



HAL
open science

Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation. Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées

Bruno Molle, L. Huet, Séverine Tomas, Jean Marc Granier, P. Dimaiolo,
Camille Rosa

► To cite this version:

Bruno Molle, L. Huet, Séverine Tomas, Jean Marc Granier, P. Dimaiolo, et al.. Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation. Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées. [Rapport Technique] irstea. 2009, pp.74. hal-02594918

HAL Id: hal-02594918

<https://hal.inrae.fr/hal-02594918v1>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Partenariat 2009 – Domaine Ecotechnologie et pollutions
Action 28 « Réutilisation des eaux épurées »

Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'aspenseurs d'irrigation

*Application à la définition des limites
d'utilisation de l'aspersion en réutilisation
d'eaux usées traitées*

Rapport final

Bruno Molle
Laurent Huet
Séverine Tomas
Jacques Granier
Pascal Dimaiolo
Chantal Rosa

Cemagref

Décembre 2009

Contexte de programmation et de réalisation

Dans le cadre du projet de révision de l'arrêté d'application régissant la mise en œuvre de la réutilisation des eaux usées traitées (REUT), il est apparu qu'on manquait singulièrement de références sur la propagation physique des effluents en fonction de la méthode d'application utilisée, propagation qui influe sur les risques d'effets indésirables de la REUT. C'est l'objet de ce travail que d'élaborer de telles références sur les paramètres physiques de l'aspersion et de l'apport d'effluents. A contrario, il ne s'agit pas de travailler sur les risques sanitaires liés à ces pratiques, on n'aborde ni les risques chimiques, ni bactériologiques.

Les auteurs

Bruno MOLLE
bruno.molle@cemagref.fr

Laurent HUET
Laurent.huet@cemagref.fr

Séverine TOMAS
severine.tomas@cemagref.fr

Jacques GRANIER
Jacques.granier@cemagref.fr

Pascal DIMAIOLO
Pascal.dimaiolo@cemagref.fr

Chantal ROSA
Chnatal.rosa@cemagref.fr

Cemagref – UMR G-EAU, Aix en Provence

Les correspondants

Onema

Stéphane Garnaud, Direction de l'Action Scientifique et Technique, stephane.garnaud@onema.fr

Cemagref : Bruno Molle, Cemagref Aix en Provence, bruno.molle@cemagref.fr

Droits d'usage	Accès libre
Couverture géographique	France
Niveau de lecture	Professionnels, experts
Nature de la ressource	Document

Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation – Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées

Rapport final

Bruno Molle, Laurent Huet, Séverine Tomas, Jacques Granier, Pascal Dimaiolo et Chantal Rosa

SOMMAIRE

Résumé	8
Abstract	9
Synthèse pour l'action opérationnelle	10
1. Introduction	15
1.1 Contexte de l'étude et objectifs	15
1.2 Etat des lieux de la réutilisation des eaux usées traitées : pratique et réglementation	15
1.3 Enjeux de la réutilisation des eaux usées	16
2. Matériels et méthodes	18
2.1 Types d'asperseur choisi	18
2.2. Distribution pluviométrique	19
2.2.1 Micro-asperseur et micro-spray	19
2.2.2 Asperseurs, turbines et canon	19
2.3 Distribution granulométrique	20
2.3.1 Spectropluviomètre bifaisceau	20
2.3.2 Protocole de mesure	22
2.3.3 Limites de la méthode de mesure	23
3. Estimation du temps de vol, de la portée et de l'impact du vent	24
3.1 Outil de modélisation	24
3.2 Procédure	25
4. Analyses des mesures et calculs des paramètres des distributions	26
4.1 Caractérisation de distribution pluviométrique radiale	26

4.2 Caractérisation de la distribution granulométrique du jet	29
4.2.1 Fonction de distribution granulométrique	29
4.2.2 Principaux quantiles en granulométrie	31
4.2.3 Diamètres moyens	31
4.3 Estimation du risque de dérive et d'évaporation	32
4.3.1 Durée de vol	32
4.3.2 Trajectoire des gouttes et dérive	33
4.3.3 L'évaporation comme moyen d'estimation du risque de création d'aérosols	34
5. Résultats	35
5.1 Canon TWIN 101+	35
5.2 Turbine EAGLE 750 S	39
5.3 Turbine 5000 plus	44
5.4 Asperseur Rain Bird 46 WH	49
5.5 Asperseur 5022-U	53
5.6 Micro-asperseur Hadar 7110	58
5.7 Micro-asperseur Turbojet	61
6. Conclusion générale et perspectives	65
7. Bibliographie	68
8. Annexes	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : synthèse des résultats de l'étude pour les 7 asperseurs	12
Tableau 2 : types d'asperseur utilisé	18
Tableau 3 : exemples de taux de rejet des données dus à un Q_{Flag} supérieur à 50	22
Tableau 4 : coefficient d'uniformité après recoupement pour le RB 46 et le 5022-U	27
Tableau 5 : caractéristiques générales des courbes de distribution pluviométrique mesurées pour chaque couple asperseur/pression (*sur cette mesure, l'angle de balayage du canon a été mal noté, pour la suite du travail seul le profil de la distribution est considéré avec le débit reconstitué)	28
Tableau 6 : estimation des potentiels de pertes par dérive et par évaporation (estimations obtenues en affectant aux volumes interpolés entre bornes inf et sup les distributions de tailles correspondantes. Le volume, ou la part, défini par les gouttes de diamètre inférieur à 400 μ m ne comprend pas les gouttes sensibles à l'évaporation que l'on considère totalement évaporées)	38
Tableau 7 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour l'EAGLE 750 S	43
Tableau 8 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour la turbine 5000 plus (voir indications du Tab. 6)	47
Tableau 9 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour le Rain Bird 46 WH (voir indications du Tab. 6)	52
Tableau 10 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour l'asperseur 5022-U (voir indications du Tab. 6)	56
Tableau 11 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour le micro-asperseur Hadar 7110 (voir indications du Tab. 6)	60
Tableau 12 : évaluation des pertes de dérive et d'évaporation pour le micro-asperseur Turbojet (voir indications du Tab. 6)	64
Tableau 13 : synthèse des résultats de l'étude pour les 7 asperseurs	67

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : photos du dispositif de mesure pluviométrique de l'Hadar 7110 (a) et du Turbojet (b)	19
Figure 2 : dispositif de mesure extérieur, mesures de pluviométries sur la turbine Eagle 750 S (a) et intérieur avec cloche de mesure (b)	20
Figure 3 : spectropluviomètre bifaisceau	21
Figure 4 : principe de fonctionnement du spectropluviomètre bifaisceau	21
Figure 5 : exemple de courbe de pluviométrie radiale et de courbe volumique (asperseur Rain Bird 46 WH)	23
Figure 6 : données brutes d'un fichier de mesure	23
Figure 7 : simulation de 4 gouttes, respectivement de 6 mm, 8 mm, 4 mm et 3 mm	24
Figure 8 : détermination des caractéristiques de l'apogée pour la turbine RainBird 5000+ à 2 bars sans vent (a) et avec un vent de 4 m.s ⁻¹ (b) : vitesse des gouttes (m.s ⁻¹) suivant leur trajectoire. Ces résultats permettent d'estimer la position (distance = plan vertical, hauteur = plan horizontal) de l'apogée et la vitesse des gouttes en ce point	25
Figure 9 : détermination du temps de vol et de la portée pour l'asperseur RainBird 5000+ à 2 bars sans vent (a) et avec un vent de 4 m.s ⁻¹ (b) : temps de résidence des gouttes suivant leur trajectoire	26
Figure 10 : fonction de distribution granulométrique en effectif et en volume	29
Figure 11 : distributions granulométriques en fonction de l'effectif (N %) et du volume (V %) à 3,5 bars en différents points de la portée standard	30
Figure 12 : effet du vent sur la durée de vol de gouttes d'une gamme de petites gouttes, émises avec une vitesse initiale de 20 m.s ⁻¹ , un angle de 23°, à une hauteur de 1 m par rapport au sol	32
Figure 13 : distance de vol d'une gamme de diamètres de gouttes en situation ventée ou non, vitesse initiale 20 m.s ⁻¹ , angle 23°, hauteur 1 m	33
Figure 14 : variation de masse des gouttes émises par l'asperseur RB 46 en fonction des conditions climatiques	34
Figure 15 : représentation des apports pluviométrique et volumique pour le Twin 101+ aux différentes pressions testées (3.5, 4.5 et 5.5 bars)	35
Figure 16 : distribution granulométrique en effectif et en volume des gouttes produites par le canon Twin 101+ le long de la portée à différentes pressions	36
Figure 17 : représentation graphique de ND10 et VD10 pour le Twin 101+ quelle que soit la pression	36
Figure 18 : représentation statistique (ND et VD) de la distribution granulométrique numérique et volumique du Twin 101+ à 3,5 bars	37
Figure 19 : dispersion en effectif et en volume de la distribution granulométrique du Twin 101+	37
Figure 20 : évolution du diamètre de Sauter en fonction du rayon pour trois pressions différentes	37
Figure 21 : représentations pluviométrique et volumique de la distribution de l'Eagle 750 S le long de la portée	39
Figure 22 : représentation des distributions volumique observée et moyenne pour l'Eagle 750 S à 4,5 bars et à 6,5 bars	40
Figure 23 : représentation de la distribution granulométrique en effectif et en volume de l'Eagle 750 S	40
Figure 24 : évolution statistique du diamètre numérique (DN10, DN50 et DN90)	41
Figure 25 : évolution statistique du diamètre volumique pour l'Eagle 750 S	41
Figure 26 : évolution du ND10 et du VD10 le long de la portée du jet	42
Figure 27 : dispersion en effectif et en volume de la distribution	42
Figure 28 : relation entre le D32 et le rayon	42
Figure 29 : représentation des apports en termes de pluviométrie et de volume le long du jet de la turbine 5000 plus	44
Figure 30 : représentation en effectif et en volume de la distribution granulométrique de la turbine 5000 plus	45
Figure 31 : évolution statistique du diamètre numérique (ND) et du diamètre volumique (VD) pour une pression de 2 bars et 4 bars	46
Figure 32 : représentation de la dispersion numérique et volumique aux différentes pressions	46
Figure 33 : représentation du D32 pour la turbine 5000 plus	47
Figure 34 : comparaison de l'évolution du diamètre de Sauter et de la population de gouttes de diamètre inférieur à 0,4 mm le long du jet	48
Figure 35 : représentation graphique de la pluviométrie radiale et de la distribution volumique du Rain Bird 46	49
Figure 36 : comparaison de la distribution volumique moyenne et de celle obtenue pour 2,5 et 4,5 bars	49

Figure 37 : courbes de distribution granulométrique en effectif et en volume du RB 46 à différents rayons (30, 40, 60, 70, 80 et 90 % de la portée)	50
Figure 38 : représentation graphique des paramètres de tendance en effectifs et en volumes pour 2,5 et 4,5 bars	51
Figure 39 : représentation de la dispersion de la distribution granulométrique numérique et volumique par rapport à la médiane	51
Figure 40 : juxtaposition des diamètres de SAUTER pour les trois pressions	51
Figure 41 : comparaison de l'évolution du diamètre de Sauter et de la représentativité de la famille D400	53
Figure 42 : représentation de la pluviométrie radiale (a) et de la distribution volumique (b) des apports pour le 5022-U	53
Figure 43 : distribution volumique des apports comparée à sa moyenne pour une pression de 2,5 bars	54
Figure 44 : distribution granulométrique en effectif et en volume	54
Figure 45 : évolution de distribution granulométrique numérique	55
Figure 46 : évolution des indicateurs de tendance volumique	55
Figure 47 : évolution du diamètre du premier centile en fonction du rayon	55
Figure 48 : dispersions moyennes numérique et volumique de la distribution	56
Figure 49 : comparaison de l'évolution du diamètre de Sauter et de la représentativité volumique de la famille D400	57
Figure 50 : représentation de la pluviométrie radiale et de la distribution volumique des apports d'eau pour l'Hadar 7110	58
Figure 51 : courbes de distribution granulométrique en effectif et en volume de l'Hadar 7110 à différents pourcentages de la portée	58
Figure 52 : représentation de la distribution granulométrique volumique	59
Figure 53 : évolution du VD10 et VD90 pour l'Hadar 7110	59
Figure 54 : évolution du diamètre de Sauter et du volume des gouttes susceptibles de dériver	60
Figure 55 : représentation graphique de la distribution moyenne pluviométrique et volumique du Turbojet	61
Figure 56 : distribution de pluviométrie par 12 jets fixes du Turbojet	62
Figure 57 : distribution granulométrique en effectif au sol du Turbojet à différents rayons	62
Figure 58 : évolution de la distribution granulométrique numérique et volumique statistique	63
Figure 59 : évolution du VD10 pour le Turbojet	63
Figure 60 : représentation schématique de la correction du Rayon	72

Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation – Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées

Rapport final

Bruno Molle, Laurent Huet, Séverine Tomas, Jacques Granier, Pascal Dimaiolo et Chantal Rosa

RESUME

Lors de la révision de l'arrêté d'application sur la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) en irrigation, il est apparu que les restrictions proposées à l'utilisation de l'aspersion pour l'épandage d'eaux usées traitées n'étaient pas fondées sur des données objectives. Nous avons donc sélectionné 7 modèles d'asperseurs sur lesquels nous avons fait les mesures et les simulations nécessaires à la caractérisation du risque de dérive et d'évaporation induit par l'application d'eau usée traitées à partir de systèmes d'irrigation par aspersion. Pour cela, nous avons mesuré les distributions radiales d'apport d'eau ainsi que les distributions de tailles de gouttes produites. Un travail de recherche antérieur a montré que l'on pouvait définir des limites de taille de gouttes pouvant s'évaporer totalement et donner lieu à la création d'aérosols, ou dériver significativement au-delà de la zone cible. Le bilan en volume des gouttes concernées pour les différents modèles d'aspersion permet de caractériser le risque d'évaporation. A partir des estimations de vitesse de jet et de portée, on détermine une couronne de sécurité correspondant à la distance que peuvent parcourir les différentes gouttes au-delà de la zone cible, dans le cas d'un vent de 4 m.s^{-1} .

MOTS CLES

Réutilisation d'eaux usées traitées, aspersion, estimation de risques

Characterisation of drift and evaporation risks of a series of sprinklers: application in defining the limits of sprinkling with treated waste in reuse purpose

Final report

Bruno Molle, Laurent Huet, Séverine Tomas, Jacques Granier, Pascal Dimaiolo and Chantal Rosa

ABSTRACT

France is currently preparing a new law to regulate the application through irrigation techniques of treated waste water in a reuse objective. It appeared in the first draft that the restrictions applied to the use of the sprinkling irrigation for spreading treated waste water were not based on real scientific data. We thus selected 7 models of sprinklers on which we conduct measurements of the distribution of rainfall and the distribution of droplet diameters along the radius. Such data were then used to characterize through numerical simulations the risk potentially induced. A previous research work showed us that we could define limits of droplets size to induce evaporation potential of smaller droplet, that may induce the creation of aerosols, or wind drift of the different classes of droplets size beyond the target zone. The balance in terms of volume of water concerned by evaporation and drift for the different type of sprinklers is presented along with the data used for such calculation.

Key words

Treated waste water reuse, sprinkler irrigation, estimation of risks

Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation – Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées

Rapport final

Bruno Molle, Laurent Huet, Séverine Tomas, Jacques Granier, Pascal Dimaiolo et Chantal Rosa

Synthèse pour l'action opérationnelle

Dans le contexte de tensions croissantes sur la ressource en eau du fait de son inégale répartition, de la dégradation de sa qualité et de l'augmentation de la demande en eau potable liée à l'urbanisation croissante, les autorités sont à la recherche de nouvelles alternatives à l'utilisation des eaux de nappes ou de surface. La réutilisation des eaux usées traitées en fait partie en donnant une "seconde vie" à ces eaux déjà utilisées pour des usages qui peuvent les valoriser, tout en préservant les autres ressources. Ces pratiques alternatives permettent à la fois de protéger les ressources en eau tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

➤ CONTEXTE GENERAL

En France, la réutilisation des eaux usées traitées, soumise à autorisation spéciale, reste peu développée du fait de l'absence de réglementation spécifique, d'une relative abondance de la ressource et d'une certaine méfiance. Localement, les pénuries d'eau et/ou la surexploitation de la ressource incitent les collectivités à développer des sources alternatives, notamment la réutilisation des eaux usées traitées (REUT), mais ces projets restent limités. Dans le reste de l'Europe, la REUT connaît un succès variable suivant que l'on soit au nord ou au sud, c'est-à-dire suivant l'état quantitatif et qualitatif de la ressource. On considère que le volume total d'eaux usées traitées réutilisées en Europe s'est élevé à 964 millions de m³/an en 2005, ce qui représente 2,4‰ du volume d'effluent traité. La REUT en agriculture est particulièrement développée dans les pays du pourtour méditerranéen, comme en Israël, en Tunisie, en Italie et en Espagne, où les pénuries d'eau récurrentes ont conduit à son développement et à l'élaboration de réglementations adaptées. Dans la plupart des cas, le principal débouché de ces eaux, en volume, se trouve dans l'agriculture qui peut accepter des eaux de qualité médiocres, à condition qu'elles ne soient pas dangereuses (teneur en métaux lourds en particulier), et a besoin d'eau au moment où les tensions sont les plus fortes sur la ressource.

En France, l'absence d'une réglementation spécifique et adaptée à la REU-T limite le développement de cette pratique à quelques projets. Or, les pénuries d'eau récurrentes et la volonté de préservation de la ressource ont conduit à proposer un arrêté d'application relatif à l'utilisation de ces eaux. Cet arrêté fixe : "Les prescriptions techniques, les modalités de mise en œuvre et de surveillance applicables à l'utilisation des eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires des collectivités territoriales pour l'arrosage ou l'irrigation des cultures ou des espaces verts", il a été demandé par l'ONEMA et la DGPAAT à l'équipe de recherche sur les matériels d'irrigation du Cemagref de caractériser les principaux types d'asperseurs du marché, dans leur sensibilité au vent et dans leur capacité à donner naissance à des aérosols comme moyen d'évaluer les éventuels risques sanitaires induit par ces pratiques.

➤ OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Du point de vue technique, l'application des eaux usées traitées par aspersion reste la plus intéressante des solutions, car elle nécessite peu de matériel sur le terrain, est pratiquement insensible au colmatage et reste facile à contrôler visuellement. Cependant, elle présente deux risques majeurs : celui de donner naissance à des aérosols par l'évaporation des plus petites particules et celui de voir des quantités d'effluent significatives dériver hors des zones cibles sous l'effet du vent. Toutefois, ces risques peuvent être maîtrisés par une restriction d'utilisation des techniques d'aspersion en plus d'une surveillance sanitaire. L'objectif du projet consiste à déterminer les caractéristiques dimensionnelles d'une zone tampon, autour de la zone cible, au-delà de laquelle les proportions d'effluents pouvant sortir ne présentent aucun risque pour l'être humain ou l'environnement. Bien que l'aspersion semble la technique la plus appropriée, les techniques d'irrigation localisée peuvent également convenir mais sont freinées par le risque de colmatage induit par la qualité de ces eaux. Ces dernières ne sont pas abordées dans le présent travail.

➤ QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES

Pour répondre à cet objectif, nous avons sélectionné 7 systèmes d'aspersion représentatifs de ceux existant en France, servant soit à l'irrigation agricole soit à l'arrosage des espaces verts dont la portée varie entre 2 et 50 m, la pression de fonctionnement de 2.0 à 6.5 bars et le débit de 50 l/h à 50 m³/h. Pour chacun des asperseurs sélectionnés, nous avons déterminé la distribution pluviométrique radiale, ainsi que la distribution granulométrique des gouttes produites le long de la portée (6 points) pour trois pressions (pression optimale de fonctionnement conseillée, encadrée par une pression basse et une pression haute). L'objectif est de pouvoir suivre l'évolution du jet au travers de sa distribution pluviométrique et granulométrique. A partir de ces distributions, des simulations balistiques ont pu être réalisées afin d'estimer quelle pouvait être la distance de dérive en aval de la zone arrosée dans le cas d'un vent de 4 m.s⁻¹ parallèle à la direction du jet. Ces mêmes mesures croisées avec les mesures de distribution pluviométriques permettent, à partir de résultats de recherches antérieures, d'estimer les volumes d'eau en jeu à la fois dans les phénomènes de dérive (gouttes de moins de 400 µm) et d'évaporation (gouttes de moins de 150 µm).

➤ PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS ET IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS ET REALISATIONS PRATIQUES

Les différentes distributions ont pu être mesurées au laboratoire. Les gouttes produites se répartissent sur un intervalle de diamètre équivalent qui varie de 0 à 7 mm environ. La proportion de chacune des classes de gouttes pour un même asperseur varie en fonction de la pression, en général dans le sens d'une diminution des diamètres lorsque la pression augmente. Nous avons fait un bilan des volumes concernés par les différentes populations de gouttes sensibles à l'évaporation ou à la dérive et simulé la balistique des différents nuages mesurés pour estimer les distances de dérive pour un vent de 4 m.s⁻¹ soufflant dans la direction du jet. Ces différentes valeurs sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 : synthèse des résultats de l'étude pour les 7 asperseurs

Canon Komet Twin 101 Plus, buse 22mm						
Pression de fonctionnement (bar)	3.5		4.5		5.5	
Débit délivré (m ³ /h)	35.3		41.0		44.2	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	11.4	0.03 %	22.6	0.06 %	27.1	0.06 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	125.6	0.35 %	227.6	0.56 %	271.3	0.61 %
Portée (m) Dérive	42.0	18 %	47.0	18 %	50.5	21 %
Turbine Rain Bird EAGLE 750 S						
Pression de fonctionnement (bar)	4.5		5.5		6.5	
Débit délivré (m ³ /h)	5.19		5.85		7.01	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	2.6	0.05 %	1.9	0.03 %	2.0	0.03 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	28.1	0.54 %	21.1	0.36 %	24.6	0.35 %
Portée (m) Dérive	22.2	20 %	23.5	20 %	23.5	19 %
Asperseur Rain Bird 46 WH						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.5		4.5	
Débit délivré (l/h)	1 530		1 789		2 100	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	4.7	0.30 %	3.1	0.17 %	4.8	0.23 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	64.8	4.23 %	75.0	4.19 %	118.1	5.62 %
Portée (m) Dérive	13.5	25 %	14.0	30 %	14.5	37 %
Turbine Rain Bird 5000 plus						
Pression de fonctionnement (bar)	2.0		3.0		4.0	
Débit délivré (l/h)	489		601		716	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	0.9	0.19 %	2.11	0.35 %	3.1	0.43 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	21.5	4.42 %	38.81	6.46 %	55.3	7.73 %
Portée (m) Dérive	11.5	17 %	12.5	23 %	12.5	28 %
Asperseur Nan-Dan 5022 U						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.0		3.5	
Débit délivré (l/h)	575		657		700	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	7.0	1.2 %	11.9	1.8 %	17.5	2.5 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	66.1	11.5 %	96.7	14.7 %	165.4	23.6 %
Portée (m) Dérive	10.0	18 %	10.3	20 %	10.2	16 %
Micro-asperseur Nan-Dan Hadar 7110						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.0		3.5	
Débit délivré (l/h)	87.7		99.0		127.2	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	5.3	6.1 %	7.0	7.1 %	7.6	6.0 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	54.0	61.7 %	78.0	78.8 %	94.1	74.0 %
Portée (m) Dérive	3.8	34 %	3.9	37 %	3.75	29 %
Micro-asperseur Nan-Dan Turbojet						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.0		3.5	
Débit délivré (l/h)	31.1		36.7		35.7	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	1.7	5.5 %	0.2	0.5 %	0.5	1.3 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	14.3	46.1 %	4.82	13.1 %	7.10	21.0 %
Portée (m) Dérive	2.25	39 %	3.0	22 %	3.75	21 %

Les volumes calculés ici représentent une surestimation du risque d'évaporation et de dérive dans des conditions extrêmes, puisque les gestionnaires de systèmes d'irrigation n'arrosent généralement pas lorsque le vent dépasse 4 m.s^{-1} et les conditions d'évaporation qui ont été simulées (40°C , 25 % d'humidité, 800 W.m^2 de rayonnement) ne sont que très rarement rencontrées en France métropolitaine.

La dérive calculée tient compte de la portée en l'absence de vent, qui en général augmente avec la pression, bien que parfois dans des proportions réduites car contrebalancées par la diminution des diamètres. Cette portée est à la fois mesurée et calculée à partir de simulations balistiques. On en déduit la durée d'exposition des gouttes au vent et donc la dérive induite. Cette dérive, en % de la portée, s'élève à :

- 25 % pour le canon, c'est ce qui a été vérifié par le passé lors des mesures effectuées au cours des opérations Irriparc en Rhône Alpes (Niwasave, 1999) ;
- 30 % pour la turbine à 23 m de portée ;
- 37 % pour la turbine à 12 m de portée ;
- 40 % pour l'asperseur à 14 m de portée ;
- 43 % pour l'asperseur à 10 m de portée ;
- et, moins de 40 % pour les micro-asperseurs.

Les facteurs déterminant ces phénomènes de dérive combinent: angle d'émission du jet, type de rotation (bateur ou turbine), diamètre de la buse, dessin de la buse (conique ou à ailettes), pression de fonctionnement, taille des gouttes et hauteur maximum atteinte par le jet.

La zone de protection autour d'un périmètre arrosé par aspersion avec des eaux usées traitées pourrait donc être définie par rapport à la zone normalement arrosée en l'absence de vent, augmentée d'une distance correspondant à deux fois la distance de dérive estimée soit 50 à 100 % de la portée des asperseurs périphériques. Selon nos hypothèses de travail, cela correspondrait à 25 m pour un arrosage par canon, 15 m pour les turbines de plus de 20 m de portée, 12 m pour les asperseurs de 15 m de portée, 10 m pour les turbine de 12 m de portée, 10 m pour les asperseurs de 10 m de portée et 5 m pour les micro-asperseurs.

Pour compléter ces prescriptions il conviendrait de définir une limite de vitesse du vent au-delà de laquelle l'arrosage doit être arrêté. Une valeur de 3 m/s est à la fois raisonnable et facilement mesurable.

En termes de perspectives, ce travail reste à compléter sur les points suivants :

- Confirmation du risque d'aérosol à base de simulations et de mesures à la fois au laboratoire et in situ. Cela permettrait en particulier de mieux adapter le niveau de traitement requis au type d'application envisagé.
- Prise en compte de la production effective de particules d'eau le long du jet : en effet, comme on ne mesure les diamètres de gouttes qu'au sol, on fait des hypothèses fortes et simplificatrices sur l'origine des particules produites, et en particulier les plus petites d'entre elles. L'approche utilisée surestime largement la durée d'exposition des gouttes à la demande climatique et donc les phénomènes en jeu en augmentant le temps de contact entre la goutte et l'atmosphère.
- Prise en compte des phénomènes de turbulence dans la simulation des dérives, ce qui n'a pas été fait pour des raisons de temps de calcul, mais qui peut avoir un effet supplémentaire sur les temps de vol des gouttes de plus petites tailles.
- Prise en compte des phénomènes liés à l'énergie cinétique des gouttes comme facteur de compaction du sol et de risque de création de ruissellement.

➡ LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DE CE TRAVAIL

- Présentation d'étape du travail au cours du congrès de l'ASEES (Association Scientifique Eau Environnement et Santé), Bouc Bel Air, mai 2009 (Annexe 3).
- Utilisation des résultats du travail dans le cadre du groupe de travail des experts de l'AFSSET en charge de préparer des recommandations pour l'évaluation du risque sanitaire (ERS).
- Présentation d'une série de posters de résultats à la journée scientifique EIA - Cemagref du 17 mars 2010.
- Préparation d'un article scientifique pour une revue à comité de lecture, proposition pour juin 2010.

Cette liste sera reprise en annexe et complétée avec les tirés à part ou copies.

Caractérisation du risque de dérive et d'évaporation d'une gamme d'asperseurs d'irrigation – Application à la définition des limites d'utilisation de l'aspersion en réutilisation d'eaux usées traitées

Rapport final

Bruno Molle, Laurent Huet, Séverine Tomas, Jacques Granier, Pascal Dimaiolo et Chantal Rosa

1. Introduction

1.1 – Contexte de l'étude et objectifs

Le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, CSHPF, a lancé en 1991 un projet d'arrêté fixant « les prescriptions techniques, les modalités de mise en œuvre et de surveillance applicables à l'utilisation des eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires des collectivités territoriales pour l'arrosage ou l'irrigation des cultures ou des espaces verts ». Ce projet d'arrêté avait pour objectif d'actualiser et d'affiner les lignes directrices régissant la réutilisation des eaux usées pour divers usages tels que l'irrigation, l'arrosage des espaces verts, l'utilisation dans les procédés industriels, l'usage domestique (toilettes, etc). Sa rédaction s'appuie sur les nouvelles recommandations d'usages faites par l'OMS¹ (Organisation Mondiale de la Santé), en 2006, en termes de qualité microbiologique et physico-chimique des eaux usées.

Que ce soit dans le rapport de l'OMS ou dans le projet d'arrêté, très peu d'informations sont disponibles quant aux risques de propagation des effluents en fonction de la méthode d'application (ou d'épandage) utilisée. Des précautions d'usages sont citées comme les critères d'arrêt de l'irrigation, la mise en œuvre d'une zone tampon, la prise en compte du vent en aspersion, les risques de ruissellement etc. Néanmoins, ces précautions restent très générales, elles ne s'appuient pas sur des données objectives de performance et ne prennent pas en compte la diversité des asperseurs existants.

Pour combler ce manque d'informations et détailler plus précisément les risques sanitaires induits par type d'irrigation, le Cemagref sur demande de l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) et de la DGPAAT (Direction Générale des Production Agricoles, Agroalimentaires et des Territoires), s'est proposé de caractériser les distributions de taille de gouttes produites de différents types d'asperseurs : du canon d'irrigation au micro-asperseur. Il s'agit là d'un moyen d'approcher les risques de dérive, d'évaporation ou de création d'aérosols. Ce travail permettra de donner des références pour les technologies d'irrigation existantes en agriculture et parcs et jardins, sur les risques de transports et de dispersion physique des effluents en associant mesures et simulations numériques.

1.2 – Etat des lieux de la réutilisation des eaux usées traitées : pratique et réglementation

Dans le contexte mondial actuel, l'heure est à une meilleure gestion et maîtrise de la ressource en eau. Son inégale répartition, la dégradation de sa qualité, l'augmentation de la demande en eau potable liée à l'urbanisation croissante, sont autant de critères qui poussent les autorités à rechercher de nouvelles alternatives à l'utilisation des eaux de nappes ou de surface. La réutilisation des eaux usées traitées fait partie des alternatives, qui donnent une « seconde vie » aux eaux usées. Cette pratique s'inscrit dans une volonté de protéger les ressources en eau et doit se raisonner couplée à d'autres pratiques comme l'utilisation des eaux de pluie, la création de lac collinaire, la recharge de nappe, etc.

¹ Organisation Mondiale de la Santé. WHO guidelines volume II : wastewater use in agriculture

En France, la REUT reste peu développée. Cette situation s'explique en partie par un index de stress hydrique² modéré au niveau national. Néanmoins, localement les pénuries d'eau et/ou la surexploitation de la nappe phréatique incitent les collectivités à développer des sources alternatives, notamment la REUT.

Dans le reste de l'Europe, la réutilisation des eaux usées connaît un succès variable suivant que l'on est au nord ou au sud. Dans le rapport du projet AQUAREC (2007), il est rapporté que le volume total d'eaux usées traitées réutilisées en Europe s'est élevé à 964 Mm³/an en 2005, ce qui représente 2,4 % du volume d'effluent traité. En Europe, la REUT est essentiellement développée en Espagne, à Chypre et en Grèce, là où les problèmes d'alimentation en eau sont récurrents. Bien que peu répandue pour l'instant, cette alternative commence à se développer de plus en plus. Au-delà de l'Europe, certains pays, comme Israël ou l'Australie, réutilisent jusqu'à 85 % de leurs eaux usées traitées. Cette pratique est, également très répandue dans les îles (Chypre, Canaries, Sardaigne, Baléares) où les nappes sont peu rémanentes. Dans la plupart des cas, le principal débouché de ces eaux se trouve dans l'agriculture qui a besoin d'eau au moment où l'activité touristique est la plus intense.

Du point de vue réglementaire, les différents textes qui existent donnent des références strictes sur les résultats à atteindre, sans précision sur les pratiques à mettre en œuvre. Les trois textes les plus élaborés dans le domaine sont :

- WHO (2006), Guidelines for the use of wastewater, excreta and greywater, Vol.2.
- US EPA (2004), Guidelines for water reuse³.
- National Guidelines for Water Recycling Managing Health and Environmental Risks. Australia, 2005.

Ces textes fournissent des recommandations sur la qualité des eaux usées et leurs usages possibles. Ils donnent des indications sur la qualité microbiologique et physico-chimique des eaux réutilisables ainsi que sur les modalités de surveillance sanitaire. Ces textes ne sont pas toujours des réglementations mais des recommandations qui ont servi de base pour une multitude de textes législatifs en fonction des problématiques de chaque pays. Parmi les textes que nous avons examinés, aucun ne donne de prescriptions sur les méthodes d'épandages utilisables en fonction du type d'EUT appliquée, comme cela est envisagé dans le projet d'arrêté français.

1.3 – Enjeux de la réutilisation des eaux usées

La REUT permet de préserver la qualité du milieu en limitant les prélèvements en nappe et dans les cours d'eau. Cette diminution est particulièrement intéressante dans les zones où les débits d'étiage sont faibles et où le niveau des nappes phréatiques est bas. En zones côtières des prélèvements excessifs peuvent aller jusqu'à l'intrusion du biseau salé. En zone touristique, la REUT ayant un effet de rabattement des polluants améliore la protection des zones sensibles de tous risques de contaminations, telles que les zones de baignades par exemple.

Ces EUT contiennent des nutriments, principalement de l'azote et du phosphore, qui peuvent jouer un rôle de fertilisants pour les végétaux, mais aussi des sels et des métaux traces que les procédés d'épuration classiques n'éliminent pas complètement. Ainsi, ces eaux pourraient permettre de limiter les apports en intrants dans les parcelles (agricoles ou d'espaces verts) mais plusieurs problèmes se posent :

- Les concentrations en éléments nutritifs ne correspondent pas forcément aux besoins des plantes. Par exemple, les EUT sont souvent chargées en azote et en phosphore mais ne contiennent que peu de potassium. Dès lors, l'irrigant doit gérer son irrigation en même temps que les apports de minéraux, et appliquer les corrections nécessaires. Cela impose une bonne connaissance de la composition de l'EUT utilisée et de sa variabilité dans le temps.

² L'index de stress hydrique développé par l'OCDE correspond au ratio entre le prélèvement d'eau annuel et la ressource annuellement renouvelable. Il est considéré comme élevé quand il dépasse 40 %, moyen à haut quand il est compris entre 20 et 40 % et modéré lorsqu'il est inférieur à 20 % (OCDE, 2003)

³ <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r04108/625r04108.pdf>

- La présence de sodium par exemple, observée dans les zones côtières, peut engendrer une déstructuration du sol. En effet, les fonctions de stockage d'eau et d'aération du sol sont assurées grâce à sa structuration en agrégats qui permettent à l'air de circuler ainsi qu'à l'eau sans stagnation. La destruction des agrégats peut conduire à une imperméabilisation du sol qui provoquera asphyxies racinaires et stagnation d'eau.
- La présence de métaux traces, comme le bore, l'arsenic, le chrome, le cadmium posent des problèmes de toxicité et de pollution d'autant que ces éléments sont considérés comme dangereux pour la santé humaine, et plus généralement, animale. Une fois ces métaux concentrés dans les EUT il faut éviter de les disperser à nouveau dans le milieu, créant ainsi une pollution diffuse.

Bien que potentiellement utile pour la préservation du milieu et pour l'agriculture en limitant les intrants, la REUT se doit d'être encadrée par une réglementation comme celle faite pour l'épandage des boues issues du traitement des EU domestiques. Ainsi, l'élaboration d'un projet de réutilisation agricole des eaux usées traitées se doit de définir le périmètre irrigué ainsi que les modalités de surveillance sanitaire et agronomique afin d'éviter tout risque de contaminations et de pollutions. Pour améliorer la prévention des risques, l'addition d'un volet indiquant les limites en termes d'application des EUT permettra d'éviter toute dérive intempestive.

Pour l'instant, l'absence de réglementation, les coûts d'équipements et de fonctionnement ne favorisent pas le développement massif de la REUT d'autant que la France jouit d'une relative abondance en eau. Pourtant l'idée de transformer un déchet en intrant, permettant à fois d'économiser les ressources en eau de bonnes qualités, de baisser les pressions polluantes, voire de diminuer les coûts de traitement grâce à l'affinage par la REUT, est particulièrement séduisante et en pleine accord avec les concepts de développement durable. Ces pratiques comportent néanmoins un risque, dont une bonne part peut être maîtrisée par l'utilisation de techniques d'épandage adéquates, en plus d'une surveillance sanitaire.

Pour mieux approcher les risques de pollution secondaire et conserver le bénéfice de l'EUT on doit pouvoir garantir que celle-ci ne sortira pas de la zone cible. Cela n'implique pas une absence totale de sortie mais des sorties potentielles dans des quantités qui ne présentent pas de risques pour les humains ou l'environnement.

Par ailleurs le fait d'appliquer des nutriments avec l'eau impose un dimensionnement tel que l'uniformité d'application soit parfaite pour éviter tout risque de dégradation des conditions de sol (engorgement, salinité). Du point de vue technique, c'est l'application par aspersion qui reste la plus intéressante car elle nécessite peu de matériel sur le terrain, est pratiquement insensible au colmatage et reste facile à contrôler visuellement. L'utilisation de la micro-irrigation, qui annule pratiquement les risques de contact mais pose d'énormes problèmes de durabilité, n'est pas abordée dans ce volet de l'étude.

Afin de caractériser les risques de pollutions liés à cette technique on se propose d'étudier les différents systèmes d'aspersion existant sur le marché. Après une présentation des matériels étudiés et des protocoles expérimentaux mis en œuvre, la section 3 décrit les méthodes de simulation numériques qui ont permis d'estimer les temps de vols et les variations de portées pour différentes conditions de vent. Ces résultats expérimentaux et numériques servent à la quantification du volume d'eau évaporé, à la caractérisation des populations de gouttes susceptibles de s'évaporer et à la définition d'un taux de dérive. Les relations permettant d'estimer ces paramètres sont expliquées à la section 4. Les résultats sont présentés pour chaque type d'asperseur à la section 5. Une synthèse clôt ce rapport et ouvre sur les perspectives à aborder.

2. Matériels et méthodes

2.1 – Types d'asperseur choisi

Cette étude s'intéresse uniquement aux différents systèmes d'aspersion existant en France, servant soit à l'irrigation agricole soit à l'arrosage des espaces verts. Ainsi, sept types de systèmes (Annexe 1) ont été sélectionnés à partir de leur portée⁴, de leur mode de fonctionnement (rotation par turbine, batteur, ou jet fixe) et des gammes de débits qu'ils délivrent. La portée joue un rôle important dans les risques de dérives, d'évaporation et de ruissellement en déterminant le temps de vol des gouttes, le degré d'atomisation du jet et le débit instantané apporté. Les sept types d'asperseurs sont les suivants :

- Canon : dont la rotation est assurée par un batteur, pour l'irrigation agricole, avec une portée de l'ordre de 50 m ;
- Turbine à grande portée : dont la rotation est assurée par un moteur hydraulique, utilisées dans les parcs et jardins à grande portée (25 m) ;
- Turbine à moyenne portée (15 m) ;
- Asperseur à batteur utilisé en agriculture en quadrillages (couverture intégrale) d'une portée de 15 m ;
- Asperseur à batteur utilisé en couverture intégrale à faible écartement, et fonctionnant à faible pression, d'une portée de 10 m ;
- Micro-asperseur rotatif utilisé sous serre ou en arboriculture, d'une portée de 4 m ;
- Micro-spray à jets fixes utilisé en maraîchage d'une portée de 2,5 m.

Dans le cadre de ce projet, il nous fallait choisir des systèmes d'aspersion représentatifs du marché. Ainsi, le choix de chaque système d'aspersion a été fait avec l'aide de constructeurs de matériels d'irrigation avec qui nous travaillons depuis longtemps : KOMET, Rain Bird et Naan-Daan-Jain.

Pour chacun des asperseurs sélectionnés, nous avons déterminé la distribution pluviométrique radiale, ainsi que la distribution granulométrique des gouttes produites le long de la portée, pour trois pressions différentes. Le choix des pressions (Tableau 2) s'est appuyé sur la pression optimale de fonctionnement, telle que conseillée par le constructeur, encadrée par une pression basse et une pression haute. L'objectif est de pouvoir suivre l'évolution du jet, et plus précisément l'évolution de sa distribution granulométrique le long de la portée sur la plage de pression de fonctionnement. A partir de ces distributions, des simulations ont été réalisées afin d'estimer quelles seraient la portée et le temps de vol limites dans le cas d'un vent de 4 m.s^{-1} soufflant parallèlement la direction du jet.

Tableau 2 : types d'asperseur utilisé

Asperseur	Marque	Type	Buse (mm)	Plage de pression (bar)	Débit (m ³ /h)	Portée (m)	Caractéristiques (angle du jet, type de sprays, etc.)
Twin 101+	Komet	Canon	22	3.5/4.5/5.5	40	45	24°
Eagle 750 S	Rain Bird	Turbine	orange	4.5/5.5/6.5	6	21	Buse à triple orifice
5000 plus	Rain Bird	Turbine	3	2/3/4	0.8	11	
RB 46 WH	Rain Bird	Sprinkler	4.36/2.38	2.5/3.5/4.5	1.7	15	23°
5022-U	Naan	Sprinkler	2.5/1.8	2.5/3/3.5	0.6	10	
Hadar 7110	Naan	Micro-jet	1.4 (bleue)	1.5/2/3	0.1	4.5	Rotor 2 jets à longue portée
Turbojet	Naan	Micro-jet	1 (orange)	1.5/2/3	0.033	2.5	Défecteur à 12 jets statiques

⁴ La portée d'un asperseur correspond à la distance de l'axe de l'asperseur au pluviomètre le plus éloigné recevant un pluviomètre de 0,3 mm/h. Cette limite est fixée par la norme NF U 51-461

2.2 – Distribution pluviométrique

2.2.1 – Micro-asperseur et micro-spray

Pour les mesures de pluviométrie des micro-asperseurs, nous avons réalisé un quadrillage de la zone mouillée dans l'optique d'établir une cartographie de la distribution pluviométrique des asperseurs : Hadar 7110 et Turbojet. La faible portée de ces asperseurs impose de retenir un grand nombre de points de mesure pour améliorer la qualité de l'information collectée sur la répartition pluviométrique de ces asperseurs, et ce en particulier pour le Turbojet avec ces jets statiques. Ces mesures ont été effectuées à l'intérieur du laboratoire, en l'absence totale de perturbations par le vent.

Pour les mesures pluviométriques de l'Hadar 7110, nous avons employé des collecteurs cylindriques de 25 cm de diamètre et de 25 cm de hauteur. Ces collecteurs ont été disposés à chaque intersection d'un quadrillage en 50 x 50 cm réalisé pour ces mesures (Figure 1-a).

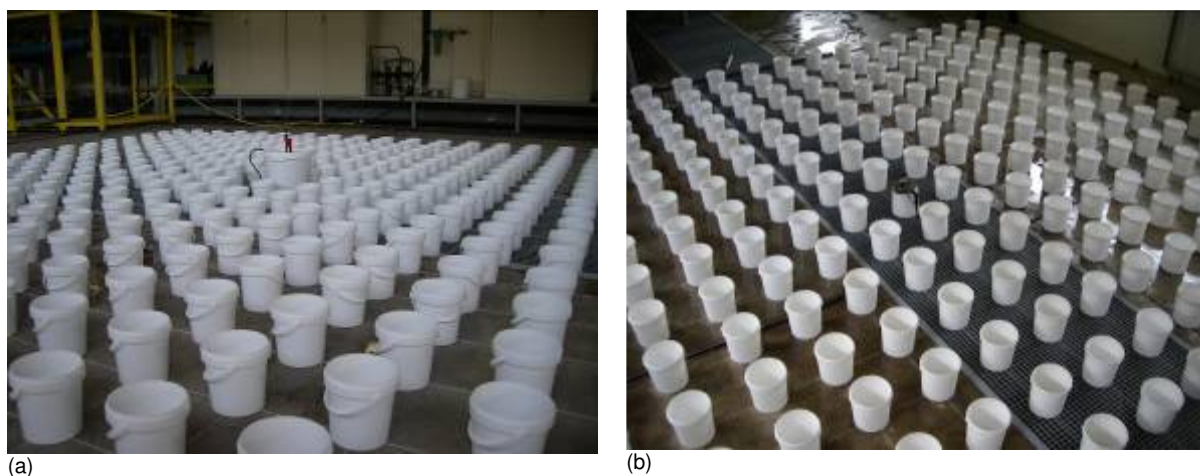


Figure 1: photos du dispositif de mesure pluviométrique de l'Hadar 7110 (a) et du Turbojet (b)

Quant aux mesures pluviométriques du Turbojet, nous avons opté pour des collecteurs plus petits ainsi qu'un quadrillage plus fin pour limiter les risques d'erreurs de mesures (Figure 1-b). Les collecteurs utilisés ont un diamètre de 12 cm pour une hauteur de 10 cm. Le quadrillage a été fait en 25*25.

Pour palier les risques d'erreur de mesure, liés aux faibles débits de ces asperseurs le temps de fonctionnement a été fixé à trois heures pour le Turbojet et deux heures pour l'Hadar 7110. *In fine* chaque collecteur est pesé individuellement et la quantité d'eau apportée convertie en mm d'eau.

Une fois les mesures collectées, et dans l'objectif de valider les résultats on compare le débit apporté (débitmètre), à celui donné par le constructeur, et à celui calculé par une procédure de reconstitution du débit à partir des données de pluviométrie mesurées. Si le débit reconstitué s'éloigne de plus de 5 % de la valeur théorique ou mesurée au débitmètre une autre mesure est conduite. La dérive acceptée pour ces petits asperseurs est de 10 %, pour les autres elle est de 5 %. Après avoir mesuré la distribution de pluviométrie de l'asperseur, on calcule une distribution de pluviométrie radiale qui servira ensuite pour déterminer les points de mesure de la granulométrie.

2.2.2 – Asperseurs, turbines et canon

Pour les autres asperseurs avec une plus grande portée, il n'était pas envisageable de faire un quadrillage complet de la zone cible. Ainsi, nous avons décidé d'échantillonner la distribution pluviométrique sur un rayon conformément à la norme ISO 15886 (Figure 2-a). Chaque arroseur est installé dans un abri ou cloche de mesure qui se trouve soit à l'intérieur du laboratoire pour les portées de moins de 15 m (Rain Bird 5000 plus et 46 WH, Naan Dan Jain 5022) soit à l'extérieur pour les plus grandes portées (Twin 101, Rain Bird Eagle 750).

Pour les asperseurs à cercle complet, comme le RB 46 WH et le 5022-U, ils sont disposés à l'intérieur de la cloche de mesure qui possède une ouverture laissant le jet se développer sur un angle de 7° environ (Figure 2-b). Les collecteurs sont placés sur une portion de la surface faisant un angle de 3° environ. Chaque collecteur est installé le long de trois rayons au moins matérialisés par des cordeaux. Tous les collecteurs sont ensuite disposés sur ces rayons à un intervalle de 25 cm les uns des autres sauf en début de portée. En effet, en début de portée, les collecteurs sont disposés en continu afin d'avoir une bonne représentation de la pluviométrie à la proximité de l'asperseur. Nous disposons donc de la pluviométrie moyenne sur un rayon, que nous pourrions ensuite interpoler sur l'ensemble de la surface afin de reconstituer le débit apporté et valider les résultats de mesures.

Pour les asperseurs à secteur, il est possible de régler l'angle de secteur à 180°. Le fait de réduire l'angle de secteur de l'asperseur permet de réduire le temps de mesure sans nuire au degré de précision des mesures.



(a)



(b)

Figure 2 : dispositif de mesure extérieur, mesures de pluviométries sur la turbine Eagle 750 S (a) et intérieur avec cloche de mesure (b)

Dans le cas des mesures extérieures, nous étions tributaires des conditions climatiques telles que le vent et la pluie. En ce qui concerne le vent, son évolution est suivie à l'aide d'un anémomètre, l'arrêt des mesures est conditionné à une vitesse du vent de plus de 1 m.s^{-1} . En effet, au-delà de cette vitesse, la distribution pluviométrique est fortement modifiée et ne peut donc plus servir de référence.

Dans le cas de la turbine on a travaillé avec un angle de 180°, sa portée n'impose pas d'utiliser la cloche de mesure. En revanche, le Twin a été disposé dans la cloche extérieure pour éviter les projections sur les bâtiments et réglé lui aussi à 180°.

Pour ces mesures extérieures on travaille avec un rayon unique et des pluviomètres positionnés tous les 0.5 m (Figure 2-a). La procédure de validation par reconstitution des débits à partir des pluviométries est appliquée comme dans les cas précédents.

2.3 – Distribution granulométrique

2.3.1 – Spectropluviomètre bifaisceau

Le DBS (Dual Beam Spectrometer, Delahaye and Co, 2001, Figure 3) est constitué de deux faisceaux Infra Rouge parallèles de 2 mm d'épaisseur, séparés par une distance de 2 mm, d'une largeur de 40 mm et d'une longueur de 250 mm. Ces faisceaux sont reçus par deux photodiodes aux bornes desquelles la tension varie en fonction de l'intensité du faisceau reçu. Lorsqu'une particule passe dans le faisceau, la lumière est atténuée et la tension de même, proportionnellement à la taille de la particule (Figure 4). Le décalage entre les deux signaux est inversement proportionnel à la vitesse de la particule. Chaque particule identifiée est, ainsi, assortie d'une taille et d'une vitesse.



Figure 3 : spectropluviomètre bifaisceau

Une particule d'eau de plus de 1 mm de diamètre lorsqu'elle est en vol, est de section elliptique du fait que les forces de frottements avec l'air sont plus importantes que les forces de tensions superficielles qui maintiennent la circularité de la goutte. Ainsi, la taille de chaque particule est calculée à partir de son ombre portée sur la photodiode réceptrice qui est convertie en diamètre équivalent en utilisant l'algorithme de Pruppacher et Pitter (1971) pour reconstituer correctement les volumes d'eau qui transitent dans la zone de mesure. Cette correction n'est nécessaire que pour des particules de plus de 1 mm.

Chaque mesure porte sur 3 000 à 5 000 particules dans une gamme de diamètres équivalents pouvant varier de 0,1 à 10 mm. Chaque mesure est assortie d'un paramètre de qualité, le Q_{Flag} ($0 < Q_{Flag} < 250$) qui juge de la similarité des deux signaux lorsqu'une particule est détectée. Un post-traitement permet de sélectionner les particules dont le Q_{Flag} est au meilleur niveau ($Q_{Flag} < 50$). Les particules rejetées sont, soit des particules passant à la marge des faisceaux, soit des particules multiples passant dans les faisceaux. Ce dernier cas est en cours d'intégration dans le logiciel de traitement pour détecter jusqu'à 3 particules passant en même temps dans les deux faisceaux.

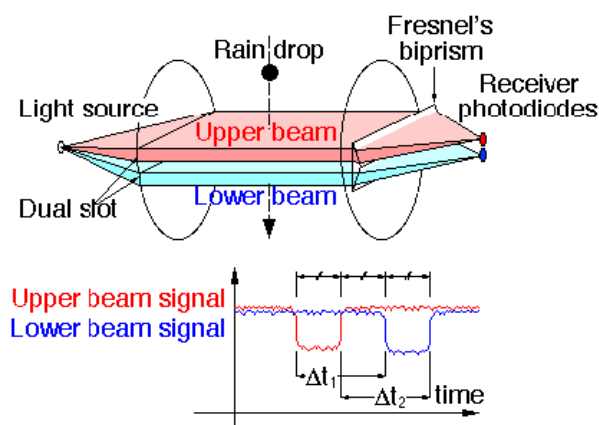


Figure 4 : principe de fonctionnement du spectropluviomètre bifaisceau

Le Q_{Flag} nous renseigne sur la cohérence de la détection, c'est-à-dire sur l'adéquation du signal haut et du signal bas. Il sert de filtre en éliminant les signaux non exploitables correctement. Cette perte d'informations est plus ou moins importante suivant le type d'asperseur et la position du spectromètre le long de la portée. En général, pour un même asperseur, le taux de rejet est le plus élevé en début de jet et tend à décroître avec la distance capteur/asperseur. La plage de rejet est très large puisqu'elle s'étend, dans notre cas, de 5 % à 59 % (Tableau 3) et implique majoritairement des gouttes de diamètre inférieur à 1 mm. Les taux élevés de rejet sont probablement dus à la présence simultanée de nombreuses particules dans les faisceaux que l'algorithme ne sait pas encore traiter. Ces rejets peuvent induire une erreur qui est proportionnelle au volume représenté par les plus petites particules, dont nous verrons plus loin que leur volume est négligeable.

Tableau 3 : exemples de taux de rejet des données dus à un Q_{Flag} supérieur à 50

Turbojet			5000-U		
Pression (bar)	Rayon	Taux de rejet (%)	Pression (bar)	Rayon	Taux de rejet (%)
1,5	40%	17	2	30%	42
	48%	22		40%	46
	65%	20		60%	7
	74%	10		70%	6
	93%	17		80%	5
				90%	9
2	52%	20	3	29%	58
	62%	19		38%	26
	71%	15		58%	11
	76%	5		67%	6
	92%	11		77%	5
				87%	6
3	43%	19	4	29%	48
	56%	19		39%	36
	66%	9		59%	16
	77%	6		69%	9
	88%	4		78%	6
				88%	6

Les signaux rejetés se trouvent principalement dans la partie la plus dense du jet (Turbojet) ou en début de jet (5000-U), là où la proportion de gouttes de diamètre inférieur à 1 mm est la plus importante. Cette tendance est observée sur l'ensemble des asperseurs étudiés.

2.3.2 – Protocole de mesure

La vitesse de la goutte détectée est calculée par différence de date de passage entre les deux signaux (cf. § 2.3.1). Ceci n'est vrai que si l'on considère que la trajectoire de la goutte coupe perpendiculairement les deux faisceaux. Or, en pratique la trajectoire moyenne des gouttes émises par un jet n'est pas perpendiculaire au sol. Il est donc nécessaire de corriger la vitesse obtenue en tenant compte de l'angle de la trajectoire moyenne des gouttes. Plutôt que de faire une telle correction en post traitement, nous avons fait le choix d'incliner le capteur de telle sorte qu'il soit perpendiculaire à la trajectoire moyenne des gouttes. Toutefois, comme le capteur est à une hauteur de 40 cm environ par rapport au sol, les gouttes mesurées tombent au-delà de la position du point de mesure, cela nécessite une correction du rayon initialement déterminé (Annexe 2).

La détermination des positions de mesure le long d'un rayon, est faite à partir de la distribution pluviométrique et volumique obtenue lors des mesures de pluviométrie radiale (Figure 5). Cette position permet de relier la distribution granulométrique à la pluviométrie radiale préalablement mesurée. Le couplage de ces deux mesures donne aussi accès aux valeurs d'énergie cinétique délivrées au sol.

La caractérisation de l'évolution des familles de gouttes le long du jet est essentielle pour estimer les risques de dérive et d'évaporation. Au-delà, cela permettra d'approcher le risque de ruissellement lié aux particules les plus volumineuses. Le jet est découpé en six tronçons correspondant à un pourcentage de la portée maximale calculée à partir de la pluviométrie comme illustré dans le Tableau 3.

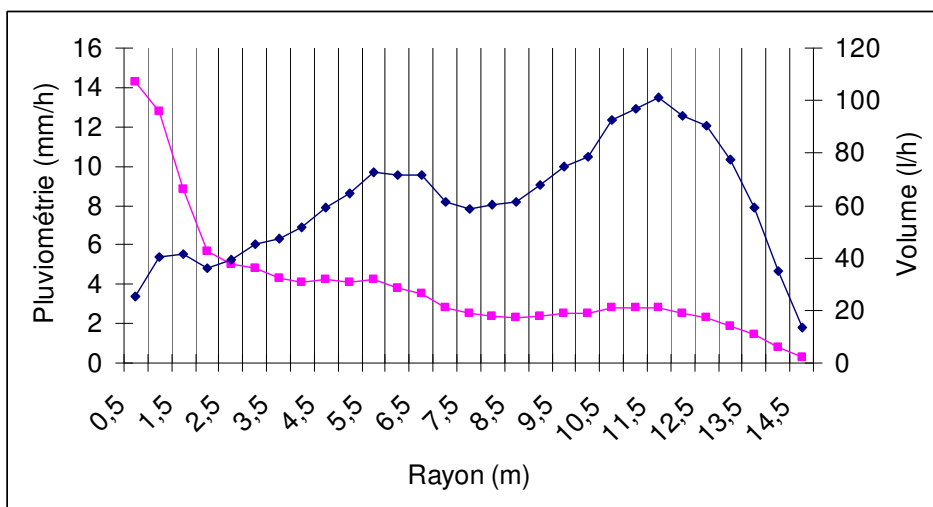


Figure 5 : exemple de courbe de pluviométrie radiale et de courbe volumique (asperseur Rain Bird 46 WH)

2.3.3 – Limites de la méthode de mesure

L'analyse des gouttes détectées par le spectromètre bi-faisceau se fait à partir d'un algorithme de décomposition du signal. Actuellement, cet algorithme ne peut détecter que les gouttes simples. Une goutte simple est caractérisée par une baisse de tension franche au niveau des deux faisceaux. La Figure 6 montre des courbes de tension aux bornes des récepteurs issues d'un fichier brut avec des baisses de tension. Chaque pic correspond au passage d'une particule. Dans le cas de plusieurs particules, le pic est composé de plusieurs signaux superposés (Figure 7). Dans ce cas, il est difficile de différencier les gouttes.

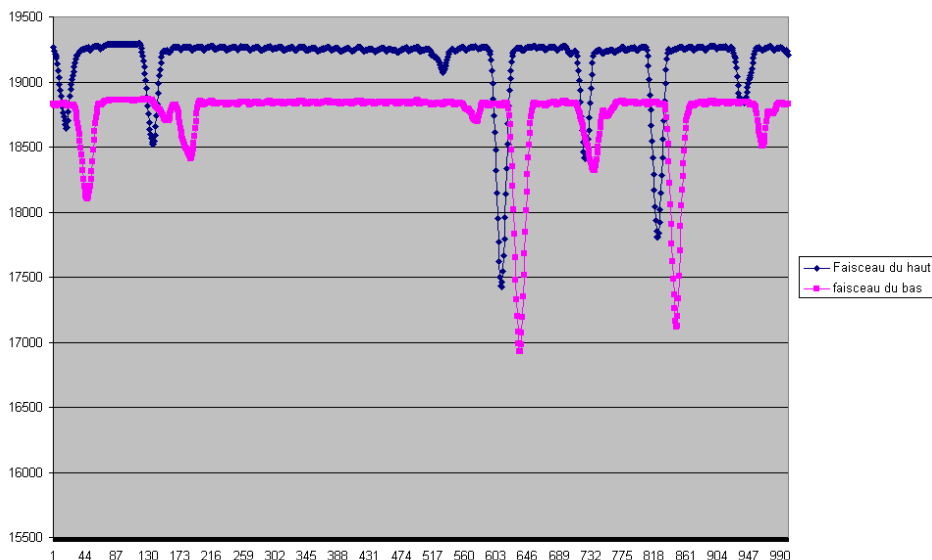


Figure 6 : données brutes d'un fichier de mesure

La Figure 7 représente une simulation d'un signal issu du passage de 4 gouttes simultanées. Cette Figure 7 illustre la difficulté de différencier les différentes particules. Un tel signal sera rejeté à cause d'un Q_{Flag} trop élevé. L'algorithme de détection est en cours d'amélioration pour détecter de tels groupes de particules.

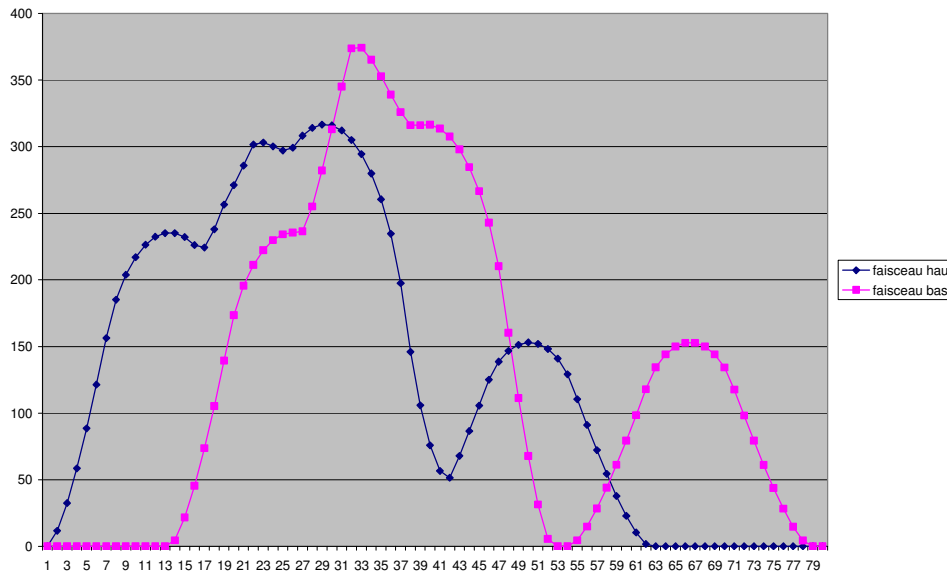


Figure 7 : simulation de 4 gouttes, respectivement de 6 mm, 8 mm, 4 mm et 3 mm

A partir de l'analyse des signaux, l'algorithme donne pour chacune des gouttes identifiées son diamètre équivalent et sa vitesse. Certaines grosses particules (plus de 4 mm) apparaissent en nombre réduit car elles sont très instables, et tendent à se fragmenter pour éventuellement se recombinaison avec d'autres. Par contre leur volume et l'énergie cinétique qu'elles développent sont très élevés. Du fait qu'une partie des gouttes est rejetée, cette mesure doit être vue comme un échantillonnage du nuage de gouttes produit, avec une valeur qualitative et non comme une mesure exhaustive, qui aurait une valeur quantitative.

3. Estimation du temps de vol, de la portée et de l'impact du vent

A partir de la granulométrie mesurée pour chacun des asperseurs, des simulations balistiques ont été réalisées afin d'estimer le temps de vol et la distance parcourue par les gouttes. L'objectif est de pouvoir définir l'impact global du vent sur la distribution d'eau au sol et le temps de vol des particules.

De précédentes études (Hendawi, 2006 ; Molle *et al.*, 2011) ont montré que seules les classes de gouttes dont le diamètre est inférieur à 350 µm sont susceptibles de dériver substantiellement hors de la zone cible. Les gouttes des classes inférieures peuvent s'évaporer totalement, si les conditions le permettent, ce qui peut générer des aérosols. Ces gouttes sont majoritairement produites au plus près de l'asperseur. Pour tenir compte des risques de dérive, pour chacun des asperseurs et pour chacune des pressions, nous avons modélisé la trajectoire d'un nuage de gouttes de même caractéristiques que celui mesuré à 90 % de la portée. Ces dernières sont susceptibles de dévier le plus hors de la zone cible. Leur zone d'impact permettra de définir l'enveloppe critique de la distribution d'eau au sol en cas de vent.

3.1 – Outil de modélisation

Le modèle utilisé est le modèle de la phase discrète ou DPM (Kleven *et al.*, 2004). Il s'agit d'un modèle Euler-Lagrange appliqué à un nuage dispersé de gouttes (fraction volumique liquide < 10 %). La phase continue (air) est représentée par une écriture Eulérienne des équations bilan de Navier-Stokes. Nous ne cherchons pas dans cette étude à faire évoluer la population de gouttes (aucun transfert de masse ou d'énergie). La trajectoire des gouttes d'eau est décrite par l'équation 1, l'indice 'g' pour goutte et 'a' pour air :

$$\text{Équation 1 : } \frac{dU_g}{dt} = F_D (U_a - U_g) + \frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_g} g + \frac{\rho_a}{\rho_g} U_g \frac{\partial U_a}{\partial x}$$

avec U_g et U_a les vitesses respectives des gouttes et de l'air ; ρ_g et ρ_a les densités respectives des gouttes et de l'air, g la gravité. Les termes de droite correspondent à la force de traînée par unité de

masse où $F_D = \frac{18\mu_a}{\rho_g D_g^2} \frac{C_D R_e}{24}$, avec : $R_e = \frac{\rho_a \|\vec{U}_g - \vec{U}_a\| D_g}{\mu_a}$ le nombre de Reynolds (μ_a étant la

viscosité dynamique) et C_D le coefficient de traînée (Morsi et Alexander, 1972 ; Haider et Levenspiel, 1989), aux forces de gravité et de poussée d'Archimède et à la force provoquée par le gradient de pression dans l'air.

Dans ce cas idéalisé, le couplage entre les deux phases s'effectue à partir des termes sources / puits relatifs à la quantité de mouvement. Ce couplage réciproque est accompli en résolvant alternativement les équations des phases discrète (gouttes d'eau) et continue (air) jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Il n'y a alors plus de changement de quantité de mouvement entre les deux phases dans la maille du calcul considérée (FLUENT 6.2 Documentation, 2005⁵).

3.2 – Procédure

On part de l'hypothèse que les gouttes mesurées à 90 % de la portée ont été préférentiellement produites au niveau de l'apogée du jet, puisque à ce niveau les paquets initialement formés à partir du jet principal apparaissent complètement fragmentés et sont appelés à se disperser (Augier, 1996). Or, nous ne disposons pas des données nécessaires (vitesse du jet à l'apogée, hauteur et abscisse de l'apogée) pour initialiser les simulations. Afin de les déterminer, pour chacun des asperseurs et chacune des pressions, un premier jeu de simulations a été réalisé, sans vent et avec un vent de 4 m.s^{-1} , en prenant comme condition initiales pour l'injection : la vitesse du jet au niveau de la buse, l'inclinaison de l'asperseur et la hauteur de la buse (Figure 8). Ensuite, un second jeu de simulation a été effectué (Figure 9) en prenant comme conditions initiales pour les gouttes les caractéristiques du jet à l'apogée (vitesse, hauteur, abscisse) sans vent et avec un vent de 4 m.s^{-1} , que l'on considère comme la limite au-delà de laquelle on ne devrait plus irriguer. La direction du vent est celle du jet, ce qui correspond à la configuration la plus défavorable en termes de dérive.

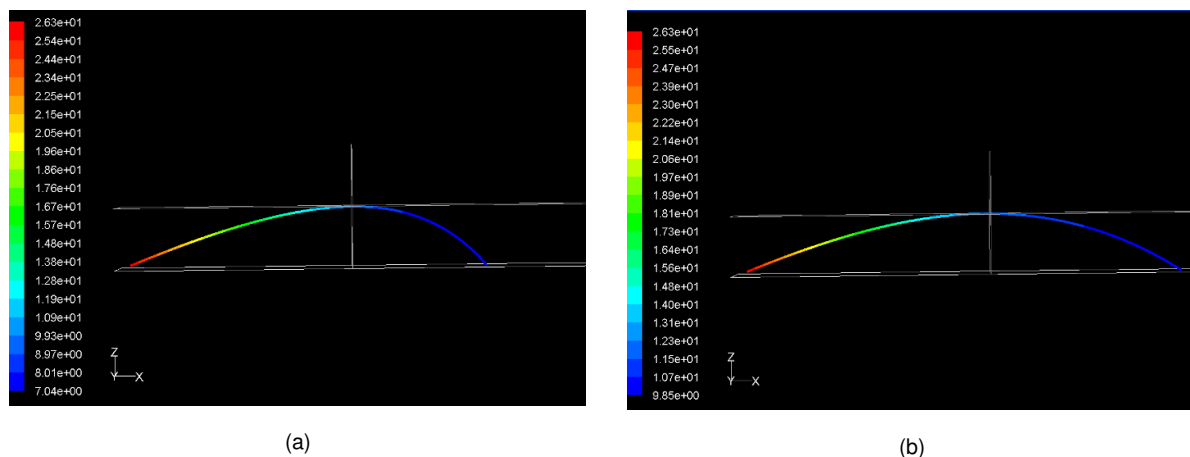
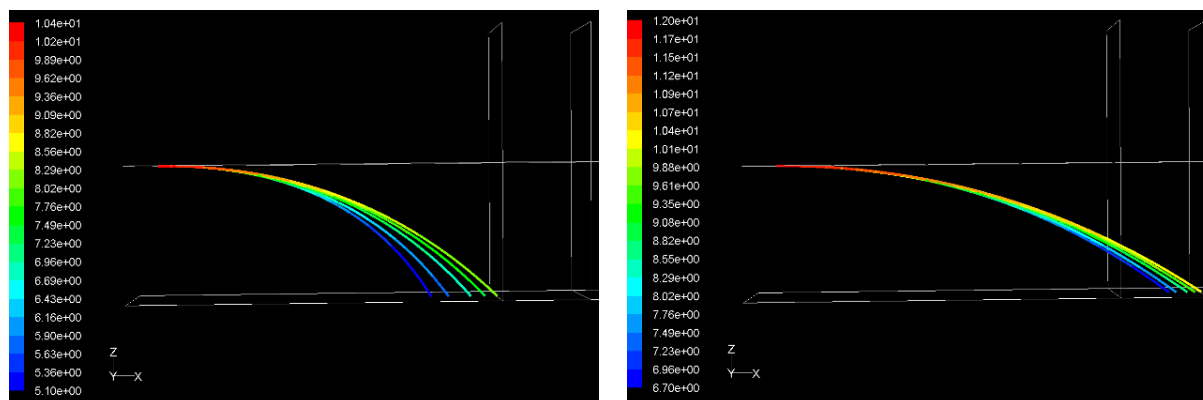


Figure 8 : détermination des caractéristiques de l'apogée pour la turbine RainBird 5000+ à 2 bars sans vent (a) et avec un vent de 4 m.s^{-1} (b) : vitesse des gouttes (m.s^{-1}) suivant leur trajectoire. Ces résultats permettent d'estimer la position (distance = plan vertical, hauteur = plan horizontal) de l'apogée et la vitesse des gouttes en ce point

⁵ Fluent User's Guide, FLUENT 6.2 Documentation, 2005.



(a)

Figure 9 : détermination du temps de vol et de la portée pour l'asperseur RainBird 5000+ à 2 bars sans vent (a) et avec un vent de 4 m.s^{-1} (b) : temps de résidence des gouttes suivant leur trajectoire

Pour l'ensemble des asperseurs, on ne simule que la trajectoire des gouttes issues du jet principal. On ne prend donc pas en compte les interactions avec les jets secondaires (cas des asperseurs Eagle, RB 46 et 5022-U).

4. Analyses des mesures et calculs des paramètres des distributions

La caractérisation des risques de dérive et d'évaporation des différents asperseurs nécessite une connaissance précise de la répartition pluviométrique radiale et de la granulométrie en différents points le long du jet. Le couplage de ces données permettra d'établir le risque potentiel de « pertes » en estimant le volume des gouttes susceptibles de dériver et/ou de s'évaporer le long de la portée. Pour ce faire, on définit un certain nombre de paramètres, calculés à partir des données qui serviront d'indicateurs.

4.1 – Caractérisation de la distribution pluviométrique radiale

La distribution de pluviométrie (P (mm/h)) peut être caractérisée par sa courbe $P=f(R)$ en fonction du rayon (R (m)) dont la valeur maximum est la portée. Cette courbe permet d'estimer le profil de la distribution, nécessaire lorsque l'on souhaite concevoir un dispositif et obtenir un bon recouvrement entre asperseurs voisins, et donc une bonne uniformité de la distribution sur l'ensemble de la zone irriguée.

En observant les courbes de distribution pluviométrique, on constate des différences notables de profil, en début de portée par rapport au reste de la distribution. On distingue des profils "plats" c'est-à-dire que la dose appliquée est constante sur une bonne part du rayon d'arrosage. C'est le cas des canons et de certaines turbines pour lesquelles un recouvrement entre asperseurs voisins n'est pas nécessaire. Cela signifie que la distance entre deux arroseurs ou passages contigus représentera 180 à 190 % de la portée, la zone de recouvrement se réduira à 5 à 10 % de la portée.

Le deuxième type de profil rencontré sur les petits asperseurs et les turbines à moyenne portée est un profil en triangle, ce qui impose un écartement entre arroseurs tel que le recouvrement soit important, ainsi l'écartement doit être équivalent à 130 à 150 % la portée suivant la disposition des mailles d'arroseurs, comme illustré par le Tableau 4 pour une implantation en mailles rectangulaires.

Tableau 4 : coefficient d'uniformité après recoupement pour le RB 46 et le 5022-U

Type d'asperseur	Pression (bar)	Ecartement (m)	Portée (m)
RB 46	2.5	21	13.5
RB 46	3.5	21	14.5
RB 46	4.5	21	14.5
5022-U	2.5	14	10
5022-U	3	14	10
5022-U	3.5	14	10

Enfin, il existe les arroseurs dont la distribution est en anneau, c'est à dire que l'apport d'eau le plus important est concentré sur une zone restreinte de la portée, comme les asperseurs de pivots ou certains micro-asperseurs pour lesquels le calcul du recouvrement est le déterminant de l'uniformité de distribution.

Cependant, le niveau d'information fourni par la courbe pluviométrique ne suffit pas pour évaluer la qualité de distribution d'un arroseur. En effet, si on souhaite mieux comprendre les effets globaux liés aux caractéristiques des gouttes produites, il faut considérer non pas la pluviométrie mais l'intégration de cette pluviométrie sur la surface concernée, ou le volume (V en $l.h^{-1}$) distribué en fonction du rayon $V=f(R)$. Ainsi, une pluviométrie même faible en fin de portée représente un volume très élevé par rapport à la même pluviométrie mesurée en début de portée. En conséquence si cette pluviométrie en fin de portée est apportée sous forme de gouttes de gros diamètre sur un intervalle de temps court, son effet moyen de dégradation de la surface du sol sera très supérieur à celui de la même pluviométrie en début de portée, généralement apportée sous forme de petites particules sur un temps long. C'est aussi cette distribution en volume qui, associée aux distributions de tailles de gouttes, nous intéresse à la fois dans l'analyse de la sensibilité au vent et à l'évaporation.

Pour chacun des essais de pluviométrie radiale, nous avons reconstitué le débit de l'asperseur et l'avons comparé à celui mesuré par le débitmètre du laboratoire (Tableau 5). De manière générale, le taux de reconstitution du débit est supérieur à 90 % validant les mesures de pluviométries. Les taux les plus faibles sont obtenus sous les arroseurs à faible portée (ou aux faibles pressions) où le nombre de collecteurs mouillés devient moins grand (donc l'erreur augmente). Ceci étant, notre objectif est avant tout de caractériser le profil de la distribution. Celui-ci reste stable sur les différentes répétitions de mesures que nous avons pu faire, en particulier dans les cas où les taux de reconstitutions étaient faibles.

Tableau 5 : caractéristiques générales des courbes de distribution pluviométrique mesurées pour chaque couple asperseur/pression (* sur cette mesure, l'angle de balayage du canon a été mal noté, pour la suite du travail seul le profil de la distribution est considéré avec le débit reconstitué)

Type d'asperseur	Pression (bar)	Portée mesurée (m)	Débit mesuré (m ³ /h)	Débit reconstitué (m ³ /h)	% de reconstitution
Twin 101+	3.5	42	35.3	43	76*
Twin 101+	4.5	47	40.2	39.6	98
Twin 101+	5.5	50	44.2	46	96
Eagle 750 S	4.5	22	5.72	5.27	92
Eagle 750 S	5.5	23.5	5.9	5.84	99
Eagle 750 S	6.5	23.5	7.2	7	97
5000 plus	2	11	0.67	0.48	72
5000 plus	3	12.4	0.7	0.6	86
5000 plus	4	12.3	0.81	0.71	88
RB 46 WH	2.5	13.5	1.53	1.49	98
RB 46 WH	3.5	14.5	1.78	1.78	100
RB 46 WH	4.5	14.5	2	2.04	98
5022-U	2.5	10	0.59	0.51	98
5022-U	3	10	0.65	0.65	100
5022-U	3.5	10	0.7	0.69	99
Hadar 7110	1.5	3.8	0.094	0.087	93
Hadar 7110	2	3.8	0.107	0.099	93
Hadar 7110	3	3.8	0.140	0.127	91
Turbojet	1.5	2.2	0.027	0.027	100
Turbojet	2	2.5	0.036	0.033	91
Turbojet	3	3	0.038	0.035	91

4.2 – Caractérisation de la distribution granulométrique du jet

Pour chaque particule identifiée sont enregistrés son diamètre équivalent et sa vitesse.

4.2.1 – Fonction de distribution granulométrique

Pour évaluer la fonction de distribution granulométrique, on peut utiliser une loi log-normale ou la loi de Rosin-Rammler (Equation 2). Cette loi, initialement développée pour décrire la distribution de taille de particules de charbon, est par sa robustesse largement utilisée dans différents types d'étude granulométrique. Cette fonction est fondée sur l'hypothèse qu'il existe une relation exponentielle entre le diamètre D , d'une classe de diamètre et la somme des fréquences, Y_D des diamètres inférieurs. Etant donnée la forme de cette loi, cette hypothèse est valable que l'on parle de fraction volumique ou massique.

Équation 2 : $Y_D = 1 - e^{-(D/\bar{d})^n}$, avec :

- Y_D est la fraction massique formée par les gouttes de diamètres inférieurs à D ;
- \bar{d} est le diamètre caractéristique de la distribution de probabilité associée. Par définition, \bar{d} correspond à la fraction massique $Y_{\bar{d}}$ formée par les gouttes de diamètres D inférieurs à \bar{d} . Il suffit donc de remplacer D par \bar{d} dans l'équation 1, $Y_{\bar{d}} = 0.63$, \bar{d} est donc la valeur du diamètre qui correspond à $Y_D = 63,21\%$ dans la distribution granulométrique ;
- n est le coefficient de dispersion de la distribution de probabilité. Il est obtenu par transformation logarithmique à partir de l'Equation 2. On obtient ainsi une série de $n=f(D)$ dont on peut extraire une moyenne.

A partir de cette fonction, on réalise une courbe de distribution en effectif de gouttes et en volume. Les distributions ont été comparées à celles obtenues expérimentalement (Figure 10).

La Figure 10 présente un exemple de courbes de distributions granulométriques en effectif, N , et en volume, V , calculées à partir de l'échantillonnage et de la fonction de distribution de Rosin-Rammler. Cet exemple montre bien le décalage existant entre la fonction de distribution en effectif et celle en volume pour une même famille de gouttes. Par la suite, les comparaisons entre différentes mesures seront faites à partir des courbes issues de la loi de Rosin-Rammler.

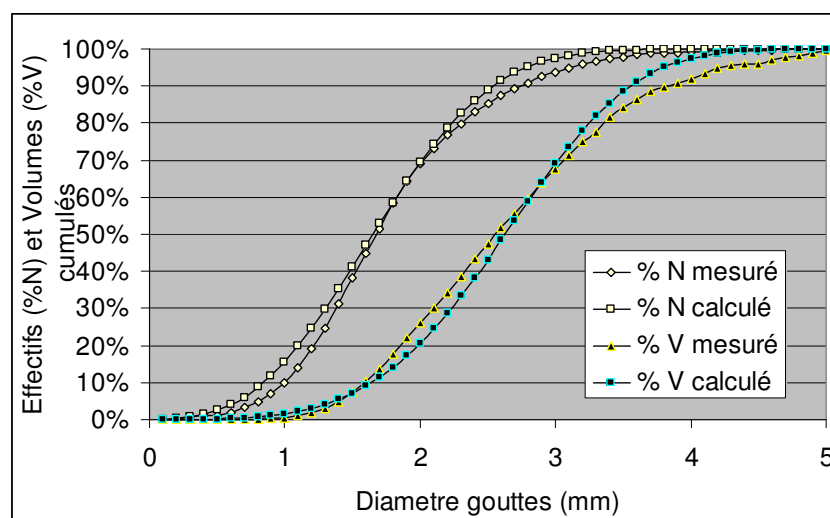


Figure 10 : fonction de distribution granulométrique en effectif et en volume

Pour un couple asperseur/pression donné, la superposition de ces fonctions de distribution suivant le rayon permet de suivre l'évolution du nuage de gouttes le long du jet. Cette évolution du jet permettra de mieux appréhender les risques de dérives et d'évaporation le long du jet. La Figure 11 montre l'évolution des distributions en effectif et en volume granulométrique du Twin 101 + à 3.5 bars en fonction du rayon exprimé en % de la portée. On notera l'augmentation du volume moyen des gouttes avec le rayon. D'une part, le diamètre médian pour la distribution des volumes à 30 % de la portée est de l'ordre de 1.9 mm alors qu'il est de 4.4 mm à 90 % de la portée. D'autre part, les gouttes de 0.9 mm qui représentent 50 % de la distribution en effectif à 60 % de la portée ne représentent plus que 3 % en distribution granulométrique en volume. Bien qu'importantes en effectif, les gouttes de petits diamètres ne représentent qu'un très faible volume.

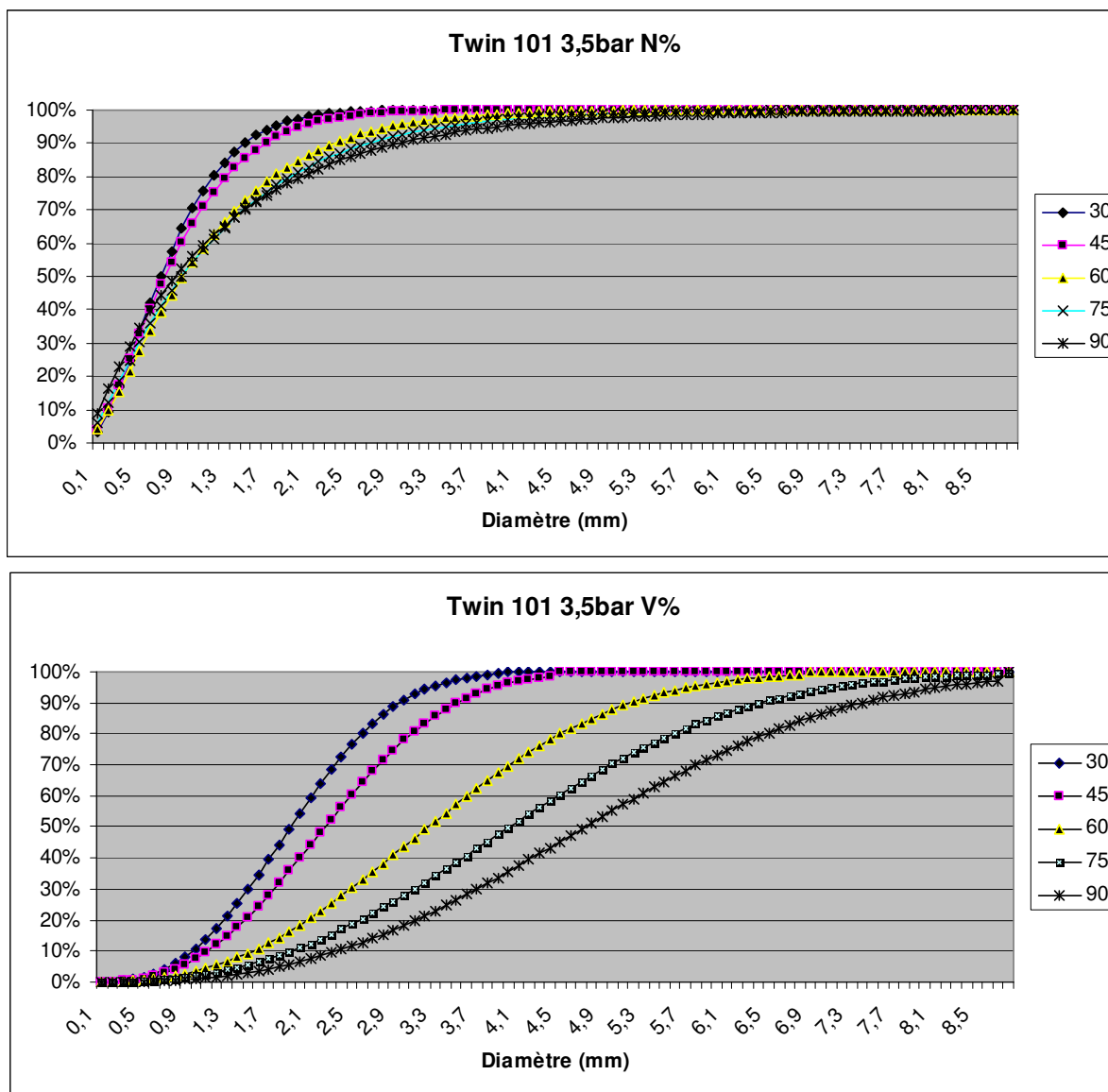


Figure 11 : distributions granulométriques en fonction de l'effectif (N %) et du volume (V %) à 3,5 bars en différents points de la portée standard

4.2.2 – Principaux quantiles en granulométrie

Pour caractériser la distribution de manière synthétique, dans la mesure où la forme de distribution reste à peu près constante, on peut utiliser les valeurs de diamètres correspondant aux quantiles des distributions cumulées comme valeurs caractéristiques. Ainsi, le quantile DV_p⁶ (respectivement le DN_p⁷) est défini comme étant la valeur du diamètre pour lequel la proportion de p % du volume (respectivement de l'effectif) total est constituée par des gouttes de diamètres inférieurs ou égaux.

Ainsi, on définit les diamètres correspondant à la médiane, aux quartiles, et aux déciles :

- DV₅₀ (respectivement DN₅₀) est le diamètre médian volumique (resp. numérique) connu aussi sous le nom de « VMD⁸ » (resp. NMD⁹) ;
- DV₁₀ (resp. DN₁₀) représente le diamètre volumique correspondant à 10 % du volume, respectivement 90 % pour DV₉₀ et DN₉₀ ;
- DV₂₅ (resp. DN₂₅) ; DV₇₅ (resp. DN₇₅) pour 25 et 75 %.

L'écart entre la valeur médiane et les valeurs extrêmes de la série caractérise la dispersion de la distribution. On utilise généralement l'écart inter-quantile (DispV₁₀, Equation 3) qui est la différence entre le premier et le dernier quantile.

$$\text{Equation 3 : Span} = (DV_{90} - DV_{10}) / DV_{50} = \text{DispV}_{10}$$

Ce paramètre adimensionnel renseigne sur la dispersion de la distribution granulométrique des gouttes tant du point de vue numérique (DispN₁₀₋₉₀) que volumique (DispV₁₀₋₉₀). Toutefois, il ne permet pas d'appréhender la possible dissymétrie existante dans la distribution.

Dans l'objectif du présent projet, on cherche à établir le risque de dérive et de création d'aérosols induit par l'épandage d'EUT avec du matériel d'aspersion. Or, ce risque dépend principalement de la quantité de petites gouttes produites et de leur proportion dans le volume total apporté.

4.2.3 – Diamètres moyens

Les indicateurs globaux du diamètre d'une série de gouttes sont calculés sur la base de moyennes arithmétiques calculées à partir des effectifs, des surfaces ou des volumes des gouttes par classe de diamètre. Les diamètres spécifiques aux distributions de taille des gouttes des jets sont décrits par la formule de Mugele et Evans (Equation 4) qui est la forme généralisée du diamètre spécifique moyen D_{np}.

$$\text{Equation 4 : } D_{np} = \left(\frac{(D_{n0}^n)}{(D_{p0}^p)} \right)^{1/n-p} = \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^N n_i D_i^n \right)}{\left(\sum_{i=1}^N n_i D_i^p \right)} \right)^{1/n-p}$$

Pour cette étude, nous avons utilisé le D₃₂, ou diamètre moyen de Sauter. Cet indicateur, calculé sur les effectifs ou les volumes, est plus robuste que la médiane de la distribution des diamètres (DN₅₀) et des volumes (DV₅₀). Il tient mieux compte du poids des grosses gouttes et de l'effet des frottements de l'air (traînée) sur le mouvement des particules. Ce diamètre de Sauter représente la goutte dont le rapport du volume/surface est égal à celui du total des gouttes échantillonnées (Equation 5). Il est égal au rapport du diamètre volumique moyen par le diamètre surfacique moyen :

$$\text{Equation 5 : } D_{32} = \frac{\sum D_i^3}{\sum D_i^2}$$

⁶ DV : diamètre ajustés aux volumes

⁷ DN : diamètre ajustés aux effectifs

⁸ VMD : volumic mean diameter

⁹ NMD : numeric mean diameter

Il est cohérent avec la pénétration des gouttes dans l'air (qui détermine leur trajectoire), le transfert de chaleur et le transfert de masse (évaporation). Les travaux réalisés par Molle *et al.* (2007) montrent que le diamètre de Sauter varie en fonction du rayon dans les mêmes proportions pour un même modèle d'arroseur, quelle que soit la pression de fonctionnement. La connaissance de cette caractéristique qualitative de la distribution produite par l'asperseur croisée avec la distribution en volume, permet d'estimer les risques de dérive et d'évaporation.

4.3 – Estimation du risque de dérive et d'évaporation

A partir des données de simulation, deux points sont déterminants : la durée de vol des gouttes qui détermine leur temps d'exposition à l'évaporation, et la distance parcourue qui détermine la distance potentielle de dérive.

4.3.1 – Durée de vol

La durée du vol des particules est définie comme étant l'intervalle de temps qui s'est écoulé entre leur sortie de la buse et leur arrivée au sol, soit leur durée d'exposition aux facteurs climatiques (vent et évaporation). Comme les gouttes ne sont pas formées directement au sortir de la buse, leur temps réel d'exposition est surestimé, les valeurs de temps de vol calculées ici seront une surestimation de la valeur réelle. Afin de mettre en évidence l'influence du vent sur la durée de vol des différents diamètres de goutte, des simulations ont été réalisées avec et sans vent en partant des mêmes conditions initiales¹⁰ et pour une gamme de diamètres de gouttes allant jusqu'à 5 mm.

D'après Hendawi (2006), l'influence du vent est particulièrement visible pour les gouttes de moins de 0.2 mm de diamètres pour lesquelles la durée du vol est augmentée de 0.5 sec. Ces travaux reposent en partie sur des simulations du comportement des nuages de gouttes avec ou sans vent pour un asperseur à batteur : le RB 46 WH. Ce nuage de gouttes a la même vitesse initiale que le jet en sortie de buse, soit 20 m.s⁻¹, et a une trajectoire faisant un angle de 23° avec l'horizontale. Le vent, lorsqu'il est simulé, a une direction horizontale dans le sens du jet avec une vitesse de 4 m.s⁻¹. Une partie des résultats est présentée Figure 12. On constate que la durée de vol varie de 1.5 à 5 sec et que le vent a un effet mineur sur cette durée. Au-delà de 0.4 mm la différence va en s'amenuisant.

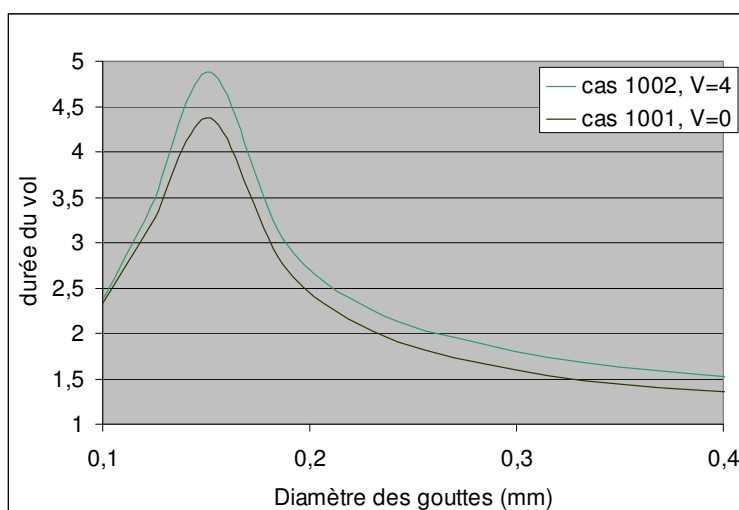


Figure 12 : effet du vent sur la durée de vol de gouttes d'une gamme de petites gouttes, émises avec une vitesse initiale de 20 m.s⁻¹, un angle de 23°, à une hauteur de 1 m par rapport au sol

¹⁰ Une vitesse de vent de 4 m.s⁻¹ est considérée comme la vitesse limite pour l'irrigation à l'aspersion.

4.3.2 – Trajectoire des gouttes et dérive

Contrairement à la durée du vol, la distance parcourue par un train de gouttes est très dépendante de la vitesse du vent et de la granulométrie.

Si le vent est dans la même direction que le jet, alors la composante horizontale du champ des vitesses est augmentée, sans modification de la composante verticale (gravité) ce qui se traduit par une augmentation de la distance parcourue (Hendawi, 2006, Figure 13). Les simulations ont été faites pour une grande variété de conditions : température de l'air (15 à 40°C) et de l'eau (15 à 30°C), d'humidité de l'air (10 à 100 %) et un rayonnement de 800 W/m² (soleil au zénith une journée d'été dans le sud de la France).

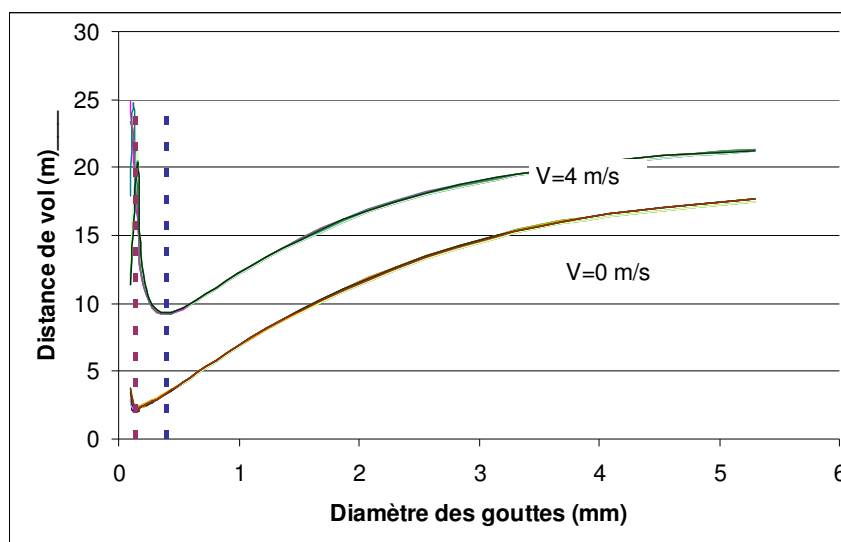


Figure 13 : distance de vol d'une gamme de diamètres de gouttes en situation ventée ou non, vitesse initiale 20 m.s⁻¹, angle 23°, hauteur 1 m

Pour les gouttes de diamètre supérieur à 0.4 mm, l'effet du vent se traduit par une translation de la distance parcourue d'environ 4 m. L'influence du vent s'avère la plus importante pour les gouttes de diamètre inférieur à 0.15 mm où la distance parcourue est augmentée de 23 m par rapport à la distance en absence de vent. Notons que la portée maximale sans vent du RB46 utilisé pour illustrer cette partie est de 17 m. Parmi cette catégorie de gouttes (< 0.2 mm), et dans ces conditions extrêmes, une partie est évaporée avant d'atteindre le sol.

D'après les travaux réalisés par Hendawi (2006), la trajectoire des gouttes de diamètre inférieur à 0,35 mm (matérialisé par la ligne pointillée de la Figure 13) est fortement influencée par le vent. Ainsi, l'estimation de la part en effectif et en volume de ces gouttes permettra de mieux appréhender le risque potentiel de dérive en conditions ventées. Ce risque doit être pondéré par d'autres critères tels que le débit, la hauteur d'émission et la hauteur maximale du jet, ainsi que par le type d'asperseur dont certains peuvent modifier l'impact du vent sur la trajectoire des gouttes.

Dans la présente étude, pour augmenter le niveau de précaution, nous estimerons par la suite que le diamètre limite des gouttes susceptibles de subir une dérive significative n'est pas de 0.35 mais de 0.4 mm. Nous chercherons à quantifier le volume représenté par cette catégorie de gouttes pour l'ensemble des données granulométriques des sept asperseurs retenus aux différentes pressions. Les simulations permettront de définir la portée limite et la durée de vol atteinte par ces gouttes en cas de vent.

4.3.3 – L'évaporation comme moyen d'estimation du risque de création d'aérosols

Le processus d'évaporation s'explique par plusieurs paramètres : la taille de la particule, la température de l'eau, le déficit de saturation de l'air, le vent et le rayonnement solaire. Parmi ces facteurs, deux sont particulièrement importants : la granulométrie et le vent. La température de l'eau n'influe significativement que lorsqu'elle dépasse 25 °C.

La Figure 14 montre les résultats de simulation d'évaporation des gouttes en fonction de leur diamètre et des conditions climatiques. Le rayonnement a été fixé à 800 W/m² (journée ensoleillée d'été dans le sud de la France). Les gouttes qui sont susceptibles de s'évaporer complètement, et d'être à l'origine d'éventuels aérosols, sont celles dont le diamètre est inférieur à 0.15 mm. Elles sont aussi susceptibles de dériver en dehors de la zone ciblée par l'arrosage. Le vent joue un rôle prépondérant dans le processus d'évaporation en augmentant le renouvellement de l'air ambiant autour des gouttes, par de l'air sec ou plus exactement moins saturé que la couche limite environnante.

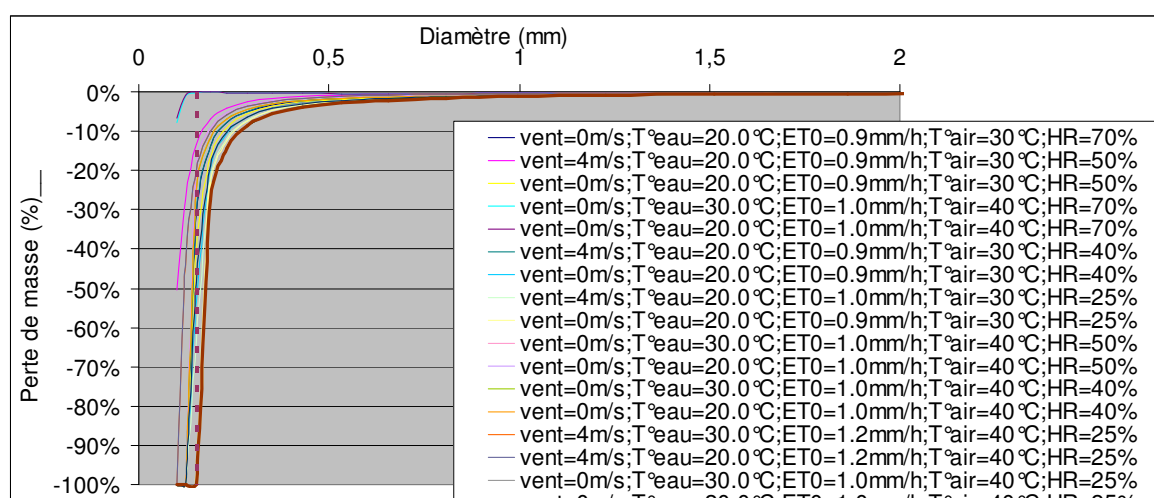


Figure 14 : variation de masse des gouttes émises par l'asperseur RB 46 en fonction des conditions climatiques

Ainsi l'estimation des volumes concernés par les risques d'évaporation, par conséquent de création d'aérosols, de dérive, et de contamination des environs pour l'asperseur RB46 fonctionnant à une hauteur de 1 m, pourra être faite au travers de deux paramètres :

- la proportion de gouttes de diamètre inférieur à 0.15 mm, ou $Y_{0,15}$, en référence à la distribution de Rosin-Ramler,
- la proportion des gouttes de diamètre inférieur à 0.40 mm ou $Y_{0,40}$ pour des diamètres en m.

Ces pertes et dérives ne seront effectivement enregistrées qu'en conditions de forte évaporation ou/et de fort vent.

Cependant, les caractéristiques de l'asperseur RB46 ne sont pas en tous points semblables à celles des autres asperseurs utilisés dans cette étude. En effet, les portées et hauteurs sont différentes; et les durées de vol des gouttes, et par conséquent leur exposition à l'évaporation ou à la dérive. Il se peut donc que les limites précédemment déterminées soient un peu différentes suivant les asperseurs. Autrement dit, pour des temps de vols supérieurs, la classe de gouttes susceptibles de s'évaporer totalement sera délimitée par une valeur plus grande ou plus petite du diamètre.

Dans l'analyse des résultats les termes de risque seront liés directement à l'estimation de ces familles de gouttes au sein du nuage et de leur distribution le long du jet. Ces estimations se feront à la fois en nombre et en volume.

5. Résultats

Dans ce chapitre, les résultats des mesures de pluviométries radiales et de granulométries seront présentés et analysés pour chacun des asperseurs étudiés. A partir de ces résultats, et du résultat des simulations de trajectoire et d'évaporation, une appréciation des risques de dérive et d'évaporation sera exposée pour chacun des asperseurs.

5.1 – Canon TWIN 101+ (photo en Annexe 1)

5.1.1 – Distribution de la pluviométrie radiale

La distribution du *TWIN 101+* est très homogène quelle que soit la pression avec une moyenne autour 12 mm/h (Figure 15 (a)). La portée varie de 40 à 50 m entre 3.5 et 5.5 bars. Au-delà de cette pression, la portée ne varie pratiquement pas et la part du volume appliqué aux abords de l'arroseur augmente, ce qui nuit à l'uniformité de distribution et accroît la sensibilité au vent. La distribution en volume (Figure 15 (b)) permet de pondérer les distributions de tailles de gouttes par le volume qu'elles représentent. En utilisant le rayon standard¹¹, on peut comparer les profils de distribution entre eux pour comprendre leur effet sur l'uniformité. La rotation du *TWIN 101+* est déterminée par le rythme et le réglage du batteur. Celui-ci n'a que peu d'impact sur la distribution volumique, puisqu'il n'intercepte le jet que pendant une durée de 3 à 4 % du temps total, ce qui est néanmoins observable sur la distribution pluviométrique (forte pluviométrie en début de course).

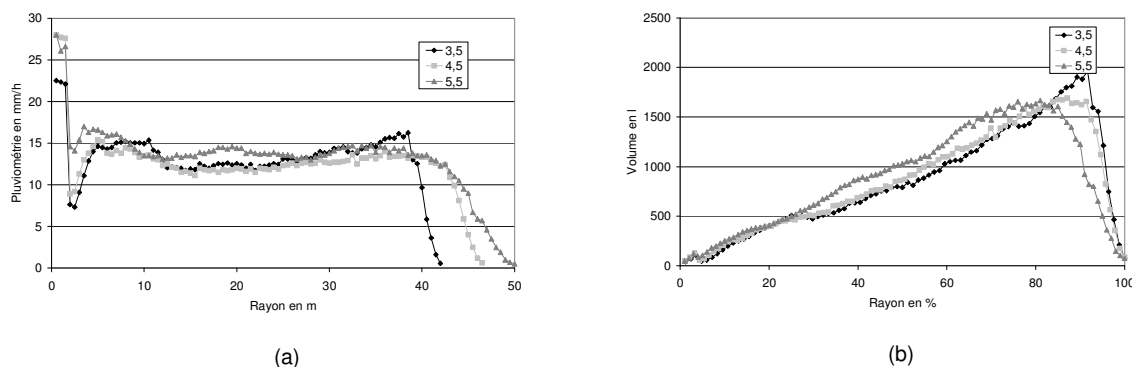


Figure 15 : représentation des apports pluviométrique et volumique pour le Twin 101+ aux différentes pressions testées (3.5, 4.5 et 5.5 bars)

5.1.2 – Caractéristiques de la distribution granulométrique

A 3,5 bars, on observe une évolution brusque de la distribution en effectif et en volume aux alentours de 50 % de la portée. Cette évolution concerne peu les faibles diamètres de particules (<0,9 mm). Aux autres pressions, l'évolution de la distribution vers des gouttes de plus forts diamètres est plus régulière le long de la portée (Figure 16).

Concernant les familles de gouttes identifiées comme sensibles (diamètres < 0.4 et < 0.15 mm), il n'y a pratiquement pas d'évolution au long de la portée. Quel que soit le rayon ou la pression appliquée, on trouve toujours les classes de diamètre en question. Il s'en suit que le risque de dérive et d'évaporation existe tout au long du jet. Toutefois, ce risque reste modéré du fait du faible volume que ces gouttes représentent. La taille des gouttes augmente avec la distance en proportion du rayon. Ainsi, les risques de déstructuration du sol dus à l'impact de grosses gouttes est d'autant plus fort que l'on s'éloigne de l'asperseur. Pour le *TWIN 101+*, les gouttes de plus de 5 mm de diamètre représentent respectivement 36, 47 et 28 % du volume pour une pression de 3,5, 4,5 et 5,5 bars à 90 % de la portée.

¹¹ Rayon standard = Rayon observe / Portée %

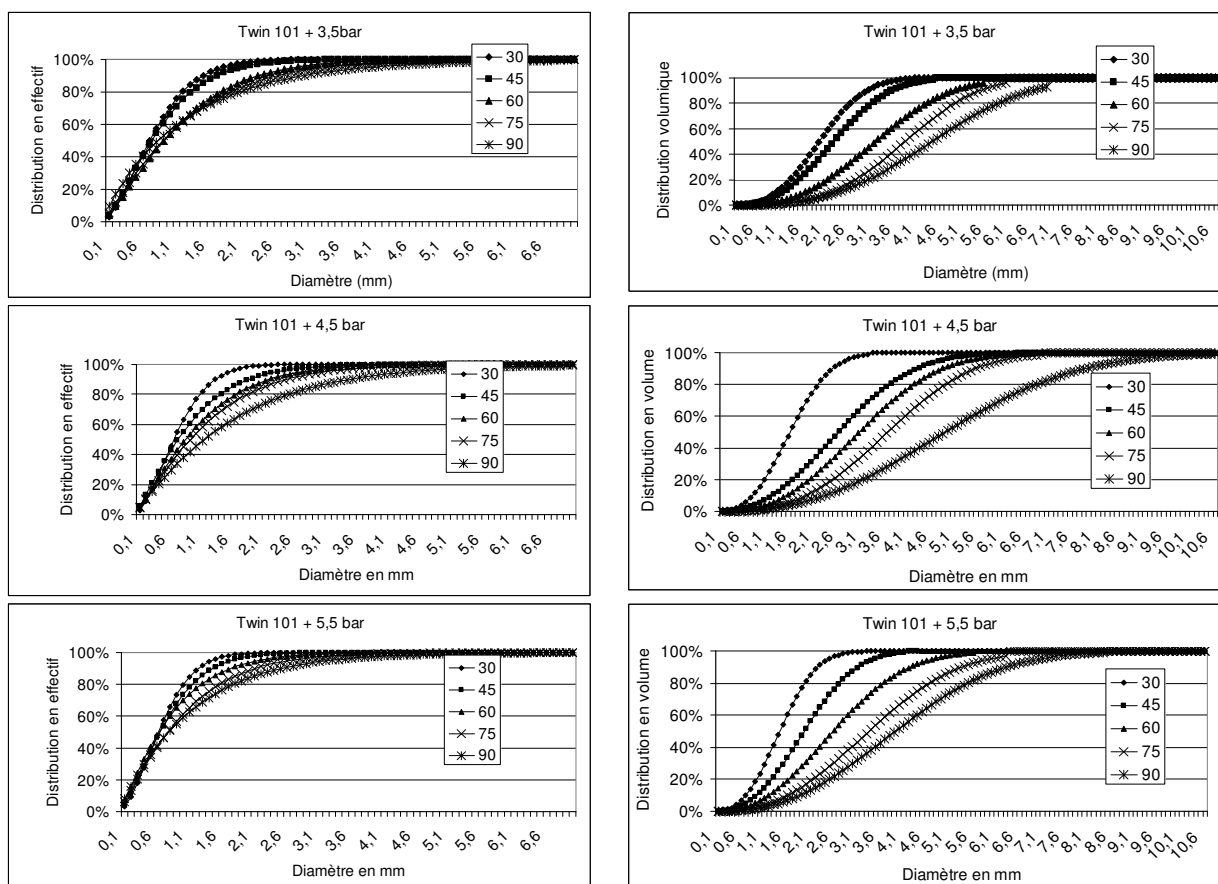


Figure 16 : distribution granulométrique en effectif et en volume des gouttes produites par le canon Twin 101+ le long de la portée à différentes pressions

5.1.3 – Indicateur de tendance de la distribution en effectif et en volume

Quels que soient la pression de fonctionnement et le rayon, le diamètre correspondant à 10 % de l'effectif, ND_{10} , reste constant avec une valeur moyenne de l'ordre de 0,2 mm (Figure 17). Autrement dit, 10 % des gouttes sont très sensibles à la dérive et à l'évaporation. Concernant la médiane de la distribution en effectif (ND_{50}), ce paramètre croît avec le rayon de 0,5 mm à 0,8 mm de diamètre (Figure 18). Autrement dit, la moitié des gouttes distribuées font moins de 1 mm de diamètre. Le diamètre correspondant à 10 % du volume, DV_{10} , croît proportionnellement au rayon quelle que soit la pression appliquée. Ce diamètre est compris entre 0,7 mm de diamètre en début de portée à 2 mm en fin de portée. Ainsi, les gouttes susceptibles de dériver et de s'évaporer représentent un volume très faible.

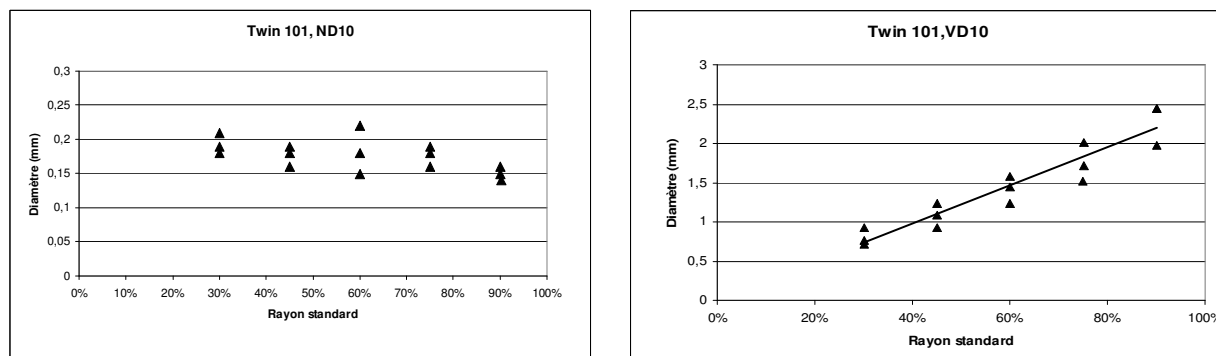


Figure 17 : représentation graphique de ND_{10} et VD_{10} pour le TWIN 101+ quelle que soit la pression

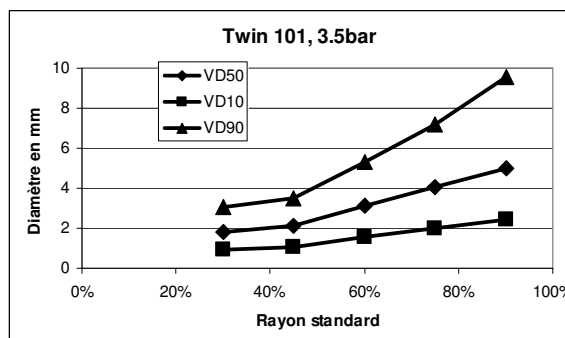
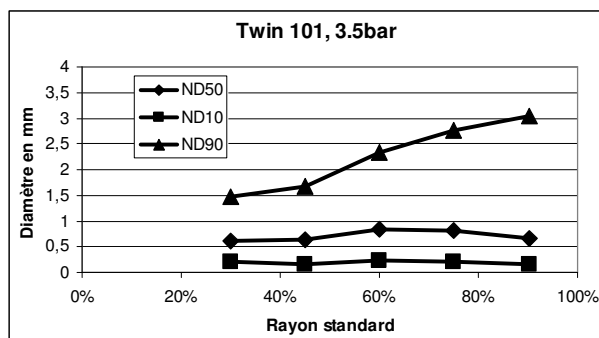


Figure 18 : représentation statistique (ND et VD) de la distribution granulométrique numérique et volumique du TWIN 101+ à 3,5 bars

La dispersion du nuage reste à peu près constante en volume (Figure 19).

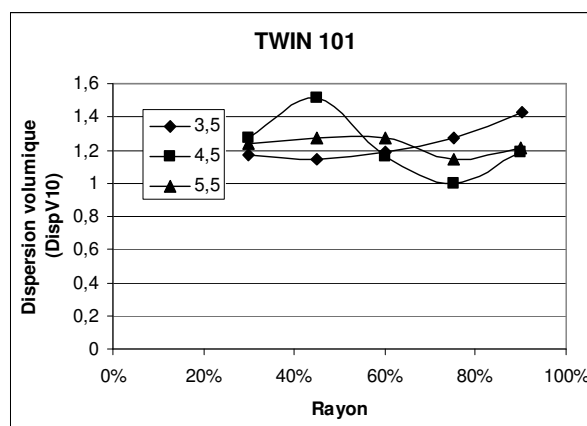
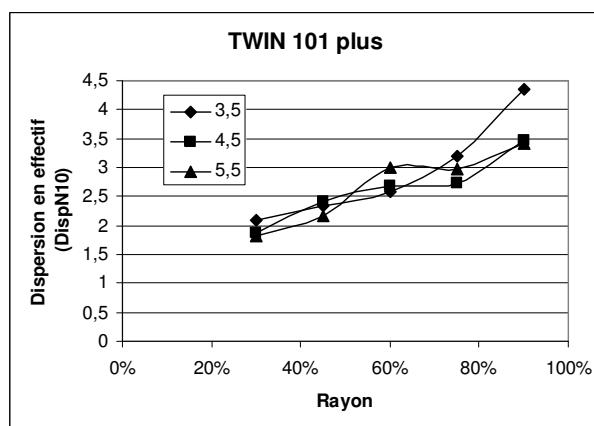


Figure 19 : dispersion en effectif et en volume de la distribution granulométrique du TWIN 101+

Comme nous pouvons le constater sur la Figure 20, le D_{32} est corrélé au rayon par une loi de fonction carré. Ce paramètre augmente le long de la portée traduisant une évolution du nuage vers des gouttes de diamètre plus important, et donc moins sensibles aux phénomènes d'évaporation et de dérive.

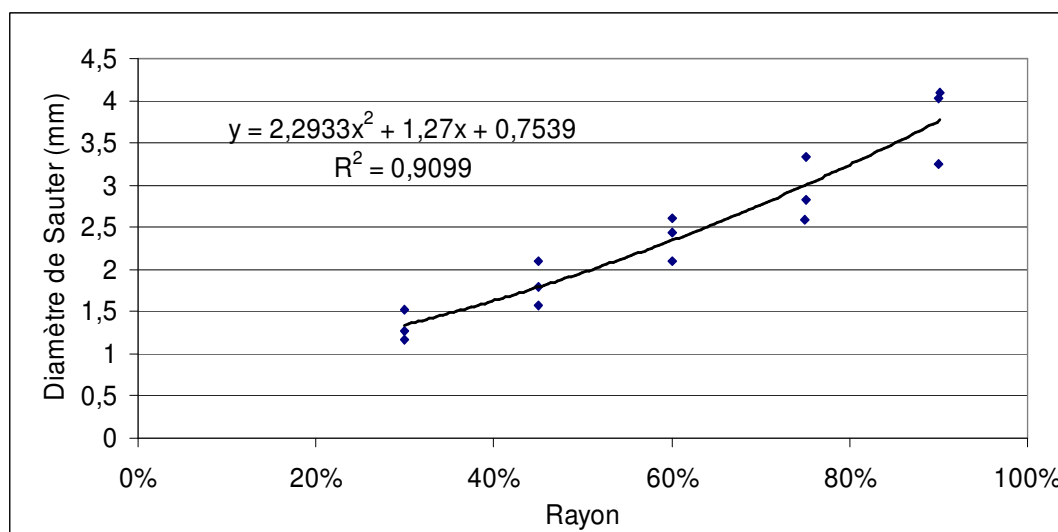


Figure 20 : évolution du diamètre de Sauter en fonction du rayon pour trois pressions différentes

5.1.4 – Estimation des risques de dérive et d'évaporation

Quelle que soit la pression appliquée, les risques de dérive et d'évaporation sont concentrés en début de jet et diminuent avec l'éloignement de l'asperseur (Tableau 6). Néanmoins, ces risques restent réduits et surtout représentés par de la dérive. Ils concernent au maximum 2 % du volume dispensé en début de jet contre et moins de 0,2 % pour le risque d'évaporation. La pression multiplie par deux la proportion des gouttes "à risque" tout en restant dans des volumes extrêmement faibles en regard du volume total apporté. Le volume total susceptible de s'évaporer est au maximum de 27 l, soit un dixième du volume total qui peut dériver (244 l). Ces volumes qui peuvent être perdus ou transportés sont estimés pour une durée de fonctionnement d'une heure.

Tableau 6 : estimation des potentiels de pertes par dérive et par évaporation (estimations obtenues en affectant aux volumes interpolés entre bornes inf et sup les distributions de tailles correspondantes. Le volume, ou la part, défini par les gouttes de diamètre inférieur à 400 µm ne comprend pas les gouttes sensibles à l'évaporation que l'on considère totalement évaporées)

3,5 bar

Portée max (m)	42					
% de la portée	30	45	60	75	90	
Rang	12,6	18,9	25,2	31,5	37,8	
Borne inf	0,0	15,8	22,1	28,4	34,7	
Borne sup	15,8	22,1	28,4	34,7	42,0	Total
volume (l)	5 204	4 613	6 316	8 881	10 287	35 300
dia < 0,15 mm	4,0	2,8	2,1	1,7	0,8	11,4
dia < 0,4 mm	43,1	28,3	19,2	15,3	8,3	114,2
% (dia < 0,15 mm)	0,08%	0,06%	0,03%	0,02%	0,01%	0,03%
% (dia < 0,40 mm)	0,83%	0,61%	0,30%	0,17%	0,08%	0,32%

4,5 bar

Portée max (m)	47					
% de la portée	30	45	60	75	90	
Rang	14,1	21,2	28,2	35,3	42,3	
Borne inf	0,0	17,6	24,7	31,7	38,8	
Borne sup	17,6	24,7	31,7	38,8	47,0	Total
volume (l)	6 217	5 538	7 902	10 955	10 400	41 012
dia < 0,15 mm	12,4	5,0	2,7	1,0	1,4	22,6
dia < 0,4 mm	115,7	39,0	25,8	12,0	12,5	205,0
% (dia < 0,15 mm)	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
% (dia < 0,40 mm)	1,9%	0,7%	0,3%	0,1%	0,1%	0,5%

5,5 bar

Portée max (m)	50,5					
% de la portée	30	45	60	75	90	
Rang	15,2	22,7	30,3	37,9	45,5	
Borne inf	0,0	18,9	26,5	34,1	41,7	
Borne sup	18,9	26,5	34,1	41,7	50,5	Total
volume (l)	7 345	7 597	9 725	11 940	7 593	44 200
dia < 0,15 mm	14,7	6,9	3,4	1,1	1,1	27,1
dia < 0,4 mm	136,7	53,5	31,7	13,1	9,1	244,2
% (dia < 0,15 mm)	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
% (dia < 0,40 mm)	1,9%	0,7%	0,3%	0,1%	0,1%	0,6%

Pertes totales

	3,5	4,5	5,5
Volume (diam < 0,15)	11,4	22,6	27,1
Volume (diam < 0,4)	114,2	205,0	244,2
Débit (l/h)	35 300	41 012	44 200
% (diam < 0,15)	0,03%	0,1%	0,1%
% (diam < 0,4)	0,32%	0,5%	0,6%

La majeure partie du volume susceptible de dériver ou de s'évaporer se trouve en début de jet. Cependant, cette partie du jet est moins exposée au vent puisqu'elle n'atteint pas l'apogée. L'impact du vent sur le trajet d'un nuage de gouttes est proportionnel à la durée de leur exposition. Pour le TWIN 101+, les nuages émis vers 70 % de la portée semblent répondre à ces caractéristiques, si l'on considère qu'ils ont été créés autour de 55 % de la portée.

CONCLUSION

Dans le cas du TWIN 101+, le volume susceptible de s'évaporer ou de dériver ne constitue qu'une part infime du volume atteignant le sol, inférieure à 1 % du volume total. Bien que minime, ce volume peut atteindre 27 l pour l'évaporation et 244 l pour la dérive pour une durée d'une heure d'arrosage. Toutefois, près de 70 % de ce volume étant émis en début de jet, ce qui induit un temps d'exposition à l'évaporation et à la dérive réduits, le risque calculé ici est maximisé. La distance maximum de dérive calculée pour ce type de distributeur avec un vent à 4 m.s^{-1} sera de l'ordre 13 m.

5.2 – Turbine EAGLE 750 S

5.2.1 – Distribution de la pluviométrie radiale

La forme des courbes de la Figure 21 montre une répartition peu homogène de la pluviométrie le long du jet pour l'EAGLE 750 S. La pression a peu d'effet sur la forme de distribution entre 4,5 et 5,5 bars, seule la portée varie un peu. On observe une nette variation pour la courbe à 6,5 bars, bien que la portée reste équivalente à celle observée à 5.5 bars. L'observation de la Figure 21 montre une zone de sur-irrigation sur les 20 % de la portée proches de l'arroseur, et une zone moins irriguée ensuite vers 50 %.

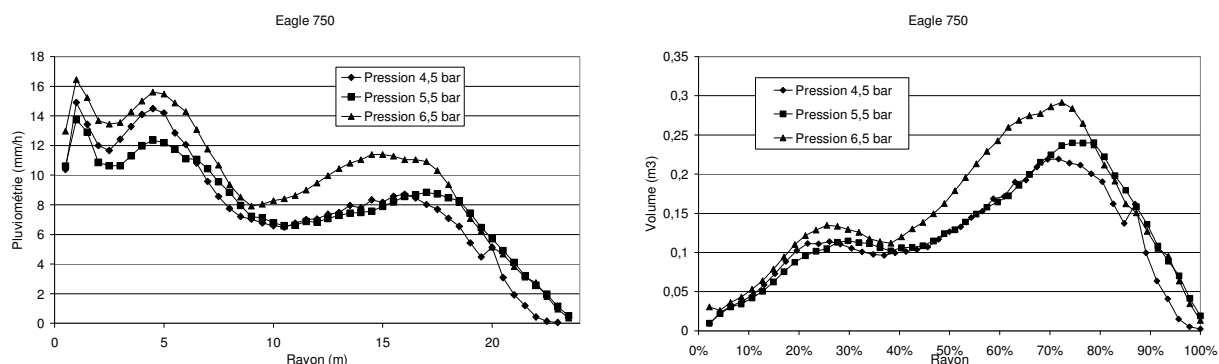


Figure 21 : représentations pluviométrique et volumique de la distribution de l'Eagle 750 S le long de la portée

Figure 22, on a ajouté à la distribution en volume une courbe moyenne calculée à partir de la distribution pluviométrique observée entre 10 et 90 % de la portée. Cette représentation traduit en volume les enjeux de l'uniformité de distribution, ce qui correspond à une représentation graphique des zones à partir desquelles l'uniformité se dégrade. On note que la distribution à 6.5 bars donne la meilleure uniformité comparée à 4.5 bars. Cette représentation montre bien le besoin de soin à apporter au calcul du recouvrement entre asperseurs voisins.

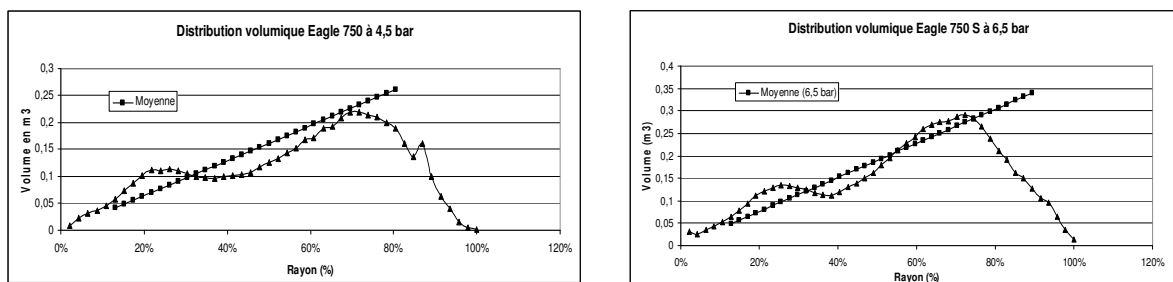


Figure 22 : représentation des distributions volumiques observée et moyenne pour l'Eagle 750 S à 4,5 bars et à 6,5 bars

5.2.2 – Caractéristiques de la distribution granulométrique

Quelle que soit la pression appliquée, nous observons (Figure 23) un fort décalage dans la distribution granulométrique du jet à partir de 70 % de la portée par rapport aux distributions plus proches de l'asperseur. Les autres nuages de gouttes restent sensiblement similaires pour les autres rayons, quelle que soit la pression. Ils sont composés en majeure partie de gouttes de petites tailles.

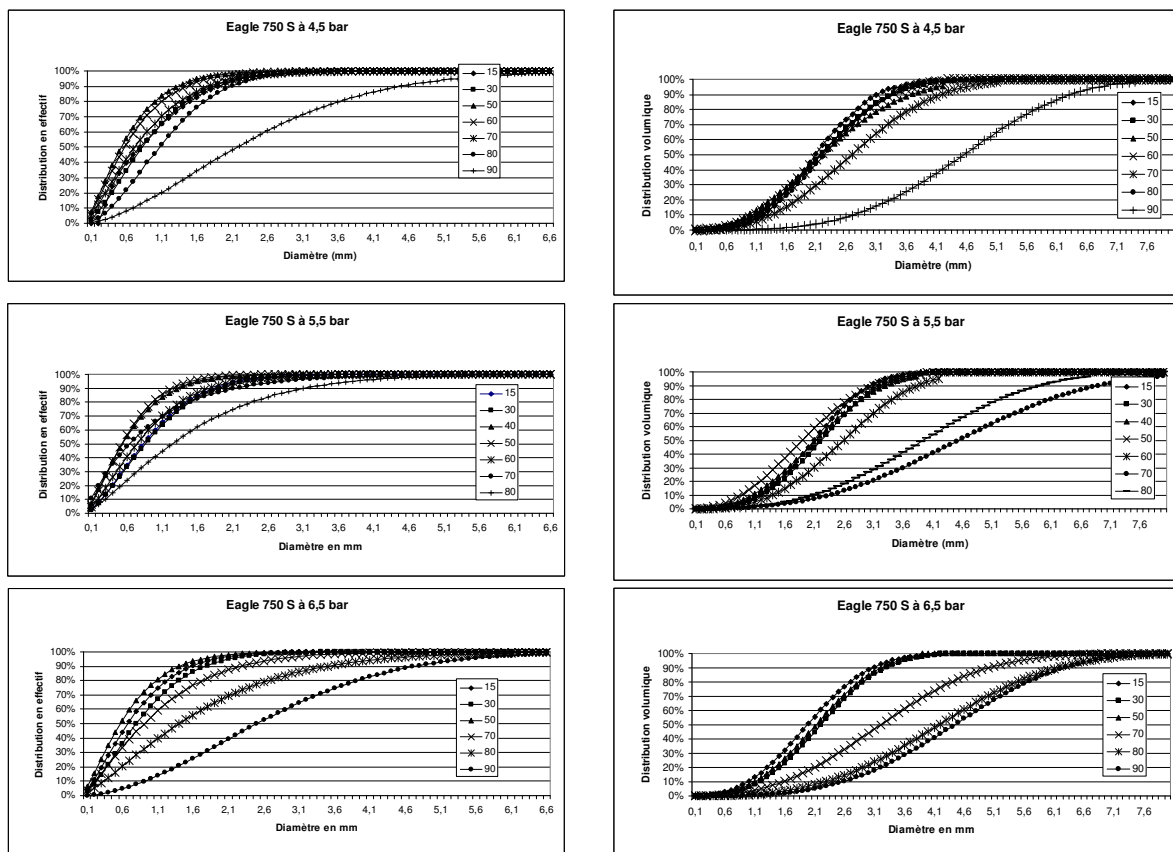


Figure 23 : représentation de la distribution granulométrique en effectif et en volume de l'Eagle 750 S

Concernant les gouttes à "risque", leur proportion en volume reste très faible et diminue avec le rayon. L'augmentation du diamètre des gouttes du nuage en bout de jet suit celle de la pression. Toutefois, les gouttes de diamètre inférieur à 0,4 mm représentent une part importante de l'effectif du nuage jusqu'à 50 % de la portée.

Nous notons que les gouttes susceptibles d'engendrer une dégradation de la surface du sol, celle ayant un diamètre supérieur à 3 mm, sont peu nombreuses mais représentent près de 80 % du volume distribué en bout de portée.

5.2.3 – Indicateur de tendance de distribution

Quelle que soit la pression appliquée, le ND10 et le ND50 (Figure 24) évoluent de la même manière sauf en extrémité de jet où le diamètre médian croît brusquement. Hormis cette particularité, ces deux paramètres sont relativement stables tout au long du jet aux différentes pressions. Les gouttes de diamètre inférieur à 0,15 mm représentent moins de 10 % de l'effectif total des gouttes le long du jet pour l'ensemble des pressions. Ainsi, le risque d'évaporation reste faible mais il est réparti tout au long du jet.

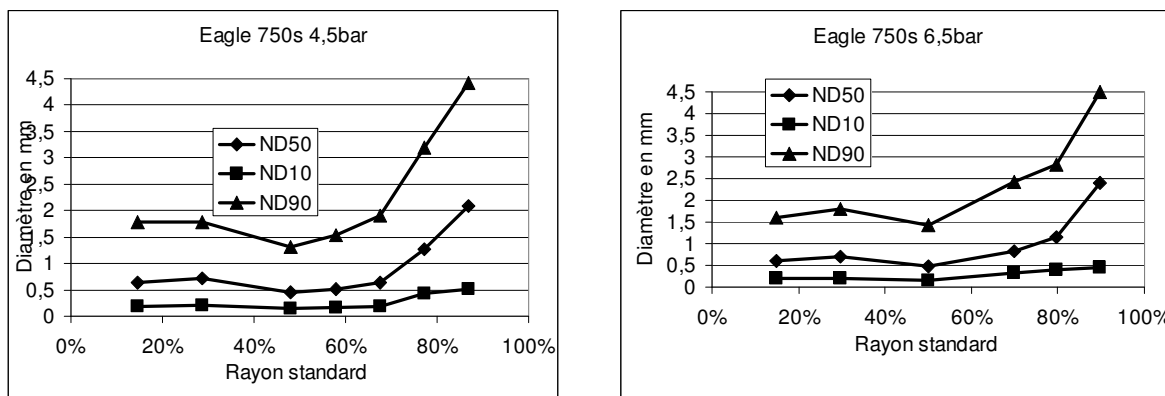


Figure 24 : évolution statistique du diamètre numérique (DN10, DN50 et DN90)

Les diamètres ajustés aux volumes VD10 et VD50 (Figure 25) suivent la même tendance quelle que soit la pression, comme observé sur les effectifs. En dessous de 70 % de la portée, ils restent stables et toujours supérieur à 1 mm pour VD10 et 2 mm pour VD50, ce qui signifie que les gouttes de diamètre inférieur représentent respectivement moins de 10 % et de 50 % du volume total. Les gouttes susceptibles de s'évaporer ou de dériver représentent donc un très faible volume cumulé pour cet arroseur.

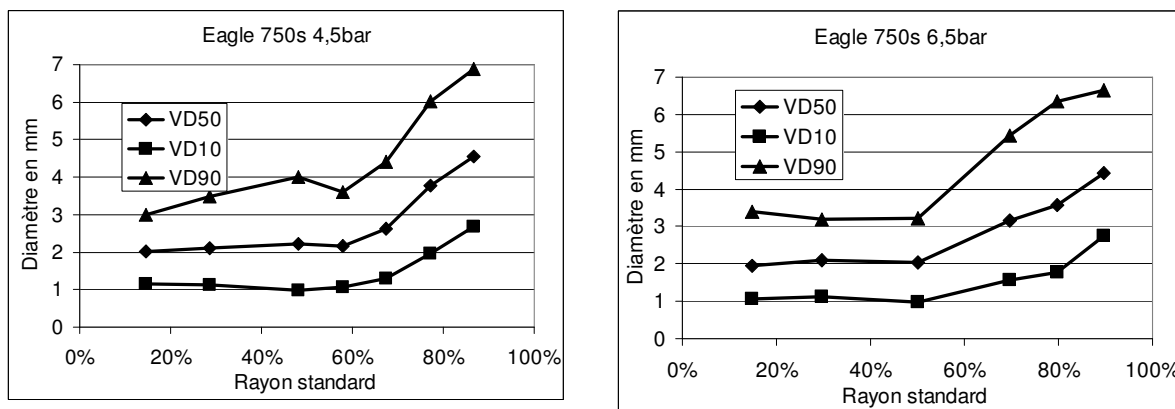


Figure 25 : évolution statistique du diamètre volumique pour l'Eagle 750 S

A partir de la Figure 26, on note que ND10 et VD10 suivent une même tendance quelle que soit la pression. On observe une baisse des deux paramètres jusqu'à 50 % de la portée, qui correspond à la zone "en creux" de la courbe pluviométrique. Cette différence est probablement due à la superposition des distributions des deux types de buse de cet arroseur, une pour arroser la première moitié (angle 7°, ailette brise jet), l'autre la deuxième (angle 25°, buse plus longue).

Nous notons que ces observations (décroissance puis croissance, tendance identiques quelles que soient les pressions) se vérifient pour les autres paramètres VD50 et VD90.

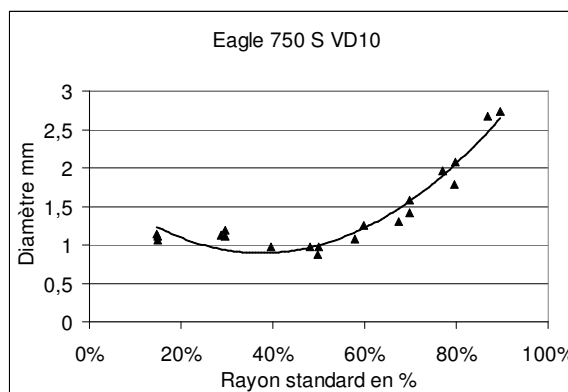
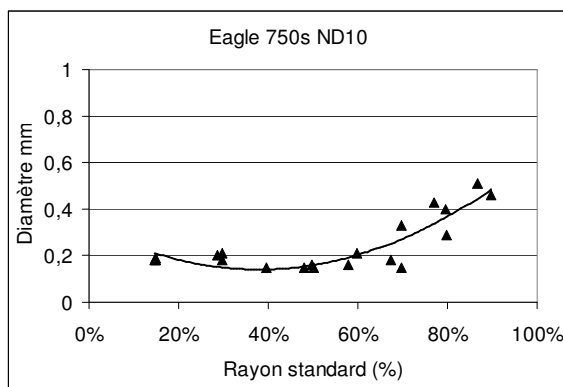


Figure 26 : évolution du ND10 et du VD10 le long de la portée du jet

La dispersion des distributions en effectif comme en volume (Figure 27) est considérée comme stable sur l'ensemble de la portée.

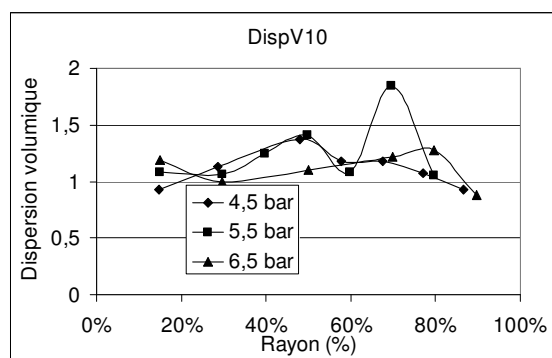
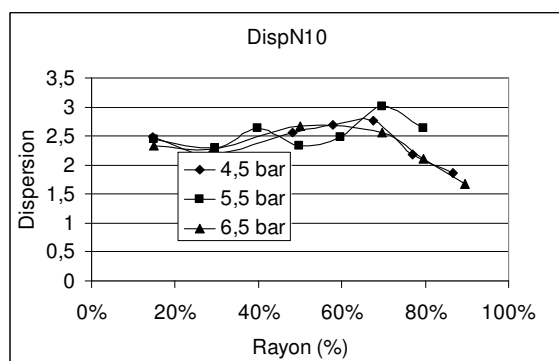


Figure 27 : dispersion en effectif et en volume de la distribution

L'analyse du diamètre de Sauter (Figure 28) confirme la relation polynomiale d'ordre 2 liant le D_{32} et la portée standard.

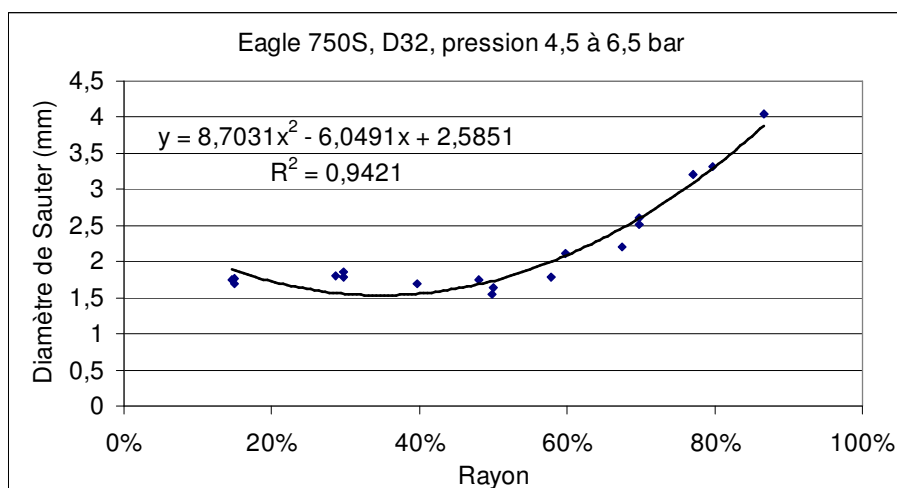


Figure 28 : relation entre le D_{32} et le rayon

Ainsi, quelque soit la pression, et pour la buse utilisée, la distribution granulométrique de la turbine Eagle 750 S peut se caractériser par l'équation du diamètre de Sauter :

Equation 7 $D_{32} = 8,7031 \times \%R^2 - 6,0491 \times \%R + 2,5851$ ($R^2 = 0,94$)

Pour les autres diamètres de buses, on peut supposer que la distribution granulométrique des gouttes reste la même en tendance, conformément à ce qui a été trouvé dans des études précédentes (Molle, 2002). Cette observation est valable qualitativement. Du point de vue quantitatif, les volumes effectivement distribués aux différentes pressions sous forme de populations de différents diamètres varient.

5.2.4 – Estimation des risques de dérive et d'évaporation

Pour les trois pressions les risques d'évaporation et de dérive sont concentrés aux alentours de 50 % de la portée (Tableau 7). Il s'agit de gouttes qui sont émises plus tôt par le jet. En termes de volume de gouttes potentiellement évaporées, ils sont très faibles à la fois en valeur absolue et en valeur relative. Pour ce qui concerne la dérive les volumes concernés sont inférieurs à 0.5 % du volume apporté, soit moins de 30 l/h.

Tableau 7 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour l'EAGLE 750 S

4,5 bar

Portée max	22,2							
% portée	15	30	50	60	70	80	90	
Rayon	3,33	6,66	11,10	13,32	15,54	17,76	19,98	
Borne inf	0,00	5,00	8,88	12,21	14,43	16,65	18,87	
borne sup	5,00	8,88	12,21	14,43	16,65	18,87	22,20	Total
Volume total (m3)	0,517	0,803	0,749	0,709	0,887	0,884	0,637	5,186
volume (dia<0,15)	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
volume (dia<0,40)	0,001	0,005	0,009	0,004	0,003	0,003	0,000	0,025
% (dia<0,15)	0,00%	0,06%	0,16%	0,06%	0,03%	0,03%	0,00%	0,05%
% (dia<0,40)	0,19%	0,60%	1,18%	0,61%	0,34%	0,39%	0,01%	0,49%

5,5 bar

Portée max	23,5							
% portée	15	30	40	50	60	70	80	
Rayon	3,53	7,05	9,40	11,75	14,10	16,45	18,80	
Borne inf	0,00	5,29	8,23	10,58	12,93	15,28	17,63	
borne sup	5,29	8,23	10,58	12,93	15,28	17,63	23,50	Total
Volume (m3)	0,518	0,648	0,497	0,613	0,755	1,058	1,757	5,85
volume (dia<0,15)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,00
volume (dia<0,40)	0,002	0,002	0,003	0,009	0,002	0,001	0,001	0,02
% (dia<0,15)	0,02%	0,02%	0,07%	0,18%	0,02%	0,01%	0,01%	0,03%
% (dia<0,40)	0,33%	0,29%	0,69%	1,41%	0,21%	0,06%	0,07%	0,33%

6,5 bar

Portée max	23,5						
% portée	15	30	50	70	80	90	
Rayon	3,53	7,05	11,75	16,45	18,80	21,15	
Borne inf	0,00	5,29	9,40	14,10	17,63	19,98	
borne sup	5,29	9,40	14,10	17,63	19,98	23,50	Total
Volume (m3)	0,669	1,018	1,651	1,947	1,053	0,671	7,01
volume (dia<0,15)	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,00
volume (dia<0,40)	0,005	0,004	0,008	0,005	0,000	0,000	0,02
% (dia<0,15)	0,08%	0,03%	0,04%	0,02%	0,00%	0,00%	0,03%
% (dia<0,40)	0,80%	0,36%	0,50%	0,24%	0,04%	0,02%	0,32%

Pertes totales

	4,5	5,5	6,5
Volume ($\sigma < 0,15$) en m3	0,00	0,00	0,00
Volume ($\sigma < 0,4$) en m3	0,03	0,02	0,02
Débit total (m3/h)	5,19	5,85	7,01
% ($\sigma < 0,15$)	0,05%	0,03%	0,03%
% ($\sigma < 0,40$)	0,49%	0,33%	0,32%

Les simulations de dérive montrent que les gouttes qui dérivent le plus loin sont celles émises entre 40 et 60 % de la portée. La distance maximum de cette dérive est de 7 m pour un vent de 4 m.s⁻¹ dans la direction du jet.

CONCLUSION

La turbine EAGLE 750 S est utilisée dans l'arrosage des espaces verts, terrains de sports, les golfs, etc. Dans ce contexte, la prise en compte du risque est très importante afin d'éviter, ou au moins réduire au maximum, la possibilité de contact des eaux usées traitées avec les personnes proches de ces espaces publics.

En examinant les données pluviométriques et granulométriques de cette turbine, il s'avère que le risque d'évaporation représente au maximum 3 l/h. et que le risque de dérive, quant à lui, représente près de 30 l/h pour un débit de l'ordre de 6 m³/h.

La distance maximum de dérive calculée pour ce type de distributeur avec un vent à 4 m.s⁻¹ sera de l'ordre 8 m.

5.3 – Turbine 5000 plus

5.3.1 – Représentations pluviométrique et volumétrique de l'apport d'eau

Comme nous pouvons l'observer sur la Figure 29, cette turbine donne une distribution uniformité à 3 et 4 bars, en dessous on observe un fort déséquilibre entre le début et la fin de la portée et la partie médiane.

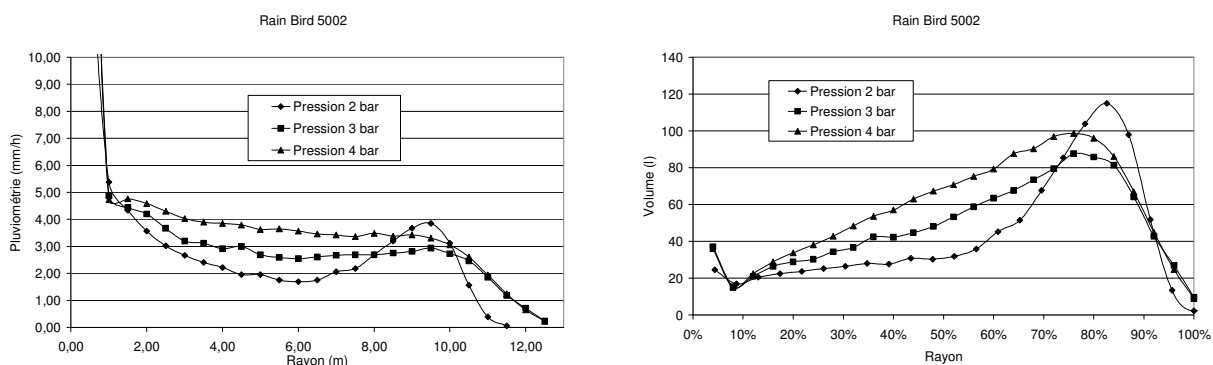


Figure 29 : représentation des apports en termes de pluviométrie et de volume le long du jet de la turbine 5000 plus

La distribution en volume met bien ces points en évidence, et montre que le pic d'apport pluviométrique en début de portée est sans effet en termes de volume. La portée reste constante entre 3 et 4 bars, avec cet arroseur et cette buse, il n'est donc pas utile d'avoir des pressions supérieures à 3.5 bars avec cet arroseur.

5.3.2 – Caractéristique de la distribution granulométrique

Quelle que soit la pression, on observe Figure 30 les mêmes tendances d'évolution de la distribution granulométrique en effectif et en volume.

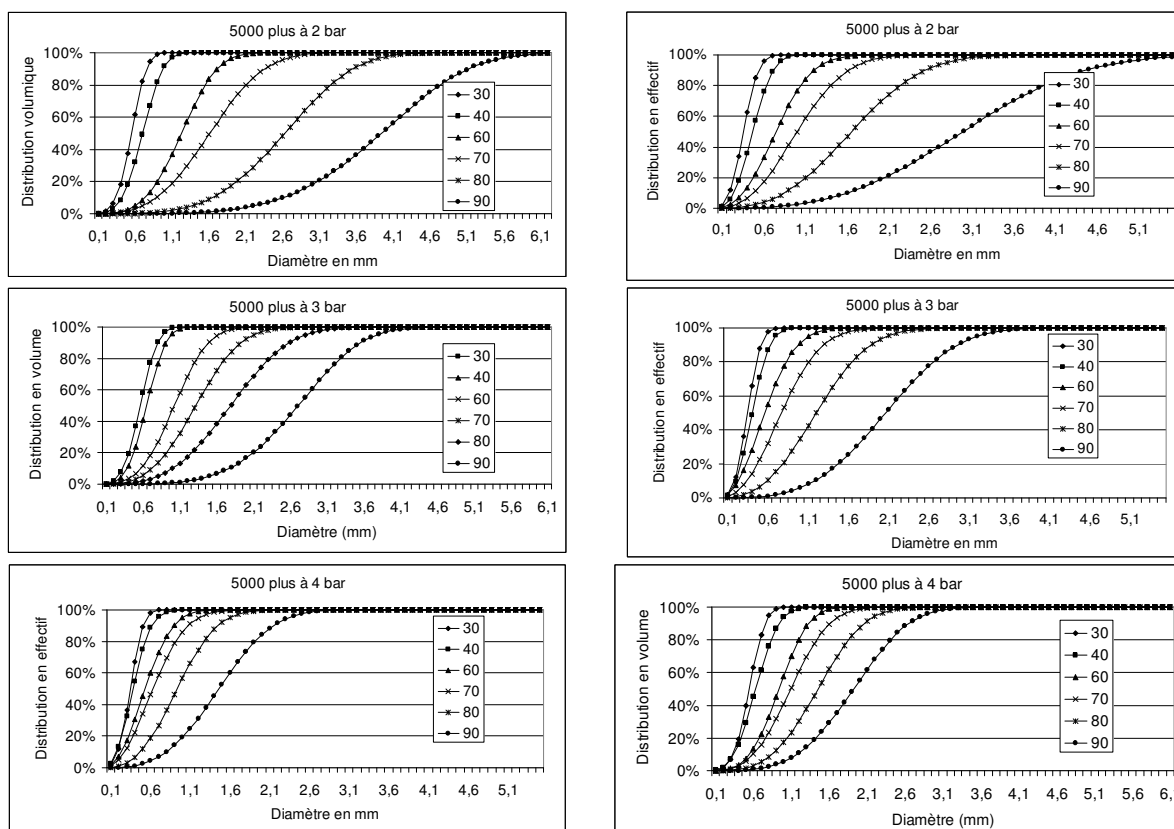


Figure 30 : représentation en effectif et en volume de la distribution granulométrique de la turbine 5000 plus

A 30 et 40 % de la portée, la distribution du nuage est relativement stable à toutes les pressions. Au-delà les diamètres caractéristiques augmentent d'autant plus que la pression est diminuée, il s'agit d'une illustration claire de l'effet des frottements entre l'air et le jet sur l'atomisation, cet effet est d'autant plus important que la vitesse relative du jet par rapport à l'air est grande. Cet effet est moins net sur les arroseurs précédents dont les jets sont de nature différente (recherche d'une plus grande compacité) pour atteindre des portées plus élevées. La remarque précédente sur la pression de fonctionnement optimale vers 3.5 bars vaut aussi à l'observation des tailles de gouttes.

Concernant les gouttes de diamètre inférieur à 0,15 mm leur représentativité est très faible tant en effectif qu'en volume tout au long du jet. Par contre, les gouttes de diamètre compris entre 0,15 et 0,4 mm sont présentes en quantité plus importante, et ce surtout en début de jet. La proportion de cette famille de gouttes décroît rapidement avec l'augmentation du rayon. Par conséquent, la part de gouttes susceptibles de dériver se situe préférentiellement en début de portée. Or, à ce niveau, l'influence du vent est réduite, d'autant plus que l'apogée est relativement faible sur cet arroseur.

5.3.3 – Indicateur de tendance de distribution

Quelle que soit la pression, les paramètres statistiques des diamètres (Figure 31) évoluent suivant les mêmes tendances. Ils augmentent progressivement jusqu'à 70 % de la portée. Puis, on observe une rupture de pente avec une augmentation plus ou moins forte selon qu'on est à basse ou à haute pression.

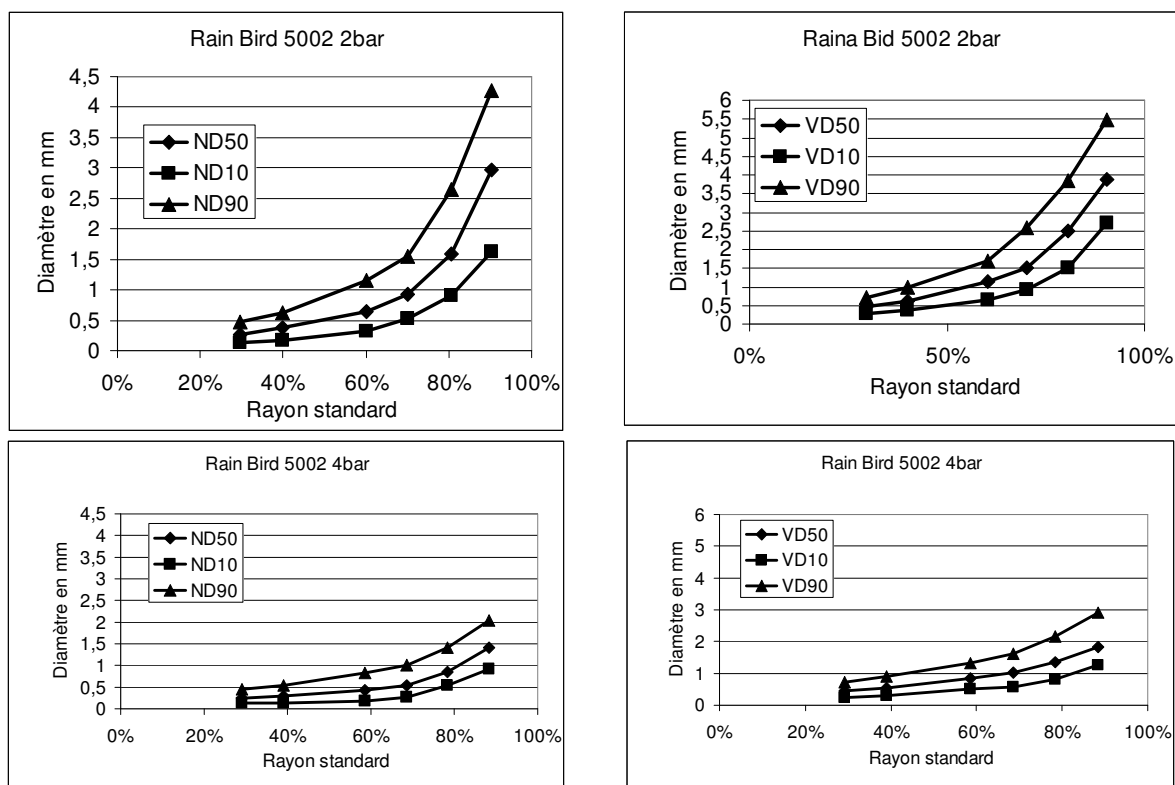


Figure 31 : évolution statistique du diamètre numérique (ND) et du diamètre volumique (VD) pour une pression de 2 bars et 4 bars

On observe la forte représentativité des gouttes de diamètre compris entre 0,15 et 0,4 mm jusqu'à 50 à 60 % de la portée. Avec l'augmentation de la pression, la taille des gouttes se réduit. Par exemple, à 2 bars, les gouttes de 2 mm de diamètre représentent moins de 10 % du volume à 90 % de la portée alors qu'à 4 bars cette même famille au même rayon représente plus de 50 % de volume. Ainsi, à 90 % de la portée, le diamètre médian volumique est de 4 mm à 2 bars, et de 1,8 mm à 4 bars.

S'agissant de l'étendu des spectres de distribution de gouttes mesurés, la Figure32 montre une relative homogénéité des distributions entre 10 et 90 % du volume. On note un rétrécissement du spectre de distribution en effectif en bout de portée qui se traduit à peine en volume.

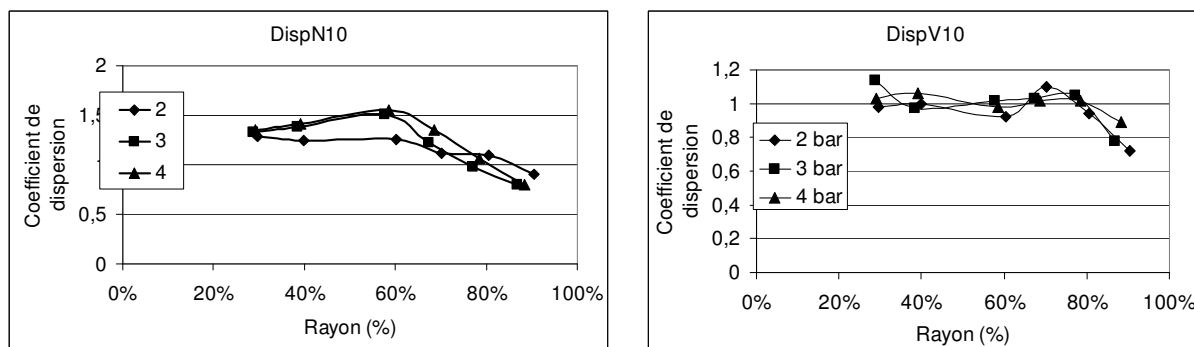


Figure 32 : représentation de la dispersion numérique et volumique aux différentes pressions

Le diamètre de Sauter traduit la sensibilité à la dérive et à l'évaporation du nuage de gouttes. Dans le cas de la turbine 5000 plus, le diamètre de Sauter est de l'ordre de 0,5 mm, et ce jusqu'à 50 % de la portée, ce qui traduit une proportion importante de gouttes de faible diamètre pouvant s'évaporer et dériver (Figure 33).

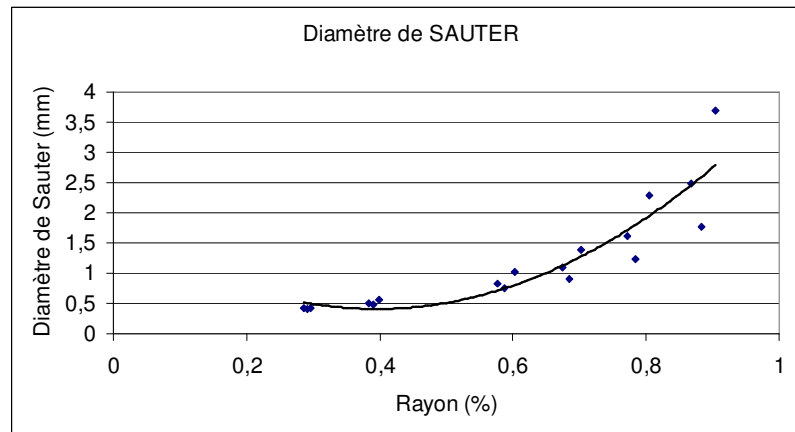


Figure 33 : représentation du D32 pour la turbine 5000 plus

5.3.4 – Estimation des risques de dérive et d'évaporation

Quelle que soit la pression de fonctionnement, l'évolution des familles de gouttes à « risques » est la même en tendance en fonction de la portée (Tableau 8). Ces gouttes sont produites en début de portée, leur proportion croît avec la pression.

Tableau 8 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour la turbine 5000 plus (voir indications du Tab. 6)

2 bar

Portée max	11,5						
% portée	30	40	60	70	80	90	
Rayon	3,45	4,60	6,90	8,05	9,20	10,35	
Borne inf	0	4,025	5,75	7,475	8,625	9,775	
Borne sup	4,025	5,75	7,475	8,625	9,775	11,5	Total
Volume (l)	86,76	51,32	69,32	76,56	122,17	82,67	488,81
Volume (dia<0,15)	0,64	0,19	0,03	0,04	0,00	0,00	0,91
Volume (dia<0,40)	15,10	4,14	0,77	0,60	0,04	0,00	20,65
% (dia<0,15)	0,7%	0,4%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,2%
% (dia<0,40)	17,4%	8,1%	1,1%	0,8%	0,0%	0,0%	4,2%

3 bar

Portée max	12,5						
% portée	30	40	60	70	80	90	
Rayon	3,75	5,00	7,50	8,75	10,00	11,25	
Borne inf	0	4,375	6,25	8,125	9,375	10,625	
Borne sup	4,375	6,25	8,125	9,375	10,625	12,5	Total
Volume (l/h)	120,10	83,39	113,05	95,90	106,26	81,82	600,52
Volume (dia<0,15)	1,29	0,46	0,22	0,10	0,03	0,00	2,11
Volume (dia<0,40)	21,99	9,18	3,49	1,46	0,53	0,01	36,67
% (dia<0,15)	1,08%	0,55%	0,20%	0,10%	0,03%	0,00%	0,35%
% (dia<0,40)	18,31%	11,00%	3,09%	1,52%	0,50%	0,01%	6,11%

4 bar

Portée max	12,5						
% portée	30	40	60	70	80	90	
Rayon	3,75	5,00	7,50	8,75	10,00	11,25	
Borne inf	0	4,375	6,25	8,125	9,375	10,625	
Borne sup	4,375	6,25	8,125	9,375	10,625	12,5	Total
Volume (l/h)	139,28	113,73	145,50	116,85	117,25	83,37	715,98
Volume (dia<0,15)	1,19	1,37	0,26	0,23	0,05	0,01	3,10
Volume (dia<0,40)	26,02	16,98	4,87	3,29	0,90	0,15	52,22
% (dia<0,15)	0,85%	1,21%	0,18%	0,20%	0,04%	0,01%	0,43%
% (dia<0,40)	18,69%	14,93%	3,35%	2,81%	0,77%	0,18%	7,29%

Pertes totales

	2	3	4
Volume ($\sigma < 0,15$) en l	0,91	2,11	3,10
Volume ($\sigma < 0,40$) en l	20,65	36,67	52,22
Débit total (l/h)	488,81	600,52	715,98
% < 0,15	0,19%	0,35%	0,43%
% < 0,40	4,23%	6,11%	7,29%

Les risques de dérive et d'évaporation sont donc concentrés en début de portée et diminuent avec le rayon pour être pratiquement inexistant à partir de 80 % de la portée. Avec l'augmentation de la pression, le jet est plus dispersé ce qui se traduit par la formation de nuage avec de plus petites gouttes. L'augmentation de la pression augmente la représentativité des populations à « risque ». Les gouttes susceptibles de s'évaporer représentent toujours moins de 0.5 % du volume, et celles susceptibles de dériver sont en proportion plus élevées que dans les autres cas, tout en restant en dessous de 7.5 % du volume pour la pression la plus élevée.

Si on analyse l'évolution du diamètre de Sauter D32 (Figure 34), comme dans les cas précédents on distingue une tendance claire à la croissance en fonction de la portée relative. On a essayé de mettre ce paramètre en regard de la proportion en volume des gouttes de moins de 0.4 mm de diamètre. Les gouttes de diamètre inférieur à 0,4 mm évoluent en proportion inverse du diamètre de Sauter, sans toutefois pouvoir dégager de relation numérique claire.

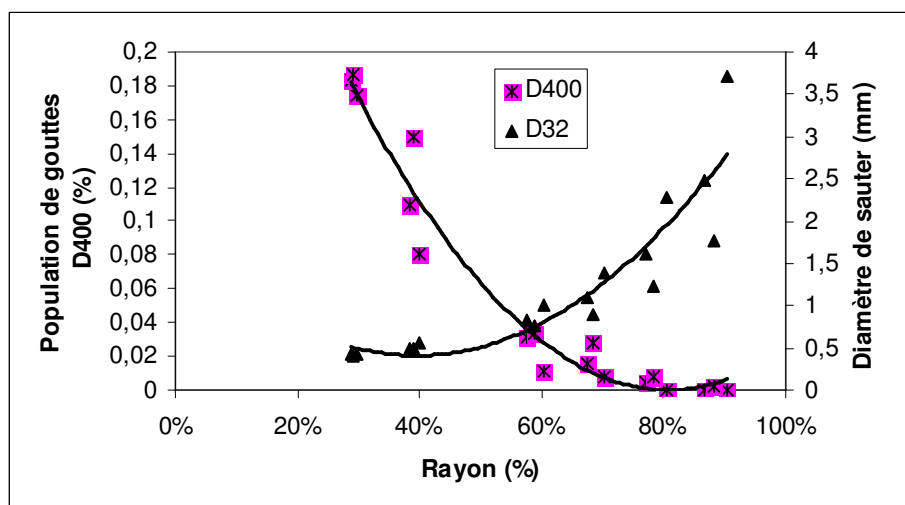


Figure 34 : comparaison de l'évolution du diamètre de Sauter et de la population de gouttes de diamètre inférieur à 0,4 mm le long du jet

CONCLUSION

La turbine 5000 de Rain Bird est utilisée, tout comme l'Eagle 750 S, pour l'arrosage des espaces verts. Les données de granulométrie couplées à celles de pluviométries permettent d'estimer le volume susceptible de dériver et de s'évaporer le long du jet. Pour une pression de 4 bars, le volume totale susceptible de dériver est de 52 l/h (7.3 % du volume total), respectivement de 3 l/h (0.4 % du volume total) pour l'évaporation à 2 bars ces chiffres tombent respectivement à 37 et 2 l/h (6.1 % et 0.3 % du volume total).

Pour cette turbine, le risque provient essentiellement du risque de dérive, c'est à dire des gouttes de diamètre compris entre 0 et 0,4 mm. Les gouttes sensibles à la dérive sont, surtout, présentes en début de jet. Ainsi, près de 80 % du volume des gouttes soumises à la dérive sont rencontrés entre 0 et 40% de la portée. Il s'agit de gouttes issues du jet bien avant son apogée, donc dans des couches d'air soumises à des vitesses du vent plus faibles que l'ensemble de la masse d'air. La simulation nous indique que les gouttes issues de l'apogée sont celles que l'on trouve au-delà de 70 % de la portée. A ce niveau, le volume des gouttes de moins de 400 µm représente moins de 5 l/h à 4 bars, soit moins de 1 % du volume total.

La distance maximum de dérive calculée pour ce type de distributeur avec un vent à 4 m.s⁻¹ sera de l'ordre 5 m.

5.4 – Asperseur Rain Bird 46 WH

5.4.1 – Représentations pluviométrique et volumétrique de l'apport d'eau

La Figure 35 (a) représente une courbe pluviométrique typique d'un asperseur à batteur avec un pic au voisinage de l'asperseur puis une courbe en pente continue. Ces asperseurs sont faits pour fonctionner en quadrillage pour obtenir un minimum de recouvrement entre distributions d'asperseurs voisins.

La distribution en volume (Figure 35 (b)) montre de fortes hétérogénéités confirmées par les représentations de la Figure 36, avec matérialisation de la courbe moyenne cumulée entre 10 et 90 % du volume.

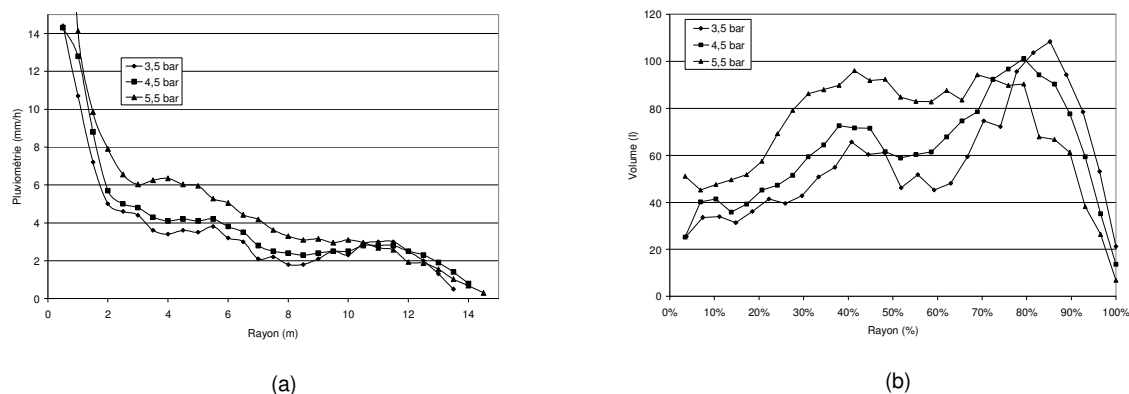


Figure 35 : représentation graphique de la pluviométrie radiale et de la distribution volumique du Rain Bird 46

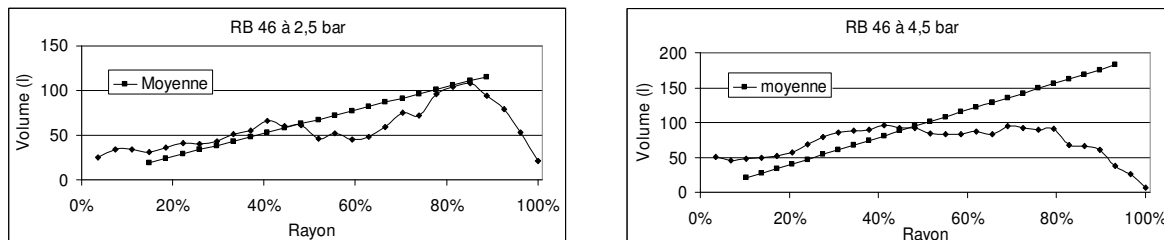


Figure 36 : comparaison de la distribution volumique moyenne et de celle obtenue pour 2,5 et 4,5 bars

Ces courbes confirment la sur-irrigation jusqu'à 50 % de la portée. Ensuite, débute une portion sous-irriguée, qui s'étend jusqu'à 80 % de la portée à 2.5 bars et jusqu'au bout à 4.5 bars. Ici l'augmentation de la pression induit une dégradation de l'homogénéité de distribution, ainsi à 4,5 bars, la moyenne de pluviométrie est de 4 mm/h, avec des variations entre 5,4 mm/h sur la première moitié de la portée et 2,8 mm/h sur la deuxième.

En conclusion, pour ce type de sprinkler en irrigation, la zone de recouvrement doit s'effectuer à la moitié de la portée du jet principal. Autrement dit, pour obtenir une uniformité satisfaisante, on veillera à maintenir un écartement de l'ordre de 1.5 fois la portée.

5.4.2 – Caractéristique de la distribution granulométrique

La Figure 37 met en évidence une distribution granulométrique en deux parties. Jusqu'à 60 % de la portée, les courbes de distribution restent proches d'une pression à l'autre, en effectif comme en volume. Puis, au-delà se manifestent des variations importantes entre les différentes pressions.

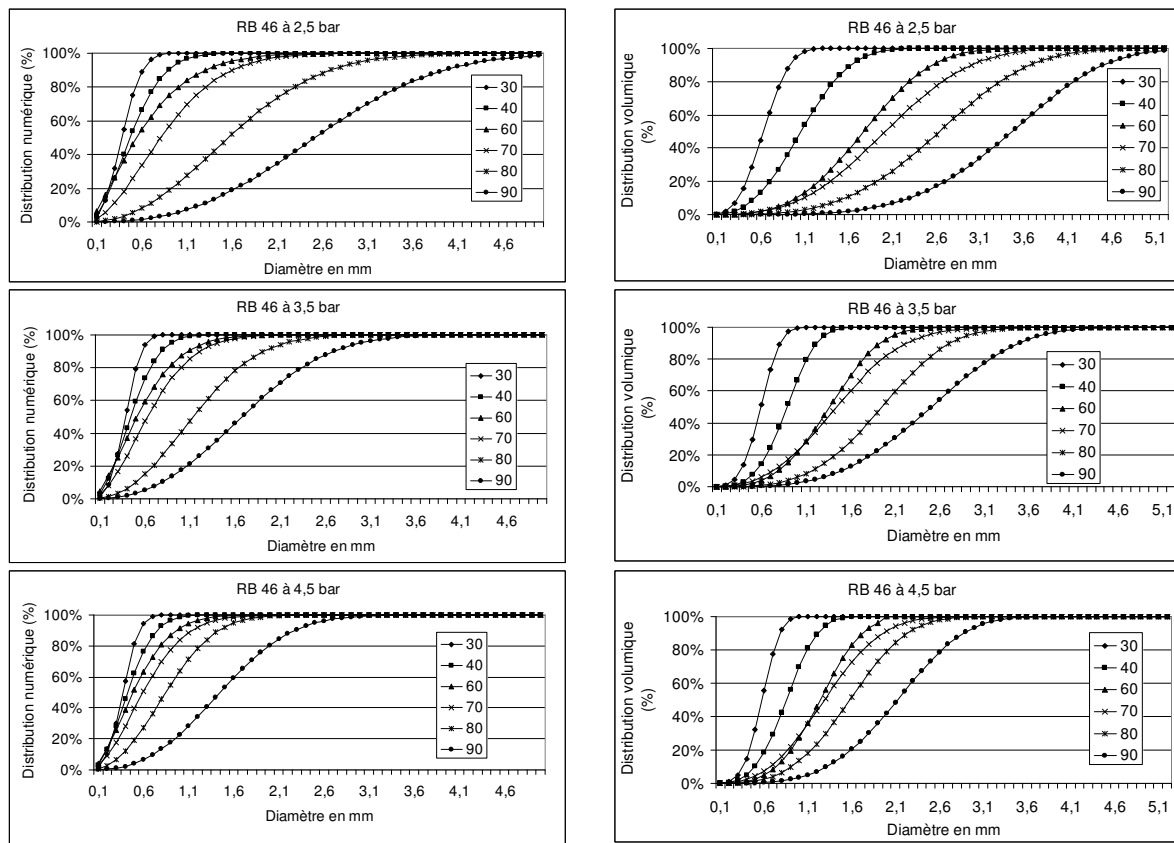


Figure 37 : courbes de distribution granulométrique en effectif et en volume du RB 46 à différents rayons (30, 40, 60, 70, 80 et 90 % de la portée)

L'augmentation de la pression induit une réduction des diamètres de gouttes observés, traduisant une meilleure dispersion du jet lorsque la pression donc la vitesse d'éjection du jet est plus grande. Les gouttes de moins de 0.4 mm sont produites en majorité en début de portée. Toutefois, la part volumique constituée par cette population reste faible.

Le batteur, en brisant le jet, crée localement des gouttes de petit diamètre à faible vitesse qui tombent instantanément au sol. La présence de ces gouttes explique la forte pluviométrie mesurée en tout début du jet.

5.4.3 – Paramètres de tendance de la distribution

De manière générale, les gouttes proches de 0,5 mm sont bien représentées jusqu'à 70 % de la portée. Cette tendance gagne en importance avec l'augmentation de la pression. Elle est notable sur les représentations en volume, beaucoup sur les représentations en effectifs (Figures 38 et 39).

Si la distribution en effectif montre une variation de dispersion entre le début et la fin de la portée, la distribution en volume corrige une bonne part de cette hétérogénéité pour aller vers une valeur de dispersion pratiquement constante.

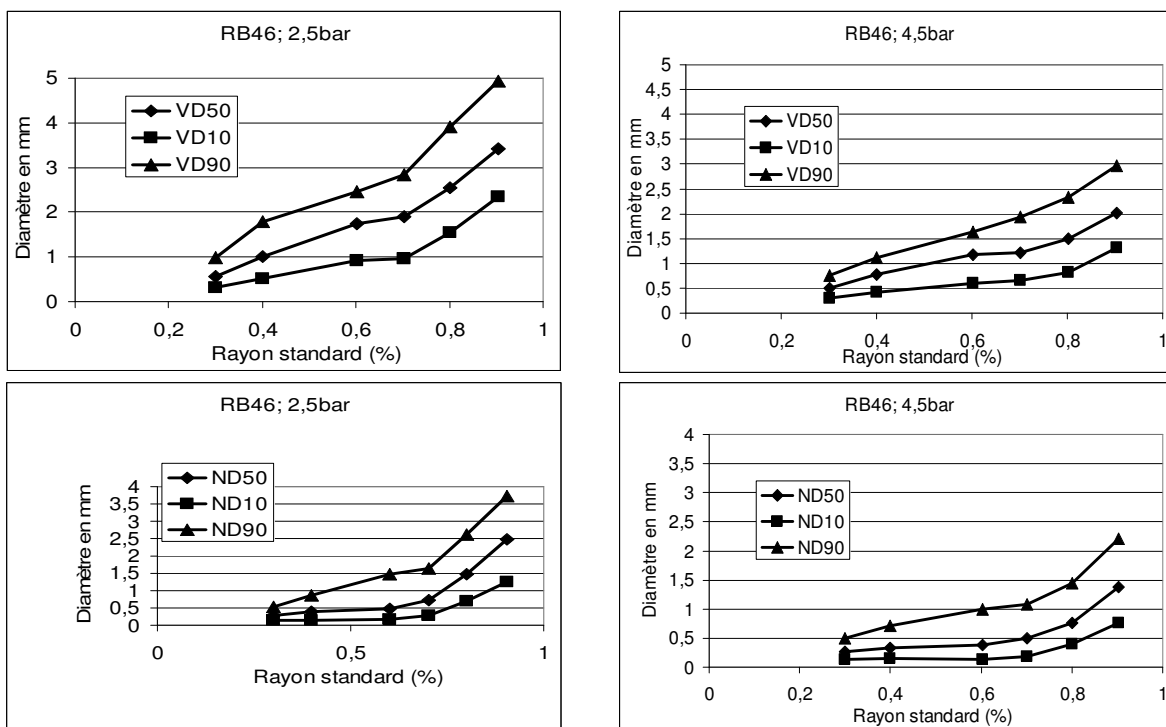


Figure 38 : représentation graphique des paramètres de tendance en effectifs et en volumes pour 2,5 et 4,5 bars

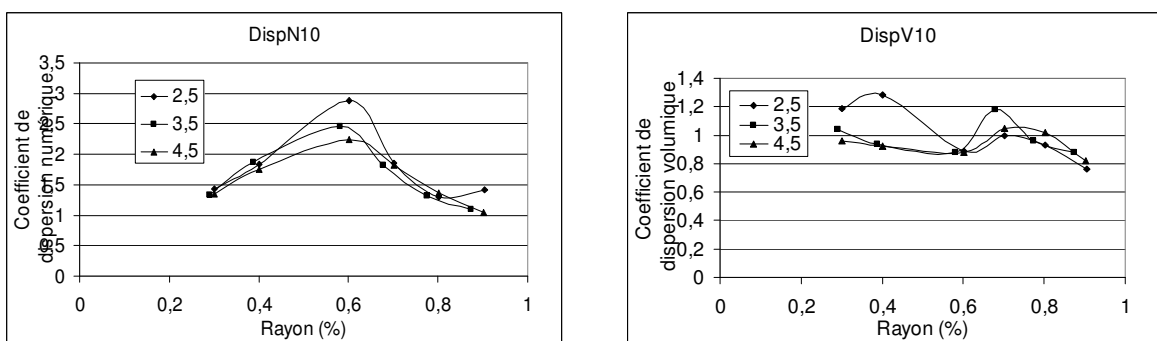


Figure 39 : représentation de la dispersion de la distribution granulométrique numérique et volumique par rapport à la médiane

De manière générale, le diamètre de SAUTER (Figure 40) peut être ajusté par une fonction exponentielle au rayon standard et ce quelle que soit la pression appliquée. Néanmoins, le D32 tend à diminuer avec la pression à partir de 40 % de la portée.

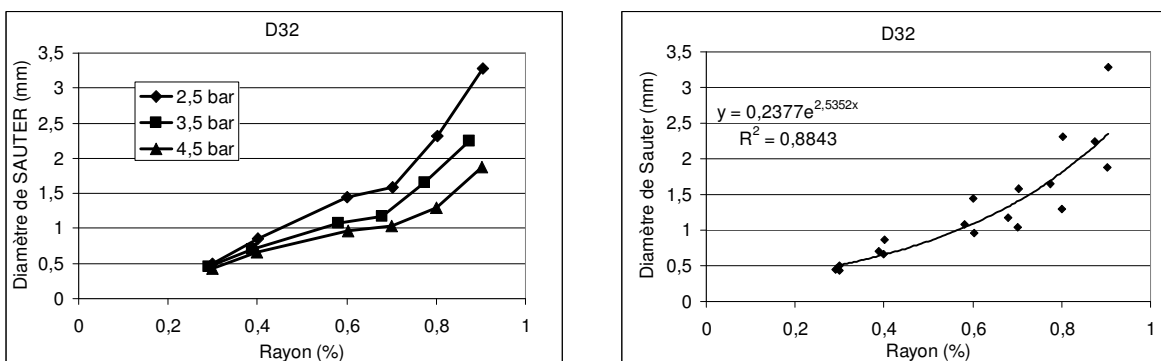


Figure 40 : juxtaposition des diamètres de SAUTER pour les trois pressions

5.4.4 – Quantification des risques de dérive et d'évaporation

Le volume susceptible de dériver et de s'évaporer est directement lié à la pression de fonctionnement. L'augmentation de la pression à l'aspersion contribue à accélérer l'atomisation du jet (Tableau 9).

Tableau 9 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour le Rain Bird 46 WH (voir indications du Tab. 6)

2,5 bar

Portée max	13,5						
% portée	30	40	60	70	80	90	
Rayon	4,05	5,40	8,10	9,45	10,80	12,15	
Borne inf	0	4,725	6,75	8,775	10,125	11,475	
Borne sup	4,725	6,75	8,775	10,125	11,475	13,5	Total
Volume (l)	335,21	242,22	191,32	188,90	270,87	301,28	1529,80
Volume (dia<0,15)	3,61	0,92	0,05	0,07	0,01	0,00	4,65
Volume (dia<0,40)	48,17	9,93	0,90	0,90	0,19	0,01	60,11
% (dia<0,15)	1,08%	0,38%	0,03%	0,04%	0,00%	0,00%	0,30%
% (dia<0,40)	14,37%	4,10%	0,47%	0,47%	0,07%	0,00%	3,93%

3,5 bar

Portée max	14						
% portée	30	40	60	70	80	90	
Rayon	4,20	5,60	8,40	9,80	11,20	12,60	
Borne inf	0	4,9	7	9,1	10,5	11,9	
Borne sup	4,9	7	9,1	10,5	11,9	14	Total
Volume (l/h)	417,66	309,45	285,81	231,43	290,62	254,47	1789,43
Volume (dia<0,15)	2,08	0,38	0,15	0,41	0,03	0,01	3,06
Volume (dia<0,40)	54,40	9,56	2,81	4,34	0,60	0,22	71,93
% (dia<0,15)	0,50%	0,12%	0,05%	0,18%	0,01%	0,00%	0,17%
% (dia<0,40)	13,02%	3,09%	0,98%	1,88%	0,21%	0,08%	4,02%

4,5 bar

Portée max	14,5						
% portée	30	40	60	70	80	90	
Rayon	4,35	5,80	8,70	10,15	11,60	13,05	
Borne inf	0	5,075	7,25	9,425	10,875	12,325	
borne sup	5,075	7,25	9,425	10,875	12,325	14,5	Total
Volume (l/h)	580,33	415,24	384,22	260,91	253,53	206,09	2100,31
volume (dia<0,15)	3,05	1,02	0,19	0,49	0,08	0,01	4,83
volume (dia<0,40)	82,61	19,15	4,12	5,73	1,48	0,19	113,29
% (dia<0,15)	0,53%	0,24%	0,05%	0,19%	0,03%	0,00%	0,23%
% (dia<0,40)	14,24%	4,61%	1,07%	2,20%	0,58%	0,09%	5,39%

Pertes Totales

	2,5	3,5	4,5
Volume ($\sigma < 0,15$) en l	4,7	3,1	4,8
Volume ($\sigma < 0,40$) en l	60,1	71,9	113,3
Débit total (l/h)	1529,8	1789,4	2100,3
% ($\sigma < 0,15$)	0,30%	0,17%	0,23%
% ($\sigma < 0,40$)	3,93%	4,02%	5,39%

Les populations de gouttes à risques voient leur importance baisser rapidement à partir de 50 % de la portée. Le volume correspondant varie entre 60 et 110 l/h (3 à 5 % du débit) pour le risque de dérive et 3 à 5 l/h (< 0,3 % du débit) pour le risque d'évaporation.

Les gouttes exposées sont donc principalement issues de la buse arrière, qui contribue à la distribution jusqu'à environ 60 % de la portée. Les gouttes issues du jet principal sont plus grosses, donc moins sensibles. Cela est bien illustré par la Figure 41.

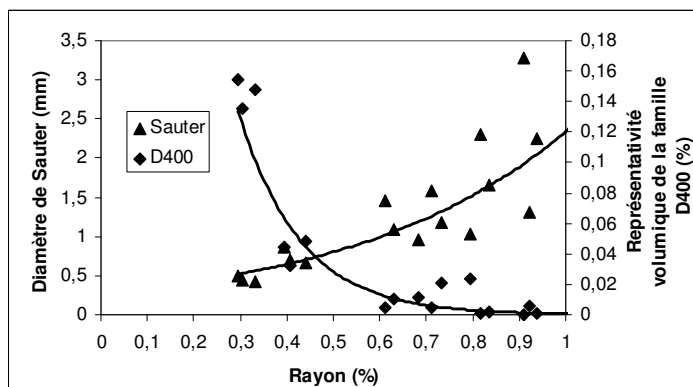


Figure 41 : comparaison de l'évolution du diamètre de Sauter et de la représentativité de la famille D400

CONCLUSION

Le Rain Bird 46 WH fait partie des sprinklers utilisés dans les systèmes de couvertures intégrales. Le modèle étudié présenté deux buses. L'existence de deux jets est visible sur la courbe de répartition pluviométrique et sur la distribution granulométrique.

La distribution granulométrique est telle que la buse secondaire concentre pratiquement tout le risque de dérive et d'évaporation. Le volume susceptible de s'évaporer reste en dessous de 5 l/h pour un débit de 2 m³/h (soit 0.23 % du volume total). le volume des gouttes sensibles à la dérive est de 110 l/h au maximum (5.4 % du volume total), mais les gouttes émises étant originaire de la partie initiale du jet sont moins soumises aux effets du vent que celles qui pourraient venir de l'apogée.

La distance maximum de dérive calculée pour ce type de distributeur avec un vent à 4 m.s⁻¹ sera de l'ordre 6 m.

5.5 – Asperseur 5022-U (photo en Annexe 1)

5.5.1 – Représentations pluviométrique et volumétrique de l'apport d'eau

Comme le RB 46 WH, le sprinkler 5022-U est équipé d'une buse avant et d'une buse arrière. La rotation est assurée par un batteur qui interrompt le jet. Les graphiques de la Figure 42 montrent un asperseur dont la courbe indique qu'il est fait pour fonctionner en quadrillage. On observe que la pression n'a pratiquement aucun effet sur la portée. Si on calcule la pluviométrie moyenne entre 10 et 90 % de la portée, on obtient à 2.5 bars, 2.07 mm/h et à 4.5 bars, 2.78 mm/h.

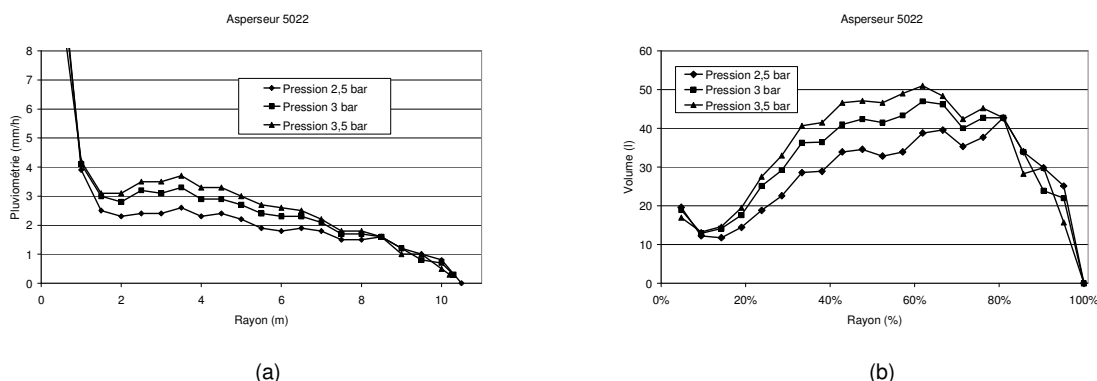


Figure 42 : représentation de la pluviométrie radiale (a) et de la distribution volumique (b) des apports pour le 5022-U

On note (Figure 43) une légère sur-irrigation jusqu'à 50 % de la portée puis une baisse qui est d'autant plus marquée que la pression est élevée. Cet asperseur fonctionne mieux pour de faibles pressions et donnera une bonne uniformité de distribution avec un écartement de 1.8 fois la portée.

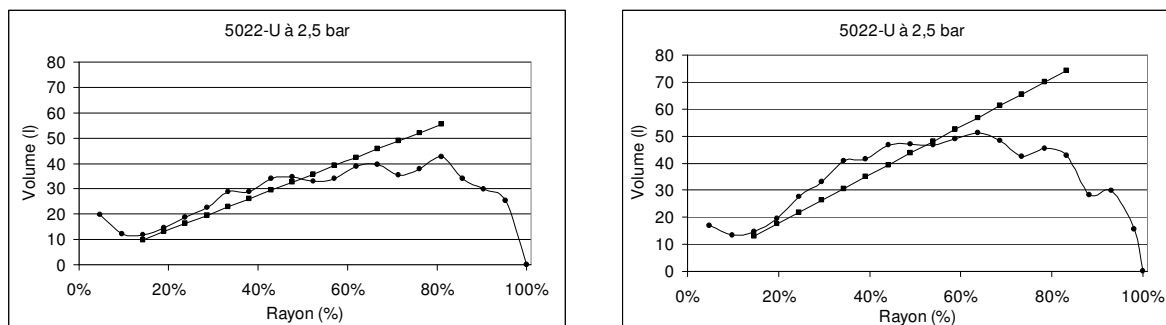


Figure 43 : distribution volumique des apports comparée à sa moyenne pour une pression de 2,5 bars

5.5.2 – Caractéristique de la distribution granulométrique

Les familles de gouttes composant les nuages de gouttes (Figure 44) évoluent progressivement quelle que soit la position de mesure vers des gouttes de diamètres croissants. Les volumes concernés par les gouttes "à risques" diminuent avec l'augmentation du rayon, malgré une représentativité importante en termes d'effectif. Ces gouttes "à risques" ne sont quasiment plus présentes au-delà de 60 % de la portée. Par l'observation des granulométries cumulées, l'effet de la pression n'est pas manifeste.

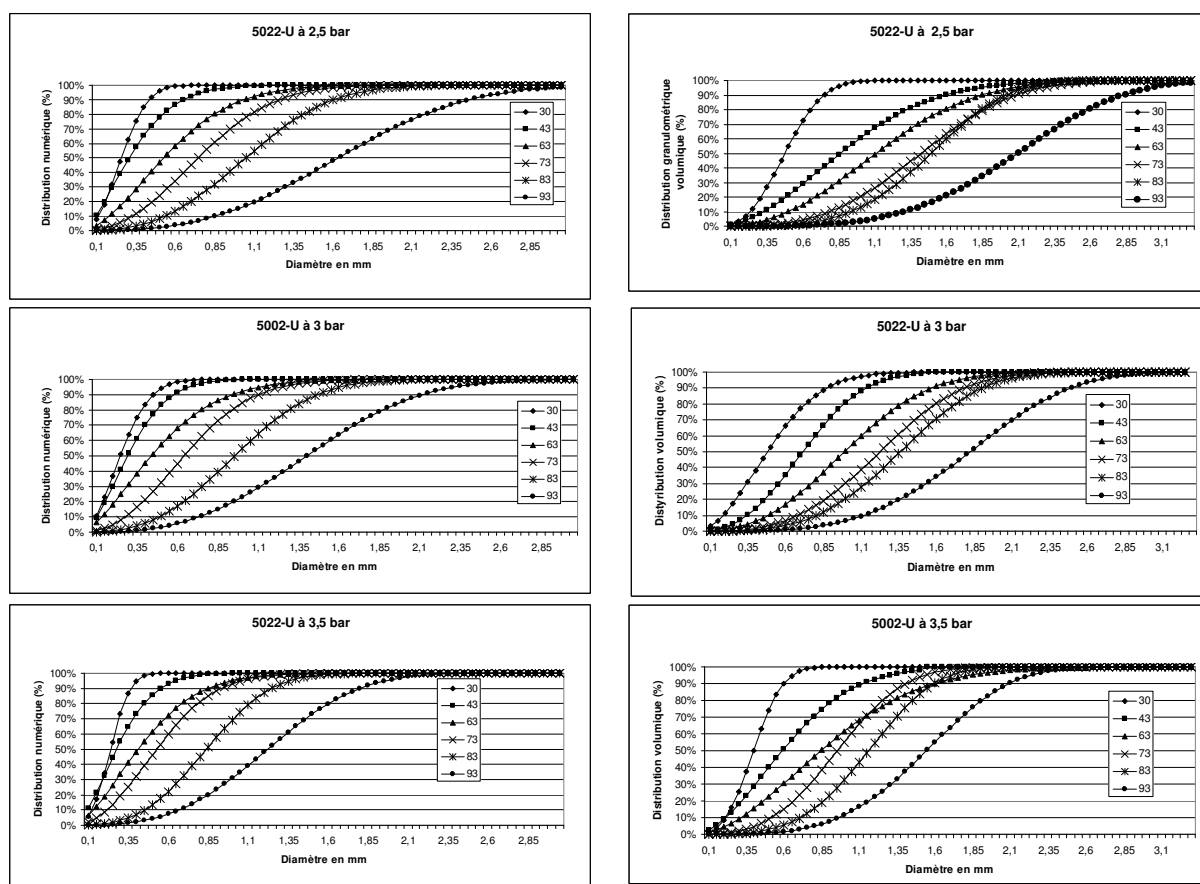


Figure 44 : distribution granulométrique en effectif et en volume

5.5.3 – Paramètres de tendance de la distribution

La Figure 45 nous montre que jusqu'à 60 % de la portée, la composition numérique des nuages de gouttes est pratiquement constante quelle que soit la pression pour les plus petites particules.

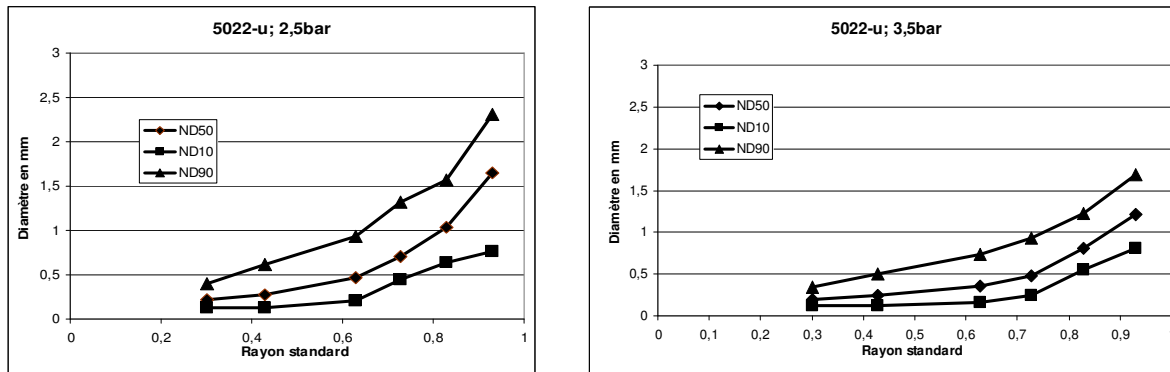


Figure 45 : évolution de distribution granulométrique numérique

L'évolution de la distribution se fait surtout au niveau des gouttes de forts diamètres, comme le souligne la courbe ND90, avec un effet notable de la pression sur l'augmentation de l'atomisation.

Au niveau des volumes (Figure 46), les différences s'amenuisent sauf pour les VD90. En début de portée apparaissent progressivement des gouttes de diamètres importants, d'autant plus que la pression est élevée. Il est possible que le batteur soit à l'origine de ce phénomène.

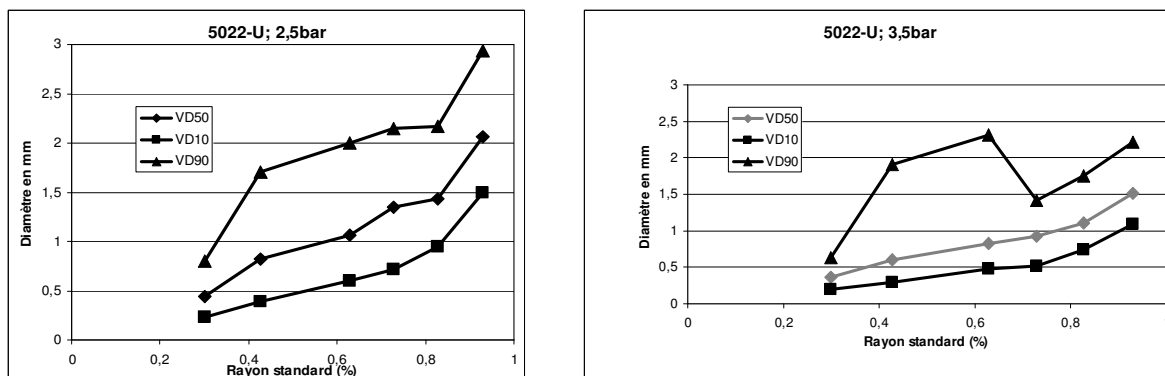


Figure 46 : évolution des indicateurs de tendance volumique

Cette observation ne change en rien les conclusions que nous pouvons tirer pour les particules de petites tailles. Si on observe l'évolution globale, sans tenir compte de la pression, les VD10 montrent un comportement similaire (Figure 47), de même que les VD50. La pression n'influe que sur les VD90.

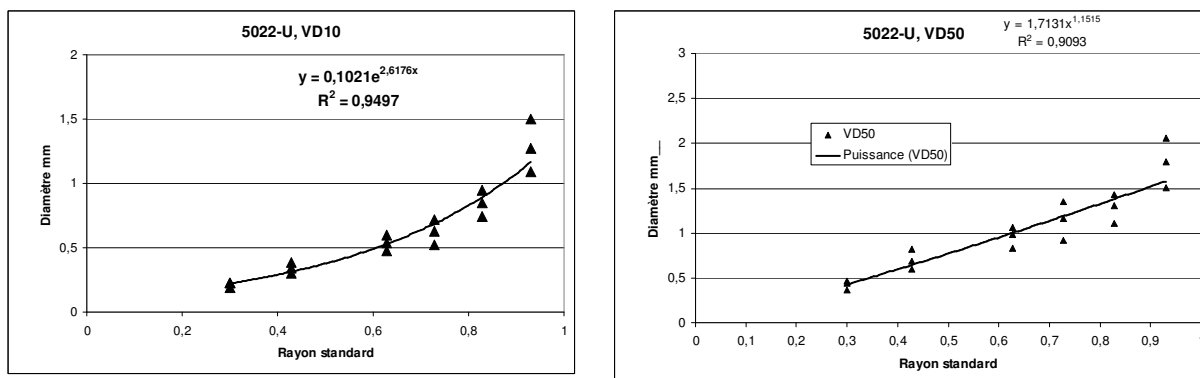


Figure 47 : évolution du diamètre du premier centile en fonction du rayon

Du fait des comportements des VD90, la dispersion (Figure 48) est importante en début de portée puis diminue lorsque seul le jet principal est concerné.

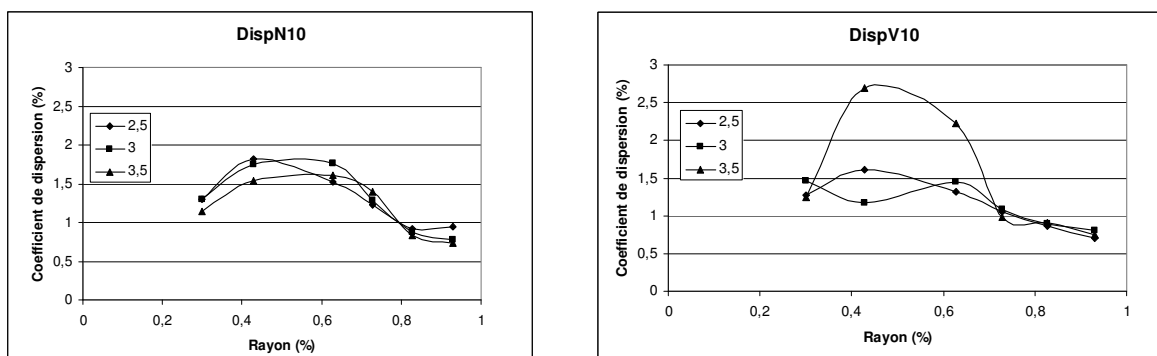


Figure 48 : dispersions moyennes numérique et volumique de la distribution

5.5.4 – Quantification des risques de dérive et d'évaporation

Comme illustré par les données du Tableau 10, le volume susceptible de dériver est concentré sur la première moitié du jet, où l'on peut avoir jusqu'à 80 % des gouttes qui font moins de 0.4 mm. Néanmoins, le volume représenté n'excède pas 20 % du volume total. Pour les gouttes soumises à l'évaporation, elles représentent localement jusqu'à 12 % du volume, mais leur représentativité n'excède pas 2.5 % du volume total. L'effet de la pression, entre 2.5 à 3.5 bars, sur ces proportions est important, puisque celles-ci sont multipliées par 2.0 environ, alors que le débit n'est multiplié que par 1.2.

Tableau 10 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour l'asperseur 5022-U (voir indications du Tab. 6)

2,5 bar

Portée max	10						
% portée	30%	43%	63%	73%	83%	93%	
Rayon	3,00	4,28	6,28	7,28	8,28	9,31	
Borne inf	0,00	3,64	5,28	6,78	7,78	8,79	
Borne sup	3,64	5,28	6,78	7,78	8,79	10,00	Total
Volume (l)	121,87	103,68	105,56	74,93	80,42	88,91	575,4
Volume (dia<0,15)	3,97	2,37	0,65	0,04	0,01	0,00	7,0
Volume (dia<0,40)	39,48	12,60	5,74	0,90	0,27	0,08	59,1
%(dia<0,15)	3,3%	2,3%	0,6%	0,1%	0,0%	0,0%	1%
%(dia<0,40)	32,4%	12,1%	5,4%	1,2%	0,3%	0,1%	10%

3 bar

Portée max	10						
% portée	30%	43%	63%	73%	83%	93%	
Rayon	3,00	4,28	6,28	7,28	8,28	9,31	
Borne inf	0,00	3,64	5,28	6,78	7,78	8,79	
borne sup	3,64	5,28	6,78	7,78	8,79	10,00	Total
Volume (l/h)	146,17	127,83	131,79	86,24	85,45	79,80	657,3
volume (dia<0,15)	9,62	1,54	0,65	0,07	0,02	0,00	11,9
volume (dia<0,40)	55,83	18,23	8,24	1,64	0,74	0,16	84,8
%(dia<0,15)	6,6%	1,2%	0,5%	0,1%	0,0%	0,0%	1,8%
%(dia<0,40)	38,2%	14,3%	6,3%	1,9%	0,9%	0,2%	12,9%

3,5 bar

Portée max	10						
% portée	30%	43%	63%	73%	83%	93%	
Rayon	3,00	4,28	6,28	7,28	8,28	9,31	
Borne inf	0,00	3,64	5,28	6,78	7,78	8,79	
borne sup	3,64	5,28	6,78	7,78	8,79	10,00	Total
Volume (l/h)	156,45	144,20	146,71	90,79	87,96	73,83	699,9
volume (dia<0,15)	5,83	7,67	3,77	0,21	0,03	0,00	17,5
volume (dia<0,40)	78,50	41,37	22,59	4,19	1,05	0,23	147,9
%(dia<0,15)	3,72%	5,32%	2,57%	0,23%	0,03%	0,01%	2,50%
%(dia<0,40)	50,18%	28,69%	15,40%	4,61%	1,19%	0,31%	21,14%

PERTES TOTALES

	2,5	3	3,5
Volume ($\phi < 0,15$) en l	7,03	11,92	17,50
Volume ($\phi < 0,40$) en l	59,07	84,85	147,94
Débit total (l/h)	575,36	657,28	699,95
% $\phi < 0,15$	1,2%	1,8%	2,5%
% $\phi < 0,40$	10,3%	12,9%	21,1%

Comme pour les asperseurs, le point critique en termes de risque de dérive comme d'évaporation, se trouve aux alentours de 60 % de la portée (Figure 49). L'ajustement des diamètres de Sauter donne une assez bonne idée de la représentation des petites gouttes dans la population totale. La sensibilité à la dérive peut intéresser un volume important (jusqu'à 150 l/h) mais la faiblesse de l'apogée sur cet arroseur (moins de 2 m par rapport à la buse) le protège globalement en n'exposant pas les gouttes aux couches les plus ventées de l'atmosphère.

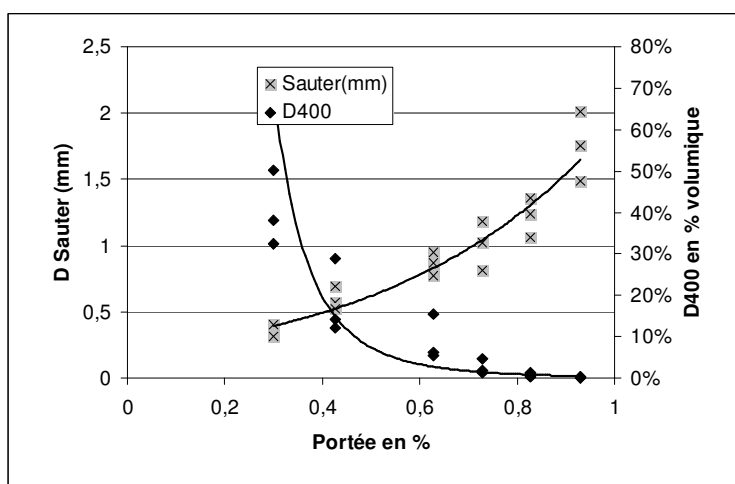


Figure 49 : comparaison de l'évolution du diamètre de Sauter et de la représentativité volumique de la famille D400

CONCLUSION

Le 5022-U est un sprinkler, à deux buses, destiné à l'irrigation en plein champs ou sous serre et l'arrosage des espaces verts à faibles écartements. Ce type d'asperseur est utilisé en quadrillage en prévoyant un recoupement suffisant entre les apports de sprinklers voisins (écartement maximum de 1.8 fois la portée). Ces arroseurs étant générateurs d'une proportion élevée de petites gouttes, la pratique est plutôt de conserver un écartement de 15 m.

Les pertes par dérive et par évaporation restent localisées sur la première moitié de la portée, le volume de pertes est assez sensible aux augmentations de pression. Ainsi, une augmentation de 1 bar conduit au doublement des risques de pertes. Pour nos mesures, nous avons disposé l'asperseur à 1 m au dessus du sol, il est évident que son utilisation à des hauteurs supérieures induira une sensibilité au vent, et donc un risque supplémentaire.

Les pertes par évaporation varient de 7 l/h à 2,5 bars, à 18 l/h à 3,5 bars, soit moins de 2.5 % du volume apporté. Les pertes par dérive sont prépondérantes sur la première moitié de la portée, elles peuvent représenter 80 % du volume local, toutefois rapportées au volume total apporté celles-ci ne dépassent pas 20 %, ce qui reste une proportion élevée. Etant donnée la variation de portée de cet arroseur, il est judicieux de l'utiliser à plus basse pression, ce qui réduira à 10 % le volume des gouttes "à risque" et permettra d'avoir une meilleure uniformité de distribution, même en conditions ventées.

La distance maximum de dérive calculée pour ce type de distributeur avec un vent à 4 m.s^{-1} sera de l'ordre 5 m.

5.6 – Micro-asperseur Hadar 7110

5.6.1 – Représentations pluviométrique et volumétrique de l'apport d'eau

Ce petit arroseur est utilisé dans les serres et dans les espaces verts pour arroser des massifs.

Quelle que soit la pression appliquée, la forme de la courbe pluviométrique est dite triangulaire, et la portée reste constante. Il est donc inutile d'utiliser la pression la plus élevée. A l'observation de la distribution en volume, pour obtenir une bonne uniformité cet arroseur doit être utilisé en quadrillage avec un écartement de l'ordre de 1.5 fois la portée, soit 6 m (Figure 50).

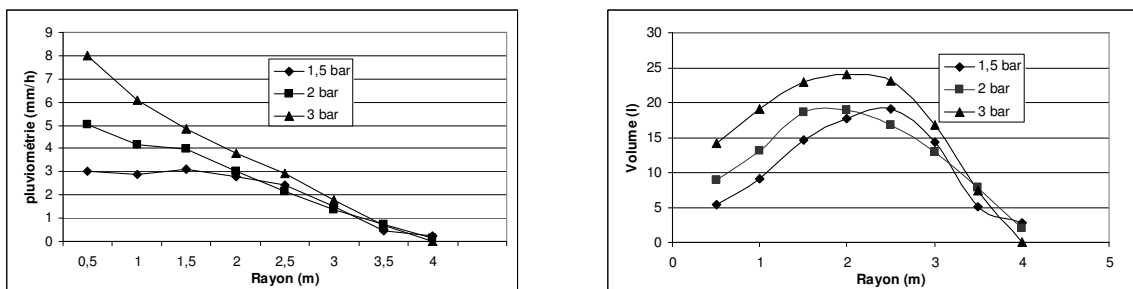


Figure 50 : représentation de la pluviométrie radiale et de la distribution volumique des apports d'eau pour l'Hadar 7110

5.6.2 – Caractéristique de la distribution granulométrique

La distribution granulométrique en effectif évolue peu le long de la portée en fonction de la pression (Figure 51). L'intervalle de variation des diamètres de particules d'eau est très restreint puisque toutes les gouttes font moins de 1 mm de diamètre.

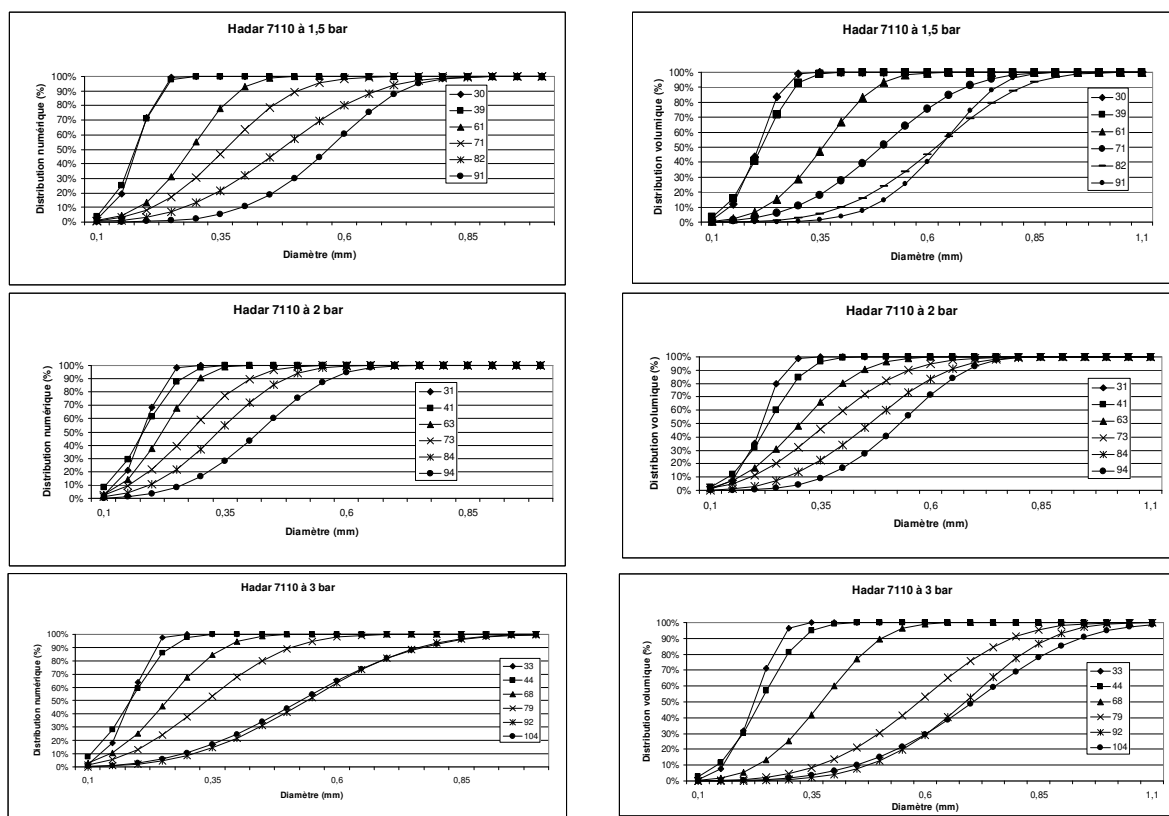


Figure 51 : courbes de distribution granulométrique en effectif et en volume de l'Hadar 7110 à différents pourcentages de la portée

La mesure s'est avérée assez compliquée sur cet arroseur, du fait de son échelle de travail par rapport à l'espace de mesure du granulomètre. Les populations de gouttes "à risque" sont largement représentées en volume, sinon majoritaires avec ce type d'arroseur, au moins sur 80 % de la portée.

5.6.3 – Paramètres de tendance de la distribution

La Figure 52 montre des distributions en volumes très similaires entre les deux pressions extrêmes, confirmé par le graphique présenté à la Figure 53. Quelle que soit la pression, les gouttes avec un diamètre compris entre 0,15 et 0,4 mm sont présentes à tous les niveaux de la portée.

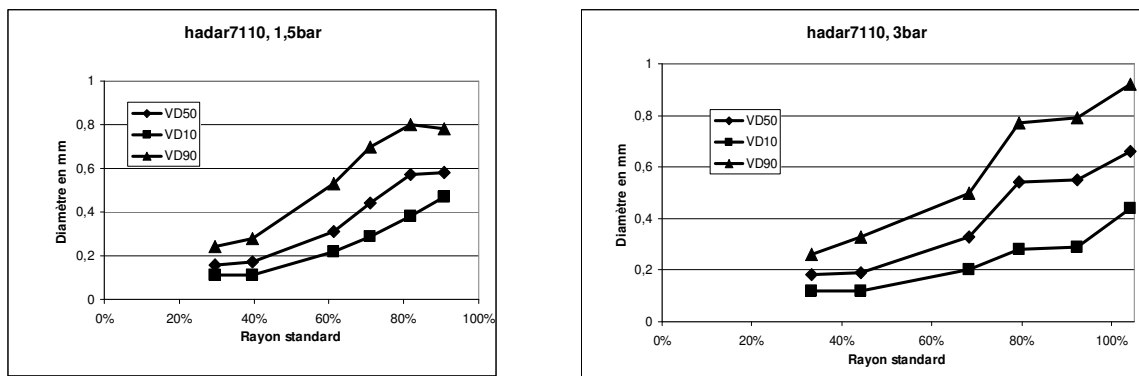


Figure 52 : représentation de la distribution granulométrique volumique

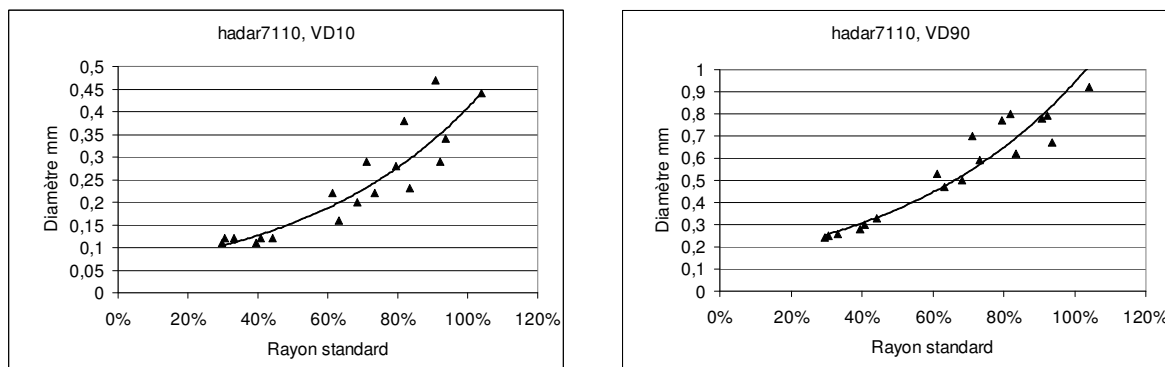


Figure 53 : évolution du VD10 et VD90 pour l'Hadar 7110

5.6.4 – Quantification des risques de dérive et d'évaporation

Il apparaît clairement que le risque d'évaporation et de dérive est important sur cet arroseur, de part la taille des gouttes qu'il produit. La part en volume des gouttes susceptibles de s'évaporer reste réduite à moins de 7 %, celle susceptible de dériver peut représenter jusqu'à 70 % du volume. Les risques de pertes par évaporation, symbolisés par la famille de gouttes de diamètre inférieur à 0,15 mm, sont localisés en début de jet (avant la moitié de la portée).

Tableau 11 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour le micro-asperseur Hadar 7110
 (voir indications du Tab. 6)

1,5 bar

Portée max	3,8						
% portée	30%	39%	61%	71%	82%	91%	
Rayon	1,14	1,48	2,32	2,70	3,12	3,46	
Borne inf	0,0	1,3	1,9	2,5	2,9	3,3	
Borne sup	1,3	1,9	2,5	2,9	3,3	3,8	Total
Volume (l)	15,9	18,4	21,9	13,8	10,5	7,2	87,73
Volume (dia<0,15)	1,9	2,9	0,4	0,13	0,02	0,001	5,31
Volume (dia<0,40)	14,0	15,6	14,2	3,7	1,0	0,3	48,74
% (dia<0,15)	12%	16%	2%	1%	0%	0%	6%
% (dia<0,40)	88%	84%	65%	27%	10%	4%	56%

2 bar

Portée max	3,8						
% portée	31%	41%	63%	73%	84%	94%	
Rayon	1,18	1,56	2,39	2,77	3,19	3,57	
Borne inf	0,0	1,4	2,0	2,6	3,0	3,4	
Borne sup	1,4	2,0	2,6	3,0	3,4	3,8	Total
Volume (l)	27,5	22,5	21,1	11,5	8,8	7,5	98,98
Volume (dia<0,15)	2,1	2,7	1,5	0,6	0,1	0,01	7,02
Volume (dia<0,40)	25,4	19,7	15,5	6,2	2,9	1,2	70,99
% (dia<0,15)	8%	12%	7%	5%	1%	0%	7%
% (dia<0,40)	92%	88%	74%	54%	33%	16%	72%

3 bar

Portée max	3,8						
% portée	33%	44%	68%	79%	92%	100%	
Rayon	1,25	1,67	2,58	3,00	3,50	3,80	
Borne inf	0,0	1,5	2,1	2,8	3,2	3,6	
Borne sup	1,5	2,1	2,8	3,2	3,6	3,8	Total
Volume (l/h)	42,866	31,443	28,785	16,704	5,914	1,478	127,19
Volume (dia<0,15)	3,394	3,608	0,526	0,046	0,002	0,002	7,58
Volume (dia<0,40)	39,472	27,606	16,822	2,230	0,250	0,090	86,47
% (dia<0,15)	8%	11%	2%	0%	0%	0%	6%
% (dia<0,40)	92%	88%	58%	13%	4%	6%	68%

Pertes totales

	2,5	3	3,5
Volume ($\sigma < 0,15$) en l	5,31	7,02	7,58
Volume ($\sigma < 0,40$) en l	48,74	70,99	86,47
Débit (l/h)	87,73	98,98	127,19
% $\sigma < 0,15$	6%	7%	6%
% $\sigma < 0,40$	56%	72%	68%

La Figure 54 montre la proportion élevée des gouttes "à risque" de dérive (D400) et d'évaporation (D150) prises en % du volume, en fonction de la portée, en comparaison avec le D32.

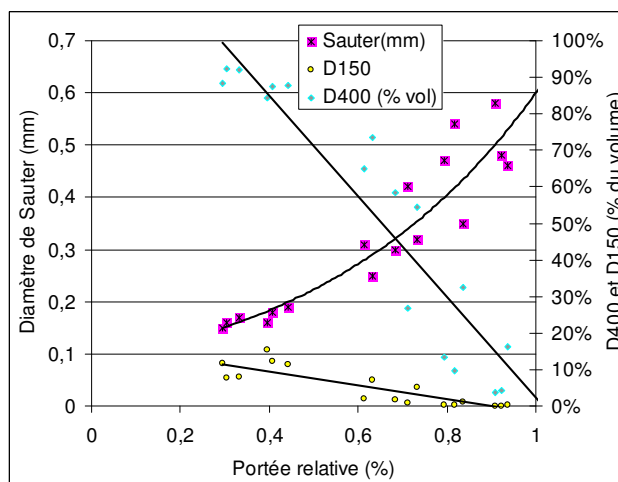


Figure 54 : évolution du diamètre de Sauter et du volume des gouttes susceptibles de dériver

CONCLUSION

Le micro-asperseur, Hadar 7110, étudié ici est composé d'un rotor sur lequel le jet issu de la buse vient taper et se divise en 2. Sa portée est importante en regard du débit délivré. Ce type d'asperseur utilisé pour l'irrigation sous serre et l'arrosage des espaces verts produit de très petites particules d'eau dont la sensibilité potentielle à la dérive et à l'évaporation est grande. Ce micro-asperseur est placé à une hauteur de 40 cm par rapport au sol. Les pertes par dérive et par évaporation sont potentiellement importantes. Elles peuvent représenter 70 % du volume total distribué. Toutefois, ces résultats sont à moduler car ces asperseurs sont utilisés sous serre ou sous le feuillage des arbres, bénéficiant d'une excellente protection contre le vent et l'évaporation. Les risques de pertes par évaporation concernent moins de 10 % du volume distribué quelle que soit la pression de service.

La distance maximum de dérive calculée pour ce type de distributeur avec un vent à 4 m.s^{-1} sera de l'ordre 1.5 m.

5.7 – Micro-asperseur Turbojet

5.7.1 – Représentations pluviométrique et volumétrique de l'apport d'eau

Pour une pression de 1,5 et 2 bars, et dans une moindre mesure 3 bars, la répartition moyenne volumique et pluviométrique montre une zone s'étendant jusqu'à 30 % de la portée dépourvue d'apport. Immédiatement après, un pic de pluviométrie est observé. A 1.5 et 2 bars la portée est pratiquement constante, puis augmente à 3 bars (Figure 55).

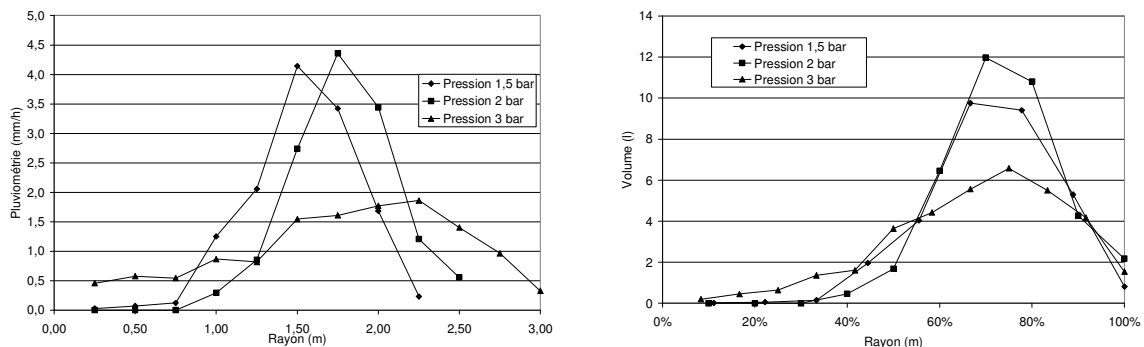


Figure 55 : représentation graphique de la distribution moyenne pluviométrique et volumétrique du Turbojet

Cet arroseur distribue l'eau sous forme de 12 jets issus d'un déflecteur fixe (Figure 56) sur lequel le jet issu de la buse vient frapper. La carte de distribution est donc constituée de pinceaux d'eau comme des pétales de fleur disjoints l'un par rapport à ses voisins. La courbe présentée Figure 55 est donc une reconstitution à partir d'une mesure par un quadrillage de collecteur, dans l'objectif de conduire une analyse similaire aux autres arroseurs.

Ce micro-jet fonctionne sous couvert végétal réduisant les risques de contacts, ou sous serre et mouille généralement la surface de sol qui surplombe les racines d'un arbre par exemple.



Figure 56 : distribution de pluviométrie par 12 jets fixes du Turbojet

5.7.2 – Caractéristique de la distribution granulométrique

Les mesures de granulo-vélocimétrie ont été faites sur un seul jet calé au centre des faisceaux. Les mesures ci-après auront donc avant tout un caractère qualitatif, les extrapolations en quantité restent indicatives, surtout en fin de jet (Figure 57).

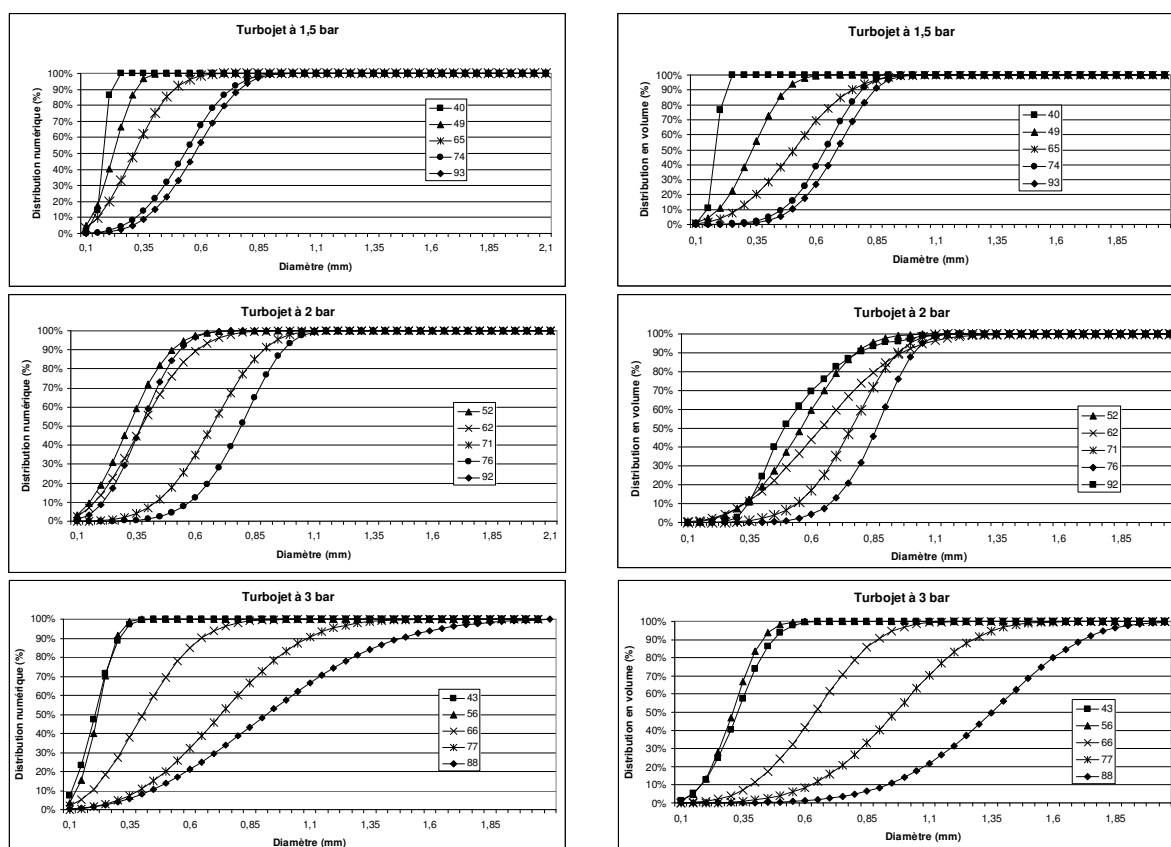


Figure 57 : distribution granulométrique en effectif au sol du Turbojet à différents rayons

De manière générale, les familles de gouttes produites sont de diamètres supérieurs à celles du précédent asperseur testé (Hadar 7110). L'effet de la pression se ressent surtout sur les mesures à 3 bars, et se traduit par une augmentation de la taille des particules, contrairement à ce qu'on peut noter sur les autres modèles étudiés. Au-delà de 50 % de la portée, la représentation volumique de la famille de gouttes de plus de 0.4 mm diminue rapidement pour laisser la place aux gouttes de diamètre plus important. Les pertes par dérive et évaporation sont concentrées sur la première moitié de la portée.

5.7.3 – Paramètres de tendance de la distribution

En termes d'effectif, les nuages de gouttes sont composés en majorité de gouttes de diamètre inférieur à 0,4 mm, et ce jusqu'aux environs de 70 % de la portée (Figure 58). Toutefois, cette représentation est atténuée par l'analyse des volumes en jeu. Ainsi, à 70 % de la portée, les gouttes de moins de 0.4 mm ne représentent plus que 10 % du volume total. On notera, également, que DN50 et DN10 sont très proches.

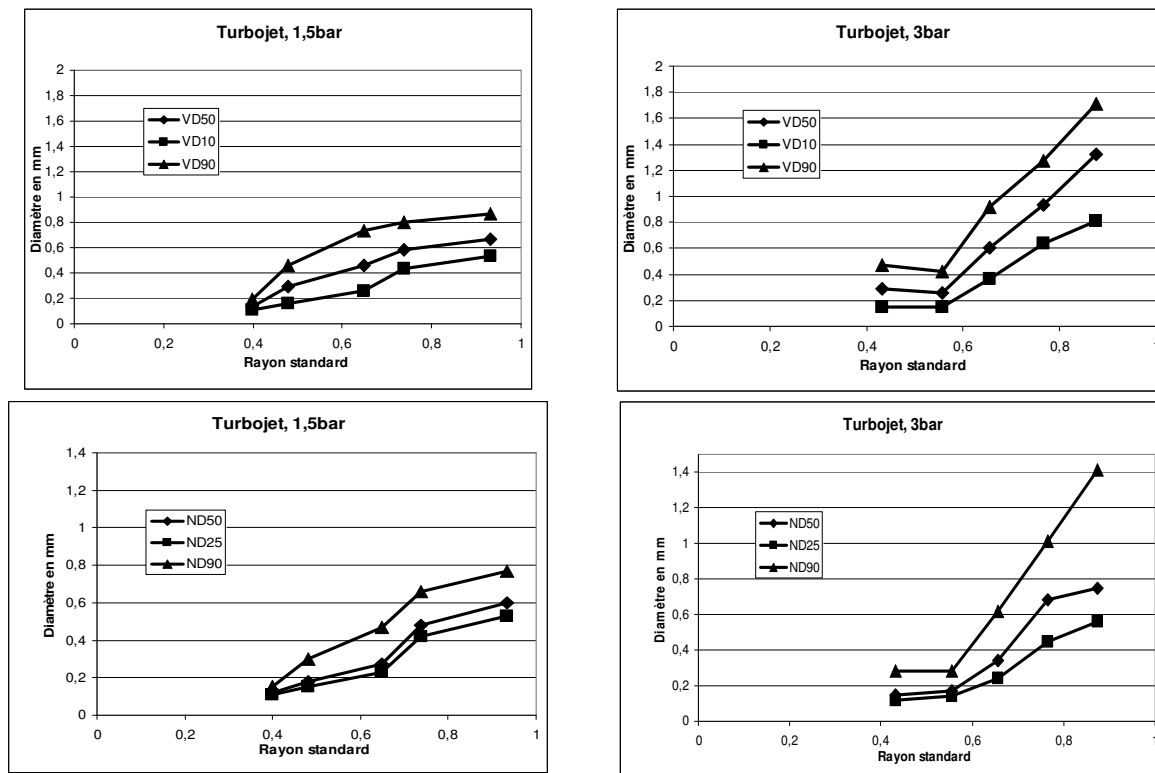


Figure 58 : évolution de la distribution granulométrique numérique et volumique statistique

Au-delà de 70 % de la portée, les gouttes de diamètre inférieur à 0,4 mm représentent moins de 10 % du volume du nuage. Ce diamètre volumique, VD10 (Figure 59), suit une fonction exponentielle croissante le long du jet aux différentes pressions. Par conséquent, au-delà de 70 % de la portée, les risques de pertes par dérive et évaporation sont fortement réduits.

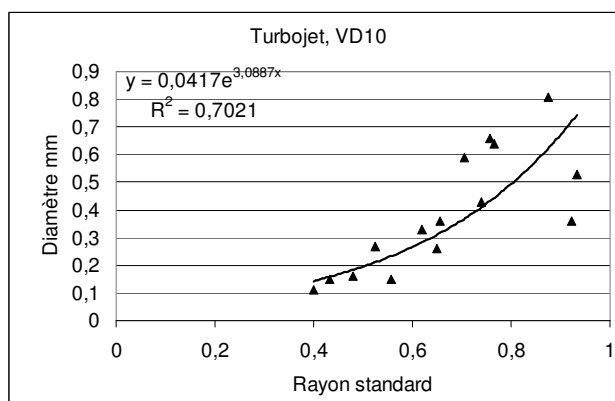


Figure 59 : évolution du VD10 pour le Turbojet

5.7.4 – Quantification des risques de dérive et d'évaporation

Les risques de pertes par évaporation et par dérive restent présents tout au long du jet malgré des valeurs qui restent relativement faibles. Bien que les gouttes à risques représentent une part significative des nuages de gouttes, ces risques restent faibles dans la mesure où ces arroseurs sont exclusivement destinés à travailler sous serre ou sous couvert d'arbres. Pour l'ensemble de ces jets, la durée de vol des gouttes est courte, donc leur exposition à l'évaporation et à la dérive (Tableau 12).

Tableau 12 : évolution des risques de dérive et d'évaporation pour le micro-asperseur Turbojet (voir indications du Tab. 6)

1,5 bar

Portée max	2,25					
% portée	40	49	65	74	85	
Rayon	0,9	1,1	1,5	1,7	1,9	
Borne inf	0,0	1,0	1,3	1,6	1,8	
Borne sup	1,0	1,3	1,6	1,8	2,3	Total
Volume (l/h)	1,19	3,40	8,64	8,38	9,46	31,08
volume (dia<0,15)	0,18	0,60	0,84	0,05	0,03	1,69
volume (dia<0,40)	1,02	2,79	5,66	1,78	1,38	12,62
% (dia<0,15)	14,7%	17,7%	9,7%	0,6%	0,3%	5,5%
% (dia<0,40)	85,3%	81,8%	65,5%	21,2%	14,6%	40,6%

2 bar

Portée max	2,5					
% portée	53	62	70	75	85	
Rayon	1,3	1,6	1,8	1,9	2,1	
Borne inf	0,0	1,4	1,7	1,8	2,0	
borne sup	1,4	1,7	1,8	2,0	2,5	Total
Volume (l/h)	11,00	10,88	6,92	4,73	3,19	36,72
volume (dia<0,15)	0,07	0,11	0,00	0,00	0,00	0,18
volume (dia<0,40)	2,01	1,67	0,14	0,01	0,78	4,62
% (dia<0,15)	0,6%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%
% (dia<0,40)	18,3%	15,4%	2,0%	0,2%	24,5%	12,6%

3 bar

Portée max	3				
% portée	44	66	77	88	
Rayon	1,3	2,0	2,3	2,6	
Borne inf	0,0	1,7	2,1	2,5	
borne sup	1,7	2,1	2,5	3,0	Total
Volume (l/h)	8,44	9,99	8,25	9,01	35,69
volume (dia<0,15)	0,43	0,03	0,00	0,00	0,47
volume (dia<0,40)	5,79	1,11	0,13	0,01	7,05
% (dia<0,15)	5,1%	0,3%	0,0%	0,0%	1,3%
% (dia<0,40)	68,7%	11,1%	1,5%	0,2%	19,7%

Pertes Totales

Pression	2,5	3	3,5
Volume (diam < 0,15)	1,69	0,18	0,47
Volume (diam < 0,4)	12,62	4,62	7,05
Débit (l/h)	31,08	36,72	35,69
% (diam < 0,15)	5%	0%	1%
% (diam < 0,4)	41%	13%	20%

CONCLUSION

Le Turbojet est un micro-asperseur à jets statique. Il est utilisé pour l'irrigation de vergers sous-frondaison à une hauteur d'environ 0,25 m. Ce type de micro-asperseur dispose de plusieurs types de déflecteur donnant naissance à 16 sous-jets. Les familles de gouttes susceptibles de s'évaporer et de dériver sont présentes en forte proportion tout au long du jet. Néanmoins, les caractéristiques physiques des jets et l'utilisation de ces asperseurs minimisent ces risques. Les gouttes susceptibles de dériver représentent 20 à 40 % du volume, celles susceptibles de s'évaporer, moins de 5 %. La distance maximum de dérive calculée pour ce type de distributeur avec un vent à 4m.s⁻¹ sera de l'ordre 1 m.

6. Conclusion générale et perspectives

Sur un panel d'asperseurs représentatifs des différentes catégories présentes sur le marché, d'un débit de 50 l/h à 50 m³/h, pour une portée de 2 à 50 m, on a pu mesurer les différentes composantes de la distribution d'un jet d'eau à savoir la distribution pluviométrique et la distribution de tailles de gouttes. Les résultats des calculs résumés ci-dessous sont synthétisés dans le Tableau 13.

Les différentes populations de gouttes produites par érosion du jet principal ou par éclatement de ce dernier se répartissent sur un intervalle de diamètre qui varie de 0 à 7 mm environ. La proportion de chacune des classes de gouttes pour un même asperseur varie en fonction de la pression, en général dans le sens d'une diminution des diamètres lorsque la pression augmente.

Une étude antérieure (Hendawi, 2005) a permis d'identifier les populations de gouttes les plus sensibles à l'évaporation, c'est-à-dire celles d'un diamètre inférieur à 150 µm, et à la dérive, pour un diamètre de 400 µm. A partir de ces informations, nous avons fait un bilan des volumes concernés par ces différentes populations de gouttes, et simuler leur balistique (trajectoire dans l'air) pour estimer les distances de dérive pour un vent de 4 m.s⁻¹ soufflant dans la direction du jet.

Le volume des gouttes sensibles à l'évaporation nous donne une indication du risque de création d'aérosols, à partir des plus petites particules, celui des gouttes sensibles à la dérive nous indique la quantité d'effluent qui peut sortir de la zone cible, et pour l'ensemble des gouttes, la simulation balistique nous donne la distance de migration hors de cette même zone ciblée (ou à arroser) en l'absence de vent.

Les volumes calculés ici surestiment le risque d'évaporation et de dérive puisque les gestionnaires de systèmes d'irrigation n'arrosent généralement pas lorsque le vent dépasse 4 m.s⁻¹ et les conditions d'évaporation qui ont été simulées (40 °C, 25 % d'humidité, 800 W/m² de rayonnement) ne sont que très rarement rencontrées (3 jours au cours de l'été 2003 à Salon de Provence). Il convient de noter ici qu'en pratique dans le domaine agricole, les irrigants ne peuvent pas toujours travailler avec des vitesses du vent faibles, en particulier en période est sèche où les besoins sont importants, et/ou lorsque leur pratique d'irrigation est régie par un tour d'eau.

La dérive calculée tient compte de la portée en l'absence de vent, qui en général augmente avec la pression, bien que parfois dans des proportions réduites. Cette portée est à la fois mesurée et calculée à partir de simulations balistiques d'où on déduit la durée d'exposition des gouttes au vent et donc la dérive supplémentaire induite. Cette dérive est reportée en % de la portée sans vent. Elle s'élève à :

- 25 % pour le canon, c'est ce qui a été vérifié par le passé lors des opérations Irriparc en Rhône Alpes,
- 30 % pour la turbine à 23 m de portée,
- 37 % pour la turbine à 12 m de portée,
- 40 % pour l'asperseur à 14 m de portée,
- 43 % pour l'asperseur à 10 m de portée,
- Moins de 40 % pour les micro-asperseurs.

Les facteurs déterminant ces phénomènes de dérive combinent: angle d'émission du jet, type de rotation (bateur ou turbine), diamètre de la buse, dessin de la buse (conique ou à ailettes), pression de fonctionnement, taille des gouttes et hauteur maximum atteinte par le jet.

La zone de protection autour d'un périmètre arrosé par aspersion avec des EUT pourrait donc être définie par rapport à la zone normalement arrosée en l'absence de vent, augmentée d'une distance correspondant à deux fois la distance de dérive estimée soit 50 à 100 % de la portée des asperseurs périphériques.

Selon nos hypothèses de travail, cela correspondrait à 25 m pour un arrosage par canon, 15 m pour les turbines de plus de 20 m de portée, 12 m pour les asperseurs de 15 m de portée, 10 m pour les turbine de 12 m de portée, 10 m pour les asperseurs de 10 m de portée et 5 m pour les micro-asperseurs.

En outre il conviendrait de définir une limite de vitesse du vent au-delà de laquelle l'arrosage doit être arrêté. Une valeur de 3 m.s^{-1} à 2 m de hauteur, est à la fois raisonnable et facilement mesurable.

En termes de perspectives, ce travail resterait à compléter sur les points suivants :

- Sachant que nous avons estimé le risque de production d'aérosols à partir de la diminution du diamètre des gouttes, jusqu'à évaporation totale pour certaines, il conviendrait de confirmer ce risque aérosol, en partenariat avec des laboratoires spécialistes, à base de simulations et de mesures à la fois au laboratoire et in situ. Cela permettrait en particulier de mieux adapter le niveau de traitement requis au type d'application envisagé.
- Prise en compte de la production effective de particules d'eau le long du jet : en effet comme on ne mesure les diamètres de gouttes qu'au sol, on fait des hypothèses fortes et simplificatrices sur l'origine des particules produites à partir du jet principal, et en particulier sur les plus petites d'entre elles : à quelle distance sont elles produites?, proviennent-elles du jet ou d'une atomisation secondaire ? L'approche utilisée surestime largement la durée d'exposition des gouttes à la demande climatique donc les phénomènes en jeu (évaporation et dérive) en augmentant le temps de contact entre la goutte et l'atmosphère.
- Prise en compte des phénomènes de turbulence atmosphériques dans la simulation des dérives, ce qui n'a pas été fait pour des raisons de temps de calcul, mais qui peut avoir un effet supplémentaire sur les temps de vol des gouttes de plus petites tailles.
- Caractérisation de l'effet du batteur qui intercepte le jet périodiquement sur certains asperseurs (volume d'eau concerné).
- Prise en compte des phénomènes liés à l'énergie cinétique des gouttes comme facteur de déstructuration de la couche de surface du sol et de risque de création de ruissellement.
- Pour caractériser plus précisément les risques sanitaires et environnementaux, il reste à coupler aléas (source de potentielle de contamination) avec la vulnérabilité de l'environnement (populations et zones sensibles). Dans notre cas, la vulnérabilité n'est pas la même si on épand les EUT en zone rurale, en zone périurbaine ou dans un lieu public, et si ces eaux sont issues d'un traitement secondaire ou tertiaire.

Tableau 13 : synthèse des résultats de l'étude pour les 7 asperseurs

Canon Komet Twin 101 Plus, buse 22mm						
Pression de fonctionnement (bar)	3.5		4.5		5.5	
Débit délivré (m ³ /h)	35.3		41.0		44.2	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	11.4	0.03 %	22.6	0.06 %	27.1	0.06 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	125.6	0.35 %	227.6	0.56 %	271.3	0.61 %
Portée (m) Dérive	42.0	18 %	47.0	18 %	50.5	21 %
Turbine Rain Bird EAGLE 750 S						
Pression de fonctionnement (bar)	4.5		5.5		6.5	
Débit délivré (m ³ /h)	5.19		5.85		7.01	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	2.6	0.05 %	1.9	0.03 %	2.0	0.03 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	28.1	0.54 %	21.1	0.36 %	24.6	0.35 %
Portée (m) Dérive	22.2	20 %	23.5	20 %	23.5	19 %
Asperseur Rain Bird 46 WH						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.5		4.5	
Débit délivré (l/h)	1 530		1 789		2 100	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	4.7	0.30 %	3.1	0.17 %	4.8	0.23 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	64.8	4.23 %	75.0	4.19 %	118.1	5.62 %
Portée (m) Dérive	13.5	25 %	14.0	30 %	14.5	37 %
Turbine Rain Bird 5000 plus						
Pression de fonctionnement (bar)	2.0		3.0		4.0	
Débit délivré (l/h)	489		601		716	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	0.9	0.19 %	2.11	0.35 %	3.1	0.43 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	21.5	4.42 %	38.81	6.46 %	55.3	7.73 %
Portée (m) Dérive	11.5	17 %	12.5	23 %	12.5	28 %
Asperseur Nan-Dan 5022 U						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.0		3.5	
Débit délivré (l/h)	575		657		700	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	7.0	1.2 %	11.9	1.8 %	17.5	2.5 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	66.1	11.5 %	96.7	14.7 %	165.4	23.6 %
Portée (m) Dérive	10.0	18 %	10.3	20 %	10.2	16 %
Micro-asperseur Nan-Dan Hadar 7110						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.0		3.5	
Débit délivré (l/h)	87.7		99.0		127.2	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	5.3	6.1 %	7.0	7.1 %	7.6	6.0 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	54.0	61.7 %	78.0	78.8 %	94.1	74.0 %
Portée (m) Dérive	3.8	34 %	3.9	37 %	3.75	29 %
Micro-asperseur Nan-Dan Turbojet						
Pression de fonctionnement (bar)	2.5		3.0		3.5	
Débit délivré (l/h)	31.1		36.7		35.7	
Volume (l/h) & % gouttes < 0.15 mm	1.7	5.5 %	0.2	0.5 %	0.5	1.3 %
Volume (l/h) & % gouttes < 0.40 mm	14.3	46.1 %	4.82	13.1 %	7.10	21.0 %
Portée (m) Dérive	2.25	39 %	3.0	22 %	3.75	21 %

7. Bibliographie

Augier P. (1996). Contribution à l'étude et à la modélisation mécaniste-statistique de la distribution spatiale des apports d'eau sous un canon d'irrigation : Application de la méthode à la caractérisation des effets du vent sur l'uniformité d'arrosage. Thèse de doctorat, Montpellier, ENGREF: 248 p.

CSHPF (1991). Recommandations sanitaires concernant l'utilisation des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation des cultures et des espaces verts, 40 p.

Haider A. and Levenspiel O. (1989). Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles, Powder Technology, 58:63-70.

Hendawi, M. (2006). "Étude des pertes d'eau par évaporation et dérive sur un jet d'asperseur ", thèse de doctorat, Université Aix-Marseille II.

ISO-15886-3 –Irrigation equipment; Irrigation sprinklers; Characterizing of distribution and test methods.

J.-Y. Delahaye and Co. (2001). A dual-beam spectropluviometer concept. CETP (CNRS).

Mediterranean wastewater reuse (2007). Projet AQUAREC – EVK1-CT-2002-00130.

Molle, B., Tomas, S., Hendawi, M. and Granier, J., Evaporation and Wind Drift Loss during Sprinkler Irrigation influenced by Droplet Size Distribution, proposé au J.of Irrigation and Drainage, ICID, accepté en 2011.

Molle B., J.Granier and A.Drechsel (2007). A method describing precise water application intensity under a CPIS from a limited number of measurements, USCID Fourth International Conference, Sacramento, CA, October, 17p.

Molle, B. (2002). Characterising Droplet Distribution of an Irrigation Sprinkler Water Application, ICID Congress, Q50-R3.02, Montreal July 2002.

Morsi S. A. and Alexander A. J. (1972). An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, J. Fluid Mech., September 26, 55(2):193-208.

Niwasave (1999). FAIR1 CT 950088, Water, Agriculture and Environment interactions. Reducing the impacts of water application heterogeneity on: nitrates leaching, water losses and economic yields. Final Report.

Organisation Mondiale de la Santé (2006). WHO guidelines volume II :wastewater use in agriculture

http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuww/en/index.html

<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r04108/625r04108.pdf>

<http://www.ephc.gov.au/taxonomy/term/39>

8. Annexes

ANNEXE 1 : photographies des différents asperseurs étudiés



Gun Komet

Buse de 22 mm

Angle du canon de 24

Portée de 45 m à 4,5 bars

Turbine Rain Bird à secteur réglable.



EAGLE 750 S



Buse orange à triple orifice

Portée de 21 m pour une pression de 5.5 bars

Turbine RainBird à secteur réglable

Buse de 3 mm

Porté de 11 m à 3 bars



5000 plus



5022-U

Sprinkler Naan Dan

Buse avant 2,5 mm

Buse arrière (verte) 1,8 mm

Portée de 10 m à 3 bars



46 WH

RainBird 46 WH

Buse avant 4,36 mm

Buse arrière 2,38 mm

Portée de 15 m à 3,5 bars



Hadar 7110

Micro-asperseur Naan Dan

Buse bleue de 1,4 mm

Rotor (partie grise) à longue portée

Portée de 4,5 m à 2 bars



Turbojet

Micro-jet Naan Dan

Buse orange de 1 mm

Diffacteur statique à 12 jets

Portée de 2,5 m à 2 bars

ANNEXE 2 : principe de correction du rayon

Lors de chacune des mesures de granulométrie nous avons estimé l'angle moyen du nuage de gouttes par rapport à l'horizontal ainsi que l'angle du DBS, et plus particulièrement l'angle des faisceaux, à l'aide d'un niveau électronique.

Cette estimation reste subjective et liée à l'appréciation de l'opérateur. Afin de minimiser les erreurs induites par l'opérateur, il fut convenu que ce soit toujours le même opérateur qui ait en charge l'estimation de ces angles.

A partir de ces données et de propriétés trigonométriques, il a été possible de corriger le rayon, R_0 , préalablement défini à l'aide de la pluviométrie radiale (Figure 60).

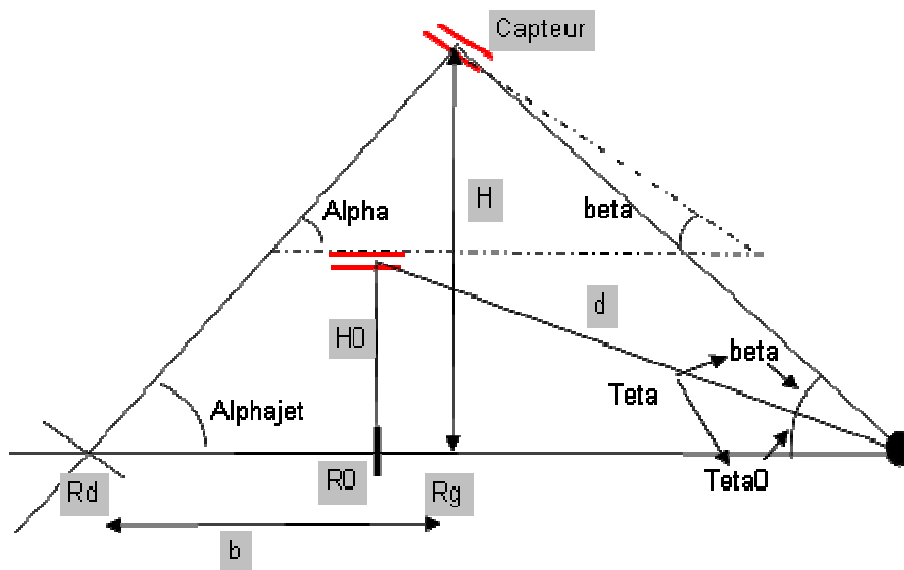


Figure 60 : représentation schématique de la correction du Rayon

Alpha représente l'angle du nuage de gouttes alors que Beta correspond à l'angle du granulomètre par rapport au sol.

R_0 et R_d sont respectivement le rayon initial et le rayon corrigé.

Cette correction permet de situer l'arrivée au sol du nuage de gouttes et donc de relier le nuage de gouttes détecté aux mesures de pluviométrie radiale.

ANNEXE 3 : présentation d'étape du travail au cours du congrès de l'ASEES (Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé) Bouc Bel Air, mai 2009

Session: Économies d'eau : Réutilisation des eaux de pluie, grises ou usées : Impacts Sanitaires et Environnementaux

*Comment définir les paramètres d'un système d'irrigation par aspersion pour l'adapter à la REU
Bruno MOLLE, Cemagref Aix en Provence – UMR G-EAU*

La réglementation de la REU en France a fait l'objet des recommandations du CSHPF de 1991, révisées en 2001 et a donné lieu à l'écriture du projet d'Arrêté du 3 juin 1994, qui n'a jamais été publié. L'extrême niveau de précaution imposé par ces recommandations a fortement limité le développement des applications de REU, le projet d'arrêté est en cours de révision depuis 2007. Dans ce cadre les Ministère de la Santé, de l'Agriculture et de l'Environnement ont demandé au Cemagref de préciser les limites d'utilisation de l'aspersion avec des EUs.

L'objectif du travail présenté ici est de préciser les bases scientifiques sur lesquelles on peut fonder des règles d'application sensées limiter les risques liés à la production d'aérosols, la dérive hors des zones cibles et le ruissellement.

Les méthodes d'application utilisables en REU doivent répondre à 3 exigences principales: une application uniforme, l'absence de sensibilité aux phénomènes de bouchage et l'absence d'effets sur les environs. Le respect de ces exigences garantit l'innocuité et l'efficacité sur le long terme des systèmes, à la fois en matière de réutilisation mais aussi en matière d'affinage du traitement des EU. L'irrigation agricole propose un certain nombre de solutions pour appliquer un liquide uniformément sur une parcelle de grande dimension, en plus des solutions développées spécialement pour les EUs. Les techniques d'aspersion sont à la fois les plus intéressantes en terme économique, moins de matériel pour couvrir une grande surface et d'uniformité, sans réclamer plus de pression que les systèmes d'irrigation localisés (goutte à goutte et micro-aspersion) qui sont très sensibles au colmatage. On a donc sélectionné une série de 7 modèles d'asperseurs couvrant la gamme des débits (50 l/h à 50 m³/h) et portées (2 m à 45 m) utilisés à la fois en agriculture et en parcs et jardins. Sur chaque modèle on a choisi un diamètre de buse réputé le plus utilisé, en liaison avec les constructeurs, que l'on a testé à 3 pressions représentatives des plages d'utilisation habituelles. Sur chaque combinaison on a mesuré la distribution radiale d'apport d'eau et la distribution de diamètre et vitesses des gouttes produites en 6 points au moins de la portée.

Pour caractériser le risque d'évaporation et de dérive on utilise les résultats d'un travail de thèse (Hendawi, 2006) sur l'évaluation des pertes par évaporation et transport en aspersion en fonction de la taille des gouttes produites. Les gouttes susceptibles de s'évaporer en totalité sont celles dont le diamètre est inférieur à 150 µm, celles susceptibles de dériver significativement sont celles de 150 à 400 µm. Chaque arroseur est donc caractérisé en terme de nombre et de volumes des particules de moins de 200 µm, susceptibles en conditions fortement évaporantes de créer des aérosols, et de 200 à 500 µm, susceptibles en conditions ventées (plus de 4 m.s⁻¹) de dériver hors de la zone cible.

Comme nous mesurons aussi la vitesse des particules, nous pourrions aussi analyser les résultats en termes d'énergie cinétique délivrée au sol et donc de risque de ruissellement induit.

On présentera les bases de cette réflexion et un exemple d'application sur un des arroseurs testés. Les autres résultats seront évoqués en fonction de l'état d'évolution de leur traitement.

Les résultats trouvés dans le cadre de ce travail trouveront des applications en REU bien sûr mais aussi sur des dispositifs d'affinage des traitements (zones de dissipation) comme sur les filtres plantés dont l'efficacité pourrait être grandement optimisée en maîtrisant mieux l'uniformité de distribution de la lame d'eau appliquée.

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Cemagref
Parc de Tourvoie
BP 44,
92163 Antony cedex
01 40 96 61 21
www.cemagref.fr