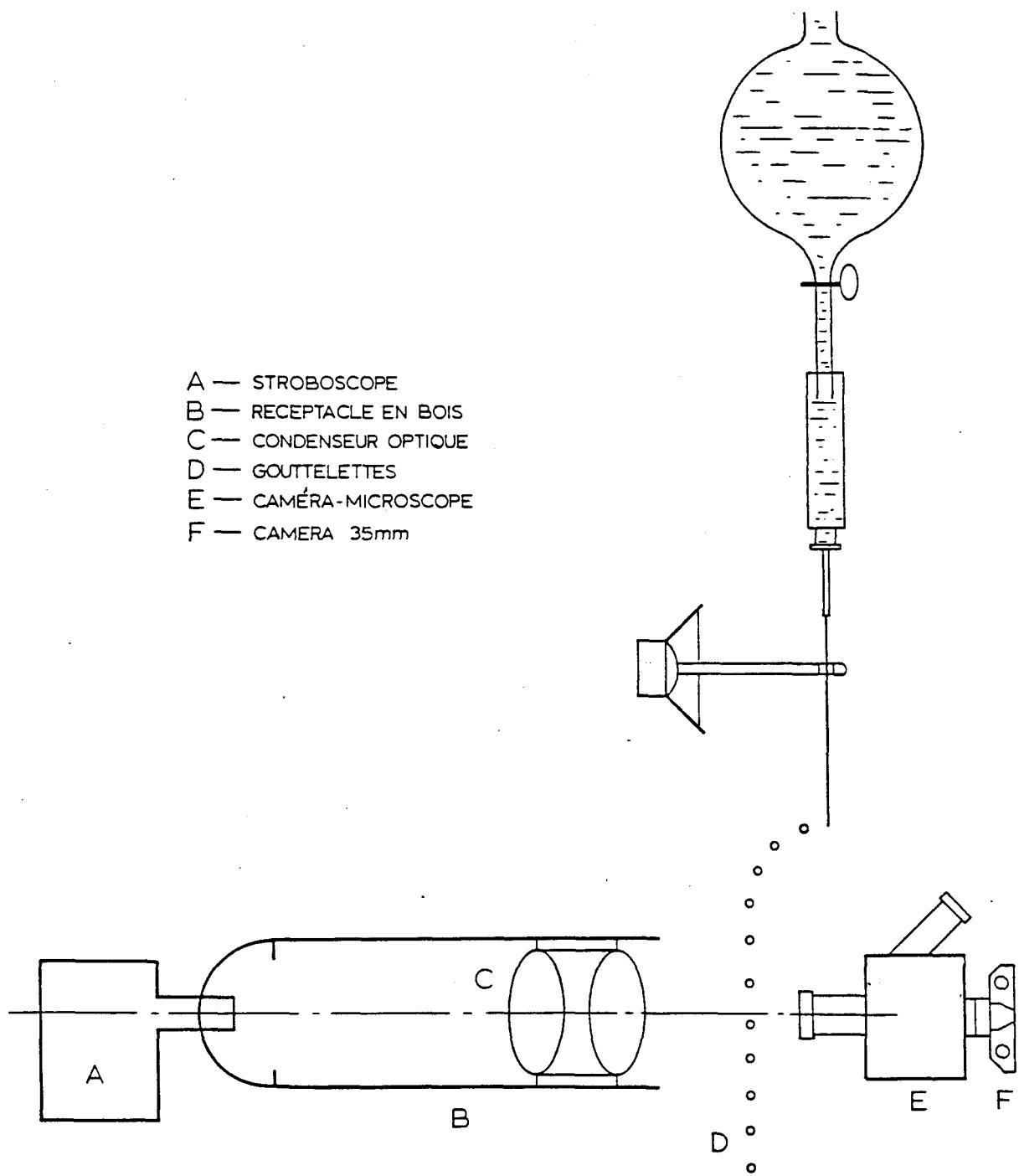


Figure 3.2 Montage servant à photographier les gouttelettes dans l'air

parfaitement nettes sont sélectionnées pour les mesures du diamètre.

La figure 3.3 montre l'image de deux gouttelettes uniformes photographiées dans l'air. Un micromètre photographié dans la même condition permet de mesurer la taille des gouttelettes. En raison de la forme sphérique de la gouttelette, de la diffraction de la lumière et de la photo prise à contre-lumière, on distingue toujours un point blanc plus ou moins prononcé au centre de chaque image d'une gouttelette.

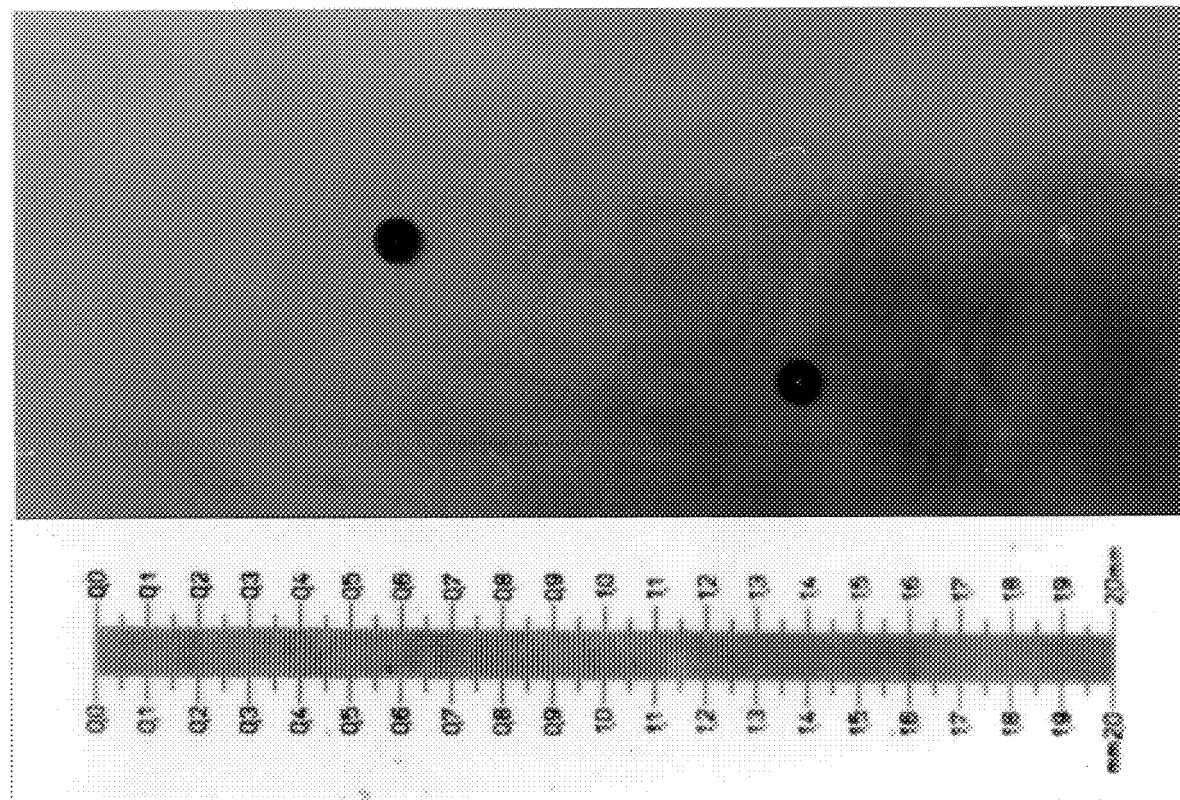


Figure 3.3 Photo de deux gouttelettes prise avec le montage décrit à la figure 3.2

### 3.2.3 PRECISION DE LA MESURE

Le diamètre des gouttelettes à l'état libre est déterminé soit directement au microscope à l'aide d'un micromètre soit sur les photographies des gouttelettes. Dans les deux cas, l'erreur de lecture que l'on peut commettre peut être évaluée à une demi-division du micromètre. Dans le cas d'une photo agrandie à 96X, chaque division représente environ 10 micromètres, l'erreur est de 5 micromètres. Dans le cas d'un grossissement de 209X au microscope, chaque division représente 5 micromètres, ce qui donne une imprécision de 2,5 micromètres.

Le tableau 3.2 représente le pourcentage d'erreur estimé lors de la mesure des gouttelettes pour les deux grossissements utilisés. D'après ce tableau, la méthode consistant à mesurer le diamètre à partir du négatif est environ deux fois plus précise que celle effectuée directement au microscope. C'est pourquoi, avec des gouttelettes de moins de 100 micromètres, pour minimiser l'erreur dans la mesure de la taille des gouttelettes, nous avons mesuré les diamètres sur les négatifs à l'aide d'un microscope.

## 3.3 ECHANTILLONNAGE DE GOUTTELETTES PAR IMPACT

### 3.3.1 DISPOSITIF ECHANTILLONNEUR

La figure 3.4 montre le montage utilisé pour faire percuter les gouttelettes sur les lamelles recouvertes de différentes substances. Il se compose des éléments suivants :

Tableau 3.2 Précision dans la détermination de  
la taille des gouttelettes

METHODE CHOISIE		
Diam μm	$\Delta d/d = \pm 0,5 \text{ div}/d$ %	%
46	11	5,1
69	7	3,4
84	6	2,8
94	5	2,5
118	4	2,0
149	3	1,6

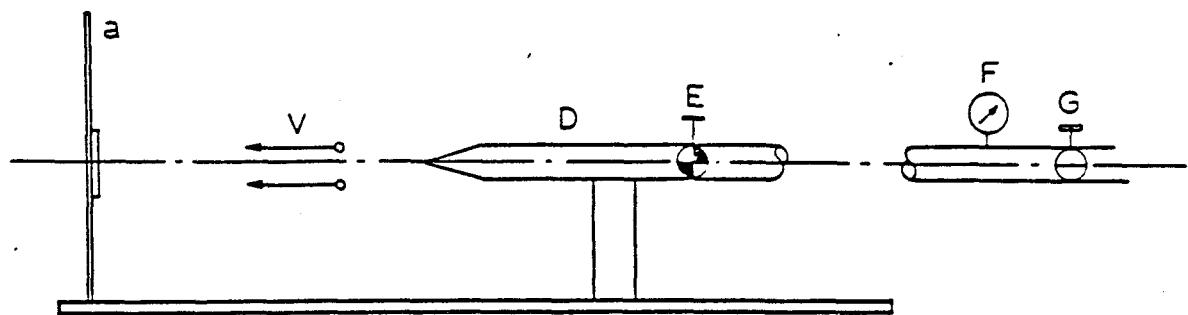
- une sortie d'air comprimé D.
- un valve à manette E pour contrôler instantanément le jet d'air produit.
- un régulateur de pression.
- un manomètre F ( 0 à 550 kPa ).
- un support de lamelle A situé à l'opposé du bec d'air comprimé, à une distance de 30cm sur son axe. Quand on relâche la manette, un jet d'air projette les gouttelettes sur la lamelle b avec une vitesse constante. Cette vitesse varie entre 4,0 et 30 m/s dépendamment de la pression d'air.

Le tableau 3.3 donne les vitesses mesurées en fonction de la pression d'air. Les vitesses d'écoulement ont été mesurées par le vélocimètre TSI modèle 1650(type anémomètre à fil chaud), et la dimension des lamelles utilisées est de 25mm de longueur et de 3mm de largeur.

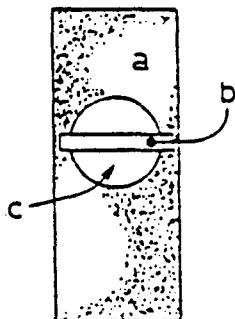
Tableau 3.3 Vitesse du jet d'air mesurée  
en fonction de la pression

Pression (kPa)	Vitesse de l'écoul. (m/s)
10	4,0
69	8,0
165	15,2
290	23,0
310	25,0
414	29,7

VUE  
DE PROFIL



VUE  
DE FACE



- a - SUPPORT DE LAMELLE
- b - LAMELLE AVEC REVÉTEMENT DÉFORMABLE
- c - TROU
- D - SORTIE D'AIR COMPRIMÉ
- E - VALVE À MANETTE
- F - MANOMÈTRE
- G - RÉGULATEUR DE PRESSION

Figure 3.4 Montage utilisé pour la mesure des diamètres des gouttelettes par impact

### 3.3.2 PROCEDURES D'ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage des gouttelettes d'eau avec le dispositif d'échantillonnage (figure 3.4) se fait en quatre étapes :

- étape 1 : réglage de la pression d'air pour produire un jet d'air à une vitesse désirée ( comprise entre 4,0 et 30 m/s).

- étape 2 : fixation sur un support de la lamelle recouverte d'une couche sensible appropriée ( Collargol, huile, noir de fumée ).

- étape 3 : orientation de l'échantillonneur dans la direction perpendiculaire au déplacement des gouttelettes pour les recueillir.

- étape 4 : détermination du diamètre des impressions laissées par les gouttelettes sur la couche de revêtement à l'aide du microscope Nachet dont l'oculaire est muni d'un micromètre intégré. Le grossissement utilisé est de 209X.

La figure 3.5 montre l'impression des gouttelettes sur une couche de collargol sur verre.

### 3.3.3 DIMENSIONS DES TRACES LAISSEES PAR LES GOUTTELETTES

On détermine le diamètre des impressions des gouttelettes sur les lamelles au microscope à l'aide d'un micromètre intégré dans l'oculaire. Comme mentionné à la section 3.2.3, l'erreur

de lecture est au maximum de  $\pm 0,5$  division du micromètre. Le tableau 3.4 présente l'erreur relative estimée pour les impressions sur collargol, comparée à l'erreur relative estimée pour la méthode à l'huile.

Tableau 3.4 Evaluation de la précision dans la détermination de la taille des impressions

$\Delta D/D$ (%)	DIAMETRE DES GOUTTELETTES ( $\mu\text{m}$ )					
	46	69	84	95	118	149
Impressions sur collargol $D \approx 3d$ $\Delta D/D=2,4/d$	1,7%	1,1%	0,9%	0,85%	0,68%	0,54%
Gouttes dans l'huile $D \approx d$ $\Delta D/D=2,4/d$	5,1%	3,4%	2,8%	2,5%	2,0%	1,6%

D : diamètre des impressions ou des gouttes dans l'huile

d : diamètre des gouttes mesuré par la méthode photographique

On constate d'après ce tableau que le pourcentage d'erreur fait lors de la lecture avec la méthode à l'huile est environ 3 fois plus élevé que celui fait avec la méthode au collargol.

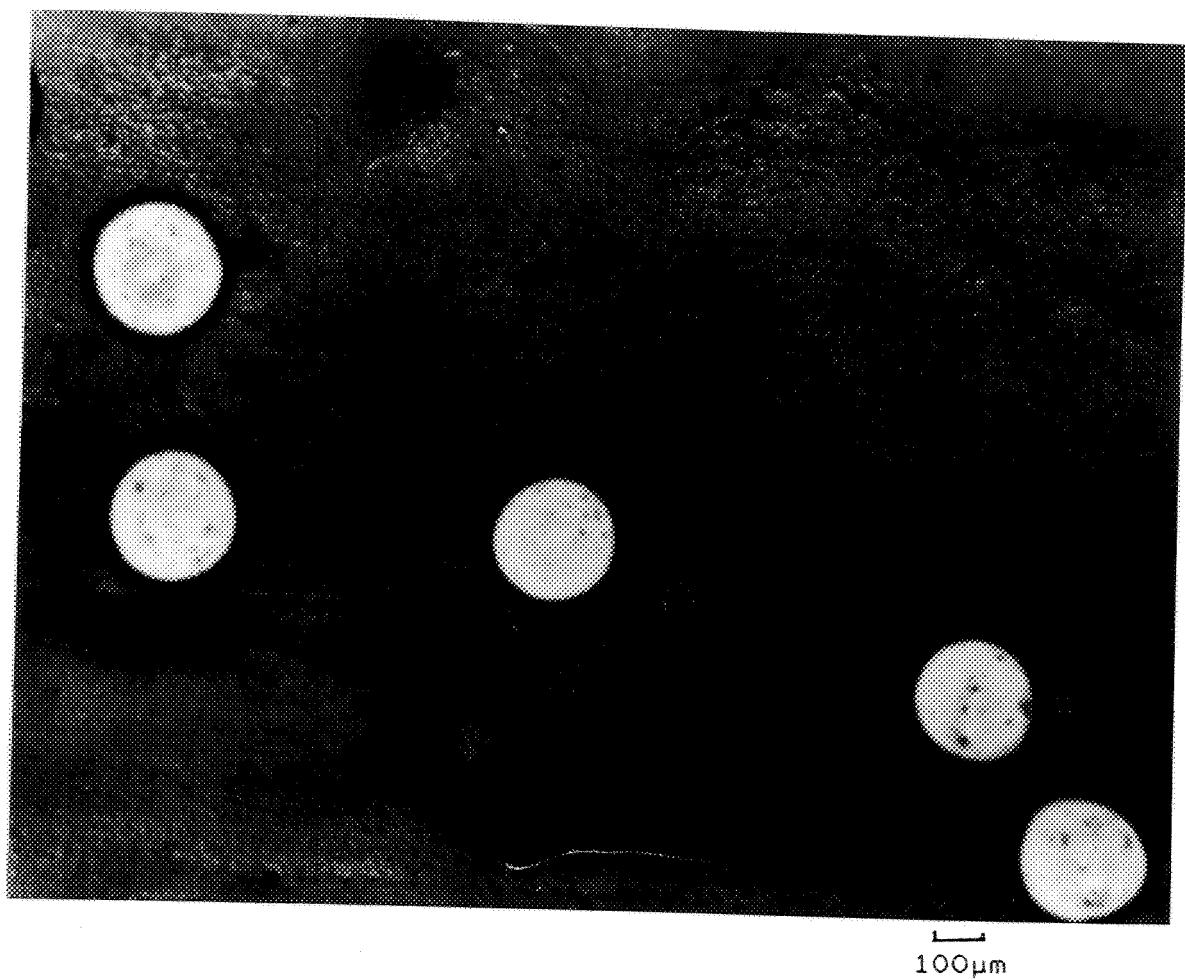


Figure 3.5 Traces des gouttelettes obtenues avec la méthode au collargol sur verre

### 3.4 PREPARATION DES LAMELLES

- l'huile sur verre : une couche d'huile est étalée sur une lamelle de verre et ensuite laissée au repos quelques heures avant l'expérimentation. L'épaisseur de la couche d'huile obtenue est d'environ 600 micromètres.

- Collargol sur verre : on recouvre une lamelle de verre avec une solution de collargol 10% diluée avec de l'eau distillée. Cette couche sèche rapidement et la lamelle peut être utilisée quelques secondes plus tard.

- Collargol sur film d'estar : c'est un support flexible fait à partir du film Kodak Technical Pan Film non exposé, développé à l'aide du développeur D.19. Cette procédure donne un film transparent que l'on peut découper en morceau de 25X3mm. On recouvre un côté de ce film avec la solution de collargol décrit ci-haut. Cette solution sèche beaucoup plus rapidement sur ce film que sur la lamelle de verre.

- noir de fumée : on obtient une couche de noir de fumée relativement uniforme en passant rapidement une lamelle au-dessus d'une flamme de kérosène. Chaque lamelle est comparée à une lamelle témoin pour garantir l'uniformité de la couche de noir de fumée lors des essais ultérieurs.

# CHAPITRE

4

Chapitre 4

MESURE DES GOUTTELETTES AVEC LA METHODE

PAR IMMERSION

Les premières expériences ont été effectuées avec la méthode par immersion et le premier travail consistait à choisir une huile où les gouttelettes présentent la plus grande stabilité possible.

4.2 CHOIX D'UNE HUILE

4.2.1 STABILITE DES GOUTTELETTES DANS L'HUILE

Afin d'avoir une idée générale de la stabilité des gouttelettes dans le film d'huile, nous avons expérimenté tout d'abord quatre huiles différentes. Le tableau 4.1 classe les quatre types d'huile expérimentés en fonction de leur viscosité et leur densité. Tous ces huiles sont des huiles de lubrification de préférence à toute autre sorte d'huile. En effet, d'après les observations de Golitzine (1951), si avec les huiles végétales ou animales les gouttelettes se dissolvent rapidement, elles restent stables avec l'huile de lubrification contenant des additifs et le délai est suffisamment long pour les photographier.

Pour ces tests, on utilise le générateur de gouttelettes uniformes. On laisse d'abord tomber les gouttelettes sur une lamelle de verre (25 X 75 mm) divisée en quatre portions égales, chacune d'elle étant recouverte d'un type d'huile

différent. On examine ensuite le film d'huile au microscope à un grossissement variant de 6,3 à 32X. Différents diamètres de gouttelettes compris entre 46 et 153 micromètres ont été étudiés.

Tableau 4.1 Masse volumique et viscosité des huiles choisis pour l'étude de la stabilité des gouttelettes

No	NOM COMMERCIAL	VISCOSITE		MASSE VOLUMIQUE g/cm <sup>3</sup>
		SAE	Centipoise	
1	MOTOMASTER	10	3635	0,848
2	"	20	7575	0,857
3	"	40	13395	0,865
4	AEROSHELL PREMIUM	100	27274	0,857

La figure 4.1 montre une photo d'une lamelle avec des gouttelettes de 153 micromètres. On remarque que les gouttelettes dans chacune des portions ont une forme parfaitement sphérique.

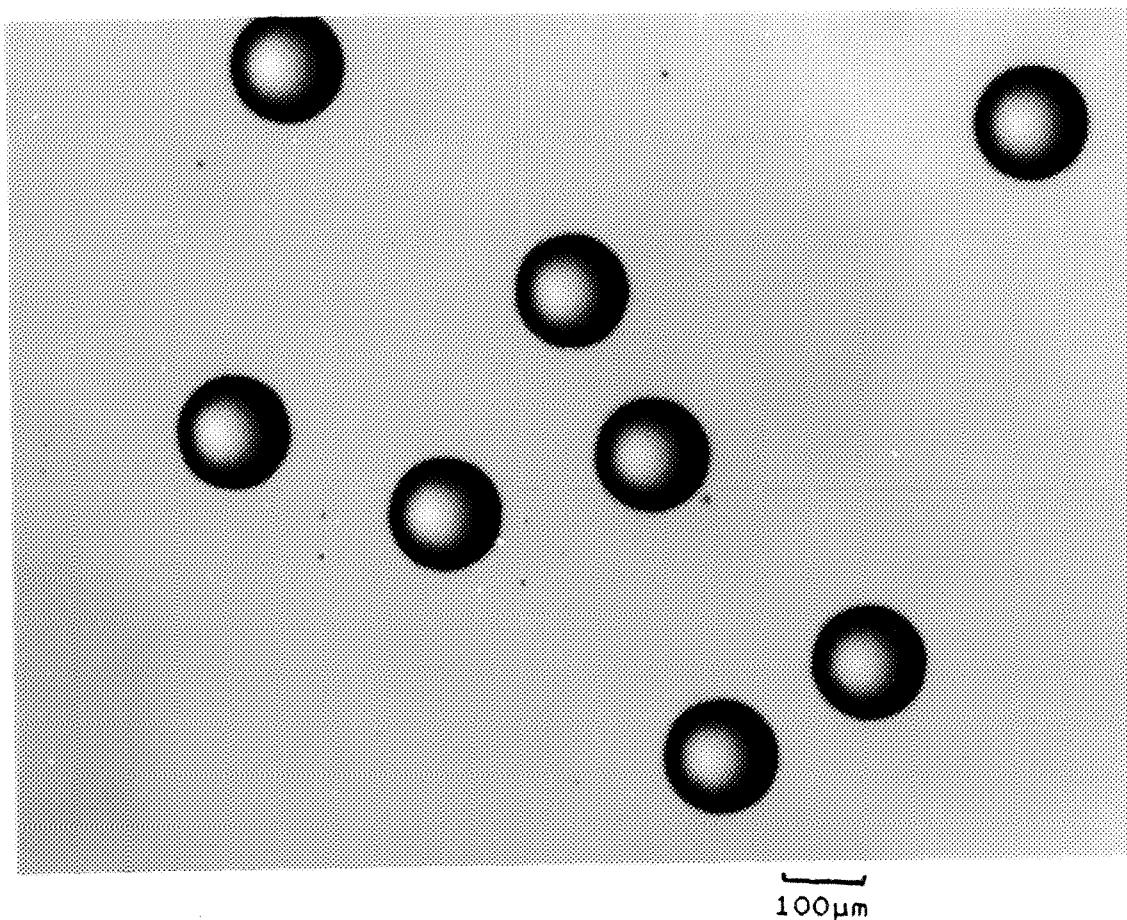


Figure 4.1 Gouttelettes uniformes de  $153\mu\text{m}$  dans un film d'huile Aeroshell SAE 100W.

Toutefois, après un certain laps de temps dépendamment du type d'huile utilisé on observe les phénomènes suivants :

- les gouttelettes se déplacent dans l'huile.
- les gouttelettes s'enfoncent pour entrer en contact avec la lamelle de verre.

Suite aux premières mesures, on a étudié les changements de diamètre d'une gouttelette emprisonnée dans l'huile en fonction du temps écoulé pour les quatre types d'huile déjà expérimentés.

La figure 4.2 présente le changement de diamètre observé (rapport  $D_t/D_0$ ) avec des gouttelettes uniformes de 70 micromètres. Les résultats montrent que les gouttelettes restent inchangées avec l'huile Aeroshell Premium de viscosité SAE 100W. Avec les trois autres huiles, les gouttelettes rétrécissent très rapidement pour ultimement disparaître au bout d'un temps variant entre 50 à 200 secondes. Nos résultats, tout comme ceux de Golitzine (1951), montrent toutefois que la viscosité et la densité ne sont pas des facteurs importants.

Pour étudier la stabilité des gouttelettes inférieures à 46 micromètres, on a utilisé un spectre de gouttelettes produit par l'humidificateur Hanscraft en raison de la capacité limitée du générateur de gouttelettes uniformes. La figure 4.3 montre les gouttelettes emprisonnées dans l'huile

# STABILITE DE GOUTTELETTES DANS L'HUILE

Gouttelettes 70  $\mu\text{m}$

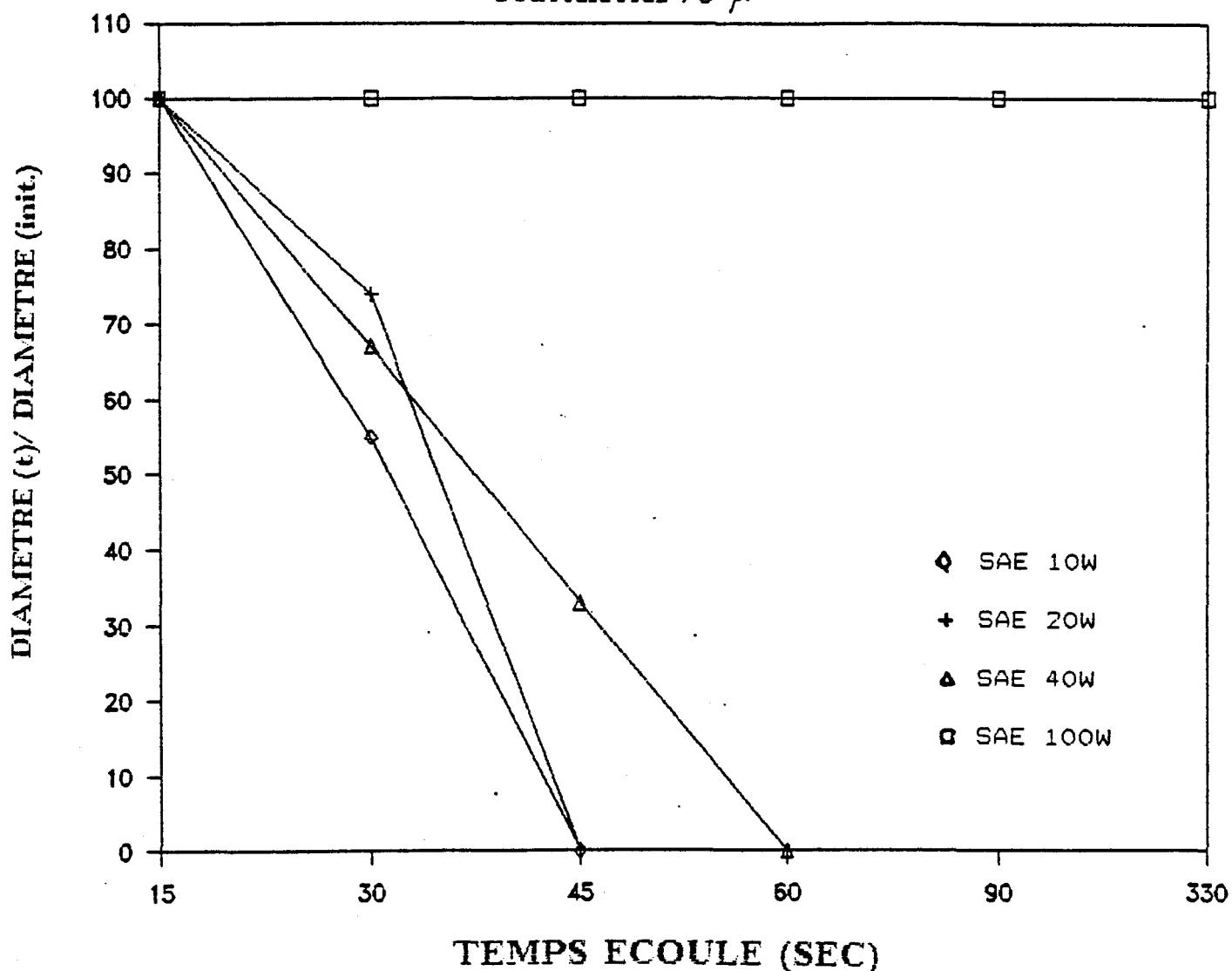


Figure 4.2 Variation de la taille des gouttelettes uniformes de 70 $\mu\text{m}$  observées pour les quatres types d'huile expérimentés.

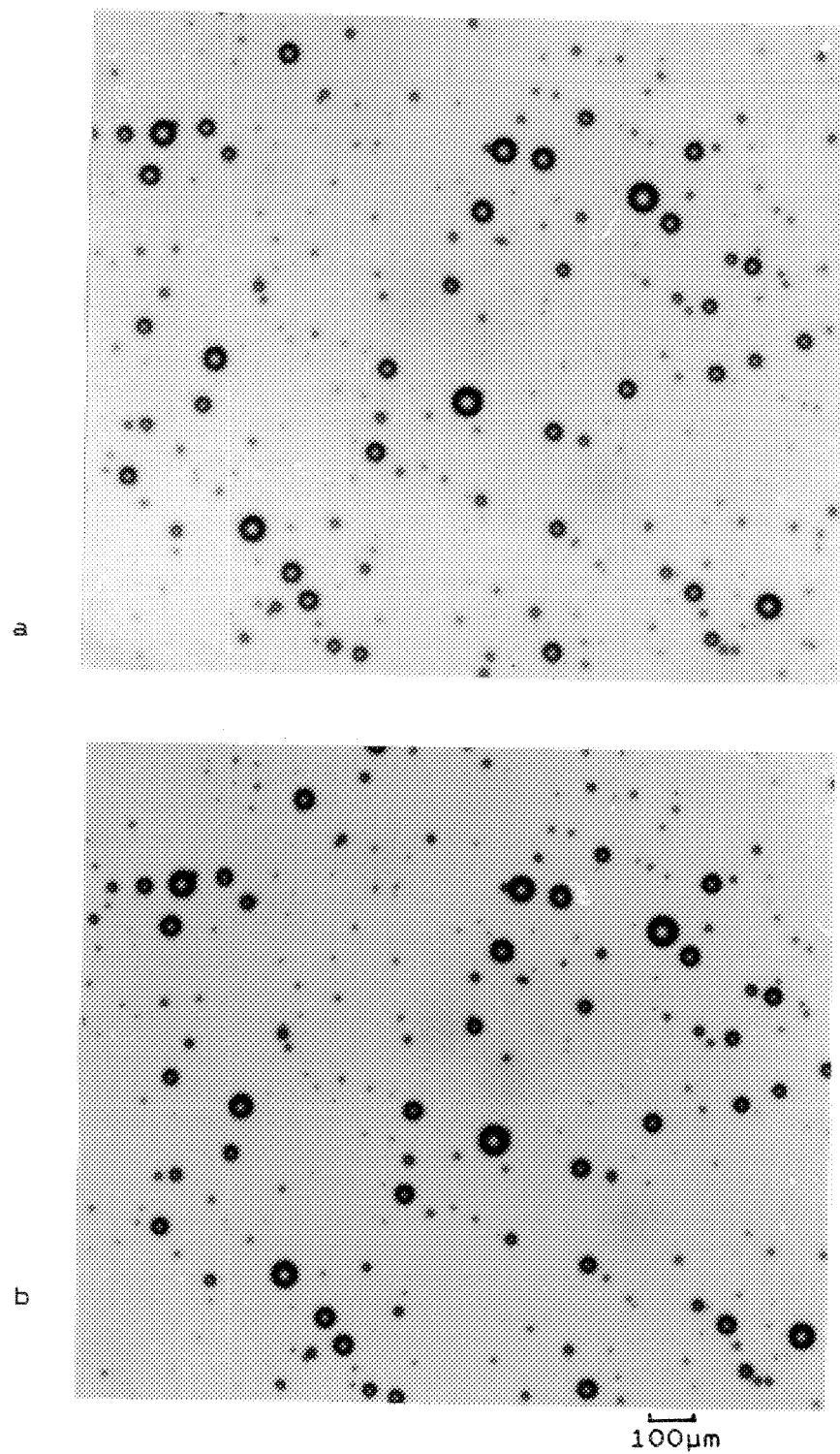


Figure 4.3 Photos de gouttelettes entre 5 et 65  $\mu\text{m}$  dans l'huile Aeroshell SAE 100W  
a) 30 secondes après l'impact  
b) 180 secondes après l'impact

provenant du spectre de gouttelettes photographié à 30 secondes et à 2 minutes 30 secondes après l'impact. Ces photographies montrent que les gouttelettes ne changent pas.

Les tests répétés montrent que seule l'huile Aeroshell SAE 100W est capable de garder les gouttelettes, même des petites gouttelettes de 5 micromètres, intactes pendant quelques minutes; soit le temps nécessaire pour les photographier.

#### 4.2.2 MOBILITE DES GOUTTELETTES DANS L'HUILE

##### 4.2.2.1 DEPLACEMENT HORIZONTAL

Dans les tests effectués précédemment, on a remarqué que les gouttelettes peuvent se déplacer dans l'huile, surtout avec les huiles de faible viscosité ( SAE 10W, SAE 20W, SAE 40W ).

Les figures 4.4 a et 4.4 b illustrent le mouvement horizontal de deux gouttelettes, par rapport à un repère en forme de triangle, observé dans une couche d'huile de viscosité SAE 100W. La photo prise 29 secondes après l'impact (figure 4.11a) montre que la gouttelette la plus proche du repère s'est déplacée de 28 micromètres; 370 secondes plus tard (figure 4.11b) la distance entre le repère et la gouttelette la plus proche est augmentée à 167 micromètres. La vitesse de déplacement mesurée dans l'huile de viscosité SAE 100W est de l'ordre de 0,5 micromètre par seconde. Dans l'huile de plus faible viscosité ( SAE 10W ) le déplacement est augmenté à quelques micromètres par seconde.

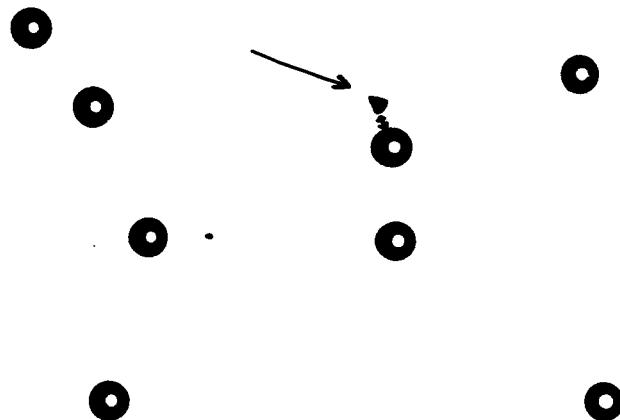


Figure 4.4a Photographie de gouttelettes 65  $\mu\text{m}$  dans l'huile Aeroshell SAE 100W 29 secondes après l'impact:  
\* déplacement de 28  $\mu\text{m}$  par rapport au repère

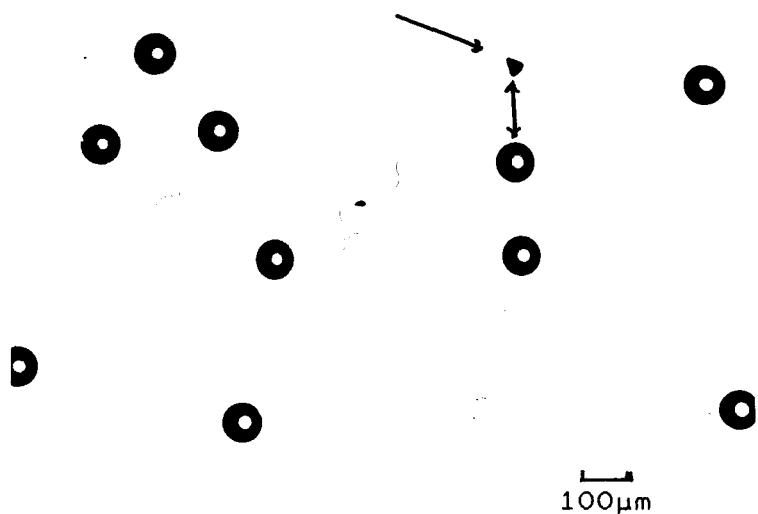


Figure 4.4b Photographie de gouttelettes 65  $\mu\text{m}$  dans l'huile Aeroshell SAE 100W 370 sec après l'impact:  
\* déplacement de 167  $\mu\text{m}$  par rapport au repère

Cependant, si en laissant reposer la lamelle 30 minutes après son installation sur un support fixe, nous avons remarqué qu'avec l'huile de viscosité SAE 100W, les gouttelettes ne se déplacent plus, ce qui laisserait à penser que le déplacement horizontal des gouttelettes serait attribuable aux manipulations de la lamelle.

#### 4.2.2.2 DEPLACEMENT VERTICAL

Une autre forme de déplacement des gouttelettes dans l'huile est leur déplacement vertical vers le bas, soit celui d'une descente vers la surface de la lamelle. Ce phénomène a été observé dans l'huile de viscosité SAE 10W surtout avec des grosses gouttelettes de 153 micromètres percutant à des vitesses supérieures à 15m/s. Dans ce cas, les gouttelettes s'aplatissent sur la surface de la lamelle et apparaissent comme des traces circulaires beaucoup plus grosses que la gouttelette. Il est alors facile de les différencier des gouttelettes en suspension. Le diamètre de ces traces est de 1,5 à 1,8 fois le diamètre de la gouttelette en suspension.

La figure 4.5 illustre la différence entre les gouttelettes en suspension dans l'huile (gouttelettes a et b) et les gouttelettes aplatis sur la surface de la lamelle (gouttelettes c,d,e ).

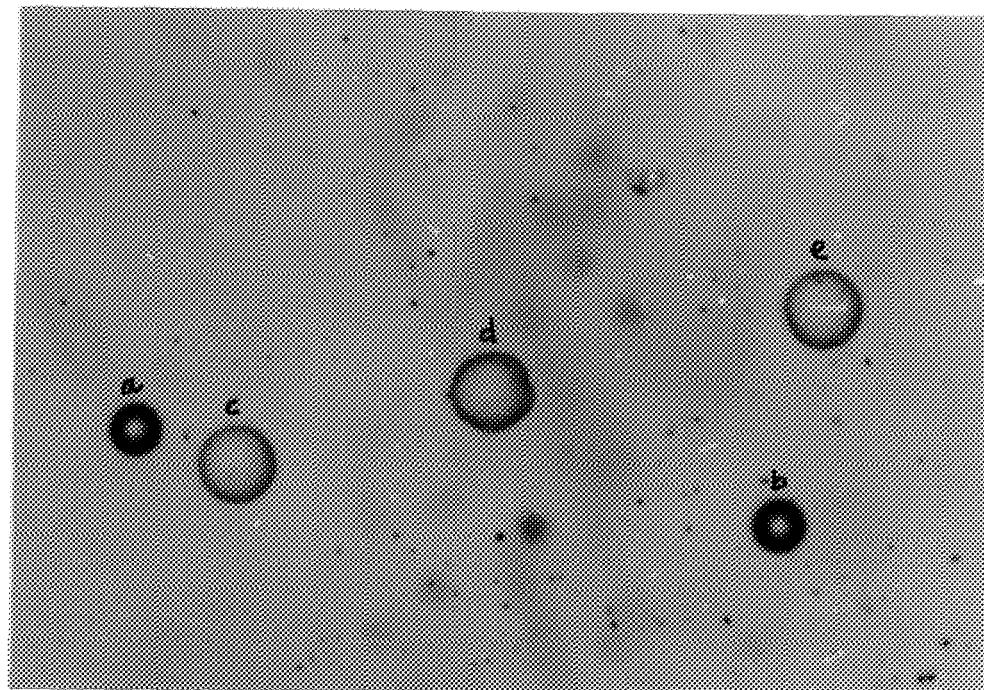
VUE DE DESSUS

Figure 4.5 Photo de gouttelettes dans l'huile:  
a,b : gouttelettes en suspension dans l'huile  
c,d,e, : gouttelettes aplatis sur la surface  
de la lamelle

#### 4.2.2.3 POSITION DES GOUTTELETTES DANS LE FILM D'HUILE

Pour déterminer où situer les gouttelettes après l'impact, en surface ou sous la surface de la couche d'huile (Golitzine, 1951; Stallabrass, 1986), nous avons photographié de profil une lamelle recouverte d'une couche d'huile préalablement exposée à un flux de gouttelettes. La figure 4.6 montre la photo d'une gouttelette de 153 micromètres en suspension dans une couche d'huile de viscosité SAE 100W. Le flou de l'image de la gouttelette peut être dû au déplacement horizontal de cette gouttelette pendant que la photo a été prise ( temps d'exposition environ 3 secondes ). Cette photographie montre que les gouttelettes ne sont pas en surface de la couche d'huile, mais bien en suspension dans le film d'huile.

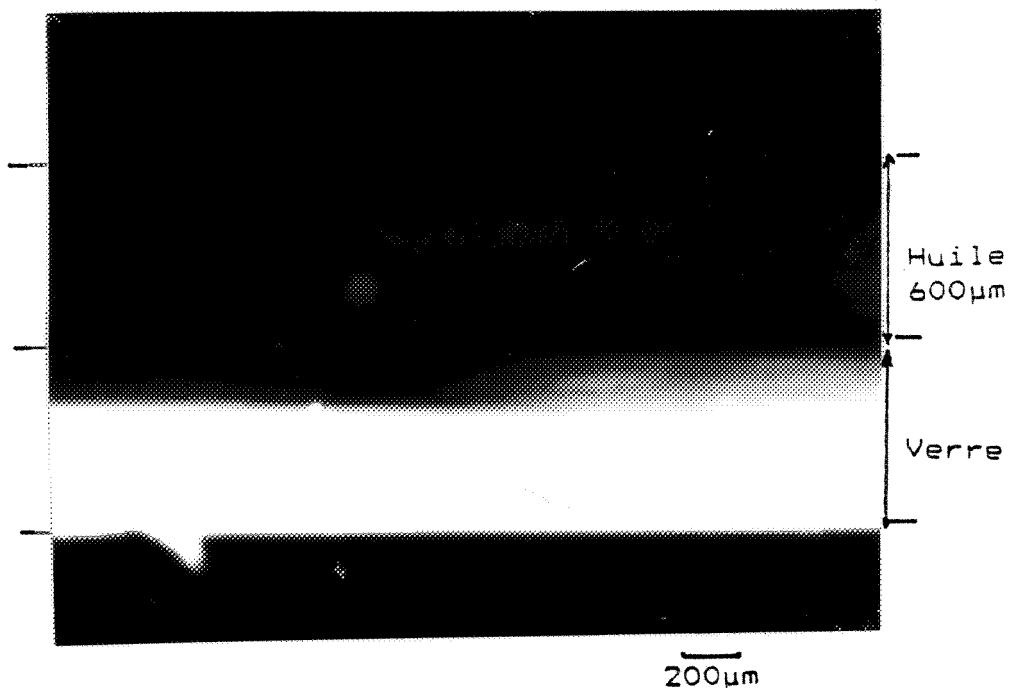


Figure 4.6 Photo des gouttelettes de 153 $\mu\text{m}$  en suspension dans l'huile ( vue de profil de la couche d'huile )

#### 4.2.3 SELECTION DU TYPE D'HUILE

Suite à ces tests, nous avons trouvé que parmi les différentes huiles expérimentées, c'est l'huile Aeroshell SAE 100W qui offre les meilleures caractéristiques entre autres :

- la dissolution des gouttelettes emprisonnées dans cette huile est retardée de plusieurs heures pour les gouttelettes de plus de 46 micromètres et de plusieurs minutes pour les gouttelettes de quelques micromètres.

- les déplacements horizontal et vertical des gouttelettes dans cette huile sont négligeables, ce qui facilite l'observation ou la photographie des gouttelettes dans les délais nécessaires à la réalisation des expériences.

- la facilité d'obtenir une couche d'huile uniforme et stable sur une lamelle de verre.

#### 4.3 VERIFICATION DE L'UNIFORMITE DES GOUTTELETTES

##### ET DE LA STABILITE DU GENERATEUR

Ces tests ont pour but d'évaluer si les gouttelettes produites par le générateur de gouttelettes uniformes ont toutes le même diamètre.

Les résultats de l'examen photographique d'une cinquantaine à une centaine de gouttelettes de trois différents diamètres sont présentés au tableau 4.2. L'écart observé dans les diamètres des gouttelettes est de 0,6 à 3,4 % confirmant

ainsi la très grande uniformité des gouttelettes produites par le générateur.

Tableau 4.2 Diamètres moyens des gouttelettes produites par le générateur de gouttelettes uniformes mesurés lors de trois échantillonnages.

Tests no.	Nombre de gouttes mesurées	Diamètres moyens $\mu\text{m}$	Variation %
1	60	$64,2 \pm 2,2$	3,4
2	51	$96,0 \pm 0,6$	0,6
3	34	$153,5 \pm 3,3$	2,1

La figure 4.7 montre une photographie à 96X de gouttelettes produites par le générateur de gouttelettes uniformes. Le diamètre des gouttelettes est compris entre 95 et 97 micromètres.

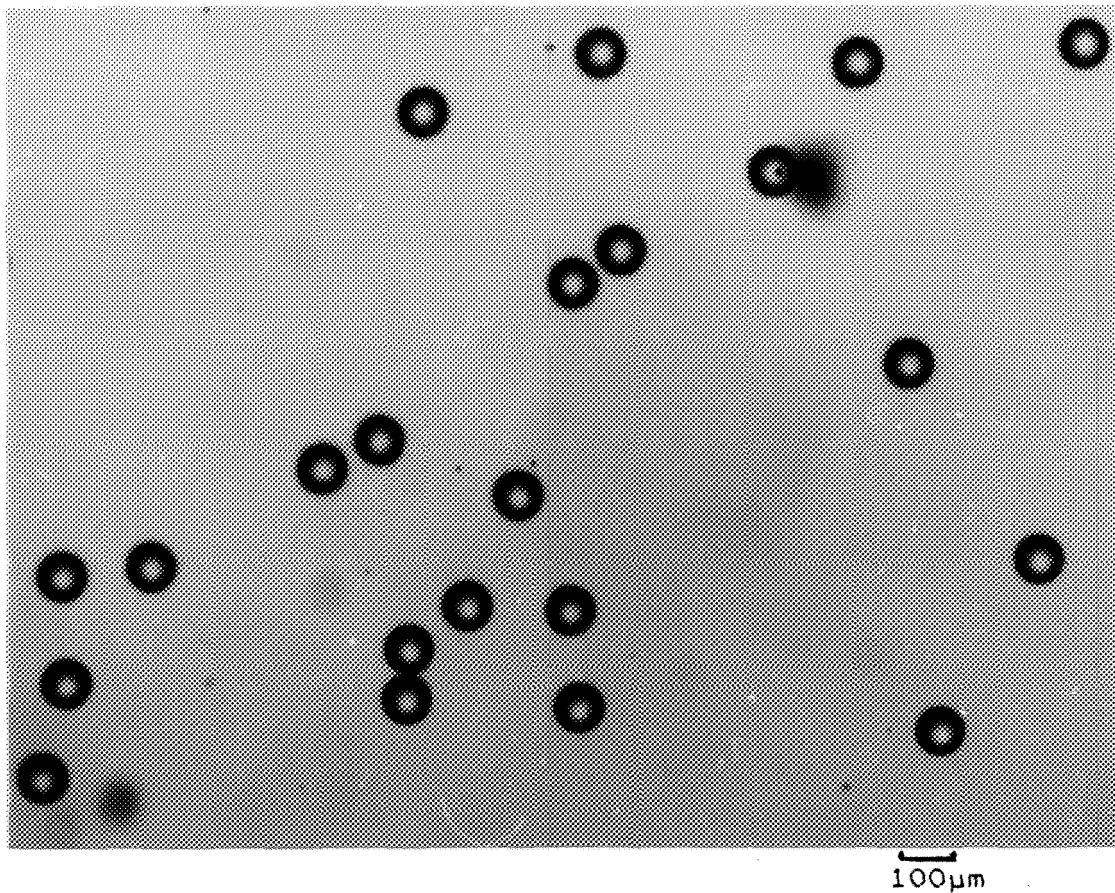


Figure 4.7 Photo des gouttelettes entre 95 et 97  $\mu\text{m}$  à la sortie du générateur de gouttelettes uniformes.

#### 4.4 CORRELATION ENTRE LE DIAMETRE DES GOUTTELETTES

EMPRISONNEES DANS L'HUILE ET CELUI MESURE A  
PARTIR D'UNE PHOTOGRAPHIE

##### 4.4.1 JET DE GOUTTELETTES UNIFORMES

###### 4.4.1.1 EFFET DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES

La figure 4.8 présente les diamètres des gouttelettes mesurées dans le film d'huile Aeroshell SAE 100 en fonction des diamètres des gouttelettes photographiées dans l'écoulement d'air. Pour ces mesures, les gouttelettes ont un diamètre compris entre 46 et 149 micromètres et percutent la couche d'huile à une vitesse d'impact de 4 m/s.

La droite de la figure 4.8 indique ici que dans l'intervalle compris entre 46 à 149 micromètres, le diamètre des gouttelettes mesurées par la méthode à l'huile est le même que celui mesuré dans l'air à l'aide de la caméra-microscope.

Si on utilise de billes de verre précalibrées à  $115 \pm 5$  micromètres, on obtient le même résultat. Le cercle noir apparaissant sur la figure 4.8 correspond au diamètre mesuré par la méthode photographique sur les billes de verre.

# METHODE PHOTOGRAPHIQUE & A L'HUILE

56

Gouttelettes uniformes

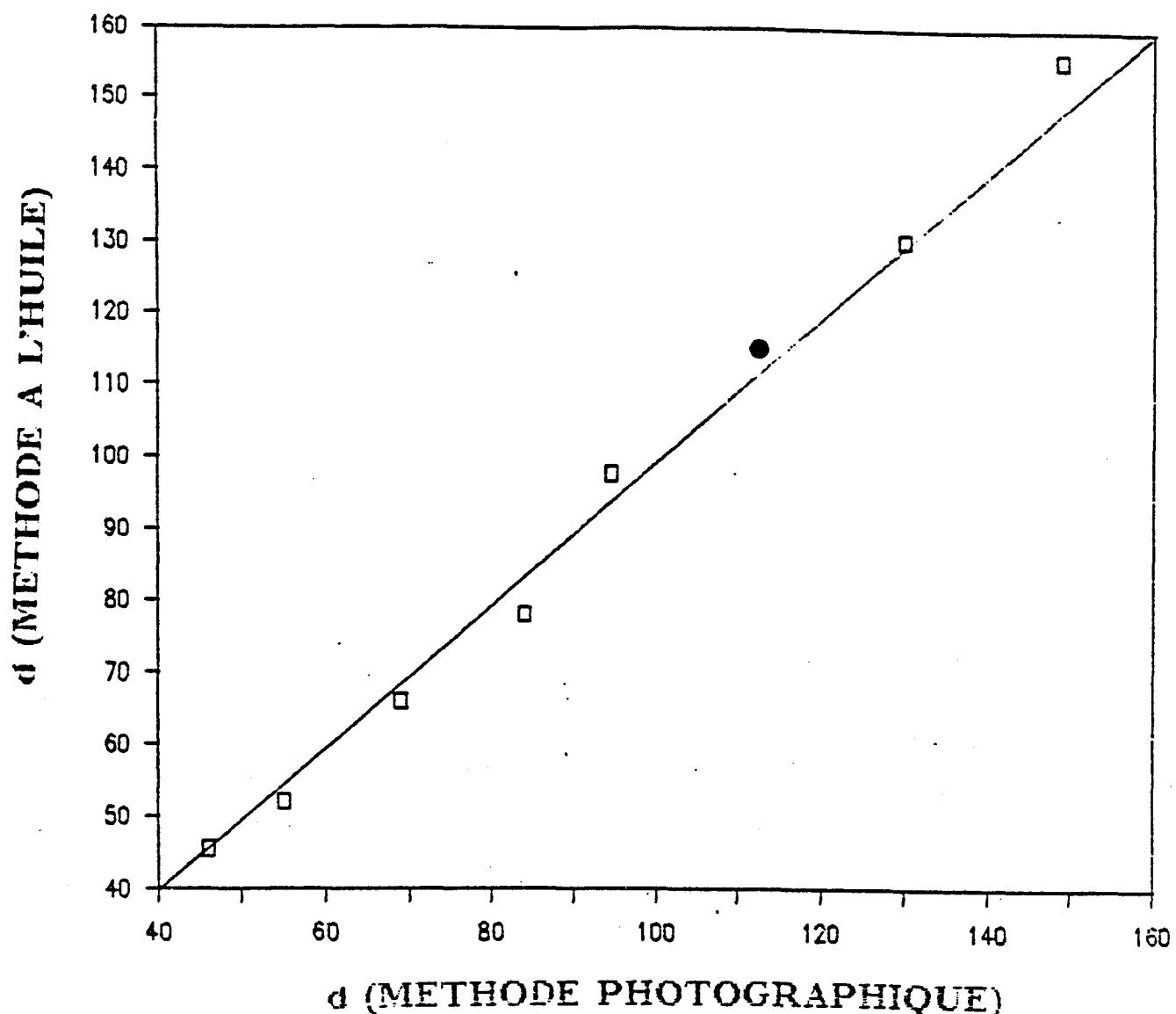


Figure 4.8 Corrélation entre le diamètre réel des gouttelettes uniformes mesuré par photographie et celui de la gouttelette emprisonnée dans le film d'huile. Le cercle noir identifie la valeur mesurée avec des billes de verres utilisée pour la calibration.

#### 4.4.1.2 EFFET DE LA VITESSE D'IMPACT

L'effet de la vitesse d'impact a été ensuite étudié en utilisant des gouttelettes uniformes de différents diamètres se déplaçant dans l'air à des vitesses d'impact de 4 à 30m/s.

La figure 4.9 compare le rapport " diamètre réel/ diamètre dans l'huile " des gouttelettes en fonction des vitesses d'impact étudiées. Pour toute la gamme de vitesses étudiées, le rapport est de  $1,03 \pm 0,04$ . Ceci montre clairement qu'avec les gouttelettes uniformes il y a parfaite corrélation entre le diamètre de la gouttelette emprisonnée dans le film d'huile et celui de la gouttelette photographiée à l'état libre, indépendamment de la vitesse d'impact.

#### 4.4.2 SPECTRE DE GOUTTELETTES

##### 4.4.2.1 PROCEDURES EXPERIMENTALES PARTICULIERES

Dans ces essais, on utilise le montage décrit à la figure 4.10 avec le générateur de gouttelettes multi-grosseurs. Les gouttelettes passent entre deux plaquettes en métal A situées entre le stroboscope B et la caméra-microscope C où elles peuvent être photographiées. À la sortie de ce passage, les gouttelettes sont déviées par un jet d'air comprimé E sur une lamelle D recouverte d'une couche d'huile. La vitesse des gouttelettes dans cet écoulement peut varier entre 3 et 35 m/s. Le temps d'exposition de la lamelle recouverte d'huile

# FACTEUR DE CORRECTION & VITESSE

Huile sur verre & Gouttes uniformes

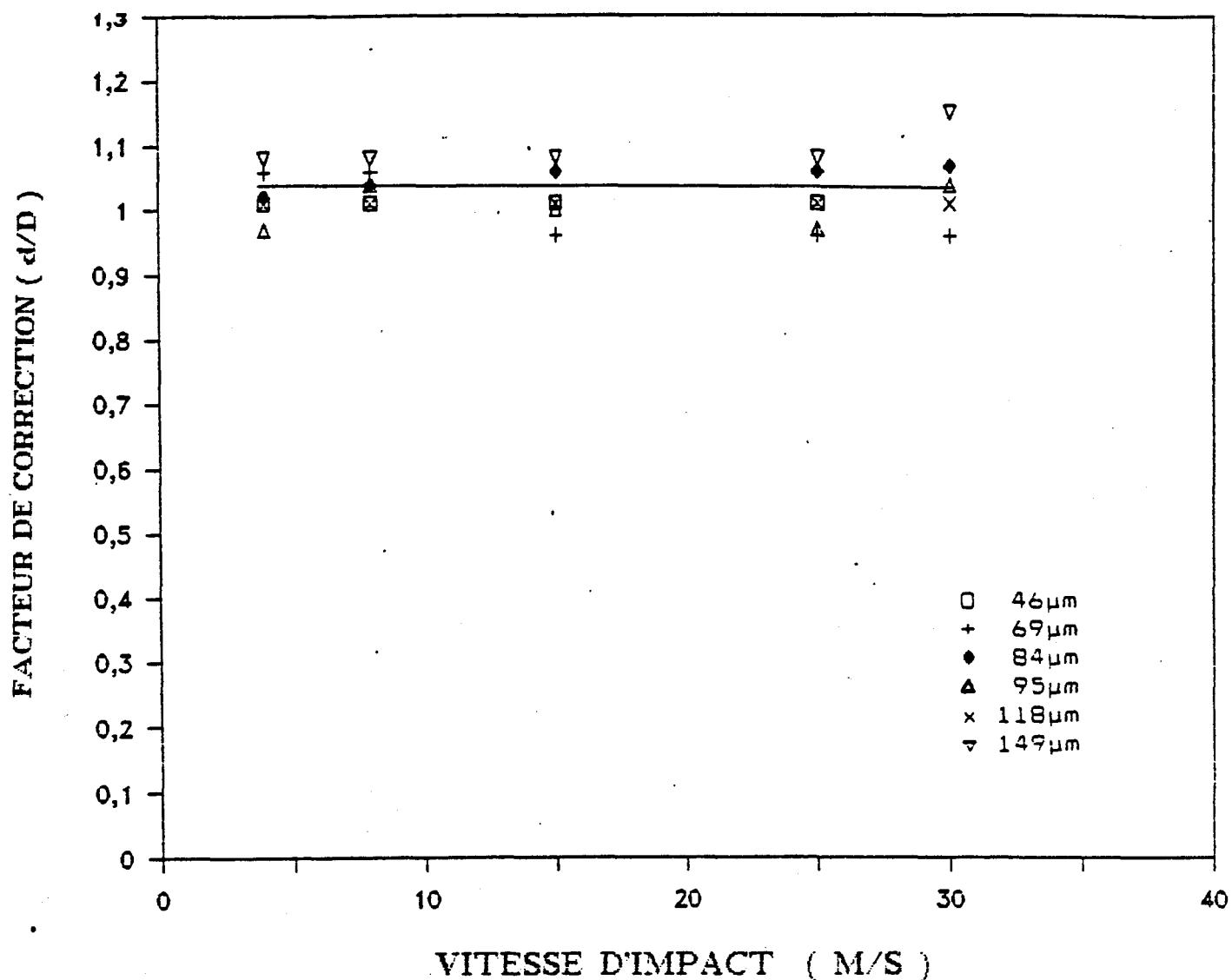
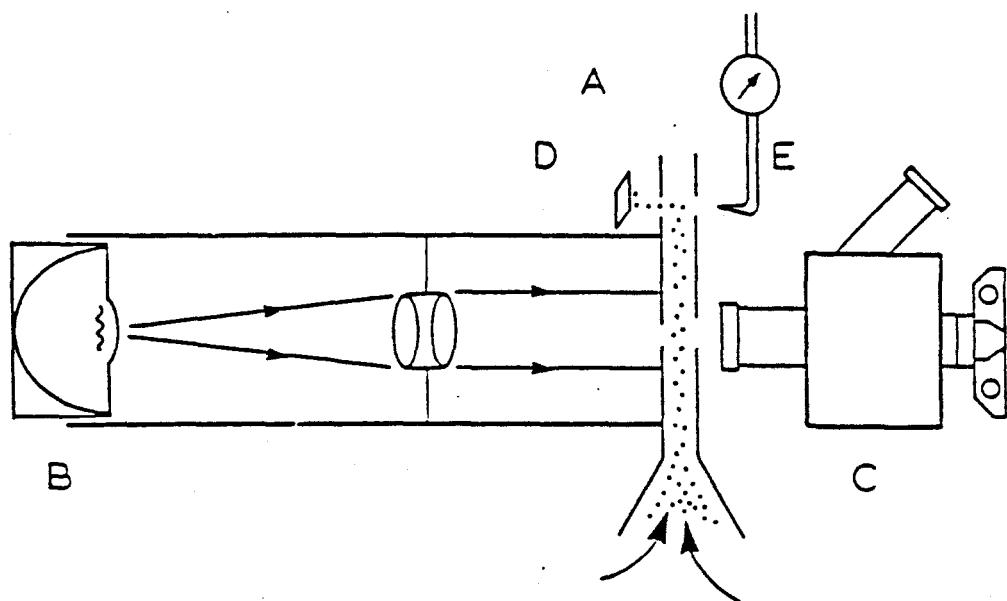


Figure 4.9 Rapport entre le diamètre des gouttelettes mesuré par photographie et celui déterminé par la méthode à l'huile, en fonction de la vitesse d'impact.



- A — PLAQUETTES EN MÉTAL
- B — STROBOSCOPE
- C — CAMÉRA-MICROSCOPE
- D — LAMELLE
- E — BEC D'AIR COMPRIMÉ

Figure 4.10 Montage servant à photographier et échantillonner les spectres de gouttelettes

est d'environ 1/25 sec comparativement au temps de passage des gouttelettes devant la caméra qui est de 1/110 sec.

Les diamètres réels des gouttelettes sont mesurés directement à partir des photos des gouttelettes qui traversent le champ de la caméra. Les diamètres des gouttelettes en suspension dans l'huile sont déterminés sur les photos des lamelles. De façon à offrir une surface de captation plus grande que celle utilisée dans la méthode avec des gouttelettes uniformes (25X3mm), on utilise une lamelle de plus grande surface, soit de 25X75mm. La détermination de la distribution spectrale des gouttelettes multidimensionnelles par la méthode photographique nécessite la prise de plusieurs photos (5 ou plus) de façon à obtenir environ une centaine de gouttelettes.

La figure 4.11 compare les photographies du même spectre de gouttelettes. La figure 4.11a correspond aux gouttelettes photographiées dans l'air. La figure 4.11b correspond aux gouttelettes contenues dans un volume d'air d'environ 950 mm captées et emprisonnées dans la couche d'huile d'un volume de 0,9 mm ce qui entraîne un nombre de gouttelettes beaucoup plus élevé sur cette photo. Le diamètre volumique moyen des gouttelettes de la photographie de la figure 4.11a est de 19,1  $\mu\text{m}$ , alors que celui de la figure 4.11b est de 28,9  $\mu\text{m}$ .

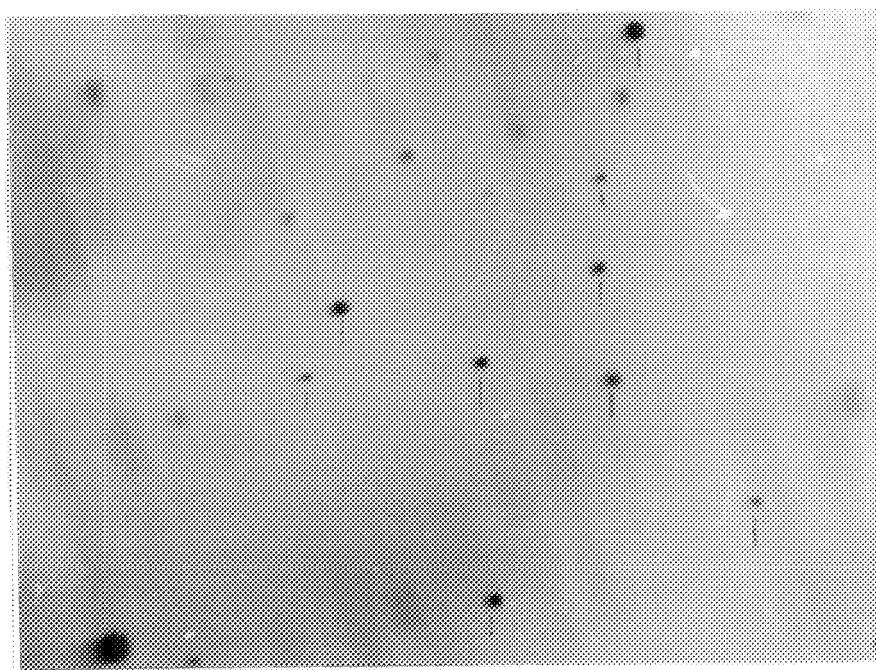


Figure 4.11a Photographie de gouttelettes se déplaçant dans l'air

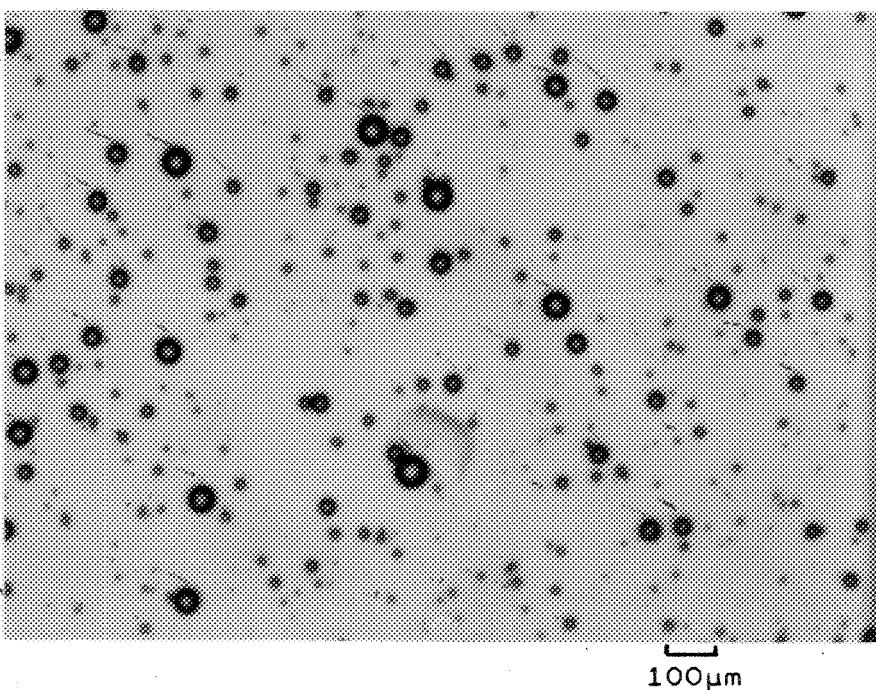


Figure 4.11b Photographie de gouttelettes provenant de la même source captées dans l'huile

#### 4.4.2.2 EFFET DE LA VITESSE

La figure 4.12 présente le rapport entre le diamètre volumique moyen des gouttelettes "dmv" déterminé par la méthode photographique et le diamètre volumique moyen des gouttelettes déterminé par la méthode à l'huile " Dmv " à différentes vitesses d'impact comprises entre 3 et 35m/s. Ce rapport a une valeur de 0,81 à 0,67 lorsque la vitesse du vent atteint des valeurs supérieures à 9m/s.

La figure 4.13 compare les spectres de gouttelettes déterminés à une vitesse d'impact de 6m/s , l'un par la méthode photographique (figure 4.20a) et les trois autres par la méthode à l'huile (figure 4.20 b,c,d) déterminés à des vitesses d'impact de 4, 8 et 10 m/s. On remarque un nombre élevé des grosses gouttelettes dans les spectres de gouttelettes observées à partir de la méthode à l'huile.

## FACTEUR DE CORRELATION & VITESSE

Huile sur verre & Spectre de gouttelettes

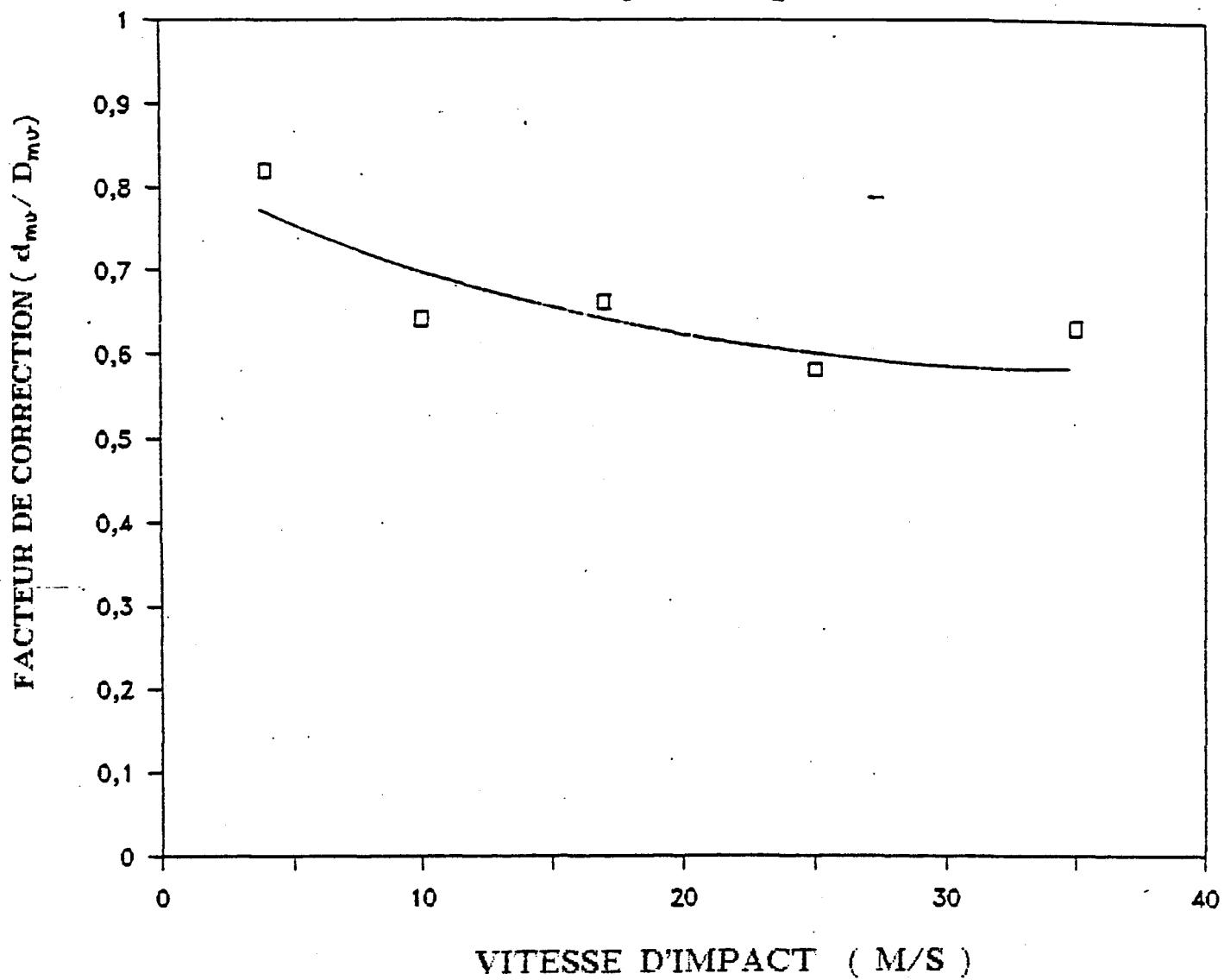


Figure 4.12 Rapport entre le diamètre volumique moyen dans l'air déterminé à partir des photographies et celui déterminé par la méthode à l'huile.

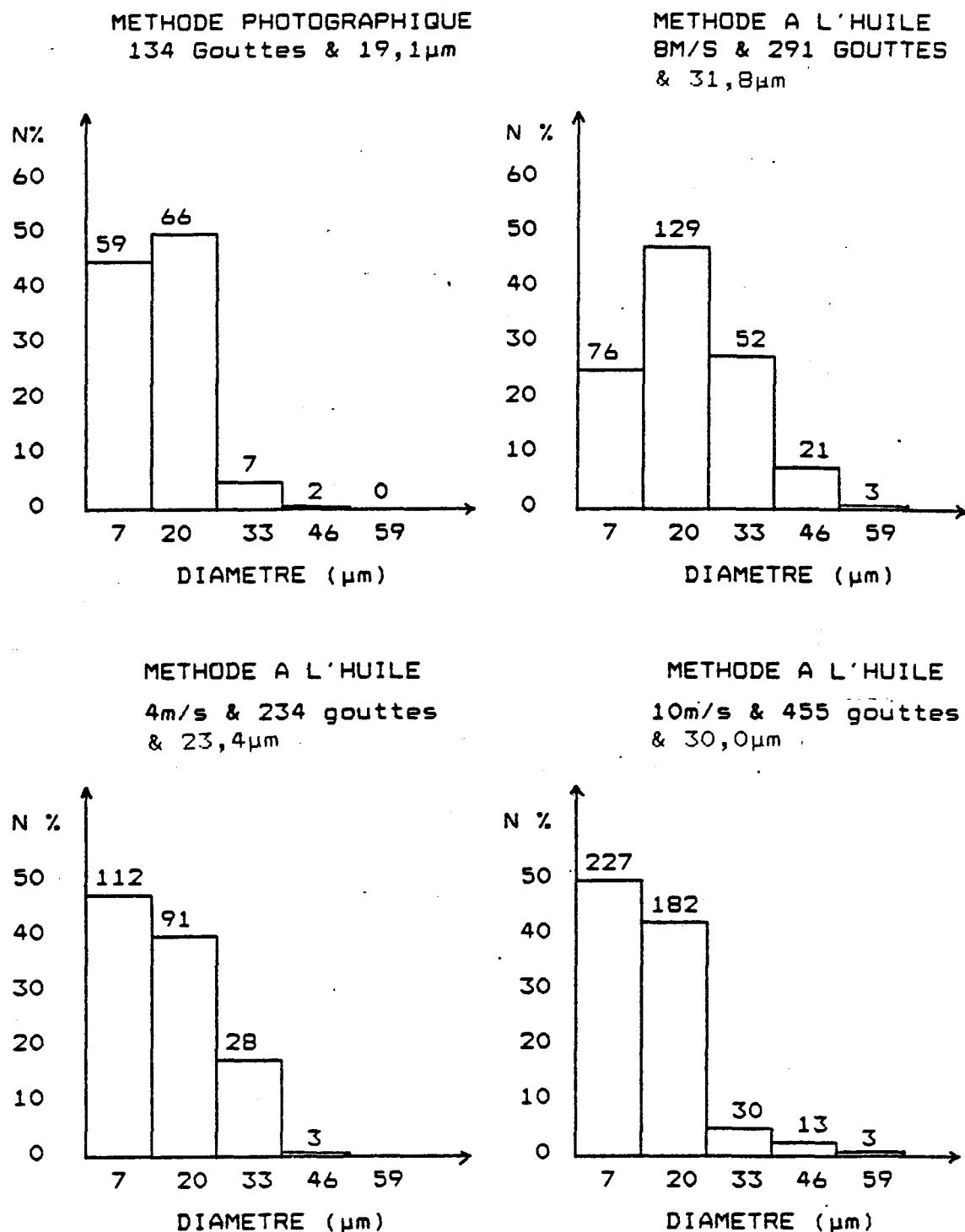


Figure 4.13 Comparaison des spectres de gouttelettes mesurés par la méthode photographique et par la méthode à l'huile.

# CHAPITRE

5

Chapitre 5  
MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTELETTES  
AVEC LES METHODES PAR IMPACT

Les méthodes de mesure de la taille des gouttelettes par impact font, pour la plupart, intervenir un facteur de correction qui sert à établir la correspondance entre le diamètre des impressions et le diamètre réel des gouttelettes. Toutefois, les valeurs retrouvées pour ce facteur varient souvent d'une étude à l'autre. Le tableau 5.1 présente les résultats de quelques auteurs ayant expérimenté différentes méthodes par impact en mentionnant la substance utilisée comme recouvrement, la taille, la vitesse de gouttelettes et le facteur de correction mesuré. Parmi ces méthodes, on a retenu dans le présent travail trois méthodes (au collargol sur verre, au collargol sur film d'Estar et au noir de fumée) pour étudier les effets de la vitesse d'impact, de la grosseur des gouttelettes, des revêtements et des substrats.

### 5.1 MESURES AVEC LE JET DE GOUTTELETTES UNIFORMES

#### 5.1.1 EFFET DU REVETEMENT, DU SUPPORT ET DE LA VITESSE D'IMPACT

Trois combinaisons "revêtement-substrat" ont été étudiées; soit le collargol sur verre, le collargol sur film d'estar et le noir de fumée. Les figures 5.1 a,b,c présentent les photos obtenues pour chacun des trois types de revêtement avec les gouttelettes uniformes.

Tableau 5.1 Résumé des principales méthodes de mesure  
par impact déjà expérimentées avec leur  
facteur de correction

AUTEUR	SUBSTANCE DE RECOUVREMENT	TAILLE DES GOUTTES $\mu\text{m}$	VITESSE m/s	FACTEUR DE CORRECTION
MAY (1950 )	MgO	10 à 200	n.d.	0,86
MARUYAMA (1954)	MgO	10 à 600	n.d.	0,6 à 0,4
VONNEGUT (1946)	Noir de fumée	2 à 26	45	0,8
SQUIRES (Mossop 1983)	Noir de fumée	1 à 1000	55 à 75	0,56 à 0,2
GARLAND (1971)	Gélatine	0,4 à 70	n.d.	0,6
JIUSTO (1965)	Gélatine	1 à 250	20 à 60	0,5
GODARD S. (1960)	Collargol	15 à 60	≈ 0	0,31 à 0,37

Avec le collargol sur verre (figure 5.1a) les empreintes de gouttelettes ressemblent à des cercles blancs presque parfaits qui contrastent sur un fond brun. Avec le collargol sur film d'estar (figure 5.1b) les empreintes apparaissent comme des cercles plus petits et moins bien définis que ceux obtenus avec le collargol sur verre. Avec le noir de fumée (figure 5.1c), nous obtenons des cercles blancs très bien définis sur fond brun.

Des échantillonnages avec les gouttelettes uniformes de différents diamètres ont également été effectués avec ces trois types de revêtement à différentes vitesses d'impact variant entre 4 et 30m/s. Avec le collargol sur verre les empreintes sont toujours bien définies pour toutes les vitesses. Le facteur de correction est de  $0,34 \pm 0,02$  et ne dépend pas de la vitesse du vent. Le revêtement collargol sur film d'estar donne des traces moins bien définies et moins visibles que celles données par le revêtement de collargol sur verre. La valeur de  $k$  est de  $0,48 \pm 0,06$ . Le revêtement noir de fumée pour sa part devient fragile pour des vitesses d'impact élevées. A une vitesse de 25m/s, par exemple, celui-ci est détérioré par le vent et les empreintes sont le plus souvent déformées (voir la photo de la figure 5.2). Le facteur de correction moyen est de  $0,93 \pm 0,11$ . La figure 5.3 présente les valeurs du facteur de correction trouvé pour les trois types de revêtement en fonction de la vitesse d'impact avec des gouttelettes de 118 micromètres.

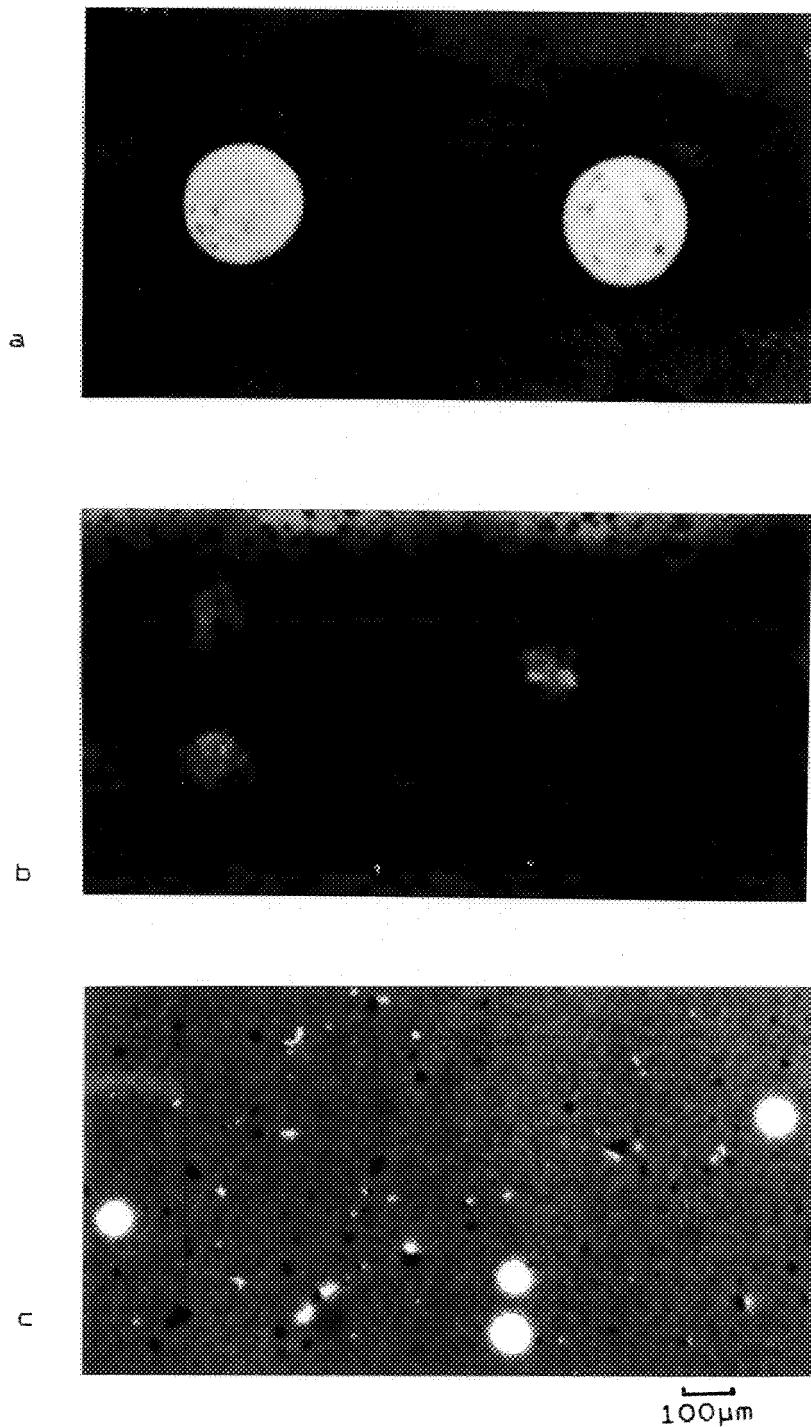


Figure 5.1 Photographies des traces des gouttelettes obtenues avec différents revêtements et substrats :

- a) collargol sur verre
- b) collargol sur film d'estar
- c) noir de fumée sur verre

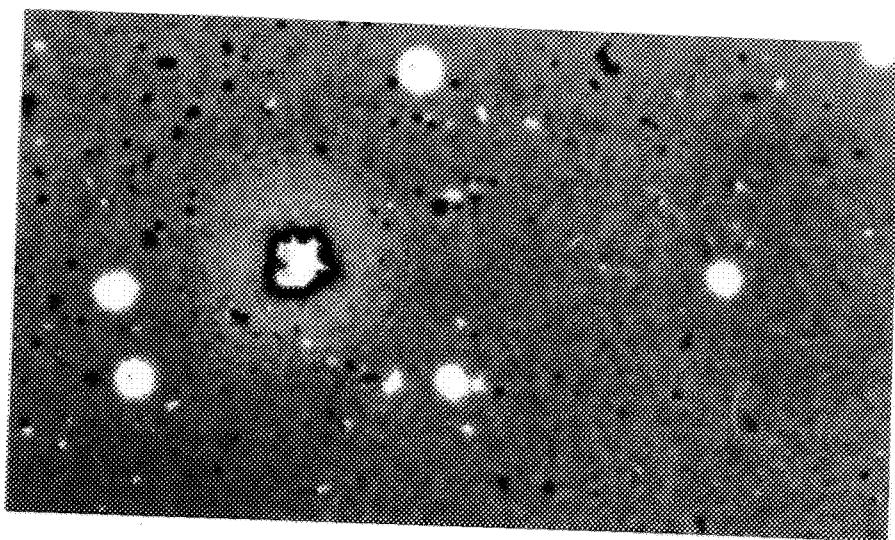


Figure 5.2 Revêtement noir de fumée avec les impressions déformées à la vitesse d'impact de 25m/s

# FACTEUR DE CORRECTION & VITESSE

71

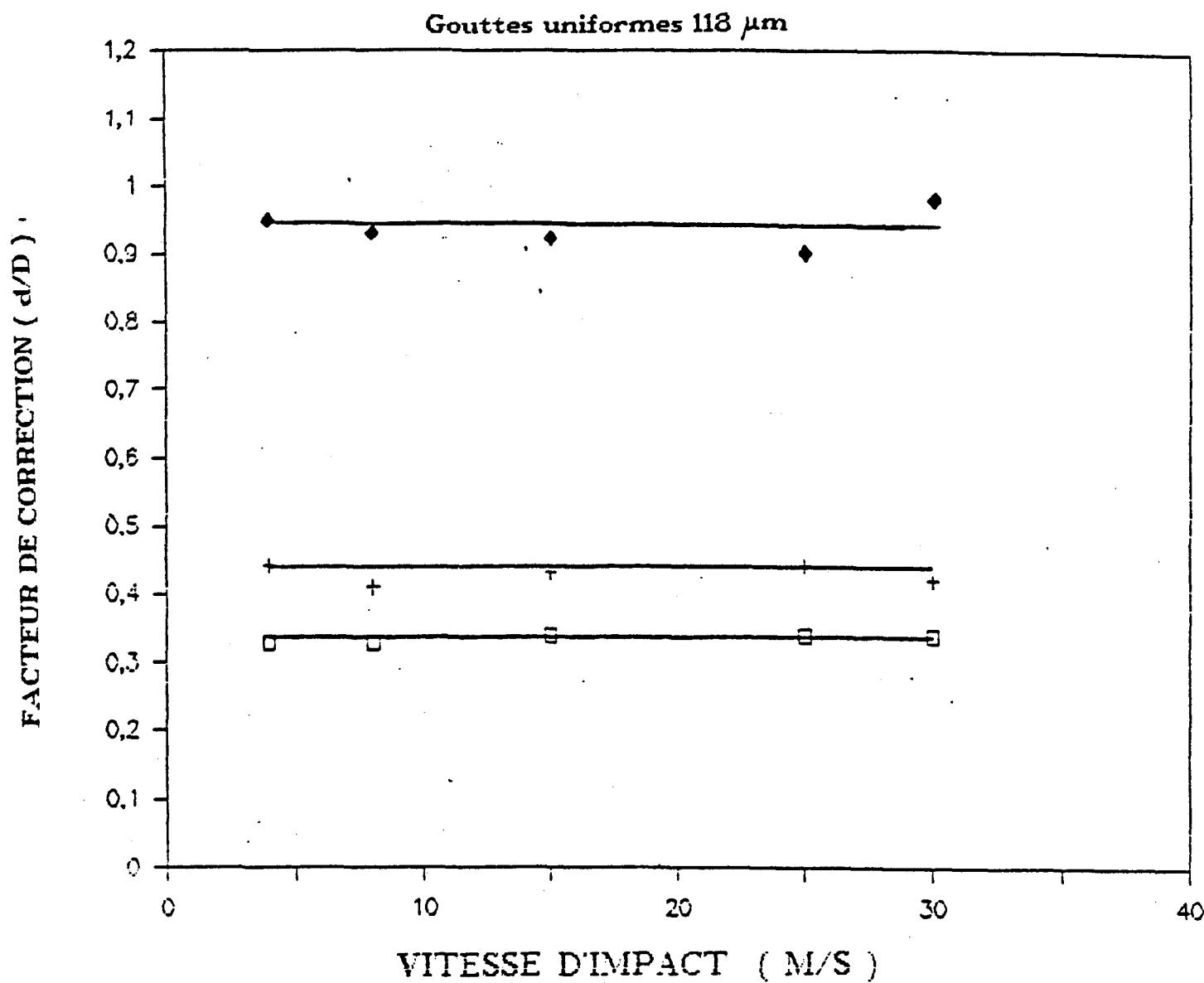


Figure 5.3 Facteur de correction  $k$  mesuré pour différentes combinaisons " revêtement-substrat " avec des gouttelettes uniformes de 118  $\mu\text{m}$

- Noir de fumée sur verre
- +—+ Collargol sur film d'Estar
- Collargol sur verre

Les résultats avec les gouttelettes uniformes montrent que chaque type de revêtement-substrat présente un facteur de correction  $k$  différent : 0,34 pour le collargol sur verre, 0,45 pour le collargol sur film d'estar et 0,93 avec le noir de fumée. Toutefois, le facteur de correction diffère selon le type de revêtement et le type de substrat utilisé. D'autre part, dans l'intervalle de vitesse étudié, entre 4 et 30 m/s, la vitesse ne semble pas avoir affectée la valeur de  $k$ .

Les figures 5.4 et 5.5 présentent les valeurs du facteur de correction mesuré en fonction de la vitesse d'impact avec les gouttelettes de 69 micromètres (figure 5.4) et de 149 micromètres (figure 5.5). Avec le revêtement de collargol sur verre ou sur film d'estar, la valeur de  $k$  est sensiblement constante respectivement de 0,33 à 0,45 pour les gouttelettes de 69 à 149 micromètres. Avec le revêtement noir de fumée, le facteur de correction fluctue beaucoup plus qu'avec les deux autres revêtements. Avec les gouttelettes de 69  $\mu\text{m}$ , le facteur  $k$  diminue avec la vitesse; avec les gouttelettes de 149  $\mu\text{m}$ , le facteur  $k$  est de 1,6 à 4 m/s et diminue à 0,93 en fonction de la vitesse à partir de 8 m/s. Pour les gouttelettes de 69 micromètres, la variation de  $k$  est moins aléatoire que dans le cas des gouttelettes de 149 micromètres.

## FACTEUR DE CORRECTION &amp; VITESSE

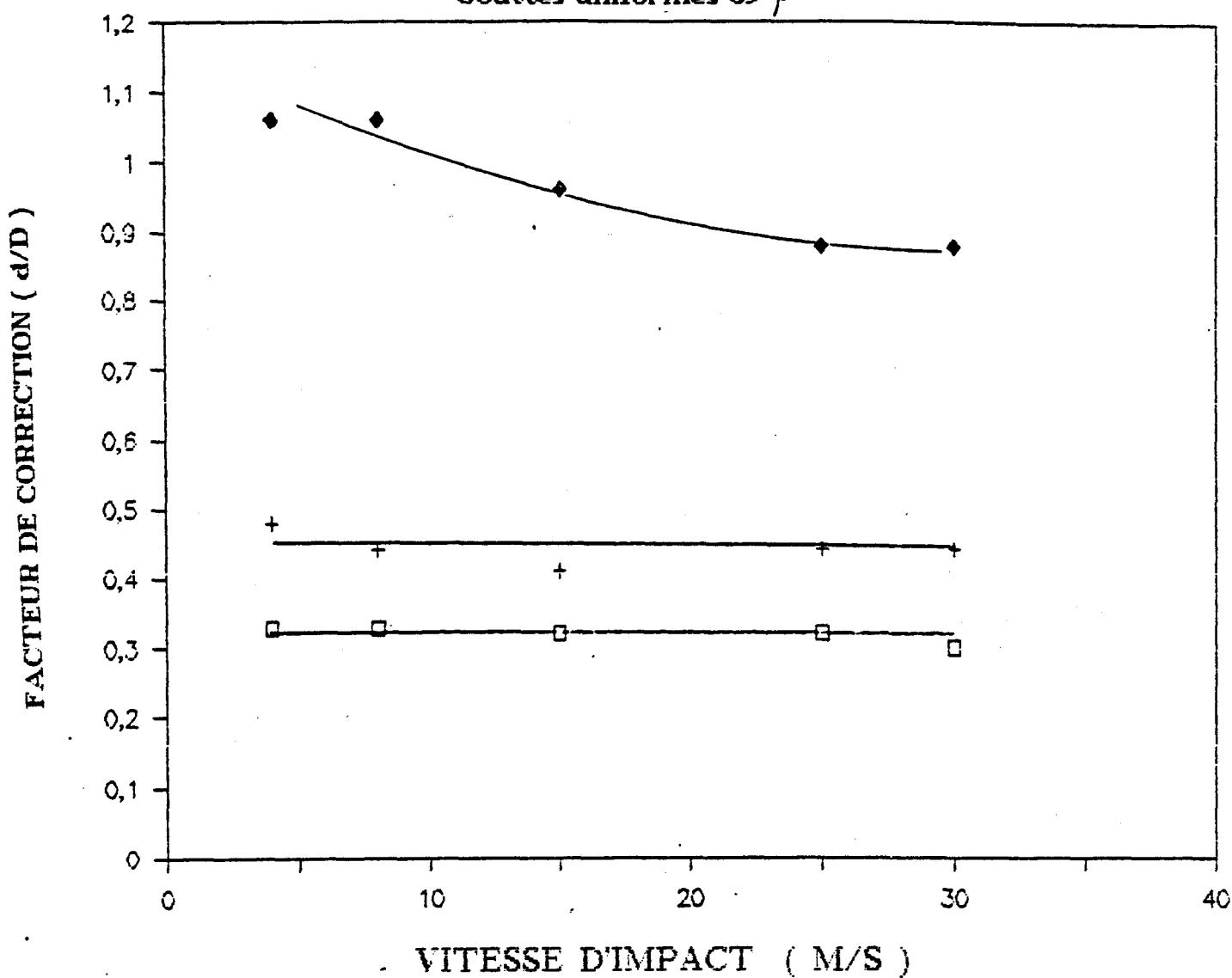
Gouttes uniformes  $69 \mu\text{m}$ 

Figure 5.4 Effet de la vitesse d'impact sur le facteur de correction  $k$  observé pour différents revêtements avec de gouttelettes uniformes de  $69 \mu\text{m}$

- ◆—◆ Noir de fumée sur verre
- +-+ Collargol sur film d'Estar
- Collargol sur verre

# FACTEUR DE CORRECTION & VITESSE

Gouttes uniformes  $149 \mu\text{m}$

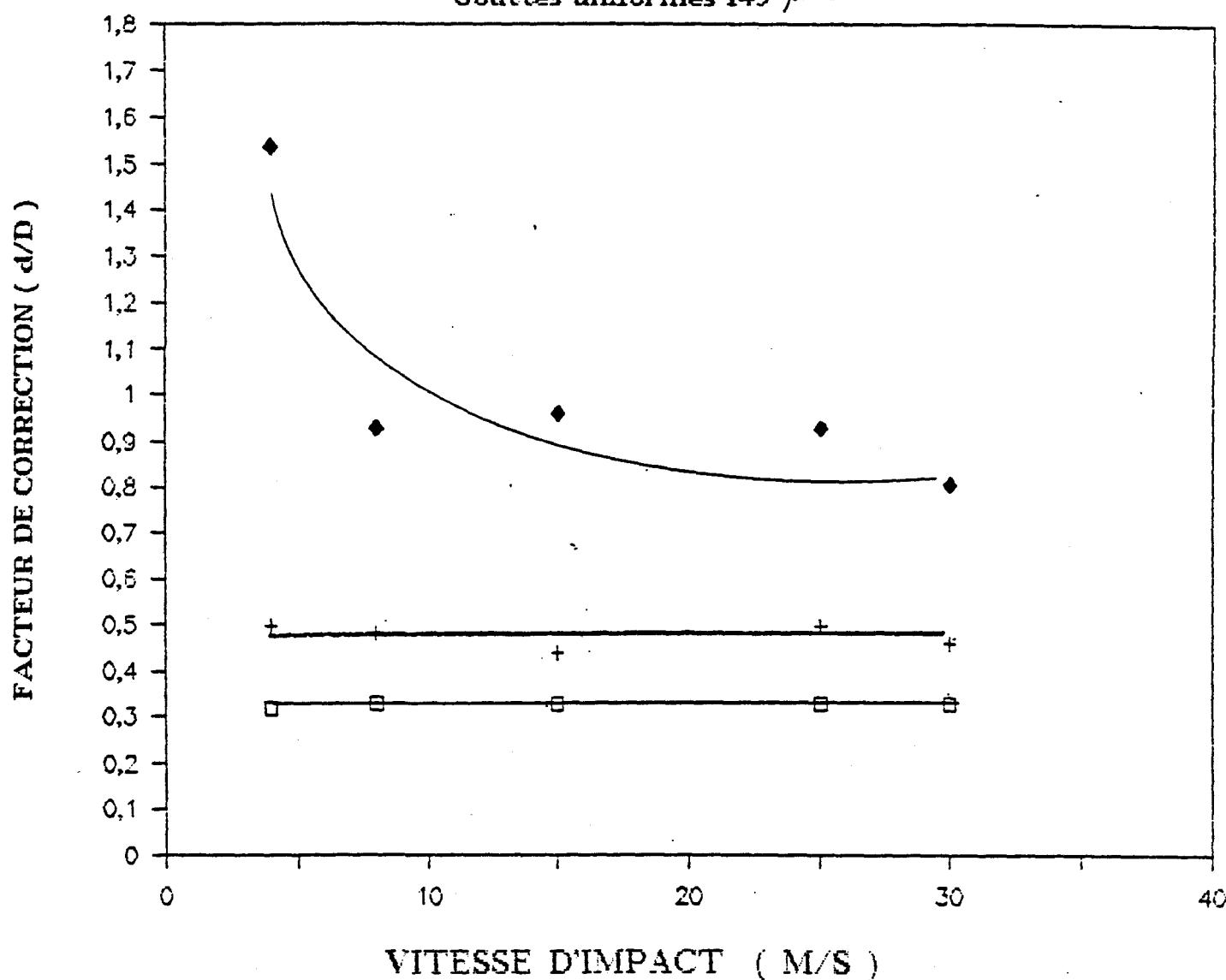


Figure 5.5 Effet de la vitesse d'impact sur le facteur de correction  $k$  observé pour différents revêtements avec des gouttelettes uniformes de  $149 \mu\text{m}$

- Noir de fumée sur verre
- +—+ Collargol sur film d'Estar
- Collargol sur verre

### 5.1.2 EFFET DE LA GROSSEUR DES GOUTTELETTES

Les figures 5.6 et 5.7 présentent l'effet de la grosseur des gouttelettes variant entre 46 et 149 micromètres sur le facteur de correction mesuré avec les trois méthodes utilisant différents "revêtement-sousstrat". Pour cette mesure, on opère à deux vitesses d'impact constantes : 15m/s et 25m/s.

Pour les plus petites gouttelettes ( 46 micromètres), on note que la méthode de collargol sur film d'estar donne des traces moins bien définies que celles obtenues par la méthode du collargol sur verre. Par contre le revêtement collargol sur verre donne des traces toujours très visibles et bien définies et la valeur de  $k$  est indépendante de la grosseur des gouttelettes. Avec le noir de fumée,  $k$  fluctue beaucoup plus d'une façon très aléatoire. La valeur moyenne de  $k$  est de  $0,93 \pm 0,11$ .

Sur les figures 5.8 ,5.9 et 5.10 on a colligé toutes les valeurs de  $k$  présentées précédemment en fonction de la vitesse. La figure 5.8 correspond aux mesures pour le revêtement collargol sur verre, la figure 5.9 correspond aux mesures pour le revêtement collargol sur film d'estar et la figure 5.10 correspond aux mesures pour le revêtement noir de fumée.

# FACTEUR DE CORRECTION & DIAM GOUTTES

76

Gouttes uniformes & Vitesse 15 m/s

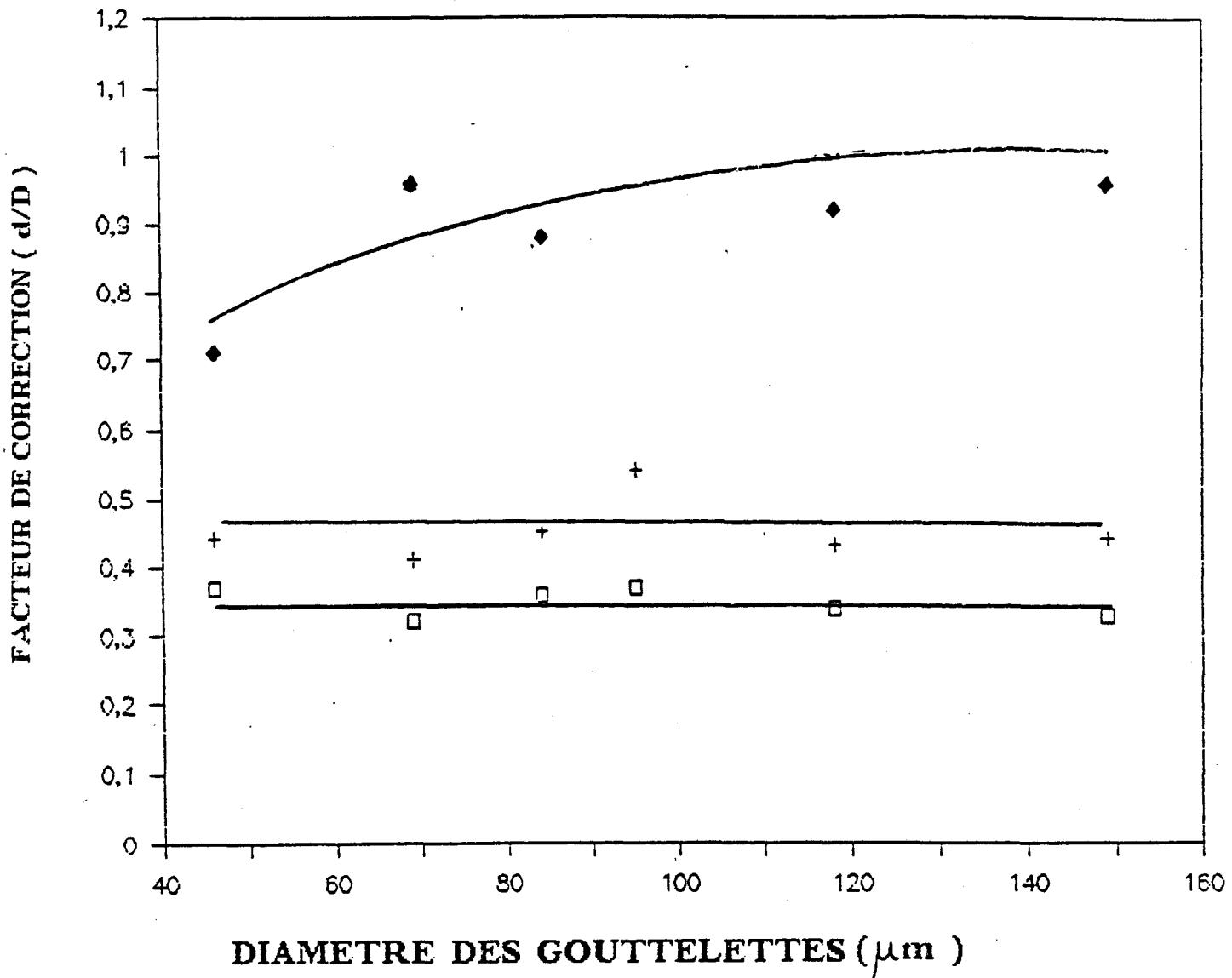


Figure 5.6 Effet de la grosseur des gouttelettes sur le facteur de correction mesuré à 15m/s avec différents revêtements

- ◆ Noir de fumée sur verre
- ++ Collargol sur film d'Estar
- Collargol sur verre

# FACTEUR DE CORRECTION & DIAM GOUTTES

77

Gouttes uniformes & Vitesse 25 m/s

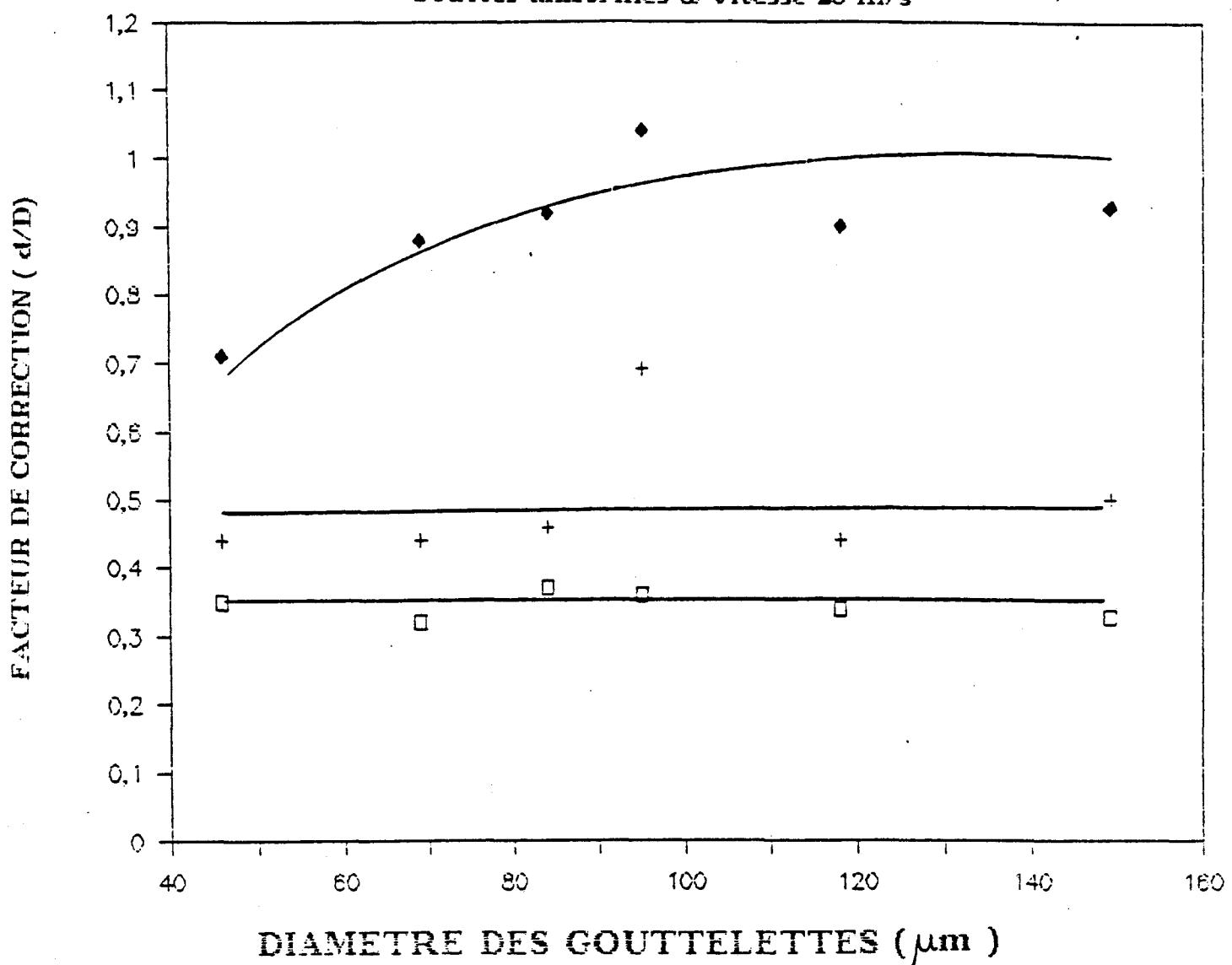


Figure 5.7 Effet de la grosseur des gouttelettes sur le facteur de correction mesuré à 25m/s avec différentes revêtements

- ◆—◆ Noir de fumée sur verre
- +—+ Collargol sur film d'Estar
- Collargol sur verre

Avec le revêtement de collargol sur verre (figure 5.8), la valeur trouvée pour  $k$  est en moyenne de  $0,33 \pm 0,02$  pour toutes les gouttelettes de 46 à 149 micromètres sur tout l'intervalle de vitesses d'impact étudié. Cette valeur est à peu près la même que celle trouvée par S.Godard (1960) pour une vitesse d'impact presque nulle ( $k = 0,34 \pm 0,03$ ).

Avec le collargol sur film d'estar (figure 5.9), la valeur obtenue pour  $k$  est de  $0,48 \pm 0,06$  au lieu de  $0,33 \pm 0,02$  comme pour le cas du collargol sur verre. Ceci indique que le substrat est un facteur important qui influence la valeur de  $k$ . Les fluctuations notées dans les mesures avec le collargol sur film d'estar sont également plus grandes que celles obtenues avec le collargol sur verre ( 13% par rapport à 6%).

Avec le noir de fumée (figure 5.10 ), on note quelques irrégularités avec des gouttelettes de 95 et 149 micromètres;  $k$  vaut en moyenne 1,6 pour des vitesses entre 4 et 15 m/s. Toutefois, pour des vitesses supérieures à 15m/s, la valeur de  $k$  se stabilise à  $0,91 \pm 0,11$  peu importe la taille des gouttelettes. En général, avec le noir de fumée, la valeur moyenne de  $k$  est de  $1,0 \pm 0,2$  . Les fluctuations de l'ordre de 22% en bas de 10m/s peuvent être dues à la non-uniformité du revêtement.

# FACTEUR DE CORRECTION & VITESSE

Collargol sur verre & gouttes uniformes

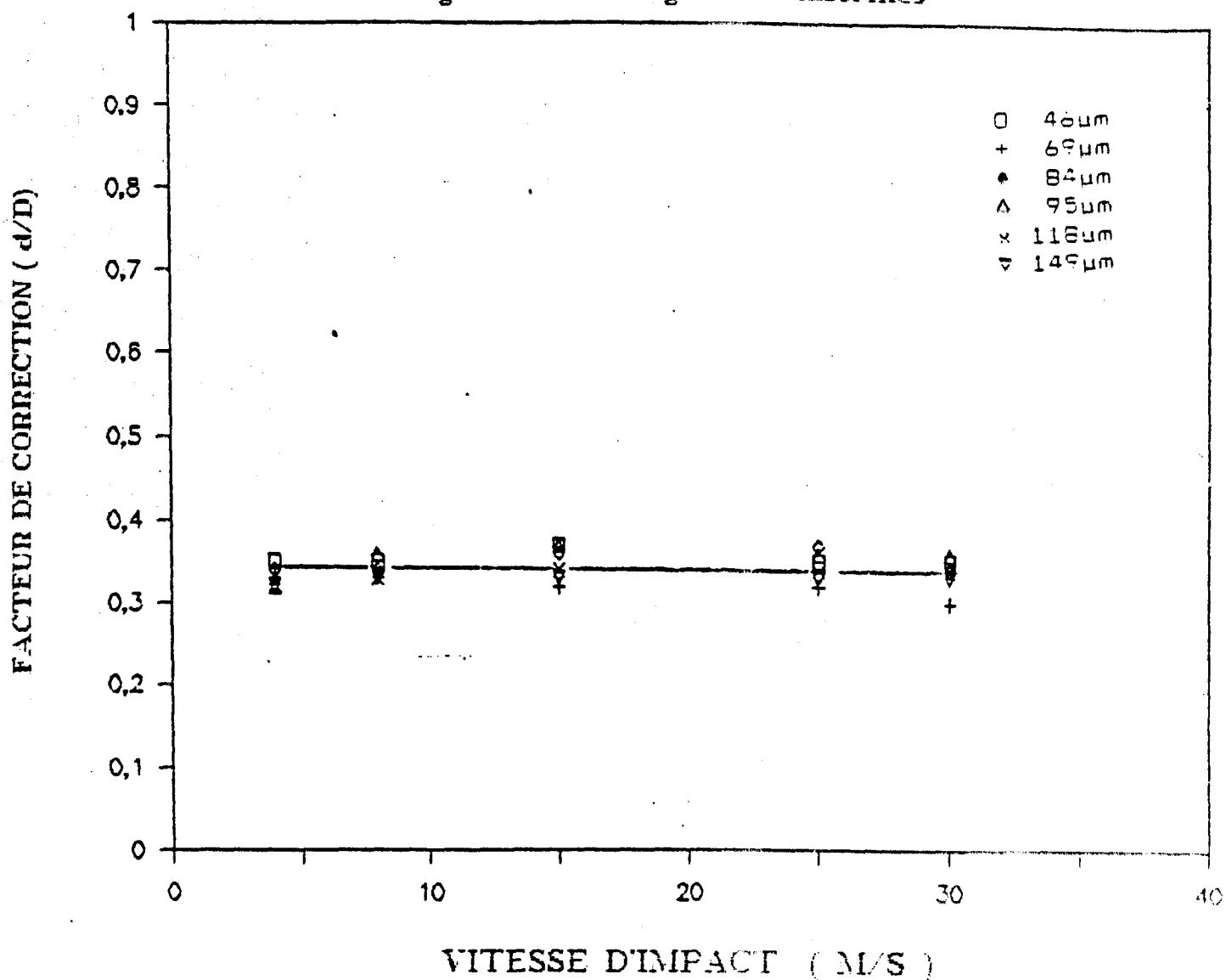


Figure 5.8 Facteur de correction  $k$  mesuré en fonction de la vitesse avec les gouttelettes uniformes de 46 à 149  $\mu\text{m}$  percutant sur un revêtement de collargol sur une lamelle de verre

# FACTEUR DE CORRECTION & VITESSE

Collargol sur film d'estar & gouttes uniformes

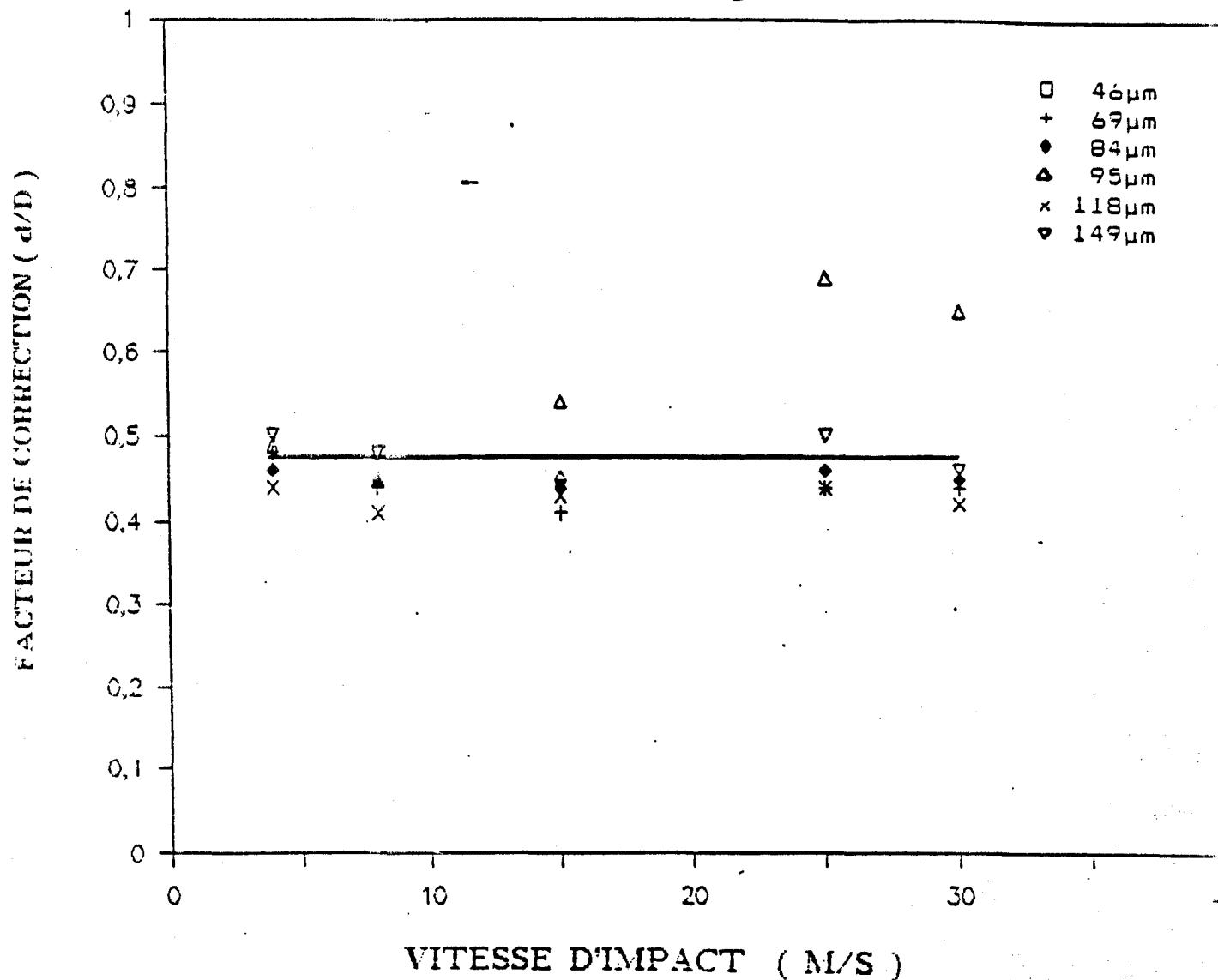


Figure 5.9 Facteur de correction  $k$  mesuré en fonction de la vitesse avec les gouttelettes uniformes de 46 à 149  $\mu\text{m}$  percutant sur un revêtement de collargol sur film d'estar .

# FACTEUR DE CORRECTION & VITESSE

Noir de fumée & gouttes uniformes

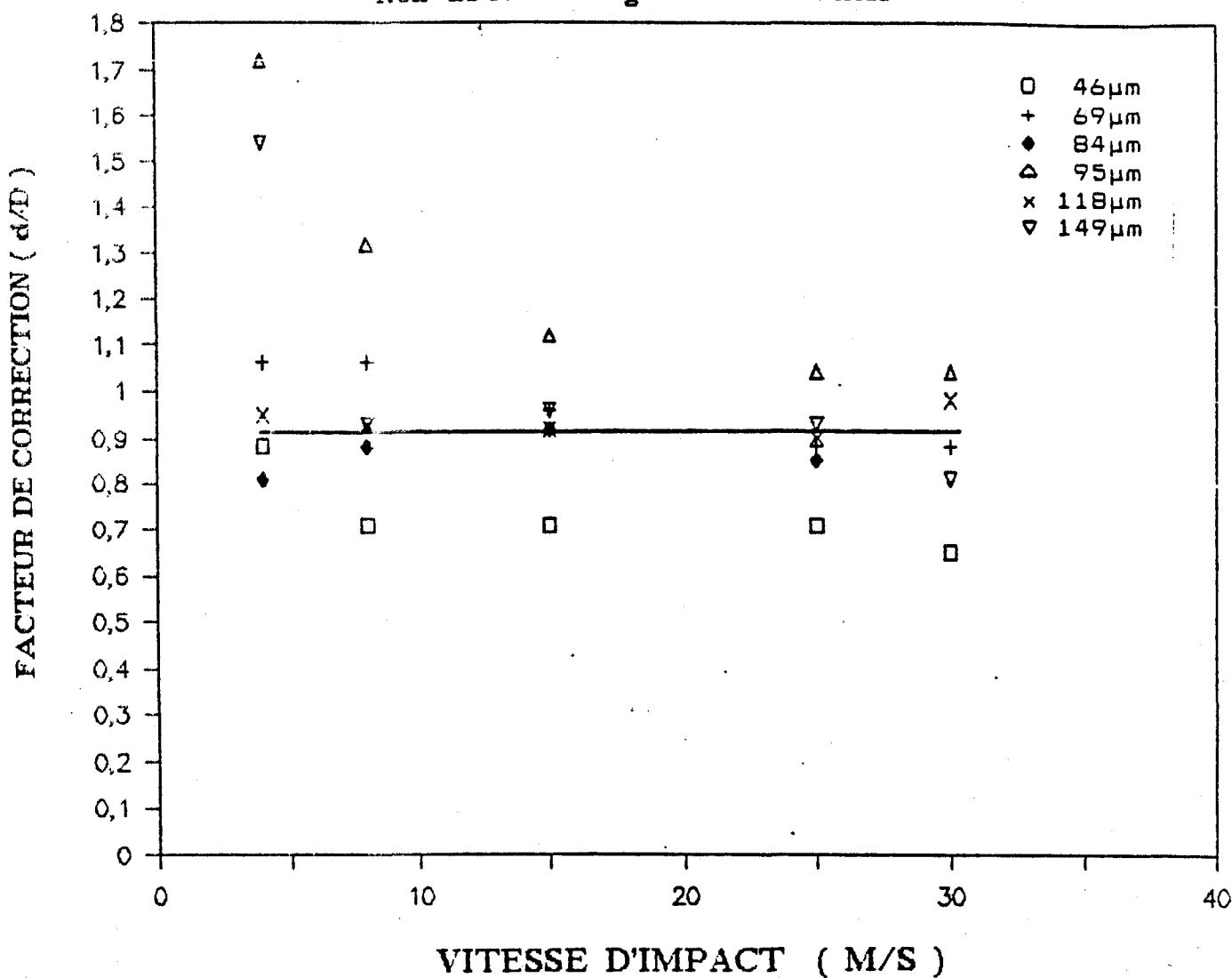


Figure 5.10 Facteur de correction  $k$  mesuré en fonction de la vitesse avec les gouttelettes uniformes de 46 à 149  $\mu\text{m}$  percutant sur un revêtement de noir de fumée sur une lamelle de verre

## 5.2 MESURE AVEC LE SPECTRE DE GOUTTELETTES

Dans cette étude, les gouttelettes uniformes sont remplacées par un spectre de gouttelettes et seules les méthodes utilisant le noir de fumée et le collargol sur verre ont été étudiées. La surface de la lamelle de verre recouverte des deux types de revêtement est de 25X75 mm. Le diamètre volumique moyen réel des gouttelettes a été déterminé par la méthode photographique. Le diamètre volumique moyen des impressions obtenu pour 5 vitesses d'impact entre 4 et 35m/s a été déterminé au microscope. Chaque mesure comporte environ 400 impressions laissées sur le revêtement.

Les résultats présentés à la figure 5.11 montrent qu'avec le revêtement noir de fumée sur verre le facteur de correction trouvé est complètement différent de celui obtenu précédemment avec des gouttelettes uniformes. La valeur moyen de  $k$  est de 0,45 au lieu de 1,0 soit une diminution de 55% , de plus elle diminue de 0,57 à 0,39 avec l'augmentation de la vitesse de 4 à 35m/s. Avec le revêtement collargol sur verre la valeur moyenne de  $k$  est sensiblement la même que celle obtenue avec les gouttelettes uniformes soit 0,33 et elle est indépendante des vitesses d'impact .

## FACTEUR DE CORRECTION & VITESSE

*Spectre de gouttelettes*

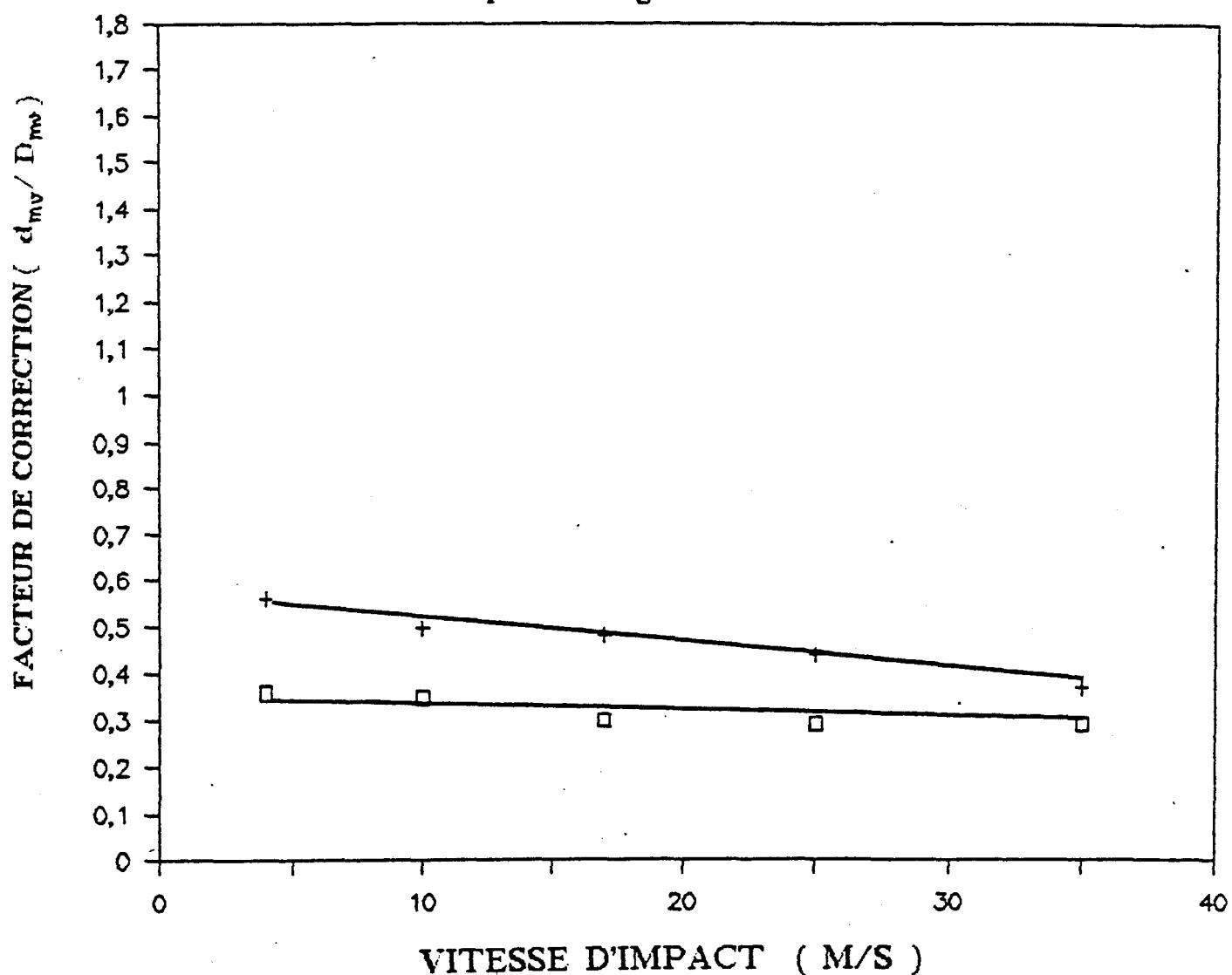


Figure 5.11 Facteur de correction  $k$  en fonction de la vitesse mesuré avec un spectre de gouttelettes

+ —→ Noir de fumée sur verre  
 □ —○ Collargol sur verre

# CHAPITRE

6

## Chapitre 6

## DISCUSSIONS

Au chapitre précédent, nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus. Au présent chapitre, nous discuterons des résultats en tenant compte des principales sources d'erreurs qui peuvent affecter chacune des différentes méthodes étudiées. Les corrections seront apportées si possible afin d'évaluer leurs effets.

La première partie de ce chapitre sera réservée à la méthode par impact et la deuxième partie discutera des résultats obtenus avec la méthode à l'huile.

### 6.1 METHODE PAR IMPACT

#### 6.1.1 JET DE GOUTTELETTES UNIFORMES

La mesure du diamètre des gouttelettes par les trois méthodes par impact étudiés fait intervenir des facteurs de correction qui diffèrent d'une méthode à l'autre (tableau 6.1). Ainsi, pour les gouttelettes uniformes de 46 à 149 micromètres, le facteur de correction mesuré dépend principalement de la nature du revêtement et du substrat, les valeurs retrouvées étant  $0,33 \pm 0,02$  avec le collargol sur verre, de  $0,48 \pm 0,06$  avec le collargol sur film d'estar et  $1,0 \pm 0,2$  avec le noir de fumée sur verre. Ces valeurs sont toutefois indépendantes de la vitesse d'impact et de la grosseur des gouttelettes pour toute la gamme de vitesses et de grosseurs étudiées. La

Tableau 6.1 Valeur moyenne du facteur de correction k  
mesurée avec des gouttelettes uniformes de  
46 à 149 $\mu$ m à des vitesses d'impact de 4 à  
30 m/s

METHODE DE MESURE	FACTEUR DE CORRECTION
Collargol sur verre	0,33 $\pm$ 0,02
Collargol sur film d'estar	0,48 $\pm$ 0,06
Noir de fumée sur verre	1,0 $\pm$ 0,2

méthode par impact la plus précise est celle utilisant le collargol sur verre ( 6 % de la variation sur k ), alors que la méthode la moins précise est celle du noir de fumée ( 20% de variation sur k ).

#### 6.1.2 SPECTRE DE GOUTTELETTES

Avec les gouttelettes provenant d'un spectre de gouttelettes variant entre 6 et 65 micromètres de diamètre, les valeurs obtenues pour k dépendent, comme avec les gouttelettes uniformes, du type de revêtement et du substrat, valant en moyenne  $0,33 \pm 0,05$  avec le collargol sur verre et  $0,45 \pm 0,10$  avec le noir de fumée (voir figure 5.11).

On constate, pour la méthode au collargol, que le facteur de correction est sensiblement le même avec le jet de gouttelettes uniformes comme avec le spectre de gouttelettes, la seule différence étant le pourcentage de fluctuation qui passe de 6% à 15%. Par ailleurs, pour le noir de fumée, le facteur de correction k mesuré avec le spectre de gouttelettes diffère considérablement, ce dernier passant de 1,0 à 0,45 soit une diminution de 55% par rapport à la valeur mesurée avec les gouttelettes uniformes. On peut s'interroger sur les raisons d'une telle différence entre le jet de gouttelettes et le spectre de gouttelettes avec le noir de fumée.

### 6.1.3 SOURCES D'ERREURS

Si nous examinons les sources d'erreurs qui entrent en jeu dans la mesure du diamètre des gouttelettes à l'aide des différentes méthodes étudiées, il y a :

- 1- L'erreur due à l'évaporation des gouttelettes dans l'air.
- 2- L'erreur de mesure.

A ces erreurs s'ajoutent :

- 1- L'erreur statistique.
- 2- L'erreur due au coefficient de captation.
- 3- L'erreur due à la superposition de gouttelettes.

#### 6.1.3.1 L'EVAPORATION DES GOUTTELETTES DANS L'AIR

D'après Fuchs (1959) une masse d'eau "  $dm$  " s'évaporant d'une gouttelette stationnaire de rayon "  $r$  " dans l'air pendant un temps "  $dt$  " est donné par l'équation :

$$dm = 4\pi r D(C_0 - C_1) dt \quad (6.1)$$

où  $D$  désigne le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau,  $C_0$  la concentration de la vapeur d'eau saturante à la température de la gouttelette et  $C_1$  la concentration de la vapeur d'eau à la température ambiante.

Pour des gouttelettes se déplaçant dans l'air à une vitesse  $v$ , cette évaporation est décrite par l'équation de Frössling (1940) :

$$dm = 4\pi r D(C_0 - C_1)(1 + \beta Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}) dt \quad (6.2)$$

où

$$Re = 2vr\gamma \quad (\text{Nombre de Reynold})$$

$\gamma$  = viscosité cinématique de l'air

$$Sc = \gamma/D \quad (\text{Nombre de Schmidt})$$

$$\beta = 0,276 \quad (\text{valeur expérimentale})$$

L'évaporation est donc proportionnelle au rayon de la gouttelette, au taux d'humidité relative de l'air ambiante, au temps d'exposition à l'air et à la vitesse de déplacement de la gouttelette. Cette évaporation peut entraîner une diminution du diamètre de la gouttelette en accord avec l'équation suivante :

$$d_0 - d = BD(C_0 - C_1)(1 + \beta Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}})t \quad (6.3)$$

où  $d_0$  représente le diamètre initial de la gouttelette,  $d$  le diamètre de la gouttelette et  $t$  la durée de l'exposition dans l'air.

Le rapport  $d/d_0$  des gouttelettes dans l'air à 21 °C à 60% d'humidité relative en fonction du temps d'exposition et du diamètre des gouttelettes à deux vitesses de déplacement est présenté à la figure 6.1.

Dans nos mesures, l'humidité relative de l'air ambiant a été maintenue à au moins 60% à une température d'environ 21 °C. Le temps d'exposition des gouttelettes à l'air est le temps qu'elles prennent à parcourir la distance entre leur position et la lamelle, soit 0,1m dans le montage avec gouttelettes uniformes et de 0,01m dans le montage avec spectre de gouttelettes ce qui donne des temps d'exposition (à une vitesse de

# EVAPORATION DES GOUTTES DANS L'AIR

Gouttelettes mobiles

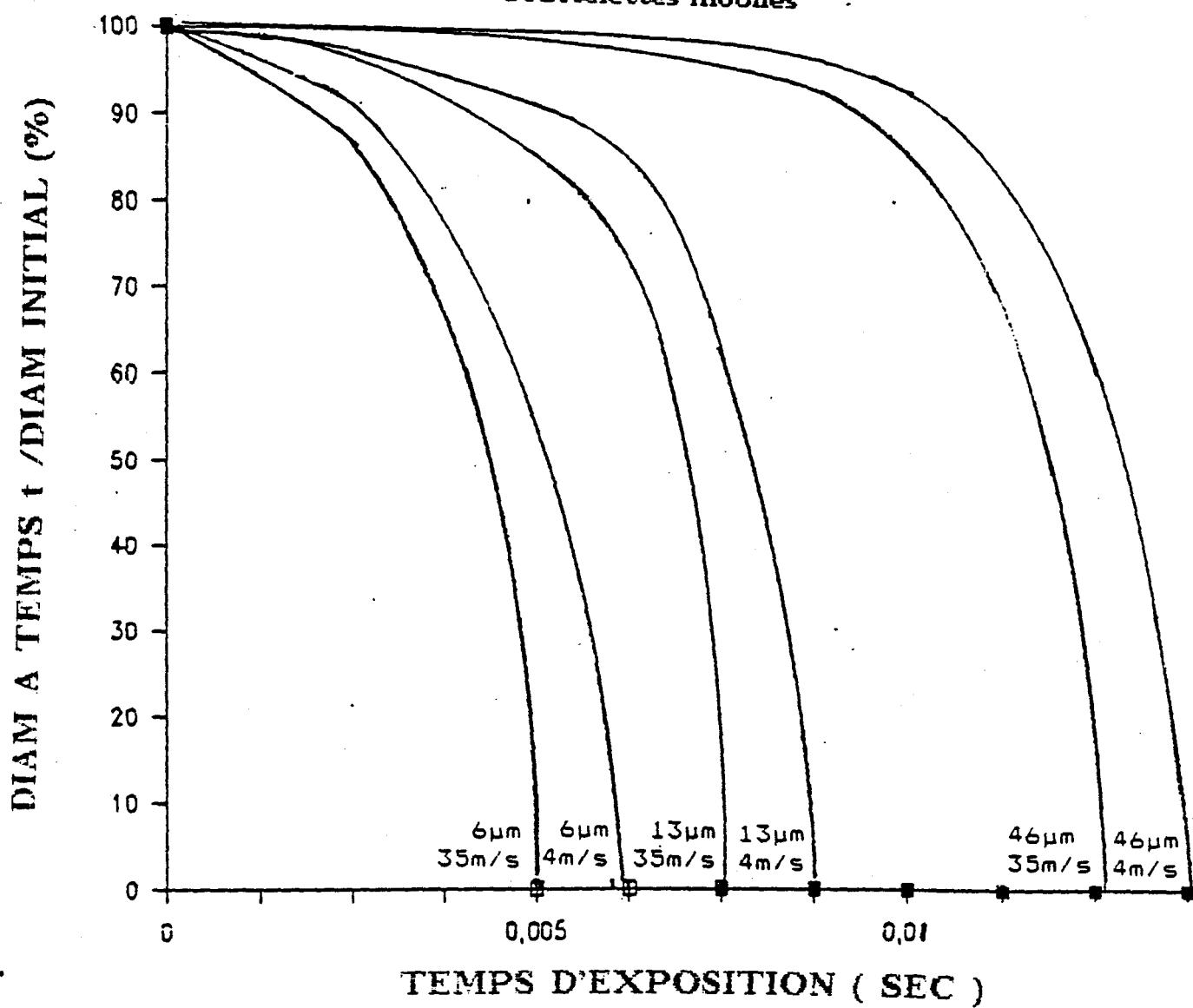


Figure 6.1 Diminution du diamètre des gouttelettes par évaporation dans l'air à 60% d'humidité relative et à 21°C

4m/s) de 0,02 et 0,002 seconde respectivement. D'après la figure 6.1, les gouttelettes de 13 micromètres et plus gardent encore, après ces périodes d'exposition, 95% de leur diamètre initial. Les gouttelettes les plus petites (6 micromètres) perdent 15% de leur diamètre initial, cependant cette diminution affecte très peu la valeur du diamètre volumique moyen calculé. Ces résultats montrent hors de toute doute que l'erreur due à l'évaporation des gouttelettes dans l'air est négligeable dans le contexte expérimental utilisé pour nos mesures.

#### 6.1.3.2 L'ERREUR STATISTIQUE

L'erreur expérimentale associée à la mesure du diamètre volumique moyen est surtout liée à l'erreur statistique. Si l'on a N mesures de diamètres, Borel (1934) a montré à l'aide du calcul de probabilité que l'erreur statistique peut être évaluée à partir de l'écart type donné par la relation:

$$\sigma = \sqrt{N} / N$$

Comme le calcul du diamètre volumique moyen nécessite le comptage de 130 à 500 gouttelettes, l'évaluation de l'erreur statistique donne une imprécision entre 4,4 et 8,7%.

#### 6.1.3.3 L'ERREUR DANS LA DETERMINATION DU DIAMETRE DE GOUTTELETTES

Cette erreur a déjà été calculée au chapitre 3 pour la méthode au collargol sur verre, elle a été estimée à 0,6% pour les gouttelettes de 149 $\mu$ m et à 1,5% pour celles de 46 $\mu$ m .

#### 6.1.3.4 CAPTATION DES GOUTTELETTES SUR LA LAMELLE

Ce facteur concerne uniquement les mesures effectuées avec un spectre de gouttelettes où la captation est maximale pour les plus grosses gouttelettes et minimale pour les plus petites. D'après Langmuir (1946), en effet, pour un même flux de gouttelettes le nombre de gouttelettes captées dépend de la grosseur des gouttelettes, de la vitesse de l'écoulement d'air et de la forme de l'objet. La figure 6.2 présente le coefficient de captation des gouttelettes de 6 à 65 micromètres de diamètre évalué par la méthode de Langmuir à des vitesses de 4 à 25m/s sur un ruban de 25mm de largeur dans un écoulement d'air non-turbulent.

D'après les données de la figure 6.2, à 4m/s, la vitesse la plus faible utilisée dans nos mesures, le coefficient de captation est presque nul pour des gouttelettes de 6 micromètres, de 47% pour celles de 13 micromètres, et peut atteindre 90% à 95% pour celles de 39 et 52 micromètres. La même tendance est notée aux vitesses supérieures à 4m/s. La très faible valeur du coefficient de captation aux faibles vitesses aura pour effet de diminuer le nombre de gouttelettes qui frappent la lamelle, ceci va contribuer à augmenter considérablement la valeur observée du diamètre volumique moyen des gouttelettes surtout aux vitesses inférieures à 10m/s. Toutefois, à des vitesses plus élevées la variation du coefficient de captation est beaucoup moins importante.

# COEFFICIENT DE CAPTATION & VITESSE

93

Plaque 25 mm & Gouttes 5 à 65  $\mu\text{m}$

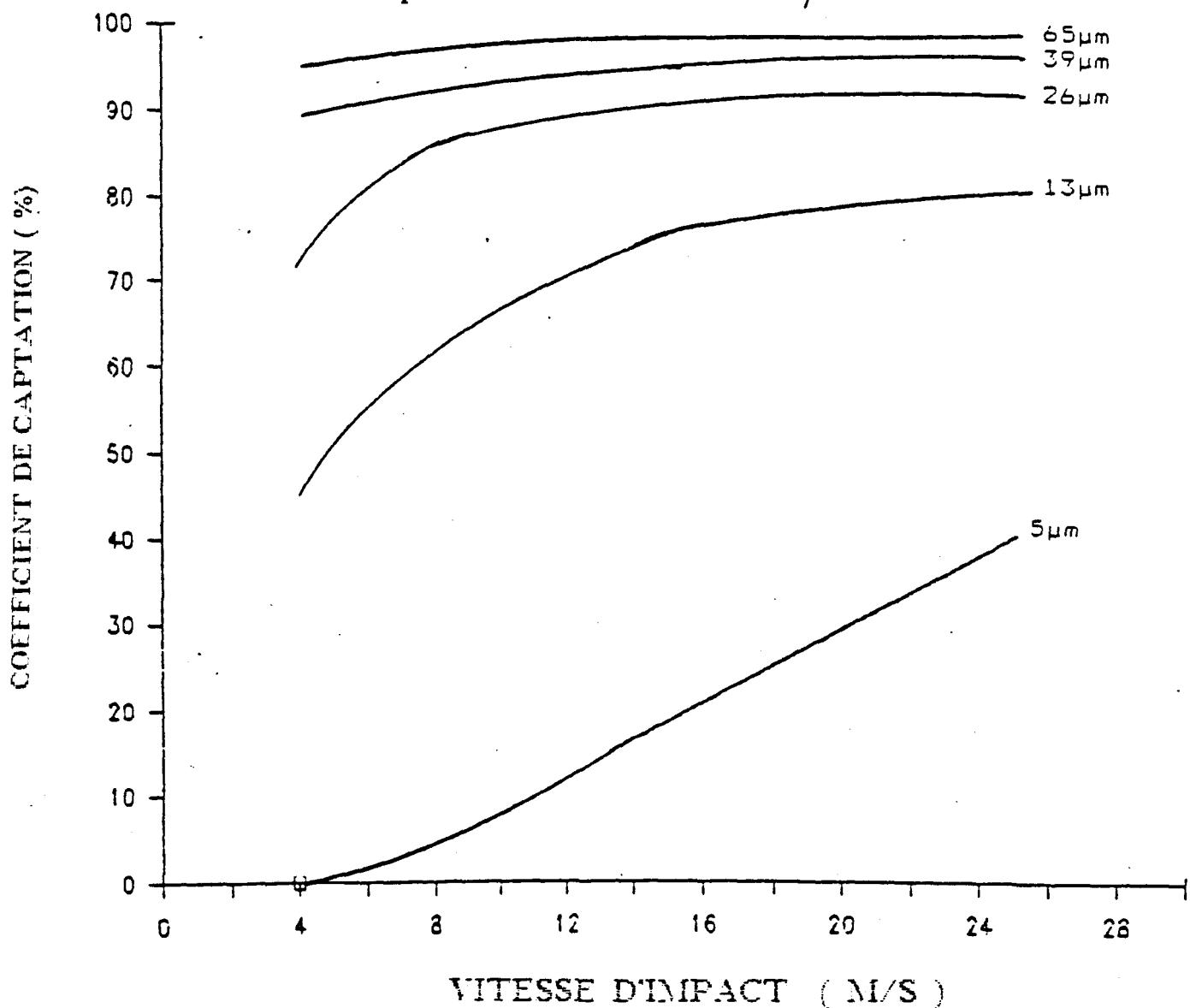


Figure 6.2 Coefficient de captation des gouttelettes sur une plaque de 25mm de largeur ( d'après Langmuir, 1946 )

Afin d'avoir une idée de l'erreur reliée à ce facteur, nous avons évalué avec la méthode au collargol l'effet du coefficient de captation sur le diamètre volumique moyen en corrigeant la distribution de gouttelettes mesurées à l'aide des coefficients de captation présentés à la figure 6.2 .

Les figures 6.3,6.4 et 6.5 présentent les spectres de gouttelettes obtenus par la méthode au collargol à 17,25 et 35 m/s avant et après l'application de la correction du coefficient de captation de gouttelettes. On peut remarquer que la correction apportée fait augmenter le nombre de petites gouttelettes de moins de 9 micromètres et diminuer celles plus grosses que 9 micromètres.

Le tableau 6.2 présente les valeurs de diamètre volumique moyen mesurées pour un même spectre de gouttelettes à trois vitesses d'impact 17, 25 et 35 m/s. On note que la correction apportée diminue les diamètres volumiques moyens de 3 à 6% . Après l'application de la correction, les diamètres volumiques moyens trouvés correspondent assez bien à ceux mesurés par la méthode photographique. Le diamètre volumique moyen déterminé par la méthode photographique est de  $19,1 \pm 1,9$  micromètres, comparativement à  $19,9 \pm 1,1$  ;  $20,3 \pm 1,6$  et  $20,1 \pm 1,1$  . Après correction, il ressort de ce calcul que l'erreur du coefficient de captation de gouttelettes peut dans certaines conditions causer une sur-estimation du diamètre volumique moyen .

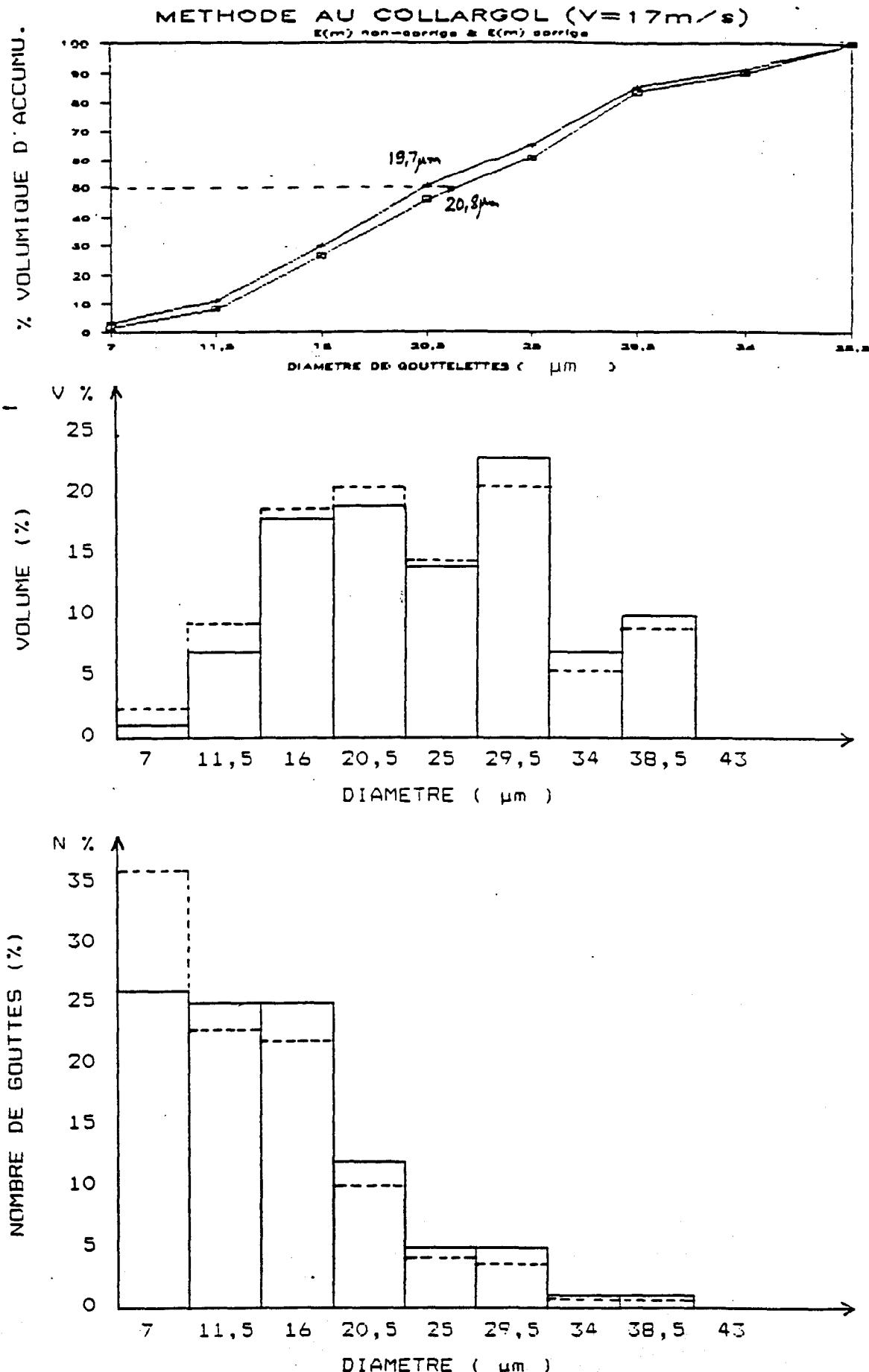


Figure 6.3 Spectre de gouttelettes mesuré à  $17\text{m/s}$  avec la méthode au collargol avant et après la correction du coefficient de captation de gouttelettes

— sans correction  
--- avec correction

METHODE AU COLLARGOL ( $V=25\text{ m/s}$ )

96

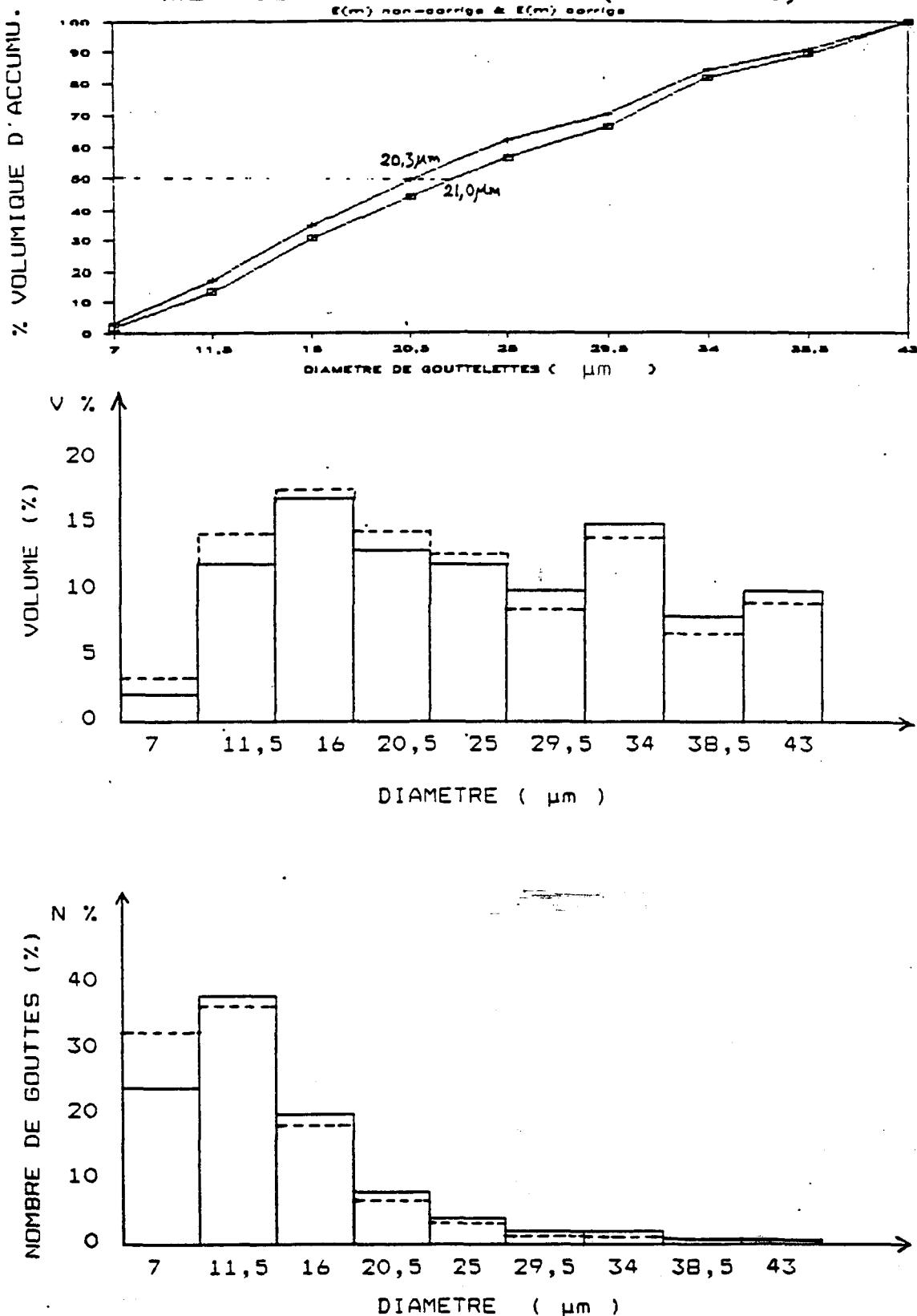


Figure 6.4 Spectre de gouttelettes mesuré à  $25\text{ m/s}$  avec la méthode au collargol avant et après la correction du coefficient de captation des gouttelettes

— sans correction  
--- avec correction

METHODE AU COLLARGOL ( $V=35m/s$ )

97

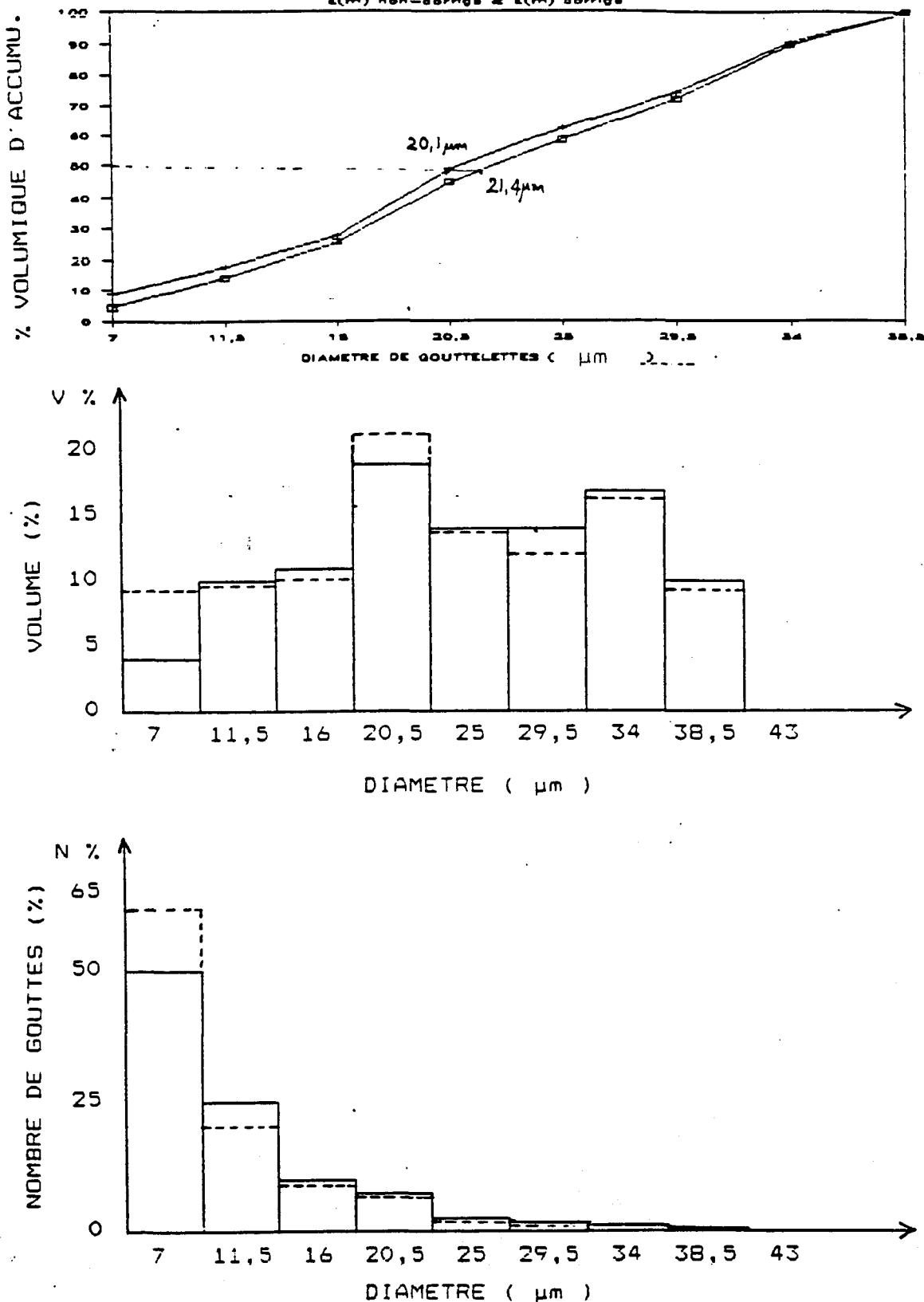


Figure 6.5 Spectre de gouttelettes mesuré à  $35m/s$  avec la méthode au collargol avant et après la correction du coefficient de captation de gouttelettes

— sans correction  
-- avec correction

Tableau 6.2 Diamètres volumiques moyens déterminés  
par la méthode au collargol à 17 , 25  
et 35 m/s

DIAMETRE VOLUMIQUE MOYEN μm	VITESSE ( M/S )		
	17	25	35
SANS CORRECTION	20,8	21,0	21,4
AVEC CORRECTION DUE A L'EFFET DU COEFF. DE CAPTATION	19,7 ±1,1	20,3 ±1,6	20,1 ±1,1
% VARIATION	-5,2	-3,3	-6,0
METHODE PHOTOGRAPHIQUE	19,1 ± 1,9		

#### 6.1.3.5 L'EFFET DE LA SUPERPOSITION DES GOUTTELETTES

Nous avons remarqué sur l'échantillon obtenu par la méthode au collargol qu'il y avait des traces très visibles d'impact multiples de gouttelettes. Les figures 6.6 a,b,c,d présentent les cas d'impacts multiples pouvant atteindre jusqu'à cinq impacts au même endroit (figure 6.6d).

L'observation de traces des gouttelettes superposées à la figure 6.6 montrent que durant le temps d'exposition de la lamelle (1/25 seconde) plusieurs gouttelettes peuvent percuter au même endroit. Or, dans la mesure du diamètre des gouttelettes avec la méthode utilisant le collargol, on ne tient pas compte des traces de gouttelettes présentant des cas de superposition. On comprend ici pourquoi après la correction de l'effet du coefficient de captation des gouttelettes le facteur de correction trouvé est le même que celui trouvé avec les gouttelettes uniformes. Ainsi, dans la méthode au collargol, le fait d'éliminer les traces montrant de la superposition ne fait pas intervenir l'effet de la superposition de gouttelettes.

Avec la méthode au noir de fumée, par contre, l'observation des impacts impliquant des gouttelettes superposées est plus difficile. Nous avons observé, effectivement qu'avec le noir de fumée, le nombre de superpositions est d'environ seulement 25 % de celui trouvé dans la même condition avec la méthode

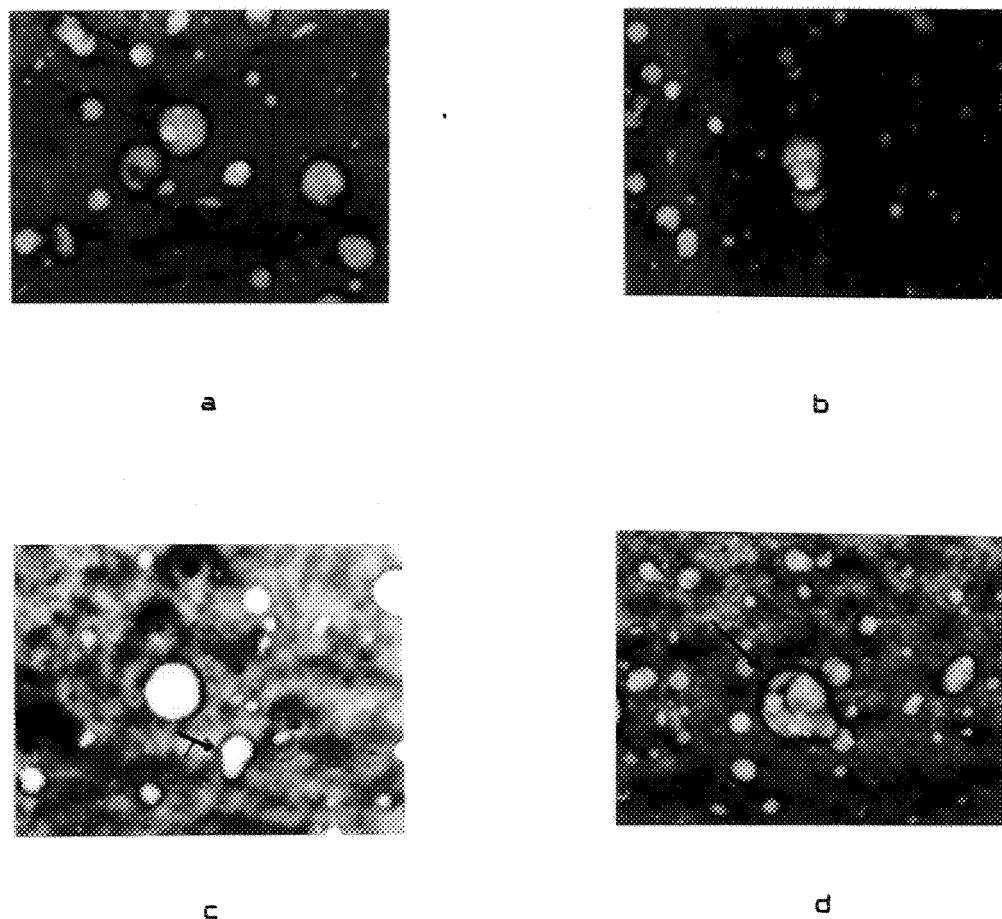


Figure 6.6 Cas types de superposition de gouttelettes :  
a/superposition complète  
b et c/ superposition double  
d/superposition multiple

au collargol. Une explication possible pourrait être qu'avec le revêtement au noir de fumée, le temps de séchage nécessaire pour former les traces est plus long que celui nécessaire avec le film de collargol ce qui pourrait favoriser la coalescence des gouttelettes lors d'impacts multiples. Cette superposition pourrait expliquer en partie la différence notée précédemment entre le facteur de correction obtenu avec le jet de gouttelettes uniformes et le spectre de gouttelettes. Toutefois, en raison de la très grande imprécision (20%) inhérente à la méthode du noir de fumée comparativement à celle du collargol, il n'apparaît pas utile d'en discuter plus longuement.

## 6.2 METHODE A L'HUILE

Avec des gouttelettes uniformes comprises entre 46 et 149 micromètres, la corrélation entre le diamètre d'une gouttelette mesuré par la méthode à l'huile et celui mesuré par la méthode photographique est excellente, soit la valeur de  $0,97 \pm 0,04$ . Ceci est conforme avec le principe de base de la méthode à l'huile accepté par Rhinehart (1969), Dessens (1961), Golitzine (1951), Stallabrass (1986). Cette corrélation apparaît d'autre part être indépendante de la grosseur des gouttelettes et de la vitesse d'impact dans l'intervalle étudié ( 4 à 30 m/s ).

Avec les gouttelettes entre 6 et 65 micromètres provenant d'un spectre de gouttelettes, la corrélation entre le diamètre

volumique moyen des gouttelettes obtenu par la méthode à l'huile et celui obtenu par la méthode photographique est beaucoup moins bonne qu'avec les gouttelettes uniformes. Le diamètre volumique moyen mesuré pour un spectre de gouttelettes par la méthode à l'huile est en effet de 1,2 à 1,6 fois plus élevé que celui déterminé à partir de photographies des gouttelettes, de plus la corrélation semble dépendre de la vitesse d'impact passant de 1,2 à 4m/s à 1,6 à 35m/s .

Les valeurs mesurées dans ce travail entre 1,2 et 1,6 se situent dans la même intervalle (1,0 - 2,0 ) que celles trouvées par Gall (1971), Gates (1983), Keller (1978) et Stallabrass (1986) qui ont comparé les mesures obtenues par la méthode à l'huile et par les méthodes non-captives comme l'holographie ou par le granulomètre FSSP.

On peut avoir une idée de la corrélation obtenue par ces auteurs à la figure 6.7 qui comparent les diamètres volumiques moyens des gouttelettes mesurées par la méthode à l'huile à ceux obtenus avec quelques méthodes non-captives.

Pour expliquer la différence notée avec la méthode à l'huile entre les diamètres mesurés avec un spectre de gouttelettes et ceux mesurés avec le jet de gouttelettes uniformes nous

# RESULTATS PUBLIES

103

Méthodes non-captives & à l'huile

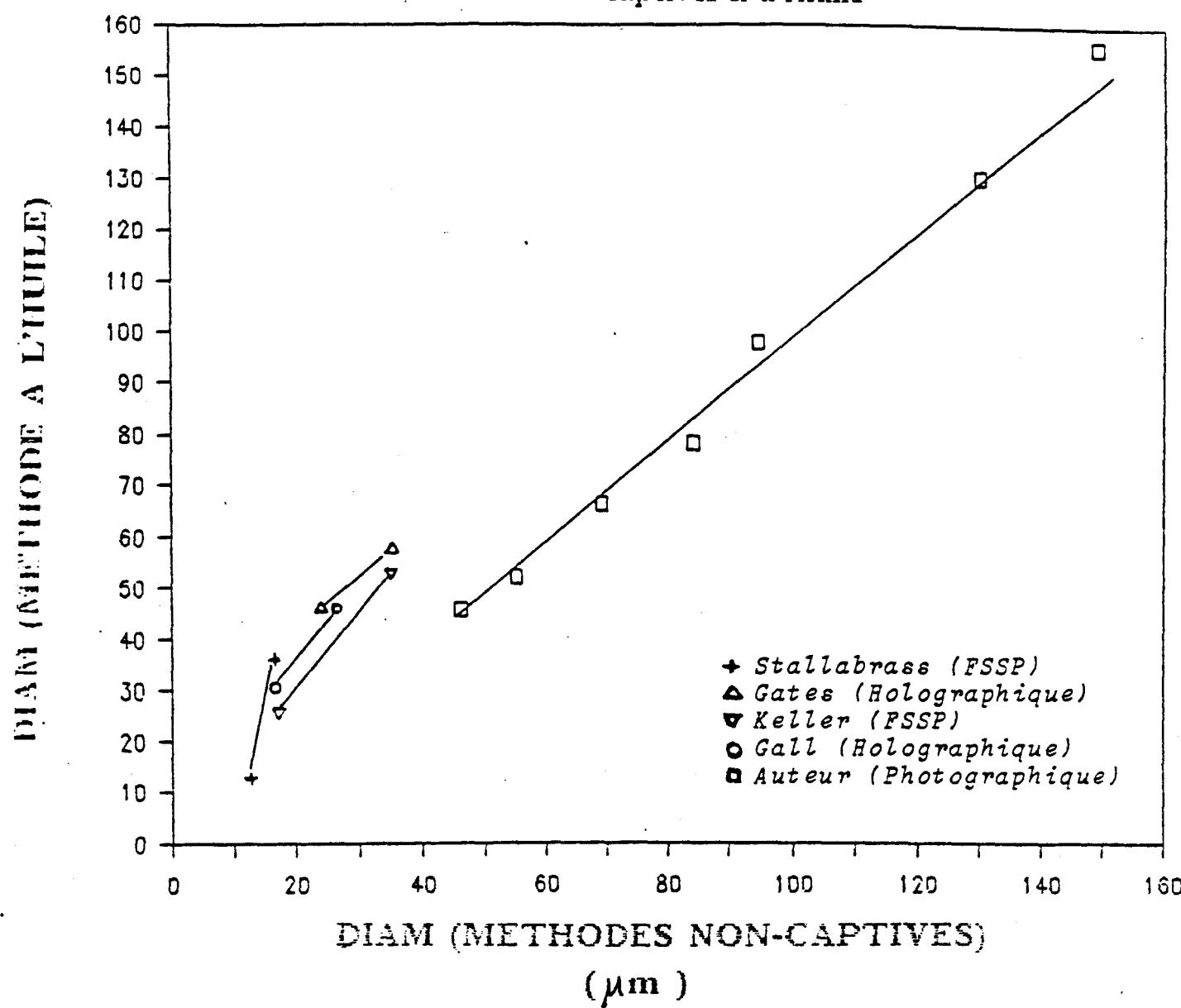


Figure 6.7 Comparaison des résultats publiés obtenus par la méthode à l'huile et les méthodes non-captives

avons examiné les sources d'erreurs possibles. Tout d'abord, il y a les erreurs qui sont communes aux deux types de gouttelettes soit :

- 1- L'évaporation dans l'air
- 2- La dissolution dans l'huile
- 3- L'erreur de mesure du diamètre lui-même

En seconde lieu, il y a des erreurs propres au spectre de gouttelettes, soit :

- 1- L'erreur statistique.
- 2- L'erreur provenant de la captation différentielle des gouttelettes.
- 3- L'erreur due à la superposition et ou à la coalescence des gouttelettes.

#### 6.2.1 L'EVAPORATION DES GOUTTELETTES DANS L'AIR

Ce phénomène est identique à celui discuté précédemment avec les méthodes par impact et pour les mêmes raisons il reste négligeable.

#### 6.2.2 LA DISSOLUTION DES GOUTTELETTES DANS L'HUILE

Comme nous avons montré au chapitre 5, l'huile utilisée est une huile qui a été choisie en raison de sa qualité pour conserver les gouttelettes intactes pendant le temps de mesure. C'est pourquoi l'erreur due à ce facteur est jugée comme étant négligeable.

### 6.2.3 L'ERREUR STATISTIQUE

Comme expliqué au paragraphe 6.1.2.2, l'erreur associée à cette mesure est entre 4,4 et 8,7%.

### 6.2.4 L'ERREUR DANS LA DETERMINATION DU DIAMETRE

Cette erreur qui a déjà été évaluée au chapitre 3 à la section 3.3.3 est comprise entre 1,6 à 5,1% pour les gouttelettes mesurant entre 46 à 149 micromètres.

### 6.2.5 L'EFFET DU COEFFICIENT DE CAPTATION DES GOUTTELETTES

L'effet de ce facteur est le même que celui expliqué dans le cas des méthodes par impact. Ce facteur occasionne une surestimation du diamètre volumique moyen de 3 à 6% de la valeur mesurée pour le spectre de diamètre volumique moyen de  $20\mu\text{m}$ .

### 6.2.6 L'EFFET DE LA COALESCENCE DES GOUTTELETTES

Si nous examinons les spectres de gouttelettes provenant d'une même source, l'un mesuré par la méthode photographique (figure 4.20a) et l'autre dans différentes conditions de vitesse par la méthode à l'huile (figure 4.20 b,c,d), nous pouvons remarquer que les trois spectres de gouttelettes mesurés par la méthode à l'huile contiennent des gouttelettes beaucoup plus grosses que celles mesurées par la méthode photographique. La même observation a été faite sur les spectres mesurés avec la méthode à l'huile par Stallabrass (1986) et par Gates (1983) (figure 6.8).

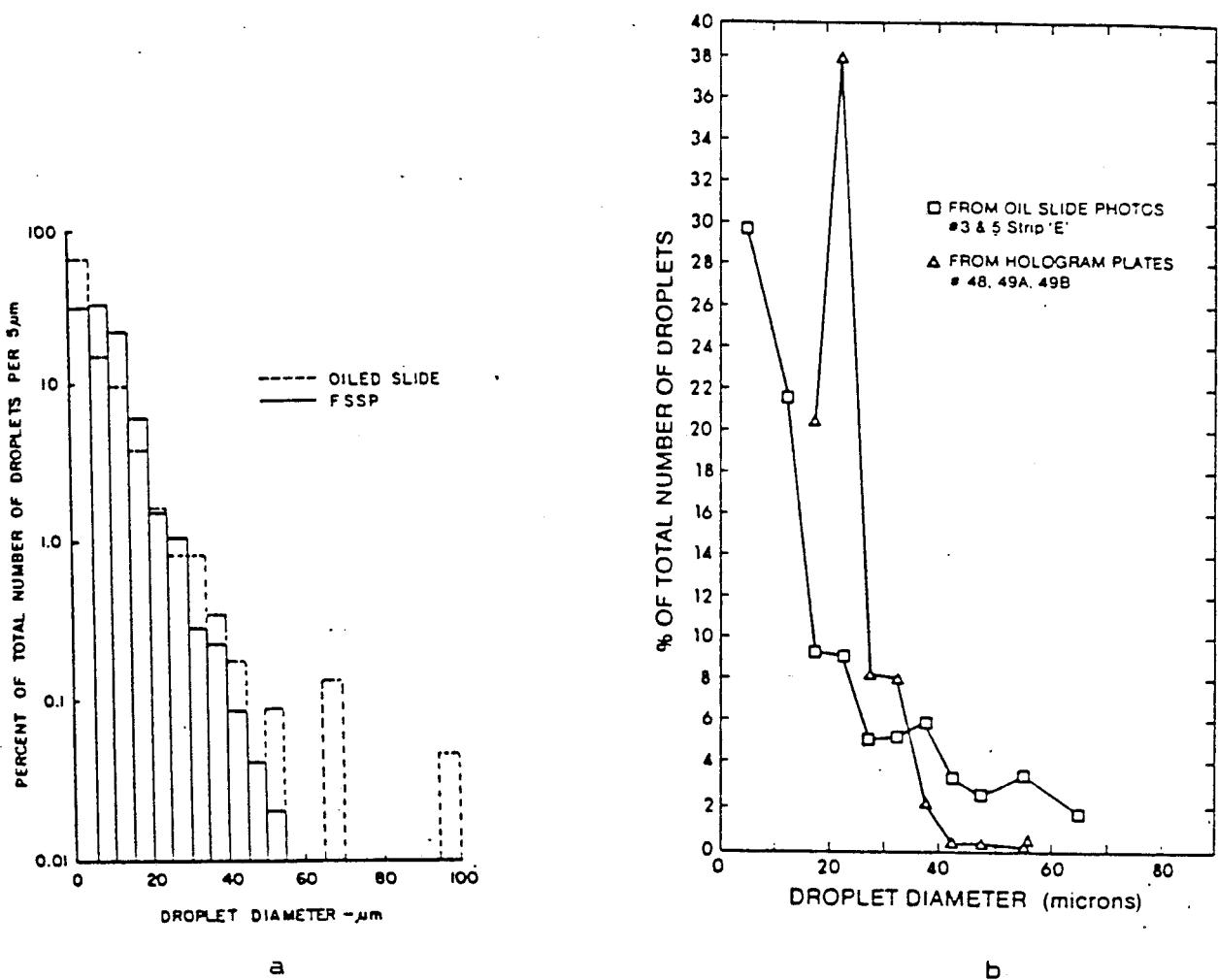


Figure 6.8 Comparaison des histogrammes de gouttelettes déterminés avec la méthode à l'huile et avec le FSSP par Stallabrass (a) et par holographie par Gates (b)

Pour expliquer ce phénomène Stallabrass, Gall et Gates ont avancé l'hypothèse d'une coalescence des gouttelettes. Nous avons vérifié cette hypothèse en examinant les traces laissées par des gouttelettes captées sur un film de collargol et les gouttelettes captées par un film d'huile dans les mêmes conditions. En effet, sur le film de collargol il y a des traces très visibles de superposition de gouttelettes alors que dans la couche d'huile des gouttelettes présentent une forme sphérique identique pour toutes les grosseurs de gouttelettes. Dans la méthode à l'huile, les gouttelettes percutant un même endroit peuvent s'agglomérer ensemble et former ainsi une gouttelette unique plus volumineuse. Dans ce mécanisme de coalescence, la grosseur des gouttelettes peut dépasser la grosseur qui existe dans le spectre réel de gouttelettes.

Le fait d'avoir quelques grosses gouttelettes de plus dans une distribution de gouttelettes affecte considérablement la valeur du diamètre volumique moyen calculé. Prenons comme exemple le spectre de gouttelettes présenté à la page 63 (méthode à l'huile à une vitesse d'impact de 10m/s); avec ce spectre, on observe 3 gouttelettes de 59 micromètres. Celles-ci représentent seulement 0,6% du nombre total des gouttelettes mais occupent 14% du volume total. Le diamètre volumique moyen de ce spectre est de 28,9 micromètres. Si on ne tient pas compte de ces trois gouttelettes, le diamètre

volumique moyen va être réduit de 28,9 micromètres à 25,9 micromètres soit une diminution de 10% .

Pour évaluer l'importance du phénomène de la coalescence sur le calcul du diamètre volumique moyen à partir des diamètres mesurés par la méthode à l'huile, nous avons corrigé la distribution de gouttelettes en éliminant les gouttelettes formées par coalescence. Le nombre et la grosseur des gouttelettes résultant de la coalescence ont été évalués à partir des traces observées sur une lamelle recouverte de collargol placée dans la même condition que la lamelle recouverte d'huile. Nous avons appliqué la correction en tenant compte des effets de la coalescence et du coefficient de captation sur les distributions de gouttelettes mesurées par la méthode à l'huile à 4m/s et à 17m/s. Les figures 6.9 et 6.10 présentent les spectres de gouttelettes obtenus à 4m/s et à 17m/s par la méthode à l'huile avant et après la correction.

Après ces corrections, les diamètres obtenus sont respectivement de 20,9 micromètres et 21,4 micromètres ce qui implique que le diamètre volumique moyen des gouttelettes dans l'huile vaut 1,09 et 1,12 fois celui des gouttelettes mesurées dans l'air respectivement (tableau 6.3). Ces résultats sont assez proches des valeurs trouvées avec les gouttelettes uniformes ( $0,97 \pm 0,04$ ) et sont à la limite de l'erreur de mesure.

METHODE A L'HUILE (  $V = 4 \text{ m/s}$  )

NON CORRIGÉ & CORRIGÉ

109

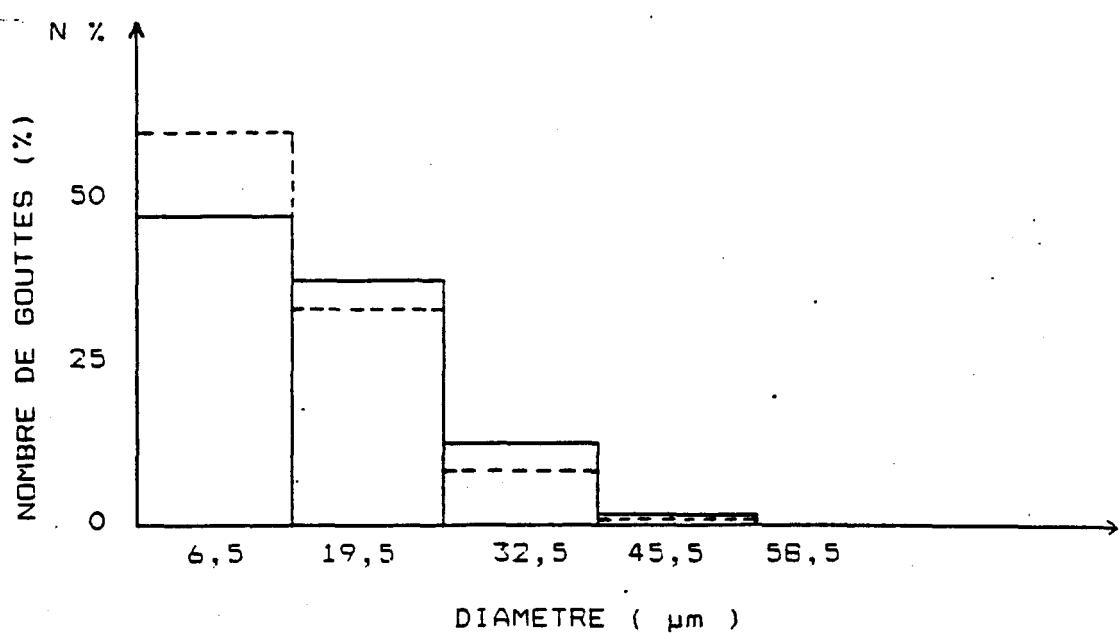
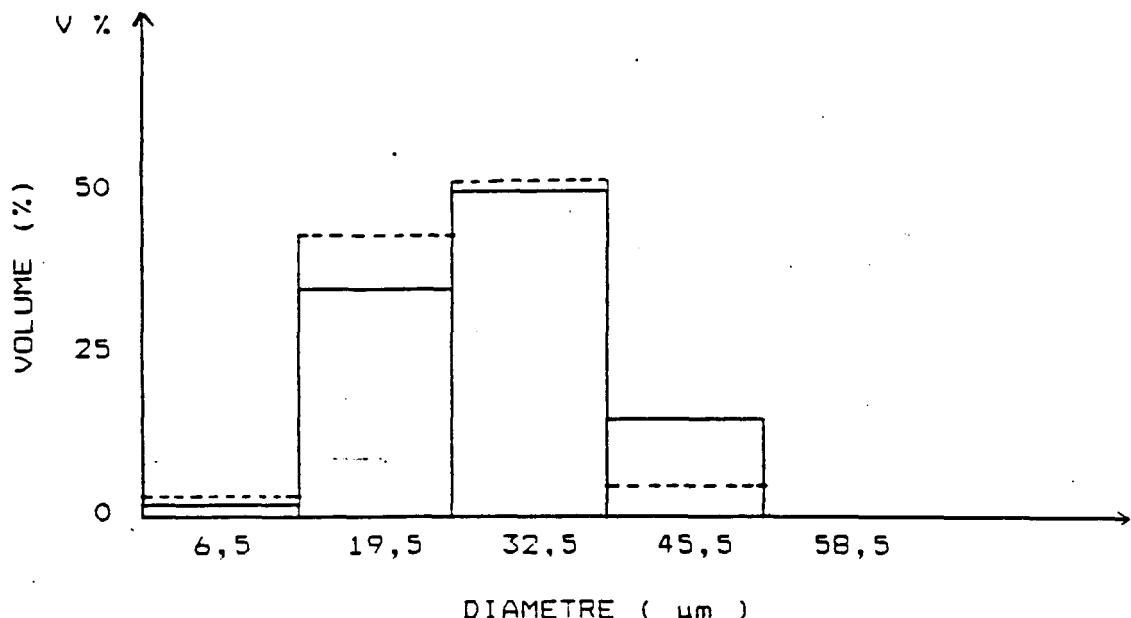
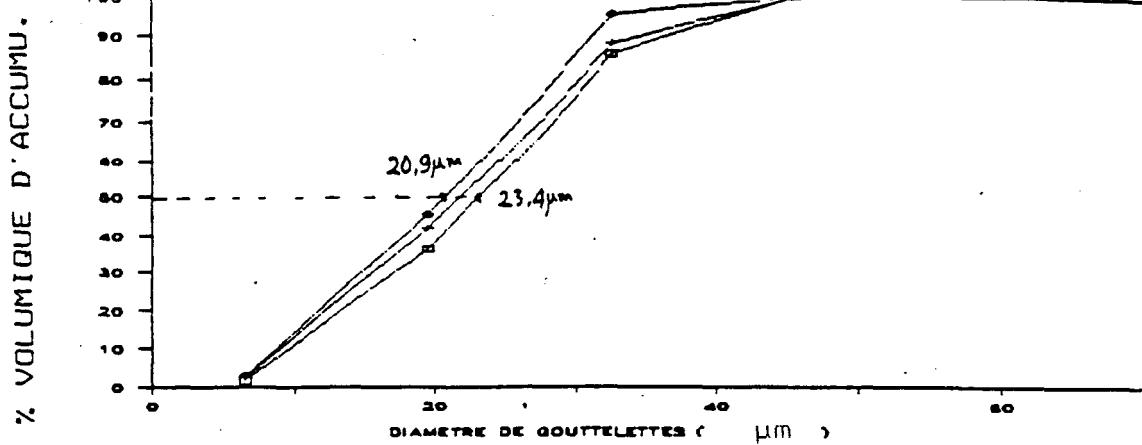


Figure 6.9 Spectre de gouttelettes mesuré avec la méthode à l'huile à  $4 \text{ m/s}$  avant et après la correction de l'effet du coefficient de captation et celui de la superposition des gouttelettes

— sans correction  
-- avec correction

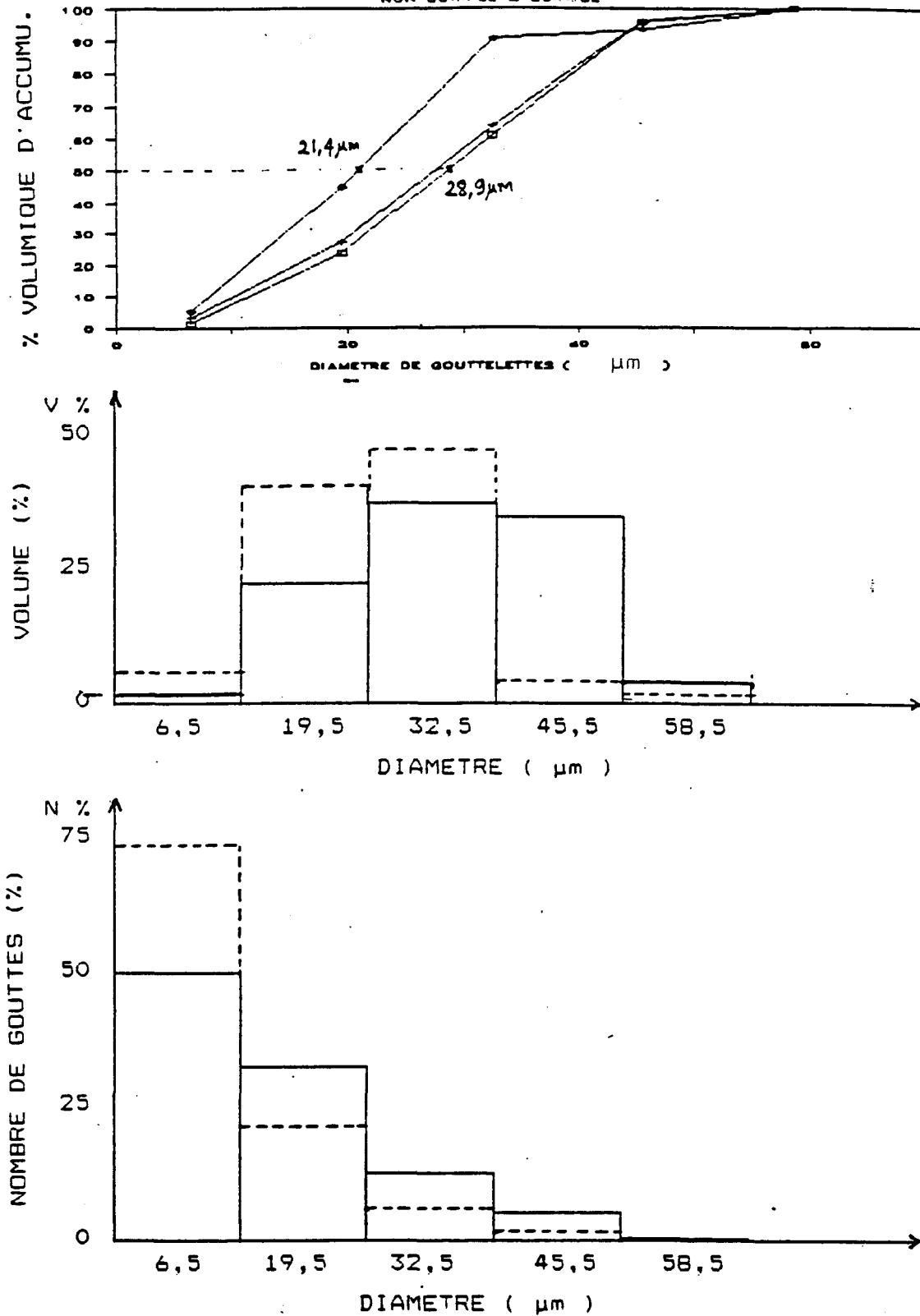


Figure 6.10 Spectre de gouttelettes mesuré avec la méthode à l'huile à 17m/s avant et après la correction de l'effet du coefficient de captation et celui de la superposition des gouttelettes

— sans correction  
--- avec correction

Tableau 6.3 Diamètres volumiques moyens d'un spectre  
de gouttelettes déterminés par la méthode  
à l'huile à 4 et 17 m/s

DIAMETRE VOLUMIQUE MOYEN μm	VITESSE (M/S)	
	4	17
SANS CORRECTION	23,4	28,9
APRES CORRECTION DUE A L'EFFET DU COEFFICIENT DE CAPTATION	22,2	27,8
APRES CORRECTION DUE AUX L'EFFET DU COEFF. DE CAPTATION ET DE LA SUPERPOSITION	20,9	21,4
METHODE PHOTOGRAPHIQUE	19,1	19,1

# CHAPITRE

7

## Chapitre 7

## CONCLUSION

Cette étude, en utilisant un jet de gouttelettes uniformes et un spectre de gouttelettes pour étudier les méthodes à l'huile, au collargol et au noir de fumée, nous a permis de préciser le comportement des gouttelettes dans le film d'huile, de déterminer précisément la taille des gouttelettes emprisonnées dans ce liquide et de mesurer celles des traces laissées sur les revêtements. Elle nous a permis également de comparer chacune des ces méthodes dans la détermination du diamètre volumique moyen d'un spectre de gouttelettes.

Concernant l'observation du comportement des gouttelettes dans le film d'huile, on a montré que les gouttelettes captées pénètrent dans l'huile où elles peuvent se dissoudre, se déplacer verticalement ou horizontalement en gardant toujours leur forme sphérique. L'huile Aeroshell Premium SAE 100W retarde la dissolution de plusieurs minutes pour les gouttelettes de quelques micromètres et de plusieurs heures pour les gouttelettes de plus de 46 micromètres. Quand une gouttelettes est en suspension dans l'huile, elle garde sa forme sphérique et son diamètre initial. Cette caractéristique ne dépend pas de la vitesse d'impact et de la grosseur de la gouttelette. Quand la gouttelette touche la lamelle de verre elle s'aplatie pour donner une trace circulaire entre 1,6 et 1,8 fois son diamètre initial.

Avec le collargol, le substrat est un facteur important. Avec une lamelle de verre comme substrat l'impression vaut trois fois le diamètre réel de la gouttelette, tandis que sur film d'estar elle vaut seulement deux fois le diamètre réel de la gouttelette. Le substrat est donc un facteur qui détermine la grosseur d'une trace.

Concernant la détermination du diamètre des gouttelettes avec les trois méthodes étudiées, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

1- Avec la méthode à l'huile ( en raison des comportements des gouttelettes emprisonnées dans l'huile mentionnées ci-haut ) il est toujours nécessaire de photographier les échantillons dans le plus bref délai soit environ une minute. Avec cette méthode, en utilisant les gouttelettes uniformes, les gouttelettes captées et en suspension dans l'huile gardent le même diamètre qu'elles ont dans l'air. Cependant, avec un spectre de gouttelettes, le diamètre volumique moyen calculé à partir des gouttelettes captées est surestimé de 1,2 à 1,6 fois par rapport à celui déterminé à partir de la photographie. Cette différence est ici attribuée principalement à la présence des grosses gouttelettes formées par coalescence des gouttelettes percutant au même endroit qu'on ne peut identifier et de ce fait éliminer.

2- La méthode du noir de fumée donne des résultats similaires à ceux obtenus avec la méthode à l'huile mais avec une fluctuation considérable qui devient importante particulièrement à basses vitesses; d'autre part les traces des gouttelettes formées par coalescence des gouttelettes percutant au même endroit ne peuvent être facilement identifiés. De plus, ce type de revêtement est fragile à des vitesses d'impact plus élevées que 25m/s, ce qui rend la méthode difficile à utiliser.

3- Avec la méthode au collargol sur verre, en utilisant le jet de gouttelettes uniformes, le diamètre des traces est d'environ trois fois le diamètre réel de la gouttelette et cela pour toutes les vitesses d'impact et pour toutes les grosseurs mentionnées. En utilisant un spectre de gouttelettes, si on ne tient pas compte des traces laissées par la superposition des gouttelettes, le diamètre volumique moyen obtenu est également environ trois fois celui du spectre de gouttelettes. Concernant la facilité d'utilisation, cette méthode offre des échantillons permanents avec des traces toujours très bien définies et faciles à mesurer au microscope.

En conclusion, la méthode au collargol sur verre ressort ici comme étant la méthode la plus facile à utiliser et aussi comme la seule méthode parmi les méthodes étudiées qui donne

rapport constant entre le diamètre des gouttelettes et celui des traces pour les gouttelettes uniformes ou pour les spectres de gouttelettes. Elle représente donc une méthode simple et satisfaisante pour la détermination de la taille des gouttelettes dans les brouillards naturels et artificiels.

## REFERENCES

BATTAN L.J et REITON C.H (1957) "Droplet size measurements in convective clouds." Artificial stimulation of rain (H.Weickmann and W.Smith,Eds) Permagon Press inc. Elmsford NY pp 184-191

BOREL E. et DELTHEIL R. (1934) "Probabilités et erreurs" Arnaud Colin, Paris

CLAGUE L.F. (1965) "An improved device for obtaining cloud droplet samples." J.Appl.Met. 4, pp.549-551

DESENSE J. (1961) "Présentation d'un capteur classeur de particules à lame unique et d'un capteur absolu permettant de l'étalonner." Revue Geofisica Pura E Applicata. Milano Vol.50 (1961/111) pp.37-41

EDWARD N.BROWN et J.H. WILLETT (1965) "A three-slide cloud droplet sampler." Bull. Amer. Met. Soc. Vol.36 N.3 pp.123-127

FROSSLING N. et GERLANDS BEITR.(1940) Geophys. Vol 52 p.170

FUCHS N. et PETRJANOFF I.(1937) "Microscopic examination of fog cloud and rain-droplets." Nature Vol.139 N.3507 Jan.1937 pp.111-112

FUCHS N. (1959) "Evaporation and droplet growth in gaseous media." Permagon Press, New York

GALL E.S. et FLOYD F.X. (1971) "Icing test capability of the engine test facility propulsion development test cell (J-1)" Arnold Engineering Development Center. AEDC-TR-71-94 p.45

GAYET J.F. (1976) "Sur les performances de l'ASSP-100 de Knollenberg pour la granulométrie des nuages." J.Rech. Atmos. Vol.X N.2 pp.105-118

GARLAND J.A. (1971) "Some fog droplet size distributions obtained by an impaction method." Quart.J.R.Met Soc. Vol.97, pp.483-494

GATES E.M. (1983) "Measurement of water droplet distributions in an icing wind tunnel by holography." U.S.Army CRREL Special Report 83-17 pp 3-11

GODARD S. (1960) "Mesure des gouttelettes de nuage avec un film de collargol." Bull. Obs. Puy de Dôme, 2 pp.41-46

GODARD L. (1959) "Procédé pour déterminer les dimensions des gouttelettes de brouillard ou de nuage." Bull. Obs. Puy de Dôme pp.11-13

GOLITZINE N., SHARP C.R. et BADHAM C.G. (1951) " Spray nozzles for the simulation of cloud conditions in icing tests of jet engines." National Aeronautical Establishement (Canada) Report 14

GOLITZINE N. (1951) " Method for measuring the size of water droplet in cloud, fog and sprays." National Aeronautical Establishement of Canada Note No.6(ME 177)

JIUSTO J.E. (1967) " Nucleation factors in the development of clouds." Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University. University Microfilms TS7 68-11992

JIUSTO J.E. (1965) " Cloud particle sampling." Report No.6 NSF G 24850. Department of Meteorology, Pennsylvania State University, 19pp

JONES A.R. et LEWIS W. (1949) " A review of instruments developed for the measurement of the meteorological factors conducive to aircraft icing." N.A.C.A Rm A9009

KELLER R.G. (1978) " Measurements and control of simulated environmental icing conditions in an outdoor free jet facility." AGARD Conference, Icing testing for aircraft engines. AGARD CP 236, 7-1 to 7-13

LANGMUIR I. et BLODGETT K.B. (1946) " A mathematical investigation of water droplet trajectories " USAF Tech. Report 5418

LIDELL H.F. et WOOTTON N.W. (1957) " The detection and measurement of water droplets." Q.J. Met.Soc. 83,pp.263-266

MARUYAMA M. et HAMA K. (1954) " On measurement of cloud particle size by means of MgO smoke " J.Met.Soc.Japan Vol.32 No.5-6 pp.167-174

MAY K.R. (1950) " Measurement of airborne droplet by magnesium oxide method." J.Sci.Instr. ,27,pp.128-130

MASON B.J. ; JAYARATNE O.W. ET WOODS J.D. (1963) " An improved vibrating capillary for producing uniform water droplets of 15 to 500 micron radius." J.Sci.instr.,40,pp.247-294

MOSSOP S.C. (1983) "Intercomparison of instruments used for measurement of cloud drop concentration and size distribution." J.of Appl. Meteor. Vol.22,pp.419-428

NEIBURGER M. (1949) "Reflection,absorption and transmission of isolation stratus cloud."J. Met.Vol.6,pp.98-104

OKITA T. (1958) "Water-blue film method for measurement of cloud and fog droplets." J. of Meteor. Soc. Japan Vol.36 pp.42-43

PINNICK R.G.; GARVEY D.M. et DUCAN L.D. (1981) " Calibration of Knollenberg FSSP Light-Scattering-counters for measurement of clouds droplets." J. of Appl. Meteor. Vol. 20 pp.1049-1057

RINEHART GAYLS S. (1969) " Fog drop size distributions- measurement methods and evaluation." Atmospheric Sciences Laboratory, White Sand Missile Range, New Mexico ECOM 5247

SHECTER R.M. et RUSS R.G. (1970) " The relation between imprint size and drop diameter from an airborne drop sampler." J. Appl. Met. Vol.9 pp.123-126

SIMMONS H.C. (1984) " Investigating the commercial instrument market " Liquid particle size techniques ASTM STP 848 J.M. Tishroff, R.D. Ingebo and J.B. Kennedy Eds Amer. Society for testing and Materials pp.22-32

STALLABRASS J.R. (1986) " Comparision of droplet size measurement by three methods ." Proceeding of 3rd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.

VONNEGUT B.; CUNNINGHAM R.M. et KATZ R.E. (1946) " Instruments for measuring atmospheric factors related to ice formation on airplanes." Dep. of Meteor. MIT (USA) Report No W3038ac 5443

WARNER J. (1969) " The microstructure of cumulus cloud. Part 1: General features of the droplet spectrum." J. Atmos. Sci. Vol. 26, pp. 1949-1959

WEICKMANN H.K. et KAMPE H.J. aufm (1953) " Physical properties of cumulus clouds." J. Met. Vol. 10, pp. 204-211