

N° d'Ordre : 04/2014-M/G.C

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE GENIE CIVIL



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

en Génie Civil

Spécialité : Hydraulique

par : Melle AISSA Hanane

THEME

***CONTRIBUTION A L'ETUDE DES EFFETS DE LA PENTE SUR LA
DISTRIBUTION DES PARTICULES DU SOL SOUS L'IMPACT DE LA
GOUTTE D'EAU***

Soutenu publiquement le : 01/02 /2014, devant le jury composé de :

Mr M. BOUHAEF	Professeur, USTHB	Président
Mr L. MOUZAI	Professeur, USTHB	Directeur de Mémoire
Mr MC. KHELLAF	Maître de conférence A, USTHB	Examineur
Mr A. SAFRI	Maître de conférence A, USTHB	Examineur
Mme K. BOUZELHA	Maître de conférence A, UMMTO	Examinatrice
Mr M. SEMIANI	ING, INRA	Invité

ملخص

إن تأثير ميل السطح على تنافر جزيئات التربة بظاهرة اللطخة شكّل اهتمام الكثير من الباحثين منذ الأزل و هذا راجع إلى صعوبة ملاحظة هذه الظاهرة تجريبياً. من خلال هذه المذكرة نقوم بدراسة العلاقة بين خصائص المطر مثل قطر القطرة و الطاقة الحركية، و خصائص التربة والمتمثلة هنا في ميل سطح التربة و تأثيره على توزيع الجزيئات المتناثرة في الأعلى و الأسفل ، وكذلك على المسافة المتوسطة للإسقاط.

ABSTRACT

The effect of slope angle on the splash detachment has been a matter of discussion for long because it has not always been clearly observed in experiments. In this paper we study the relation between rainfall characteristics such as drop diameter, kinetic energy and the soil characteristics such as the slope angle and its effect on the distribution of the detached masses up and down slope, and also on the average distance projection.

RÉSUMÉ

L'effet de l'angle de pente sur le détachement par splash a été longtemps discuté a cause de la difficulté de son observation dans les expérimentations. Dans cette article on étudiera la relation entre les caractéristiques de la pluie tel que le diamètre de la goutte et l'énergie cinétique et les caractéristiques du sol ; la pente et son effet sur la distribution des masses détachées en amont et en aval , ainsi que sur la distance moyenne de projection.

Je tiens dans un premier temps à remercier Monsieur MOUZAI, Professeur à l'USTHB, pour m'avoir confié ce travail de recherches, ainsi que pour son aide et ses précieux conseils au cours de ces années.

Toute ma gratitude envers Monsieur BOUHADDEF, Professeur à l'USTHB, pour sa disponibilité, et ses précieux conseils et aussi d'avoir corrigé le mémoire final et d'accepté d'honorer la présidence du jury.

Mes vifs remerciements pour Monsieur M.C. KHELLEAF, Maître de conférences A à l'USTHB, Monsieur A. SAFRI, Maître de conférences A à l'USTHB, Madame K. BOUZELHA, Maître de conférences A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi ousou, Monsieur M. SEMIANI, Ingénieur à l'INRA, d'avoir accepté d'examiner ce travail et honorer le jury.

Je remercie infiniment tous le staff du laboratoire d'hydraulique Lila, Cherif et Maaliou, et particulièrement Ben bachir Mohamed pour sa précieuse aide.

Je remercie mes collègues Madi, Khaled, Abd el rahmen et Mustapha, sans oublier mes chers amis Sihem, Samy et Bahia qui ont toujours été là pour m'encourager et m'aider.

Enfin ma plus grande gratitude va à ma famille qui me soutient et m'encourage depuis le début de mon cursus, et aussi à mon fiancé Djamel pour son précieux soutien moral.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	10
I. 1. Erosion hydrique et enjeux environnementaux.....	13
I.2. Processus générateur de l'érosion « Splash »	13
I.3. Splash et Battance	14
I.4. Relation entre forme et processus d'érosion par splash	14
I.5. Mise en mouvement par impact des gouttes de pluies	15
I.5.1. Genèse du phénomène de détachement par impact des gouttes de pluies.....	15
I.5.2. Transport des particules par impact des gouttes de pluies	16
I.5.3. Splash et processus de réorganisation	17
I.6. Paramètres érosifs et caractéristiques de la goutte de pluie.....	17
I. 6.1. En termes d'énergie cinétique	17
I. 6. 2. La pression d'impact de la goutte de pluie sur la surface du sol	18
I. 6. 3. La vitesse terminale de la goutte de la pluie	19
I.7. Distribution des particules rejaillies	22
I.8.1. Les facteurs topographiques influençant les processus d'érosion du sol par splash	24
II.1. Introduction.....	32
II.2. Théorie de distribution de Van Dijk (FSDF)	33
II.3. Développement du modèle « FSDF » par Leguédois et al., (2005)	33
III.1. Adaptation du montage expérimental.....	38
III.1.1. Choix et analyse de l'échantillon du sol	38
III.1.2. Préparation de l'échantillon de sol	38
III.1.3. Le dispositif expérimental	39
III.1.3.1. Le panneau d'éclaboussure.....	39
III. 1.3.2. Le bac d'eau.....	44
III.2. Mesure et procédure expérimentale	44
III.2.1. Mesure des diamètres équivalents	44
III.2.2. Mesure des paramètres de Splash	45
III.2.2. 1. Déroulement de l'expérience.....	45
III.2.2. 2. Procédure de calcul.....	46
III.2.2.2.1. Calcul de la masse apparente détachée.....	46
III.2.2.2.2. Masse détachée par impact des gouttes ou « masse de splash »	46
III.2.2.2.4. Distance moyenne de splash Λ	47
IV. 1. Calcul des diamètres équivalents des gouttes d'eau et de la fréquence de chute ...	49
IV.2. Calcul des paramètres érosifs de la goutte d'eau	49
IV.3. Caractéristiques du mécanisme de détachement du sol par effet de Splash.....	50
IV.4.2. Influence du diamètre de la goutte sur le détachement par splash.....	53
IV.4.4. Effet de la pente du sol sur le détachement par impact des gouttes d'eau.....	59
IV.4.4.1. Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente	59

IV.4.4.2.Variation de la masse apparente détachée en fonction de la pente.....	60
IV.4.4.3.Comparaison entre la masse apparente et la masse réelle détachée en amont et en aval	63
IV.4.5. EFFET DE LA PENTE SUR LA DISTRIBUTION DE LA MASSE DU SPLASH	68
IV.4.CONCLUSIONS	110
CONCLUSION GENERALE	112
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	111

Liste des tableaux

Tableau I.1	Coefficient de résistance de l'air C_d en fonction du diamètre D de la goutte dans les conditions où la pression atmosphérique est 101,3 KPa et la température de 20°C.....	17
Tableau I.2	Variation de la vitesse terminale de la goutte d'eau en fonction de la hauteur de chute (Zhou et al, 2002).....	19
Tableau III.1	Analyse chimique de l'échantillon de sol.....	35
Tableau III.2	Composition texturale de l'échantillon de sol.....	35
Tableau III.3	Dimensions des dispositifs utilisés dans les expériences menées par les différents auteurs....	38
Tableau IV.1	Diamètre équivalent des gouttes d'eau	46
Tableau IV.2	Masse de la goutte (mg) en fonction de la fréquence de chute pour différents diamètres de la goutte.....	46
Tableau IV.3	Paramètres érosifs pour différents diamètres pour un volume de 50ml.....	47
Tableau IV.4	Variation de la masse de splash en fonction du diamètre de la goutte d'eau.....	49
Tableau IV.5	Variation du taux de détachement apparent (M_{dep}), de la masse détachée ($M_{dét}$), et du taux de détachement réel (μ) en fonction du diamètre.	50
Tableau IV.6	Variation de la masse totale déposée et du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 2°.....	51
Tableau IV.7	Variation de la masse totale déposée et du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 5°.....	52
Tableau IV.8	Variation de la masse totale déposée et du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 10°.....	53
Tableau IV.9	Variation de la masse totale déposée et du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 17°.....	53
Tableau IV.10	Variation de la masse totale déposée et du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 20°.....	54
Tableau IV.11	Variation du taux de détachement apparent.....	55
Tableau IV.12	Equations de régression et coefficient de détermination de la variation du taux de détachement en fonction de l'énergie cinétique de la goutte d'eau.....	55
Tableau IV.13	Variation du taux de détachement réel avec l'énergie cinétique de la goutte.....	56
Tableau IV.14	Equations de régression et coefficient de détermination de la variation du taux de détachement réel en fonction de l'énergie cinétique de la goutte d'eau.....	56
Tableau IV.15	Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente côté Amont.....	57
Tableau IV.16	Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente côté Aval.....	57
Tableau IV.17	Variation de la masse apparente détachée en fonction de la pente côté amont.....	58
Tableau IV.18	Variation de la masse apparente détachée en fonction de la pente côté aval.....	58
Tableau IV.19	Equations de régression et coefficients de détermination.	59
Tableau IV.20	Equations et coefficients de détermination (%) de la relations entre splash et la pente (Mouzai, 1992)	59
Tableau IV.21	Comparaison des pourcentages des masses splashées en amont et en aval avec d'autres résultats pour un diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.....	60
Tableau IV.22	Mapp et μ pour un diamètre de la goutte égal à 3,7mm.....	61
Tableau IV.23	Mapp et μ pour un diamètre de la goutte égal à 4mm.....	62
Tableau IV.24	Mapp et μ pour un diamètre de la goutte égal à 4,6mm.....	63
Tableau IV.25	Mapp et μ pour un diamètre de la goutte égal à 5,6mm.....	64
Tableau IV.26	Distribution de la masse des particules rejaillies en fonction de la pente du sol pour le diamètre 3,7 mm	66
Tableau IV.27	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.....	68
Tableau IV.28	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval en fonction de la pente du sol pour le diamètre 3,7 mm	69
Tableau IV.29	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.....	71
Tableau IV.30	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont en fonction de la pente du sol pour le diamètre 4 mm	72
Tableau IV.31	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4 mm.....	74
Tableau IV.32	Distribution de la masse des particules rejaillies en fonction de la pente du sol pour le diamètre 4 mm (côtéaval).....	75

Tableau IV.33	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4 mm.....	77
Tableau IV.34	Distribution de la masse des particules rejaillies en fonction de la pente du sol pour le diamètre 4,6 mm (côté amont).....	78
Tableau IV.35	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4,6 mm.....	80
Tableau IV.36	Distribution de la masse des particules rejaillies en fonction de la pente du sol pour le diamètre 4,6 mm (côté aval).....	81
Tableau IV.37	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4,6 mm.....	83
Tableau IV.38	Distribution de la masse des particules rejaillies en fonction de la pente du sol pour le diamètre 5,6 mm (côté amont).....	84
Tableau IV.39	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 5,6 mm.....	86
Tableau IV.40	Distribution de la masse des particules rejaillies en fonction de la pente du sol pour le diamètre 5,6 mm (côté aval).....	87
Tableau IV.41	Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 5,6 mm.....	89
Tableau IV.42	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 3,7 mm côté amont.....	92
Tableau IV.43	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 3,7 mm côté aval.....	94
Tableau IV.44	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 4 mm côté amont.....	96
Tableau IV.45	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 4 mm côté aval.....	98
Tableau IV.46	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 4,6 mm côté amont.....	100
Tableau IV.47	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 4,6 mm côté aval.....	102
Tableau IV.48	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 5,6 mm côté amont.....	104
Tableau IV.49	Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 5,6 mm côté aval.....	106

Liste des figures

Figure I.1	Rejaillissement des particules sous l'impact des gouttes de pluie (Leguédou, 2003).....	13
Figure I.2	Mise en mouvement par impact des gouttes de pluie (Bobe, 2004).....	14
Figure I.3	Forces agissant sur une goutte de pluie en chute (Boudjerda, 2009).....	16
Figure I.4	Impact de la goutte sur une surface en pente.(Torri et Poesen, 1992).....	24
Figure I.4	Image représentant l'éjection des grains à partir d'un petit sillon de grain avant la propagation de la goutte à 0,004 s après l'impact initial. (Furbish et al. ,2007).....	24
Figure I.6	Diagramme de définition des vecteurs vitesses et de la fonction $V(\theta)$. Furbish et al. (2007)...	25
Figure I.7	Diagramme résumant la théorie de Furbish et Hamner (2007) concernant l'effet de la pente sur la distribution des particules rejaillies sous l'impact des gouttes de pluie.	26
Figure II.1	Méthode d'intégration. Le flux venant du pot circulaire situé à la source (gris) de rayon R et centre B , au point O à la distance l de B est intégré au-dessus de la longueur a en considérant l'arc AA' , l'angle β et le rayon $l - a$	30
Figure III.1	Séchage du sol agrégé à l'étuve.....	36
Figure III.2	Pots en PVC.....	36
Figure III.3	Photo du panneau d'éclaboussure.....	37
Figure III.4	Vue en plan du panneau d'éclaboussure.....	39
Figure III.5	Schéma du dispositif expérimental (panneau +bac d'eau).....	40
Figure III.6	Bac d'eau avec la burette et le goutteur à son extrémité.....	41
Figure III.7	Séchage à l'étuve.....	43
Figure IV.1	Distribution des particules éclaboussées (splashées) sur une pente horizontale.....	49
Figure IV.2	F Variation de la masse apparente détachée (M_{app}), de la masse totale détachée (M_{dt}), et du taux de détachement réel (μ) en fonction du diamètre de la goutte.....	51
Figure IV.3	Variation du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 2°	52
Figure IV.4	Variation du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 5°	52
Figure IV.5	Variation du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 10°	53
Figure IV.6	Variation du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 17°	53
Figure IV.7	Variation du taux de détachement apparent en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 20°	54
Figure IV.8	Variation de la masse apparente détachée (M_{app}) avec l'énergie cinétique (E_c).	55
Figure IV.9	Variation de la masse réelle détachée (μ) avec l'énergie cinétique (E_c).	56
Figure IV.10	Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente de surface (3,7mm côté amont)...	57
Figure IV.11	Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente de surface (côté aval).....	57
Figure IV.12	Variation de la masse apparente détachée (M_{app}) en fonction de la pente du sol du côté amont.....	58
Figure IV.13	Variation de la masse apparente détachée (M_{app}) en fonction de la pente du sol du côté aval.....	58
Figure IV.14	Variation de la masse apparente détachée (M_{app}) en fonction de la pente du sol du côté amont (pour le diamètre de 3,7 mm).....	61
Figure IV.15	Variation de la masse apparente détachée (M_{app}) en fonction de la pente du sol du côté aval (pour le diamètre de 3,7 mm).....	61
Figure IV.16	Variation de la masse apparente détachée (M_{app}) et de la masse réelle détachée en fonction de la pente du sol du côté amont (pour le diamètre de 4 mm).....	62
Figure IV.17	Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente du sol du côté aval (pour le diamètre de 4 mm).	62
Figure IV.18	Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente du	

	sol du côté amont (pour le diamètre de 4,6 mm).	63
Figure IV.19	Variation du taux de détachement apparent et du taux de détachement réel en fonction de la pente du sol du côté aval (pour le diamètre de 4,6 mm).	63
Figure IV.20	Variation du taux de détachement apparent et du taux de détachement réel en fonction de la pente du sol du côté amont (pour le diamètre de 5,6 mm).	64
Figure IV.21	Variation du taux de détachement apparent et du taux de détachement réel en fonction de la pente du sol du côté aval (pour le diamètre de 5,6 mm).	64
Figure IV.22	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'امت suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.	67
Figure IV.23	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.	69
Figure IV.24	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'امت suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface du sol, pour un diamètre de la goutte égal à 4 mm.	71
Figure IV.25	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 4 mm.	73
Figure IV.26	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'امت suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 4,6 mm.	75
Figure IV.27	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 4,6	77
Figure IV.28	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'امت suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 5,6mm.	79
Figure IV.29	Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale r_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 5,6 mm.	81
Figure IV.30	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 3,7 mm côté amont).	91
Figure IV.31	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 3,7 mm côté amont).	92
Figure IV.32	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 3,7 mm côté aval).	93
Figure IV.33	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 3,7 mm côté aval).	94
Figure IV.34	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4 mm côté amont).	95
Figure IV.35	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 4 mm côté amont).	96
Figure IV.36	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4 mm côté aval).	97
Figure IV.37	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 4 mm côté aval).	98
Figure IV.38	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4,6 mm côté amont).	99
Figure IV.39	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 4,6 mm côté amont).	100
Figure IV.40	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4,6 mm côté aval).	101
Figure IV.41	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 4,6 mm côté aval).	102
Figure IV.42	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 5,6 mm côté amont).	103
Figure IV.43	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 5,6 mm côté amont).	104
Figure IV.44	Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance L_i pour différentes pentes du sol (diamètre 5,6 mm côté aval).	105
Figure IV.45	Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 5,6 mm côté aval).	106

INTRODUCTION GENERALE

L'érosion des sols par l'eau est un phénomène complexe qui comprend deux sous processus complémentaires et successifs, à savoir : l'impact des gouttes de pluie et l'écoulement de surface ; ils peuvent se produire séparément ou ensemble.

A cause de la force d'impact, les particules éjectées entraînent la fermeture des pores en créant une croûte de battance qui réduit toute infiltration et déclenche rapidement un ruissellement.

Le détachement des particules se produit à la surface du sol sous l'action des gouttes de pluie, ce qu'on appelle l'effet du splash. Il résulte du rejaillissement des gouttes de pluie qui frappent le sol, mobilisent des particules du sol et les projettent à des distances pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres (Sogon, 1999).

Lorsqu'elle concerne des zones agricoles, l'érosion hydrique devient un enjeu majeur dans la société. En effet, l'érosion entraîne une dégradation et une perte du potentiel de production des sols : création de ravines qui font obstacle au travail du sol, perte nette d'éléments nutritifs et diminution de l'épaisseur du sol, ainsi que des dégâts d'ordre environnemental se manifestant par des inondations boueuses, parfois violentes, des atterrissements sur les voiries et l'arrivée d'une eau turbide contenant phytosanitaires et nutriments dans le système aquatique et les réservoirs d'eau. Elle engendre également l'envasement d'ouvrages construits par l'Homme sur le chemin de l'eau (envasement des barrages), pollution des points de captage des eaux potables, l'eutrophisation des cours d'eaux.

L'évolution des pratiques culturales, de l'occupation du sol (augmentation des cultures de printemps, diminution de la surface des prairies) et du paysage (augmentation de la taille des parcelles, disparitions des haies) semblent être des facteurs alarmants de l'érosion hydrique.

Ainsi, conçoit-on aisément toute l'importance que revêt l'étude de ce phénomène.

De nombreuses recherches ont été effectuées sur ce sujet afin de mener à des résultats bien clarifiants et fournir un maximum de données pour élargir le champ de validation des modèles élaborés dans le cadre de la lutte contre l'érosion et de limiter ses dégâts.

L'érosion du sol par effet de splash était définie par Ellisson (1944) comme deux processus séparés et successifs qui sont le détachement de particules solides, suivi par le transport de ces dernières. Ces deux sous processus sont contrôlés par le rapport de collision entre les caractéristiques de pluie et celles de la surface de sol.

Notons que l'action de ces caractéristiques affecte séparément ou ensemble ces deux sous processus. L'effet des gouttes de pluie dépend du diamètre de celles-ci, de leur vitesse, de leur pression d'impact ainsi que de leur hauteur de chute. L'effet du sol, quant à lui, dépend de deux caractéristiques principales, à savoir les propriétés de la masse de sol (texture, structure) et les propriétés de la surface de sol (angle de pente, contenu en humidité, rugosité, présence d'une couche d'eau).

Dans la présente étude, on s'intéresse particulièrement à la pente du sol jugeant que ce paramètre est d'une importance majeure dans le conditionnement de l'érosion par impact des gouttes de pluie.

Une série d'expériences a été effectuée au laboratoire pour déterminer l'effet de la pente du sol sur la distribution des particules de sol splashées en amont et en aval d'un point source sous l'impact des gouttes de pluie.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, on donnera, à travers une synthèse bibliographique, un état des connaissances actuelles portant essentiellement sur le processus d'érosion diffuse par

désagrégation mécanique, sous l'impact des gouttes de pluie, en général, et une recherche détaillée sur le phénomène de splash, en particulier, et ses interactions avec le paramètre « pente ». Cet état des connaissances permet de dégager une approche pour la caractérisation des flux de particules détachées sous l'impact des gouttes de pluie et leurs rejaillissements.

Le deuxième chapitre est consacré aux théories appliquées pour l'étude de ce phénomène. Nous essayerons ainsi, pour cerner quelque peu le domaine de validité de la théorie de Van Dijk (2002), de l'adapter à notre cas de figure. La théorie de Furbish et al. (2007), quant à elle, nous servira à expliquer la distribution des particules rejaillies en amont et en aval.

Nous présenterons, dans la troisième partie de ce mémoire, la procédure expérimentale et les méthodes mises en œuvre pour mener à bien notre étude. Cette partie comprend la description du dispositif expérimental et le déroulement des expériences menées au laboratoire.

Les résultats obtenus dans cette étude, ainsi que leurs interprétations, font l'objet de la quatrième et dernière partie du mémoire. Les investigations expérimentales sont conduites pour chaque diamètre de goutteurs utilisés et pour chaque pente étudiée, tout en mettant en exergue la distribution radiale des particules détachées suivant les directions amont et aval à partir de la source. C'est ainsi que sont alors évaluées la masse totale détachée, la masse apparente et la masse réelle détachée, ainsi que la distribution de ces particules, suivant une distance radiale du point d'impact, et la distance moyenne parcourue par ces particules.

CHAPITRE 1

Recherche bibliographique

L'objectif de ce chapitre est d'effectuer, à travers une synthèse bibliographique, une revue des connaissances nécessaires pour l'étude de l'érosion par splash. Un rappel des processus d'érosion par splash précède la présentation des principaux résultats des travaux sur ce sujet. Cette synthèse bibliographique apporte les éléments de justification des choix adoptés pour la démarche de travail.

I. 1. Erosion hydrique et enjeux environnementaux

L'érosion hydrique est un phénomène naturel essentiel de l'évolution des paysages et de la modification du relief terrestre. Elle correspond à un déplacement de matière sous l'action de l'eau. Les flux de matière générés sont transférés sur la surface continentale et conduisent à l'arasement des zones montagneuses et à la formation de riches plaines alluviales.

Lorsqu'elle concerne des zones agricoles, l'érosion hydrique devient un enjeu majeur de Société. À l'amont, l'érosion entraîne une dégradation et une perte du potentiel de production des sols : création de ravines qui font obstacle au travail du sol, perte nette d'éléments nutritifs et diminution de l'épaisseur du sol. À l'aval, les dégâts sont d'ordre environnemental avec des inondations boueuses, parfois violentes, des atterrissements sur les voiries et l'arrivée d'une eau turbide contenant phytosanitaires et nutriments dans le système aquatique et les réservoirs d'eau. Elle engendre également l'envasement d'ouvrages construits par l'Homme sur le chemin de l'eau (envasement des barrages). L'évolution des pratiques culturales de l'occupation du sol (augmentation des cultures de printemps, diminution de la surface des prairies) et du paysage (augmentation de la taille des parcelles, disparitions des haies) semblent être des facteurs alarmants de l'érosion hydrique. Ainsi, conçoit-on aisément toute l'importance que revêt l'étude de ce phénomène (Leguédois, 2003).

L'érosion des sols par l'eau est un phénomène complexe qui résulte de divers processus (détachement, transport et dépôt) causés par l'action en général combinée de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales) et de la topographie.

Ce phénomène débute par une phase de production d'éléments entraînés dans laquelle les précipitations atmosphériques jouent un rôle particulièrement important. Le sol se présente en effet sous une forme plus ou moins agrégée et c'est en grande partie sous l'effet du « splash » que les agrégats et les mottes se désagrègent et libèrent des éléments fins. L'eau entraîne ensuite, en suspension, en saltation et par traction, les matériaux détachés du sol. Elle ruisselle avec sa charge solide vers le bas des pentes où elle se concentre (Fournier, 1965).

Les gouttes de pluie heurtant un sol nu en détachent des particules qui sont éjectées dans toutes les directions. C'est le splash, un phénomène connu de longue date (De Ploey & Savat, 1968) responsable de nombreux phénomènes naturels comme la granulométrie particulière de certaines dunes de sable (Savat & Poesen, 1981), la formation de pavages désertiques (Wainwright et al., 1995) ou la disparition rapide de la rugosité générée par le travail du sol (Planchon et al., 2000).

I.2. Processus générateur de l'érosion « Splash »

Suite à l'impact d'une goutte de pluie, des gouttelettes d'eau et des fragments de sol sont éjectés de la surface et transportés radialement autour du point d'impact, avant de se déposer à la surface (Figure I.1). Ce rejaillissement d'eau et de sol est communément désigné par le terme de splash. (Quansah, 1981).

L'érosion par Splash se produit donc par l'impact des gouttes de pluies qui initient le détachement du sol. Les gouttelettes rejaillies sont alors transférées à l'extérieur du centre d'impact tandis que les solides les renfermant les portent au point d'atterrissage (Sharma, 1996).

Le splash est donc le premier processus de l'érosion hydrique. Ce phénomène de rejaillissement, sous l'impact de la goutte de pluie, déloge, compacte, détache et éjecte les particules

du sol sur une distance de quelques dizaines de centimètres. Cette distance dépend de la masse des particules et de l'angle de projection (Bouriche, 2010).

Bradford et Nearing. (1982) pensent que : le processus de l'éclaboussure (splash) commence lorsque les gouttelettes d'eau frappent la surface du sol. La force de la goutte de pluie sert à briser les agrégats et à détacher les particules de l'amas du sol. Les particules détachées sont alors éjectées pour retourner à la surface dans un état plus dispersé. (Mouzai et Bouhadeh, 2003).

D'après Hudson (1995), l'érosion par phénomène de splash débute quand les gouttes de pluie individuelles frappent la surface du sol à des vitesses allant jusqu'à 9 m/s, créant alors des forces hydrodynamiques très intenses au point d'impact.

Le processus de l'érosion de base est en premier lieu de détacher et transporter les matières du sol. Les gouttes d'eau tombantes accomplissent cela en éclaboussant les particules du sol en air (érosion par Splash), (Ellison, 1944).

El Swaify et al. (1982) démontraient que le phénomène de splash par impact de pluie est le principal instigateur d'érosion au Malawi parce qu'il détache et défait des particules du sol pour un pré-enlèvement en s'en suivant par un écoulement de surface.

I.3. Splash et Battance

L'action combinée du détachement et déplacement par splash des gouttes d'eau est probablement la raison pour laquelle on l'a souvent considéré comme le seul processus à l'origine de la battance et de l'érosion. Cependant, il ne faut pas forcément assimiler splash et dégradation structurale car le splash peut, dans certains cas, déplacer des agrégats sans qu'aucune désagrégation n'intervienne. Les particules détachées par les gouttes de pluie sont généralement des micro-agrégats ou des particules élémentaires < 100 µm. Néanmoins, le splash a un rôle déterminant dans la formation de ces croûtes ; la couche superficielle est compactée et sa rugosité diminue sous l'action des pluies. Les particules de sol très fines qui sont détachées de la surface par l'impact des gouttes, sont piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent obstruer les pores de la couche supérieure du sol et réduire considérablement le taux d'infiltration (battance). La capacité de rétention de l'eau sous forme de flaque est ainsi réduite et l'excès d'eau va se transformer plus souvent et plus rapidement en ruissellement.

L'impact de la pluie sur la surface du sol détruit les agrégats selon les mécanismes décrits précédemment ; et si la texture et la composition physico-chimique du sol s'y prêtent, la structure initiale du sol peut être totalement détruite. La surface du sol passe d'un état meuble et poreux à un état plus compact. La couche superficielle s'individualise par rapport au reste du profil et forme une croûte de battance qui diminue considérablement la perméabilité du sol. Les sols limoneux sont particulièrement touchés par ce phénomène (Boiffin, 1984).

I.4. Relation entre forme et processus d'érosion par splash

Le processus de splash peut être conceptuellement divisé en deux sous-processus : le détachement ou le délogement des particules de la masse surfacique et le transport de ces particules dans des directions aléatoires.

Ces sub-processus sont le résultat de la collision entre eau-sol.

Même si ces deux sous-processus sont des processus physiques quasi-simultanés, il est encore nécessaire de distinguer un processus qui est essentiellement dépendant du sol (la destruction) et un processus qui est essentiellement dépendant de la précipitation (le déclenchement de mouvement) d'après (Le Bissonais et Le Souder, 1995).

On distingue donc deux formes d'érosion dans lesquelles intervient le phénomène de splash de manière différente :

- L'érosion diffuse qui résulte du détachement par le splash dans une fine lame d'eau et du transport par le ruissellement.
- L'érosion par le splash qui résulte d'une combinaison de détachement par l'impact de gouttes de pluie et du transport dans l'air par ce même phénomène.

On utilise souvent, à la place du terme détachement, le terme mise en mouvement. Il a le double avantage de permettre de s'affranchir de la confusion qui existe parfois entre détachement et désagrégation, et d'insister sur la liaison avec le processus qui lui fait suite, le transport (Leguédois, 2003).

I.5. Mise en mouvement par impact des gouttes de pluies

La mise en mouvement des fragments de sol est réalisée par l'action des gouttes de pluie et du ruissellement. Classiquement, ces deux processus de mise en mouvement sont distingués (Rose, 1985). Dans la présente étude, on s'intéresse particulièrement à la mise en mouvement par impact des gouttes de pluie.

La mise en mouvement de fragments de terre, par l'impact des gouttes de pluie, est un processus qui a lieu aussi bien sur une surface de sol libre que sous une lame d'eau peu épaisse (Green & Houk, 1980).

L'impact d'une goutte sur une surface est un phénomène complexe, pour lequel les connaissances physiques fondamentales actuelles ne permettent pas de proposer un modèle de compréhension (Allen, 1988).

L'intensité de la mise en mouvement, par l'impact des gouttes, est liée à la cohésion interne du matériau qui est souvent mesurée en terme de résistance au cisaillement ou « shear strength » (Bradford et Nearing, 1982). Ce paramètre est très dépendant de l'humidité du matériau et de son état agrégé ou meuble (Bryan, 2000) et donc très variable au cours d'une pluie.

Cependant, le processus de mise en mouvement et de réorganisation du sol par impact des gouttes de pluie passe par plusieurs étapes qui peuvent être résumées comme suit :

I.5.1. Genèse du phénomène de détachement par impact des gouttes de pluies

L'impact d'une goutte de pluie percutant une surface se décompose en trois phases. Kinnell (2005) explique qu'en premier lieu la goutte de pluie entre en collision avec la surface du sol et se déforme. Dans un deuxième temps, la goutte d'eau se rompt et explose pour rejaillir sous la forme d'un disque de fluide qui s'étend radialement vers l'extérieur du point d'impact comme le montre la première image de la figure (I.1). Dans un troisième temps, de petites gouttelettes se forment et se déplacent dans l'air suivant une trajectoire parabolique pour atterrir à une distance plus ou moins éloignée du point duquel elles ont été émises. Cette dernière phase est illustrée par la deuxième image de la figure (I.1) (Leguédois, 2003).



Figure I.1 : Rejaillissement des particules sous l'impact des gouttes de pluie (Leguédois, 2003).

Dans le processus de détachement par effet de splash, l'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée mais est transformée en force de cisaillement qui provoque le détachement et le rejaillissement. L'énergie cinétique des gouttes de pluie disperse mécaniquement les particules (Kinnell, 2005).

Ces effets dépendent donc principalement de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et des propriétés de la surface du sol telles que la texture, le pourcentage de Fer et d'Aluminium, le Calcium et le Sodium échangeables, ainsi que la fraction de matière organique et le taux d'humidité du sol. La désagrégation mécanique est importante principalement lorsque le sol est humide car les agrégats ont alors une faible cohésion interne.

Le taux de détachement ainsi mesuré varie entre 10 et 20 g /m²/mm. Ces valeurs signifient que la masse totale de sédiment détaché par les gouttes de pluie représente 1% à 2% de la masse de pluie qui a percuté la surface du sol (Francis Xavier Mkanda, 2000).

I.5.2. Transport des particules par impact des gouttes de pluies

En plus de l'action de l'eau sur la désagrégation et le détachement, l'impact des gouttes de pluie peut être à l'origine d'un déplacement des particules et fragments issus de la désagrégation à la surface du sol. Ce déplacement latéral, appelé splash, constitue le principal moteur de l'évolution structurale et du déplacement de terre avant que le ruissellement ne démarre (figure I.2). Des masses très importantes de terre peuvent ainsi être déplacées sur la surface du sol, entraînant une réorganisation structurale sans qu'il s'agisse forcément d'érosion à ce stade.

Les sédiments détachés sont ainsi projetés dans toutes les directions à des distances variables où la longueur suit une loi exponentielle descendante. Cela veut dire qu'une partie considérable de la matière détachée peut être jetée à une distance de 0,5 m ou plus (Van Dijk et al., 2002) avec une valeur moyenne de 0,1 à 0,2 m .(Leguédois et al., 2005).

Pour des raisons balistiques amplement analysées (De Ploey et Savat, 1968) ont établi que les particules de sol éclaboussées peuvent voyager très loin dans la direction aval avant de heurter la surface du sol. La conséquence de ce transport différentiel est que les points bas reçoivent plus de sédiments qu'ils n'en produisent tandis que les points hauts sont érodés, menant à un processus diffusif qui égalise la surface du sol (Planchon et al., 2000). Cependant, le transport reste toute fois sélectif mais limité ; Govers et Poesen (1988) ont observé des distances moyennes de l'ordre de 20 cm.

I.5.3. Splash et processus de réorganisation

À la désagrégation et au déplacement par le splash s'ajoutent des processus de réorganisation structurale par illuviation, c'est-à-dire par entraînement des particules dans la porosité du sol, par compactage sous l'effet de l'impact des gouttes et de la succion exercée par la couche de sub-surface, et enfin par sédimentation dans les micro-dépressions. Ces processus conduisent à la fermeture de la surface et à la réduction de son infiltrabilité en formant une croûte de battance (McIntyre, 1958 ; Loch, 1994).

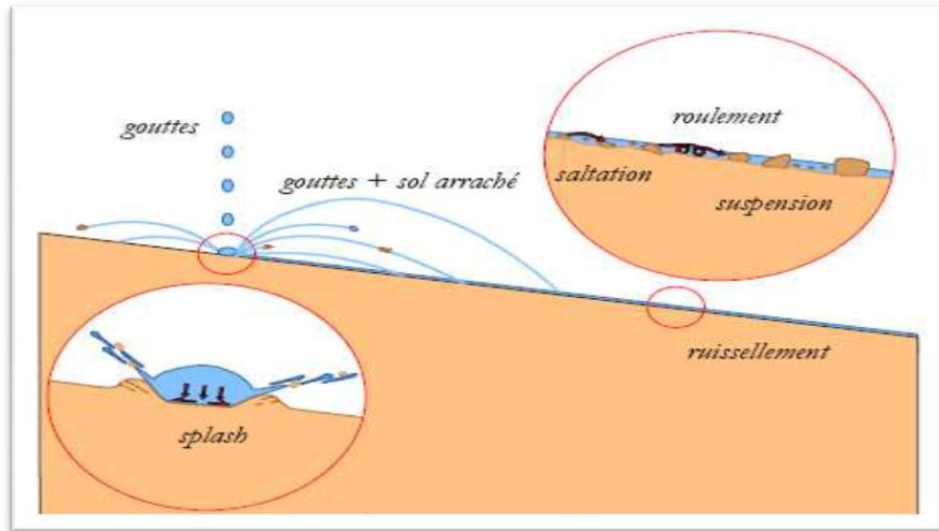


Figure I.2 : Mise en mouvement par impact des gouttes de pluie (Bobe, 2004).

I.6. Paramètres érosifs et caractéristiques de la goutte de pluie

Si la libération de l'énergie cinétique d'une goutte d'eau à son point d'impact sur le sol est suffisante, et suivant son importance et les caractéristiques de ce sol, on pourra assister à l'éclatement de la goutte d'eau sous forme de gouttelettes plus petites qui rebondissent. Il s'ensuit un détachement partiel ou total des particules du sol à l'endroit de l'impact ainsi qu'une projection de ces particules à une certaine distance de l'impact, soit à l'intérieur des gouttelettes précédentes, soit de façon séparée. C'est ce que l'on appelle le rejaillissement ou " splash " pour les auteurs anglophones. (Macary et al., 2003)

L'énergie cinétique est le facteur de base dans la détermination de l'érosivité de pluie (Zaghar, 1982). Il dépend des paramètres physiques de la pluie tels que le diamètre et la vitesse des gouttes de pluie (Zhou et al., 2002). L'énergie du splash, liée à la taille de goutte, reste un agent érosif primordial qui, en modifiant les caractéristiques de la surface du sol et les propriétés hydrauliques de l'écoulement, peut fortement influencer les processus de l'érosion en rigoles et inter-rigoles (De Ploey et Savat, 1968).

I. 6.1. En termes d'énergie cinétique

L'importance de l'énergie créée par l'impact des gouttes de pluie a été confirmée par de nombreuses études empiriques (Young et Wiersma, 1973). Comme montré par De Ploey (1972) en Belgique et Bryan (1981) en Tanzanie, l'énergie du splash, liée à la taille de goutte, reste un agent érosif primordial qui, en modifiant les caractéristiques de la surface du sol et les propriétés hydrauliques de l'écoulement, peut fortement influencer les processus de l'érosion

L'énergie cinétique KE (Joule) et la quantité du mouvement P (kg m s⁻¹) d'une goutte de pluie peuvent être calculées en utilisant les équations suivantes (Nanko et al., 2008) :

$$KE = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi}{6} D^3 \right) V^2 \quad (I.1)$$

$$P = m V = 10^3 \cdot \rho \left(\frac{\pi}{6} D^3 \right) V \quad (I.2)$$

m : masse de la goutte de pluie en (g).

ρ : densité de la goutte d'eau (1×10^6 g m⁻³).

V : vitesse de chute de la goutte d'eau (m/s).

I. 6. 2. La pression d'impact de la goutte de pluie sur la surface du sol

Une étude a été entreprise par Nearing et al. (1987) pour mesurer les pressions verticales d'impact de la goutte d'eau sur la surface du sol.

L'équation de la pression verticale P_f d'impact de la goutte d'eau sur une surface du sol est :

$$P_f = \rho_w C V / [\beta_f + \beta_p \left(\frac{\rho_p U_p}{\rho_f U_f} \right) + \left(\frac{\rho_w C}{\rho_f U_f} \right)] \quad (I.3)$$

β_f est la fraction du volume du sol dans laquelle l'onde se propage dans la structure du sol.

β_p est la fraction du volume du sol dans laquelle l'onde se propage dans le fluide qui s'écoule dans les pores.

ρ_f est la masse volumique du matériau déplacé par l'onde qui se propage dans la structure du sol.

ρ_p est la masse volumique du matériau déplacé par l'onde qui se propage dans le fluide.

U_f est la vitesse de l'onde de propagation dans la structure du sol.

U_p est la vitesse de l'onde de propagation dans le fluide qui s'écoule dans les pores.

Les résultats de Nearing indiquent que la masse volumique du sol affecte les propriétés dynamiques de cette dernière et, par conséquent, les pressions induites par l'impact de la goutte d'eau.

La pression P_e est égale à la force divisée par la superficie couverte par cette force (Mouzai et Bouhadeh, 2003).

$$P_e = F/A \quad (I.4)$$

Dans cette recherche, P_e est considérée comme étant la pression de l'érosion qu'exerce la goutte d'eau. A est la surface d'impact de la goutte avec le sol.

$$A = \pi D^2/4 \quad (I.5)$$

D est le diamètre de la goutte d'eau.

Comme indiqué dans les conclusions de Riezebos et Epema (Mouzai et Bouhadeh, 2003).

$$F = MV^2/D \quad (I.6)$$

M et V sont respectivement la masse et la vitesse de la goutte d'eau.

Il s'ensuit :

$$Pe = 4 MV^2 / \pi D^3 \quad (I.7)$$

I. 6. 3. La vitesse terminale de la goutte de la pluie

La vitesse de chute d'une goutte dans l'air atteint une valeur constante qui dépend de sa taille. Dans sa chute, la goutte en présence d'air est susceptible de se déformer. La vitesse de chute des gouttes de pluie croît avec la taille, tout en restant inférieure à 9 m/s (Reyssat, 2007).

Trois forces s'exercent sur une goutte de pluie et sont : la force de pesanteur F_g due à son poids, la poussée d'Archimède F_b due à la différence de pression et la force de résistance de l'air F_d due au frottement entre la goutte et l'air. Assimilons la forme de la goutte de pluie à une sphère de diamètre D (Chow et al., 1988).

$$\text{La force de pesanteur est : } F_g = \rho_w g (\pi/6) D^3 \quad (I.8)$$

$$\text{La poussée d'Archimède est : } F_b = \rho_a g (\pi/6) D^3 \quad (I.9)$$

ρ_w et ρ_a sont respectivement la masse volumique de l'eau et de l'air. La force de résistance est égale à :

$$F_d = C_d \rho_a A \frac{V^2}{2}. \quad (I.10)$$

C_d : est un coefficient de résistance adimensionnel, $A = (\pi/4) D^2$

A : est la section de la goutte et V la vitesse de chute.

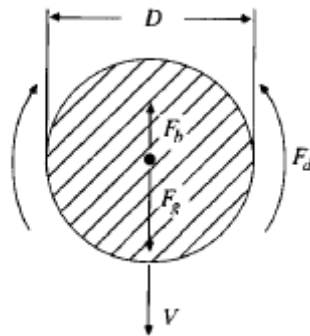


Figure I.3 : Forces agissant sur une goutte de pluie en chute (Boudjerda, 2009).

Si la goutte est libérée au repos, elle augmente pour atteindre une vitesse limite ou vitesse terminale V_t et pour laquelle les trois forces sont équilibrées :

$$F_d = F_g - F_b \quad (I.11)$$

Par conséquent $V = V_t$

$$C_d \rho_a A \frac{V_t^2}{2} = \rho_w g (\pi/6) D^3 - \rho_a g (\pi/6) D^3 \quad (I.12)$$

$$\text{Ce qui donne la vitesse : } V_t = \left[\frac{4gD}{3 C_d} \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (I.13)$$

Tableau I.1 : Coefficient de résistance de l'air C_d en fonction du diamètre D de la goutte dans les conditions où la pression atmosphérique est 101,3 KPa et la température de 20°C.

Diamètre de la goutte D (mm)	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4	5
Coefficient de résistance C_d	4,2	1,66	1,07	0,815	0,671	0,517	0,503	0,559	0,660

Selon Zhou et al., (2002) la chute d'une goutte de pluie est affectée par deux forces: la force de pesanteur (F_g) et la force de résistance (F_r).

$$F_g = m g = 1/6 \pi \rho_w D^3 g , \quad (I.14)$$

$$F_r = K \pi D V_\infty^3 . \quad (I.15)$$

La vitesse de chute d'une goutte de pluie devient constante quand les deux forces sont égales:

$$1/6 \pi \rho_w D^3 g = K \pi D V^3 \quad (I.16)$$

Donc :
$$V = (\rho_w D^2 g / 6 K)^{1/3} \quad (I.17)$$

g est l'accélération de la pesanteur égale à 9,81 m s⁻²,

D est le diamètre de la goutte de pluie en (m),

K est une constante (kg s m⁻³),

ρ_w est la masse volumique de goutte de pluie (=1000 Kg/m³),

V est la vitesse terminale de la goutte de pluie en (m s⁻¹),

Pour une goutte millimétrique tombant dans l'air à une vitesse V de l'ordre 5 m/s, le nombre de Reynolds vaut $Re = V R/\nu \sim 250$, où $\nu \sim 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ est la viscosité cinématique de l'air. Les écoulements considérés sont donc dominés par l'inertie. Dans ce régime, la viscosité peut être négligée et la force de traînée due à l'air s'écrit alors : $C_x/2 \rho_a V^2 \pi R^2$

où ρ_a est la masse volumique de l'air et le coefficient de traînée C_x proche de l'unité. L'équilibre entre les deux forces s'écrit alors (Reyssat, 2007):

$$\rho_w g R^3 \sim \rho_a V^2 R^2 \quad (I.18)$$

On en déduit la vitesse de chute :

$$V \sim \sqrt{\frac{\rho_w g R}{\rho_a}} \quad (I.19)$$

La formule empirique proposée par Atlas et Ulbrich (1977) pour calculer la vitesse de chute d'une goutte de pluie en (m/s) est la suivante :

$$V = 3,78 D^{0,67} \quad (I.20)$$

D est le diamètre de la goutte exprimé en mm. Ils précisent que cette loi est valable pour un diamètre compris entre 0,5mm et 5 mm cité par (Fox, 2004).

Les équations proposées par Beard et Pruppacher (1969) prouvent que sous des conditions standard, la pression atmosphérique (1 bar), la température de l'air (20°C) et pour des tailles de goutte de 0,1mm à 7 mm, ces équations suivent bien une équation polynômiale de troisième ordre (Van Dijk et al., 2002) :

$$V = 0,0561 D^3 - 0,912 D^2 + 5,03 D - 0,254 \quad (I.21)$$

Madden (1998) a donné une relation entre la vitesse de chute V_t et le diamètre d de la goutte comme suit :

$$V_t = 8,8 \left[1 - e^{-\left(\frac{d+0,12}{1,72}\right)^{1,34}} \right] \quad (I.22)$$

La vitesse terminale de la goutte de pluie résulte de l'équilibre entre la force gravitationnelle et la résistance de l'air. Si on assimile la goutte de pluie à une sphère rigide et indéformable, sa vitesse terminale a pour expression:

$$V = \left[\frac{4 g \rho_s}{3 \rho k} \cdot r \right]^{1/2} \quad (I.23)$$

g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2), r et ρ_s sont respectivement le rayon (m) et la masse volumique (kg/m^3) de la goutte, ρ et k sont la masse volumique (kg/m^3) de l'air et son coefficient de résistance à l'entraînement. On attribue habituellement des valeurs à k comprises entre 0,24 et 0,48 (Bultot et Coppens, 1985).

Zhou et al. (2002), ont mesuré la variation de la vitesse de la goutte en fonction du diamètre de la goutte, et de la hauteur de chute de celle-ci. Les résultats sont présentés dans le tableau I.2 ci-dessous.

Tableau I.2: Variation de la vitesse terminale de la goutte d'eau en fonction de la hauteur de chute (Zhou et al, 2002).

Hauteur de chute (m)	Diamètre de la goutte d'eau en (mm)													
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	

0,5	2,91	3,02	3,07	3,09	3,1	3,1	3,1	3,1	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11
1	3,69	4,05	4,19	4,25	4,3	4,31	4,32	4,33	4,33	4,33	4,33	4,34	4,35
1,5	4,02	4,62	4,91	5,05	5,13	5,16	5,19	5,2	5,21	5,21	5,22	5,22	5,22
2	4,29	4,98	5,41	5,64	5,75	5,82	5,85	5,88	5,9	5,9	5,91	5,91	5,92
3	4,29	5,34	6,02	6,4	6,62	6,74	6,82	6,86	6,89	6,91	6,92	6,93	6,93
4	4,29	5,48	6,32	6,85	7,16	7,35	7,45	7,52	7,57	7,6	7,61	7,63	7,64
5	4,29	5,54	6,48	7,12	7,51	7,74	7,89	7,98	8,04	8,08	8,1	8,12	8,13
6	4,29	5,57	6,56	7,27	7,73	8,01	8,18	8,29	8,37	8,41	8,44	8,46	8,48
7	4,29	5,57	6,65	7,36	7,87	8,18	8,38	8,51	8,6	8,65	8,68	8,71	8,73
8	4,29	5,57	6,65	7,42	7,96	8,3	8,52	8,66	8,76	8,82	8,86	8,89	8,91
9	4,29	5,57	6,65	7,5	8,02	8,38	8,61	8,77	8,87	8,94	8,98	9,01	9,03
10	4,29	5,57	6,65	7,5	8,06	8,43	8,68	8,84	8,95	9,03	9,07	9,1	9,12
11	4,29	5,57	6,65	7,5	8,1	8,48	8,72	8,89	9,01	9,09	9,13	9,16	9,19
12	4,29	5,57	6,65	7,5	8,12	8,51	8,75	8,93	9,05	9,13	9,17	9,21	9,23
13	4,29	5,57	6,65	7,5	8,12	8,54	8,77	8,96	9,07	9,16	9,2	9,24	9,27
14	4,29	5,57	6,65	7,5	8,12	8,54	8,79	8,97	9,09	9,19	9,23	9,26	9,29
15	4,29	5,57	6,65	7,5	8,12	8,54	8,8	8,99	9,11	9,23	9,24	9,28	9,31
A	4,29	5,57	6,65	7,5	8,12	8,54	8,82	9	9,14	9,3	9,28	9,32	9,35
B	–	–	6,58	7,41	8,06	8,52	8,86	9,1	9,25	9,3	9,3	–	–
C	–	–	6,49	7,42	8,06	8,52	8,83	9	9,09	9,15	–	–	–
D	–	–	6,68	7,41	7,99	8,46	8,75	8,96	9,08	9,13	9,24	–	–

A Vitesses terminales selon Zhou et al (2002).

B Vitesses terminales selon Laws (1941).

C Vitesses terminales selon Gunn et Kinzer (1949).

D Vitesses terminales selon Epema et Riezebos (1985).

I.7. Distribution des particules rejallies

Afin d'évaluer la distribution des particules splashées, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude du rapport entre la masse des particules splashées et la distance parcourue suivant un paramètre érosif. Ils admettent le résultat que la masse détachée m est liée par une relation de forme exponentielle avec la distance x :

$$m = a e^{-bx} \quad (I.24)$$

D'après Riezebos et Epema (1985), l'exposant 'a' diminue de 1 pour une petite hauteur de chute inférieure à 1 m, jusqu'à 0,04 pour une hauteur de chute de 13 m. Mouzai (1992) et Mouzai et Bouhadeb (2003) ont introduit le diamètre de la goutte de pluie pour déduire les valeurs de a et b. Ils ont trouvé que pour des diamètres de 3,7 mm à 5,8 mm, le coefficient 'a' augmente de 0,158 jusqu'à 0,664 alors que l'exposant 'b' diminue de 0,424 jusqu'à 0,0744.

Certains auteurs avaient préféré relier la distance de splash à la vitesse de la goutte de pluie et à l'angle d'éjection de splash avec le plan horizontal.

Deploy et Savat (1968) ont donné la formule suivante:

$$\mathbf{x} = \mathbf{v}_0 \frac{\sin^2 \theta}{g} \quad (\text{I.25})$$

Où: x : est la distance de projection.

V_0 : est la vitesse de projection.

θ : est l'angle de projection.

g : est l'accélération due à la pesanteur.

Dans le but de proposer une théorie de distribution mathématique générale qui pourrait être utilisée pour évaluer l'influence de la géométrie et de la longueur de splash, et dont toutes les autres équations dérivent par intégration de celle-ci, Dijk et al. (2002) ont développé une théorie pour la distribution de splash, connue sous le nom de «FSDF » (Fundamental Splash Distribution Function).

$$m_{\text{point}}(r) = \frac{\mu}{\Lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r} e^{-r/\Lambda} \quad (\text{I.26})$$

Avec :

$m_{\text{point}}(r)$: est la masse par unité de surface source, par unité de surface de la cible par mm de pluie ($\text{g/m}^4/\text{mm}^{-1}$) déposée dans l'anneau (i) à une distance radiale (r) à partir du point d'impact 0 jusqu'au point de dépôt.

Il existe un support empirique pour l'hypothèse qui assume que la FSDF est une équation exponentielle. Riezebos et Epma (1985) ont conduit des expériences au laboratoire en utilisant un pot de sol entouré d'anneaux concentriques de 5cm d'intervalle pour collecter les sédiments éclaboussés du pot par splash. Ils ont abouti à l'équation suivante :

$$M_{\text{ring}}(r) = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot m_{\text{point}}(r) = \frac{\mu}{\Lambda} e^{-R/\Lambda} \quad (\text{I.27})$$

Tel que $M_{\text{ring}}(r)$ en (g/m^3) est la quantité de sédiment détaché d'une petite surface source au centre d'impact et déposé sur un anneau de largeur infiniment petite à une distance radiale r (Van Dijk et al., 2002).

Dans le but de valider sa théorie, Van Dijk avait appliqué l'équation de FSDF aux données des résultats des expériences de Poesen et Torri (1988) et en a déduit la formule suivante :

$$\mathbf{m}_r = \mathbf{0,077} e^{-0,109r} \quad (\mathbf{R}^2=0,83) \quad (\text{I.28})$$

Qui est de la forme :

$$m = a e^{-br} \quad (I.29)$$

Où m_R est la masse élaboussée depuis la source. Ceci signifie que la distance moyenne de projection Λ correspond à 9,17 cm.

Par la suite, Leguédois et al. (2005) ont pu intégrer cette théorie de FSDF pour une source circulaire et ont trouvé que le coefficient a varie de 0,06 pour un sol argilo-limoneux jusqu'à 0,11 pour un sol mélangé. Ils ont même constaté que la distance moyenne de projection Λ se situe entre 4 cm et 23 cm.

Legout et al. (2005) ont trouvé que l'exposant b varie entre 0,0616 pour un sol sableux et 0,1142 pour un sol remanié. La distance moyenne de projection Λ se situe quant à elle entre 10 cm et 12 cm.

I.8. Pente du terrain et érosion par splash

Le facteur pente est l'un des facteurs gouvernant la détachabilité et le transport des particules notamment par élaboussure ; elle représente un élément très important dans la théorie d'U.S.L.E. (Universal Soil Loss by Erosion).

I.8.1. Les facteurs topographiques influençant les processus d'érosion du sol par splash

- **La raideur de la pente :** La terre escarpée est plus vulnérable à l'érosion que la terre plate pour la raison évidente que les forces érosives, telles que le splash, érodent, et transportent. Tous ont un plus grand effet sur les pentes raides (Hudson, 1995). Par conséquent, d'une façon plus marquée, il y a une plus grande érosion sur les inclinaisons de 5% à 10% comparées à l'érosion sur des inclinaisons plus douces (Evans, 1980).
- **La longueur de pente :** La longueur de la pente a un effet semblable sur les pertes en sol que l'effet de l'angle d'inclinaison. Zingg (1940) a montré que, comme la longueur de l'inclinaison augmente, les taux d'érosion aussi augmentent. Cette relation existe étant donné que sur une longue inclinaison il y a une plus grande accumulation de quantité, de vitesse, et profondeur de ruissellement (Hudson, 1995). Un tel rapport ne se produirait pas sur une plus courte pente, où l'inclinaison en pente efficace est réduite à la distance entre les terrasses du canal.
- **La forme de la pente :** Young & Mutchler (1969) ont montré qu'une pente uniforme a tendance à perdre plus de sol qu'une pente concave, mais moins qu'une pente convexe. La raison est que le plus grand volume et vitesse du ruissellement qui se produit au niveau des fins fonds des inclinaisons agit sur la partie la plus escarpée de l'inclinaison convexe, mais sur la partie la plus plate de l'inclinaison concave.

I.8.2 Pente et taille des sédiments

En étudiant l'effet de la pente sur la distribution des tailles d'agrégats, Wan et al. (1996) ont indiqué que le GMD (diamètre médian des grains) des sédiments éjectés est de 0,74 mm pour les sédiments éjectés en direction des pentes descendantes et de 0,59 mm pour ceux éjectés en direction des pentes ascendantes. Sutherland et al. (1996) ont enregistré que la masse de sol transportée augmente significativement avec la pente. Elle est inversement proportionnelle à la taille des sédiments et diminue de 0,45 mm pour les surfaces de pente de 5% jusqu'à 0,39 mm pour les surfaces de pentes de 20%.

I.8.3. Influence de la pente sur la distribution des particules rejaillies

De nombreux auteurs se sont penchés sur l'effet direct ou indirect de l'inclinaison de la pente, sur le détachement du sol par effet de Splash. Leurs résultats sont bien souvent contradictoires:

Ekern (1951) est parmi les premiers qui se sont intéressés à l'étude de ce paramètre. Il a en effet suggéré que les gouttes de pluie, qui heurtent la surface du sol, exerçaient une force impulsive à deux composantes : la composante normale N, ou composante de compression, et la composante de pente D qui est dirigée le long de la pente. Il en a déduit la formule suivante:

$$P_d = 50 + (\%) \text{ de pente} \quad (\text{I.30})$$

Où P_d est le pourcentage de matériaux splashés en direction des pentes descendantes.

Deploy et Savat (1968), quant à eux, se sont intéressés aux quantités rejaillies en amont et en aval de la source et ont constaté qu'il y avait une augmentation nette dans le transport par splash des masses détachées en aval qu'en amont avec l'augmentation de la pente.

D'autres auteurs ont donné une formule sous forme de puissance pour expliquer la relation entre la masse détachée et l'angle de pente ($m = a \cdot \sin \theta^b$) avec différentes valeurs de l'exposant. Celui-ci est approximativement égal à 1 (linéaire) pour Meyer et Wishmeire (1969), entre 1 et 2 pour Kirkby (1971), 0,75 pour Deploy (1976), 1,37 pour Ghadiri and Payne (1977) et entre 0,13 et 0,27 pour Quansah (1981).

D'après Ellison (1944), sur un sol de 10% de pente, il a constaté que 75% de matériaux détachés ont été transportés en pente descendante et 25% ont été éjectés en pente ascendante. Ceci signifie que la distribution de la masse détachée est anisotropique entre la pente descendante et la pente ascendante puisque les particules éjectées en direction de la pente descendante parcourent une distance horizontale plus grande avant de retomber sur la surface de sol comparativement à celles éjectées en direction de la pente ascendante à cause de la géométrie.

Mosley (1974), en traitant sept angles de pentes différentes pour un sol sableux, a étudié la distribution de la masse détachée avec la distance de projection pour une pluie d'intensité de 15 mm/h; il a proposé la formule suivante :

$$Y = e^{B1} + B2 \cdot B3 \cdot x \quad (R^2 = 0,95) \quad (\text{I.31})$$

Où Y est la masse, en gramme, des particules de sable splashées, x la distance de projection à partir de la source. B1, B2 et B3 sont des constantes qui varient avec l'angle de pente.

Wright (1986) a proposé un diagramme qui représente la répartition des particules sur la surface en utilisant différents angles de pente. Il a également remarqué que beaucoup de particules ont été splashées vers le bas à une distance plus grande que celles qui ont été splashées vers le haut.

Poesen (1981), quant à lui, a constaté que plus la pente augmente, plus le degré de la formation des croûtes de battance sur la surface du sol diminue. Par conséquent, il y a augmentation du détachement par le splash.

Mati (1994) a indiqué que pour un terrain de jachère non couvert, la quantité du sol splashée en direction des pentes descendantes est sept fois plus grande que celle splashée en direction des pentes ascendantes.

En fait, les gouttes détachent les particules de sol afin de niveler la surface horizontalement. Ce processus conduit à la variation de projection des particules à partir du point d'impact, parce que l'angle de projection affecte la distance de splash (Savat, 1981 ; Moeyerson et De Ploey, 1976).

Mouzai (1992), dans son étude de l'effet de l'angle de la pente sur les caractéristiques du splash, a mentionné que les particules éjectées à partir du point d'impact ont été affectées par deux types d'angles : angle de pente et angle formé entre la trajectoire et le plan horizontal. Cela explique que les particules détachées parcourent une distance plus importante avant d'arriver à la surface de pente descendante que celle d'une surface plane. Cette distance augmente également avec l'angle de pente. Il a également suggéré de décrire la relation entre la masse de sol splashée en pente descendante et l'angle de pente ($\sin\theta$) par une fonction linéaire et a constaté une bonne concordance avec les résultats d'Ekern (1951).

Mouzai (1992) a constaté que la masse des particules détachées est reliée exponentiellement à la distance de projection sous la forme suivante :

$$M = a e^{-bx} \quad (I.32)$$

Le coefficient 'a' augmente de 0.076 à 0.127 et l'exposant 'b' diminue de 0,044 jusqu'à 0,0375 pour les pentes variant de 3% à 20 % respectivement.

El-Sawaify (1996) a introduit le facteur de l'angle de pente dans la formule entre le taux de détachement et l'intensité de pluie ($E=aI^b$). Il a constaté que le taux de détachement E augmente avec l'augmentation de l'angle de pente. Il a montré que l'exposant augmente de 0,54 jusqu'à 0,98 correspondant aux pentes de 0% et 14% respectivement.

(Quansah, 1981 ; Wan et al., 1996) ont abouti à la conclusion que, quand il y a une pente générale, le flux de fragments de sol transférés par splash est cependant légèrement plus important vers l'aval que vers l'amont.

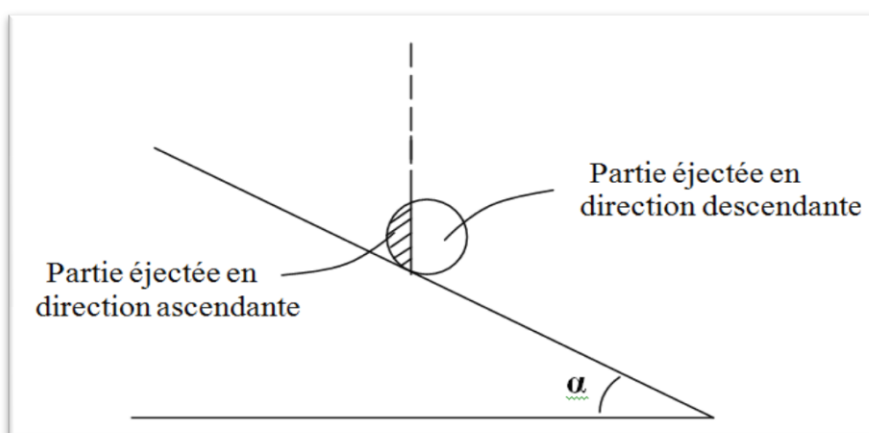


Figure I.4 : Impact de la goutte sur une surface en pente (Torri et Poesen, 1992).

Furbish et al. (2007), dans leur étude sur ce phénomène, ont utilisé un nouveau système expérimental et des conditions au laboratoire contrôlées qui consiste en l'imagerie ultra-rapide de l'impact des gouttes de pluie sur une surface cible de grains de sable.

D'après leurs observations sur le transport des grains éclaboussés par impact des gouttes d'eau, Furbish et al. (2007) proposèrent une théorie qui décrit la distribution des particules éjectées. Cette théorie suppose qu'il existe une asymétrie dans les quantités et les distances de splash: **plus de grains se déplaçant en aval** qu'en amont avec l'augmentation de la pente de surface, et en moyenne, **les grains sont éjectés plus loin en aval** qu'en amont. Ce dernier effet est initialement dû à la variation radiale de la quantité de mouvement parallèle à la surface de la goutte propagée. Le transport parallèle à la surface augmente approximativement linéairement avec la pente de sol.

En effet, une goutte d'eau heurtant la surface du sol s'étale latéralement en premier lieu, et puis son périmètre de propagation commence à s'élargir en formant un sillon de grains. L'éclaboussure de plusieurs grains nécessite l'éjection de ces derniers de la surface d'impact vers la surface d'étalement, où ils sont accélérés par la collision grain à grain. Figure (I.5). (Huang et al., 1983).

Cependant, la pente produit une influence qui induit la propagation latérale de la goutte vers l'aval, en l'associant à la composante aval de la vitesse d'impact incidente (Wright, 1986).

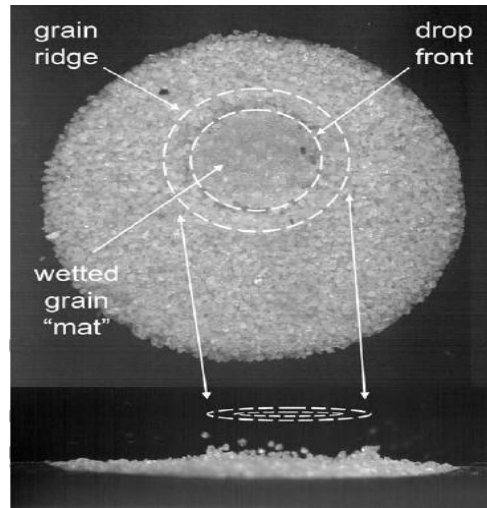


Figure I.5 : Image représentant l'éjection des grains à partir d'un petit sillon de grain avant la propagation de la goutte à 0,004 s après l'impact initial. (Furbish et al. ,2007)

La formulation théorique de Furbish et al. (2007) suppose que la proportion de grains éjectés, suivant n'importe quel petit intervalle angulaire azimutal $d\theta$, à partir du centre d'impact, est proportionnelle à la densité de quantité de mouvement de la goutte propagée avec un angle $d\theta$. C'est pourquoi la distribution des grains éjectés doit suivre la densité de probabilité décrite par l'équation suivante :

$$f(\theta) = \frac{\tau^2}{2\pi} (\cos^2\theta - \sin^2\theta) + \frac{\tau}{\pi} \cos\theta \sqrt{1 - \tau^2 \sin^2\theta} + \frac{1}{2\pi} \quad (I.33)$$

Avec $(-\pi \leq \theta \leq \pi)$

L'équation (I.33) a été obtenue par l'intégration de $V(\theta)$ sur la surface de l'empreinte $A(\theta)$ de l'impact de la goutte sur la surface.

$$V(\theta) = \tau \cos\theta + \sqrt{1 - \tau^2 \sin^2\theta} \quad (I.34)$$

Avec $-\pi \leq \theta \leq \pi$

Où : $\tau = |v_S|/|v_N| \sim \tan\beta$

Sachant que la vitesse \mathbf{v} du courant radial parallèle à la surface résulte de deux composantes l'une (\mathbf{v}_N) reliée à la composante normale à la surface de W et l'autre (\mathbf{v}_S) reliée à la composante aval de W .

Telles que $v_N = \alpha|W|\cos\beta r$,et $v_S = \alpha|W|\sin\beta s$

α est un facteur indépendant de β et de W qui caractérise le transfert vertical vers la surface parallèle, non conservateur de quantité de mouvement lors de l'impact (Wright, 1986).

La vitesse radiale est décrite par le vecteur : $\mathbf{v} = \mathbf{v}_N + \mathbf{v}_S$

$V = |V_S|/|V_N|$ Représente la grandeur du vecteur de la vitesse radiale normalisée par v_N

θ est l'angle à partir du centre d'impact où $\theta = 0$ coïncide avec la direction aval. (Figure I.6)

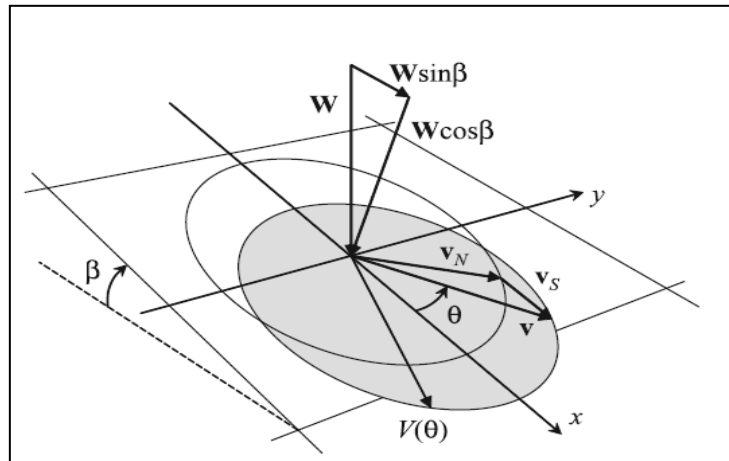


Figure I.6 : Diagramme de définition des vecteurs vitesses et de la fonction $V(\theta)$ (Furbish et al., 2007).

La présente formulation peut être résumée ainsi :

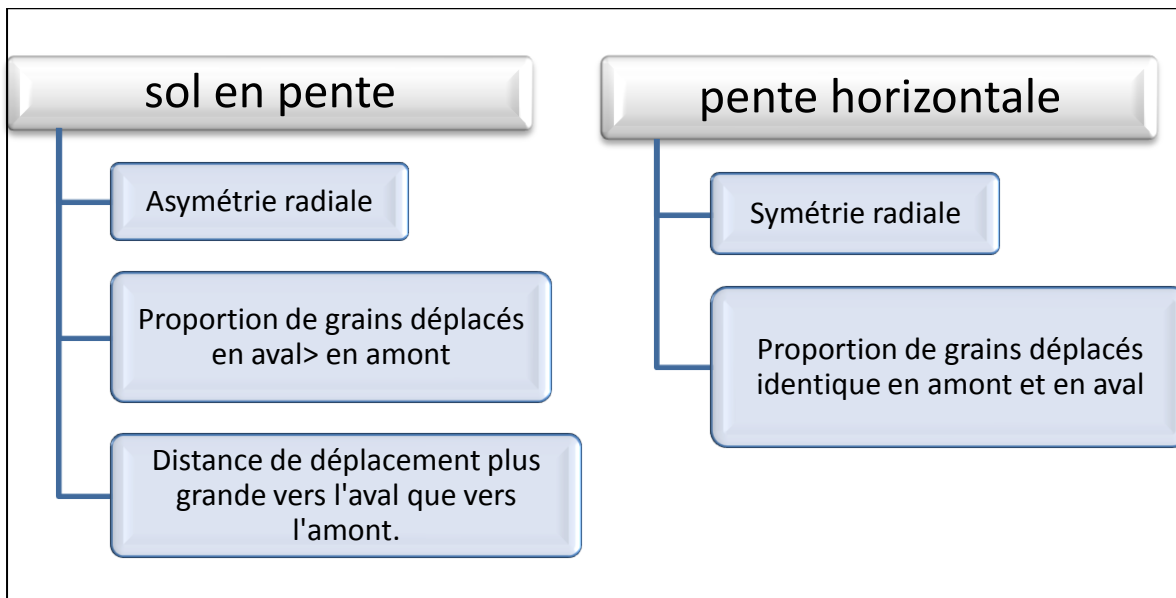


Figure I.7: Diagramme résumant la théorie de Furbish et al. (2007) concernant l'effet de la pente sur la distribution des particules rejaillies sous l'impact des gouttes de pluie.

I.8.4. Influence de la pente sur la distance moyenne de projection

Beaucoup d'auteurs ont introduit le paramètre de l'angle de la pente pour exprimer son influence sur la distance moyenne de projection.

Ghadiri et Payne (1988) ont remarqué que l'augmentation de la pente fait croître la distance moyenne de splash par perte d'énergie cinétique des gouttes de pluie.

Savat (1981) a également examiné la relation entre la pente et la distance moyenne de la masse détachée qui s'exprime sous la forme :

$$\bar{Y}_y = 0,158 - 0,301 \sin \alpha \quad (\text{I.35})$$

\bar{Y} est la distance moyenne de splash en pente descendante.

y est la distance moyenne de splash en pente ascendante et α est l'angle avec le plan horizontal.

Il a donc constaté que, plus l'angle de pente augmente, plus la distance de projection augmente. De plus, les particules splashées en pente ascendante seront ensuite transférées dans la direction de la pente descendante.

Quansah (1981) a introduit le facteur de l'angle de pente dans le calcul du transport par le splash en fonction de l'intensité de pluie et a proposé la relation suivante :

$$Q_{\text{transp}} = a I^b S^c \quad (\text{I.36})$$

Q est le transport par le splash (kg/m^2), I l'intensité de pluie (mm/h) et S l'angle de pente ($^\circ$). Il a trouvé que la valeur de c (l'exposant de l'angle de pente) est comprise entre 0,75 pour le sable et 1,35 pour l'argile.

Mouzai (1992) a constaté que la somme des angles de pente augmente le sinus de l'angle, ce qui implique l'augmentation de la distance de splash en supposant que la vitesse initiale de la goutte

est constante. Il a mentionné que la relation entre la distance moyenne d'éclaboussure et l'angle de pente suit bien une relation de forme de puissance :

$$\bar{x} = 19,49 \sin \theta^{0,0358} \quad (r^2=62,6\%) \quad (I.37)$$

Il en a déduit que la distance moyenne de projection se situe entre 17,5cm et 18,7 cm.

Furbish et al. (2007) suppose que, sous l'effet de la pente, les particules se déplacent plus loin en aval qu'en amont du point d'impact. Cela est dû principalement à la variation radiale de la quantité de mouvement parallèle à la surface de la goutte propagée. La formulation suggère que le déplacement moyen des grains en aval augmente avec la pente du terrain non linéairement même si elle est effectivement linéaire au-delà de 30°. Le déplacement moyen, mesuré par rapport à un axe horizontal, augmente non linéairement avec la pente de la surface par un facteur impliquant le cosinus de la pente.

CHAPITRE II

Théorie

II.1. Introduction

Le détachement et le transport de sol par éclaboussure est habituellement le premier pas dans la perte de sol et le transport de sédiments. Il peut être mesuré en utilisant une variété d'approches, y compris les pots de Splash, les plateaux, et les planches.

Afin de quantifier le taux de détachement et de transport par Splash, une gamme de techniques a été développée avec le temps. Sreenivas et al., (1947) était parmi les premiers à utiliser des tasses circulaires ou des entonnoirs enfoncé dans le sol pour piéger les particules éclaboussées. Ils ont considéré la masse de la matière collectée divisée par la surface de la tasse (avec rayon R , en m), m_R , comme un indicateur de taux de détachement du sol environnant.

Cette méthode a été appliquée dans beaucoup d'études suivantes, dont plusieurs ont été revues par Poesen et Torri (1988). Cependant, le taux de l'éclaboussement dans la tasse (m_R) n'est pas indépendant de la taille de la tasse, comme déjà annoncé par Rose (1960) et Bolline (1975). En outre, le rapport entre la taille de la tasse et le taux de splash est aussi influencé par la distribution des distances à travers lesquelles les particules éclaboussées migrent.

Les alternatives aux tasses circulaires incluent des panneaux de l'éclaboussement (Ellison, 1944) et plateaux (Quansah, 1981; Savat et Poesen, 1981 ; Mouzai, 1992 ; Leguédois et al., 2005). Dans chaque cas, la quantité de splash est exprimée soit par unité de surface du plateau ou par la longueur. Les résultats ne sont pas encore aisément convertis au taux réel de détachement (η) parce que les quantités de sédiment qui arrivent dans les collecteurs dépendent aussi des distances de distribution à travers lesquelles les particules éclaboussées sont éjectées.

En résumant, le taux de détachement apparent issu des expériences menées sur les tasses, plateau, ou du panneau de splash, doit être considéré comme étant mal défini, et les expériences spécifiques ne sont pas applicables sur les situations au champ, à moins que la géométrie de l'expérience et la distribution spatiale des particules éclaboussées autour de leurs sources soit prise en considération.

Reconnaissant ceci, Farrell et al. (1974) ont avancé une théorie qui décrit l'influence de la géométrie sur les mesures de l'éclaboussement. L'application pratique de leur théorie a été limitée initialement parce que peu d'information existe au sujet de la distribution spatiale des particules éclaboussées. Cependant, la distribution spatiale des particules arrachées a été mesurée dans les études de Poesen et Savat (1981), Riezebos et Epema (1985), Mouzai et Bouhadeh (2003), Mouzai et Bouhadeh (2011).

II.2. Théorie de distribution de Van Dijk (FSDF)

La théorie, développée par Van Dijk et al. (2002), est basée sur l'hypothèse que la distribution spatiale des particules détachées à partir d'un point d'impact peut être décrite par une fonction exponentielle décroissante qu'on appellera la fonction fondamentale de la distribution de l'éclaboussement.

Dans cette théorie, plus connue sur le nom de « Fundamental Splash Distribution Function », ou FSDF, l'équation comporte deux paramètres seulement : la masse réelle détachée par splash « μ » et la distance moyenne de projection « Λ ».

$$m_{\text{point}}(r) = \frac{\mu}{\Lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r} e^{-r/\Lambda} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$m_{\text{point}}(r)$: qui est la masse par unité de surface source, par unité de surface de la cible, par mm de pluie ($\text{g}/\text{m}^4/\text{mm}^{-1}$) déposée dans l'anneau (i) à une distance radiale (r) à partir du point d'impact 0 jusqu'au point de dépôt.

Van Dijk et al. (2002) ont constaté qu'il existait une différence entre la masse collectée sur la surface de projection et la masse réelle détachée par splash, ces deux paramètres étant liés par la distance moyenne de projection Λ de l'équation généralisée (II.1).

II.3. Développement du modèle « FSDF » par Leguédois et al., (2005)

Leguédois et al., (2005) ont pu développer analytiquement cette théorie pour obtenir une formule qui valide l'équation de FSDF pour une surface d'impact circulaire. Cela a été possible par l'intégration de l'équation (II.1) sur une surface d'impact circulaire.

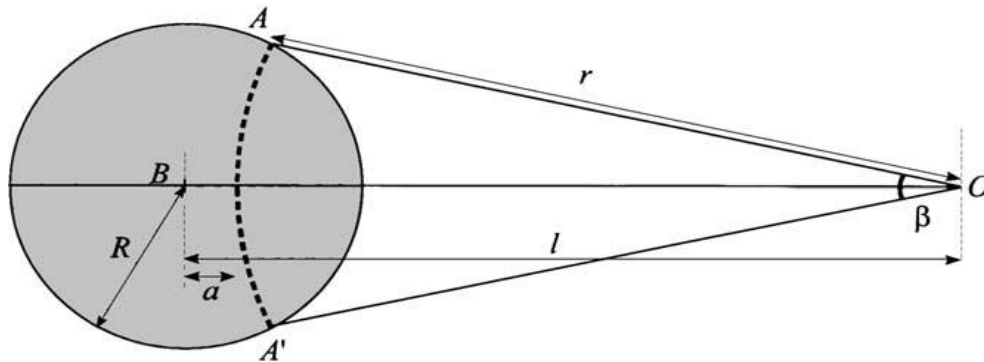


Figure II.1 : Méthode d'intégration. Le flux venant du pot circulaire situé à la source (gris) de rayon R et centre B , au point O à la distance l de B est intégré au-dessus de la longueur a en considérant l'arc AA' , l'angle β et le rayon $l - a$.

En considérant l'arc AA' de rayon $l-a$ et un angle β , l'intégration de l'équation (II.1) sur l'arc AA' donne :

$$m_{\text{arc}} = \beta \frac{\mu}{2 \cdot \pi \cdot r} e^{-(l-a)/\Lambda} \quad (\text{II.2})$$

m_{arc} est la masse (par unité de longueur de la source par unité de surface cible par mm de pluie en ($\text{g}/\text{m}^3/\text{mm}$) générée par l'arc AA' et déposée au point O .

L'intégration de cette équation sur le diamètre du pot donne :

$$m_{cup} = \int_{-R}^R \left[\beta(a) \frac{\mu}{2\pi\Lambda} e^{(-\frac{l-a}{\Lambda})} \right] da \quad (II.3)$$

m_{cup} est la masse par unité de surface cible par mm de pluie collectée au point '0' détachée de la surface du pot ($g/m^2/mm$).

R est le rayon du pot de surface circulaire (m).

β est l'angle de vue à partir du point de dépôt 0.

Λ est la longueur moyenne d'éclaboussure (m).

l est la distance du centre de la source B au point du dépôt 0 (m).

a est la différence entre la distance l et la distance du point 0 à l'arc.

L'équation (II.3) semble ne pas avoir de solution analytique car β dépend de a . Cependant, les pots ayant les mêmes surfaces et le même angle de vue du point '0' peuvent produire des flux similaires de particules vers le point '0', en dépit des détails de leur forme. Transcrivant ce point intuitif dans l'équation (II.3) conduit à l'approximation de la valeur moyenne $\hat{\beta}$ de $\beta(a)$ dans l'intervalle d'intégration, ce qui donne l'équation (II.4), en faisant ressortir $\hat{\beta}$ de l'intégrale:

$$\hat{m}_{cup} = \hat{\beta} \int_{-R}^R \left[\frac{\mu}{2\pi\Lambda} e^{(-\frac{l-a}{\Lambda})} \right] da \quad (II.4)$$

\hat{m}_{cup} est une approximation de m_{cup} .

$\hat{\beta}$ est la valeur moyenne de $\beta(a)$ dans le domaine d'intégration de l'équation (II.4).

L'intégration de l'équation (II.4) donne alors l'équation (II.5) et après factorisation des termes qui ne dépendent pas de a :

$$\hat{m}_{cup} = \hat{\beta} \frac{\mu}{2\pi} \left[e^{\frac{R}{\Lambda}} - e^{-\frac{R}{\Lambda}} \right] . e^{-l/\Lambda} \quad (II.5)$$

La prochaine étape est le calcul de $\hat{\beta}$. Pour cela, une approximation a été nécessaire. il est alors proposé l'équation (II.6) telle que:

$$\hat{\beta} = \frac{\pi}{2} \arcsin\left(\frac{R}{l}\right) \quad (II.6)$$

Notons que $(\arcsin R/l)$ est la valeur max de $\frac{\beta}{2}$ qui se produit lorsque OA est tangente à la surface de la source, lorsque l'angle \widehat{OAB} est un angle droit (voir figure II.1).

En combinant les équations (II.5) et (II.6), on aboutit à l'équation (II.7) qui est l'approximation analytique de l'intégration de l'équation exponentielle FSDF (équation II.1) pour des pots d'éclaboussure circulaires de rayon R.

$$m_{cup} = \frac{\mu}{4} \left[e^{(R/\Lambda)} - e^{-(R/\Lambda)} \right] . \arcsin(R/l) . e^{-(l/\Lambda)} \quad (II.7)$$

Afin de vérifier l'exactitude de l'équation (II.7), Leguédois et al.(2005) ont développé une intégration numérique de l'équation (II.1) dans le cas d'une source de surface circulaire en utilisant la transformée de Fourier pour résoudre l'équation. Ce qui a abouti à l'équation (II.8), qui est le logarithme de l'équation (II.7) :

$$\text{Log } m_i = \log \frac{\mu}{4} + \log [e^{(R/\Lambda)} - e^{-(R/\Lambda)}] + \log(\arcsin(R/l)) - li/\Lambda \quad (\text{II.8})$$

Qui convient à une régression linéaire des moindres carrés des données expérimentales déduites à partir de l'équation (II.1). On obtient alors l'équation (II.9) :

$$\log m_i^* = B - \frac{1}{\Lambda} \cdot l_i \quad (\text{II.9})$$

Tel que :

$$\log(m_i^*) = \log(m_i) - \log[\arcsin(R/l_i)] \quad (\text{II.10})$$

Et :

$$B = \log \frac{\mu}{4} + \log [\exp(R/\Lambda) - \exp(-R/\Lambda)] \quad (\text{II.11})$$

m_i^* correspond au flux mesuré du dépôt m_i d'éclaboussure normalisé par l'angle $\arcsin(R/l_i)$. l_i est la distance radiale moyenne du centre de la source au centre de l'anneau i (m).

La distance moyenne de projection Λ est alors déduite à partir de la pente de la droite de régression de l'équation (II.9) et indépendamment de li . Une fois Λ (Λ la distance moyenne de projection) connue, la masse réelle détachée (μ) peut être déduite de l'équation (II.12).

$$\mu = \frac{4 \times e^{-B}}{[e^{(R/\Lambda)} - e^{(-R/\Lambda)}]} ; \quad (\text{Leguédois et al., 2005}) \quad (\text{II.12}) .$$

II.4. Application de la théorie de Leguédois et al. sur une surface cible semi-circulaire :

Le modèle développé par Leguédois et al. (2005) se base sur la théorie de l' « FSDF » comme il a été précédemment mentionné. Cependant, ce modèle est valable pour une surface cible (surface de dépôt) de forme circulaire. Or le panneau que nous utilisons pour notre étude expérimentale est semi-circulaire, cela n'affectera en rien le cas d'une pente horizontale vu que nous supposons que les flux rejaillis vers l'amont et vers l'aval sont égaux. Lorsqu'on change la pente, il va falloir quantifier le flux amont et le flux aval individuellement, car l'intervention de la pente affectera la distribution du splash, et c'est ce point là que nous cherchons à prouver par la présente contribution.

En se basant sur l'équation générale de Van Dijk et al. (2002) (l'équation (II.1)), qu'on appliquera sur une surface cible semi-circulaire, on obtient :

$$m_{\text{point}}(r) = \frac{\mu}{\Lambda \cdot \pi \cdot r} e^{-r/\Lambda} \quad (\text{II.13})$$

$m_{\text{point}}(r)$ est la masse par unité de surface source, par unité de surface de la cible par goutte de pluie, déposée dans l'anneau (i) à une distance radiale (r) à partir du point d'impact 0 jusqu'au point de dépôt.

Et en suivant le développement de Leguédois et al. (2005), on obtient :

$$\text{Log } m_i = \log \frac{\mu}{2} + \log [e^{(R/\Lambda)} - e^{-(R/\Lambda)}] + \log(\arcsin(R/l)) - li/\Lambda \quad (\text{II.14})$$

qui convient à une régression linéaire des moindres carrés des données expérimentales déduites à partir de l'équation (II.14).

$$\log m_i^* = C - \frac{1}{\Lambda} \cdot l_i \quad (\text{II.15})$$

soit :

$$\log(m_i^*) = \log(m_i) - \log[\arcsin(R/l_i)] \quad (\text{II.16})$$

Et :

$$C = \log \frac{\mu}{2} + \log [\exp(R/\Lambda) - \exp(-R/\Lambda)] \quad (\text{II.17})$$

m_i^* correspond au flux mesuré du dépôt m_i d'éclaboussure normalisé par l'angle $\arcsin(R/l_i)$. l_i est la distance radiale moyenne du centre de la source au centre de l'anneau i (m).

La distance moyenne de projection Λ est alors déduite à partir de la pente de la droite de régression de l'équation (II.15) et indépendamment de l_i .

La masse réelle détachée (μ) peut être tiré de l'équation (II.17).

$$\mu = \frac{2 \times e^{-C}}{[e^{(R/\Lambda)} - e^{(-R/\Lambda)}]} \quad (\text{II.18}).$$

II.5.Conclusion :

La théorie de Van Dijk et al. (2002), développée par Leguédois et al. (2005), sera prise comme la base sur laquelle s'appuie la présente étude. Cette théorie nous permettra d'appréhender le mécanisme de détachement par splash, par la déduction des caractéristiques de ce dernier, qui sont la masse réelle détachée et de la distance moyenne parcourue.

CHAPITRE III

Adaptation du montage expérimental

Ce chapitre a pour objet de présenter les différents équipements utilisés et d'expliquer en détails la procédure expérimentale suivie au laboratoire, de la préparation du sol jusqu'à la mesure des masses éclaboussées et des distances moyennes de splash en faisant varier dans un premier temps la pente du sol et dans une deuxième étape le diamètre de la goutte d'eau. Le dispositif expérimental, ainsi que la procédure suivie, ont été sélectionnés à partir de la recherche bibliographique après quelques modifications afin d'améliorer notre travail et de parvenir à de nouveaux résultats.

III.1. Adaptation du montage expérimental

III.1.1. Choix et analyse de l'échantillon du sol

L'échantillon de sol a été prélevé dans une parcelle agricole de l'Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles (ITCMI, Staouali Alger) en faisant particulièrement attention à éviter les zones susceptibles d'être perturbées (bordures de parcelle, passages de tracteur,...). La période de prélèvement a été choisie en évitant les périodes d'intempéries (des conditions hydriques extrêmes). Le prélèvement a été réalisé dans le sens du labour sur une profondeur de 15 cm.

Le choix d'un sol sablonneux agricole a été fait afin de disposer d'un matériau de propriétés structurales et texturales convenables et variés par rapport aux études antérieures.

L'analyse physique et chimique du sol, effectuées au laboratoire de science du sol de l'Institut National de la Recherche Agronomique d'Alger (INRA), montre les résultats qui sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau. III.1 : Analyse chimique de l'échantillon de sol.

pH	CE mmhos/cm	CaCO ₃ Total %	CaCO ₃ Actif %	N ₂ Total %	K meq/100g	P ppm	C %	MO %
8,59	0,37	14,40	1,62	0,11	0,195	150	2,38	4,10

Tab.III.2 : Composition texturale de l'échantillon de sol.

Argile %	Limon fin %	Limon grossier %	Sable fin %	Sable grossier %
7,21	6,39	5,18	19,14	62,08

III.1.2. Préparation de l'échantillon de sol

1. Le sol agricole a été examiné et dépouillé de racines et de gros cailloux afin d'obtenir une structure homogène, sans pour autant avoir recours au tamisage afin de garder l'aspect naturel du sol.

2. Dans un deuxième temps, le sol traité a été séché à l'étuve à 105°C pendant 24h jusqu'à obtenir une masse constante. Il suffit en général de 16h à 24h pour sécher la majorité des sols jusqu'à obtenir une masse constante et cela pour que l'humidité du sol n'affecte pas la consistance de ses particules.



Figure III.1 : Séchage du sol agrégé à l'étuve.

4. L'étape suivante de notre procédure consiste à remplir les pots avec le sol préparé dans l'étape précédente et, afin d'éviter l'accumulation d'eau dans le pot et favoriser l'infiltration, du coton a été déposé au fond du pot.

Les pots utilisés sont des pots en PVC de forme cylindrique dont les dimensions sont :

Diamètre : 4cm, Hauteur : 5cm



Figure III.2 : Pots en PVC.

5. Les échantillons sont pesés avant et après exposition à l'éclaboussure et également après séchage afin de vérifier les quantités rejaillis des pots et celles restantes et cela pour chaque expérience.

III.1.3.Le dispositif expérimental

Afin de mener une investigation du processus de rejaillissement « splash », un dispositif expérimental a été mis en place et composé principalement par :

III.1.3.1.Le panneau d'éclaboussure

C'est une planche horizontale en PVC dur en forme d'un demi-cercle avec un rayon maximum de 1 mètre divisé en 19 compartiments concentriques dont la largeur augmente du centre

vers la périphérie entourant une zone source de 12,56 cm² (un cercle de 4cm de diamètre) servant à collecter les particules solides éjectées par les gouttes d'eau.

Les rebords des compartiments ont la même hauteur que le pot posé au centre du panneau. A l'extrémité de chaque anneau, on a percé un petit trou afin de faciliter la collecte des particules déposées dans chaque compartiment. L'espacement entre les anneaux augmente depuis la source jusqu'au dernier anneau. Il faut noter que le panneau a été peint en blanc afin de bien distinguer les fragments de sol à l'œil nu. (voir Figure III.2)

La variation de la pente du panneau est possible par l'installation de trois tiges filetées ; deux aux extrémités du panneau et une au centre afin de contrôler l'angle de la pente et son orientation (amont /aval).

Les bords externes du panneau ont été protégés par une bâche plastique afin de récolter les particules rejaiillies à des distances dépassant la longueur du panneau et d'éviter ainsi toute perte inutile de matériau.

On a opté pour une géométrie semi circulaire de la région de collecte car, sur une surface plane, le déplacement des particules par l'impact des gouttes de pluie est distribué uniformément dans toutes les directions. Cela veut dire que les particules du sol sont projetées avec une symétrie circulaire autour de la surface cible.



Figure III.3 : Photo du panneau d'éclaboussure.

Cet appareil est mis en place pour évaluer le poids des particules de sol détachées à partir du centre suite à l'impact des gouttes d'eau, ainsi que la distance moyenne parcourue par ces particules (Mouzai et Bouhadeh, 2003). Ce dispositif est semblable à celui décrit par Riezebos et Epema (1985) et à celui de Mouzai (1992), et à celui utilisé par Mouzai et Bouhadeh (2003) qui ont, par la suite (en 2011), amélioré l'équipement en changeant la forme du panneau en passant d'un quart de cercle à un demi cercle, ce qui permet d'avoir une plus grande surface de récolte des particules rejaiillies. Ce même dispositif a été repris par Boudjerda (2009). Leguédois et al. (2005) et Legout et al. (2005) ont par contre utilisé un panneau circulaire avec des compartiments concentriques autour

du pot, ce qui est aurait été plus adéquat à notre présente étude car nous cherchons à évaluer le taux d'éclaboussure en amont et en aval du point d'impact.

Tableau III.3 : Dimensions des dispositifs utilisés dans les expériences menées par les différents auteurs.

Auteur	Diamètre du pot (cm)	Hauteur de chute (m)	Type de précipitation	Système de collection de la masse détachée
Alddurah et Bradford (1981)	16	9	goutte d'eau	Récipient cylindrique
Morgan (1981)	D = 10 h = 2,5	-	Précipitations de pluie	Récipient cylindrique D = 30 cm, H = 10 cm
Riezebos et Epema (1985)	8	Varie de 0,5 à 13	Goutte d'eau	Panneau d'un quart de cercle de treize anneaux concentriques de rayon 1m
Proffit et al. (1991)	4,2	9	Précipitations simulées	Récipient en plastic autour de la tasse
Mouzai (1992)	8	8	goutte d'eau	Panneau d'un quart de cercle de treize anneaux concentriques de rayon de 1m
Salle et Poesen (2000)	5	-	Précipitations simulées	Récipient cylindrique
Legout et al. (2003)	4,6	6	Précipitations simulées	Panneau circulaire de six anneaux concentriques
Mouzai et Bouhadeb (2003, 2011)	4	8	goutte d'eau	Panneau d'un demi-cercle de treize anneaux concentriques de rayon de 1 m
Leguédois et al. (2005)	4,8	3,5	Précipitations simulées	Panneau circulaire de sept anneaux concentriques (D=90cm)
Kazuki Nanko et al., (2008)	10	-	Précipitations simulées	Récipient en plastique autour du pot D = 20 cm, H = 20cm

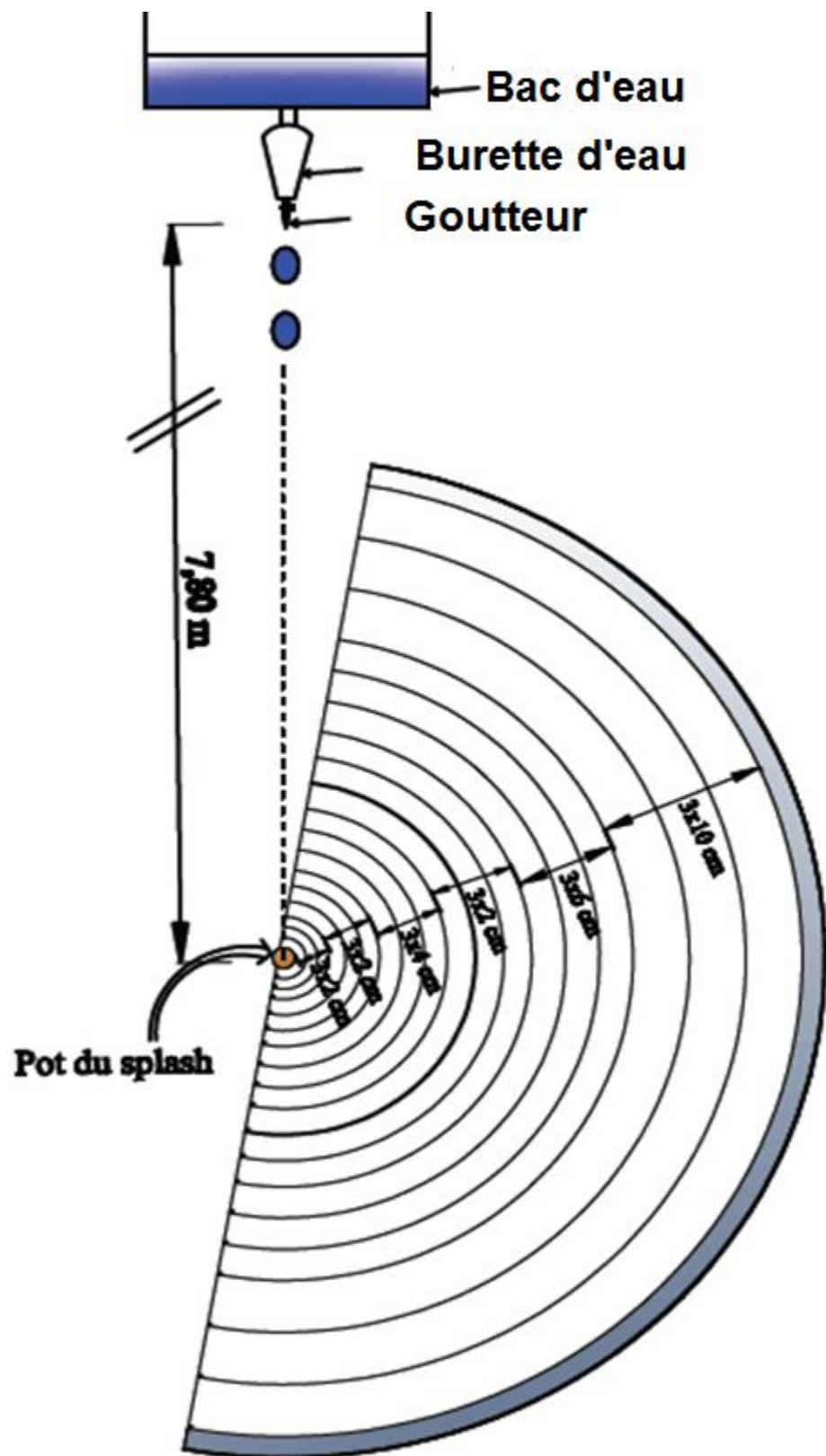


Figure III.5 : Schéma du dispositif expérimental (panneau +bac d'eau).

III. 1.3.2. Le bac d'eau

Un bac d'eau d'une longueur de 50 cm, une largeur de 50 cm et une profondeur de 35 cm a été fixé au plafond pour alimenter une burette d'une capacité de 125 ml servant à produire des gouttes d'eau.

Pour varier le diamètre de la goutte, des cônes en plastic (goutteurs) sont fixés à la sortie de la burette. Ce dispositif est placé à une hauteur de 7,80 m du sol car, d'après Laws (1941), la vitesse terminale de la goutte tombant de cette hauteur atteint 95% de sa valeur réelle pour un diamètre de 5,6 mm jusqu'à 99 % pour un diamètre de 2,3 mm.



Figure III.6 : Bac d'eau avec la burette et le goutteur à son extrémité.

III.2. Mesure et procédure expérimentale

III.2.1. Mesure des diamètres équivalents

Le choix des diamètres équivalents des gouttes de pluie s'est fait sur la base d'une série d'expériences qui ont été réalisées pour aboutir au choix final des goutteurs.

Des gouttes d'eau de différents diamètres ont été produites à l'aide des cônes en plastic (capillaire). En utilisant une balance électronique sensible, la masse moyenne (apparente) d'une goutte a été calculée en divisant la masse de plusieurs gouttes récoltées immédiatement après échantillonnage, par le nombre de ces gouttes. Le diamètre équivalent de la goutte a été calculé par de la formule utilisée auparavant par de nombreux chercheurs (Riezebos et Epema, 1985 ; Mouzai, 1992 ; Mouzai et Bouhahef, 2003) :

$$Deq = \sqrt[3]{\left[\frac{6.M}{\pi \cdot (\rho_e - \rho_a)} \right]} \quad ; \text{ (Mouzai et Bouhadef, 2003)} \quad \text{(III.1)}$$

M est la masse de la goutte d'eau collectée en kg .

ρ_e est la masse volumique de l'eau = 1000 kg/m³

ρ_a est la masse volumique de l'air = 1,3 kg/m³

D_{eq} est le diamètre équivalent de la goutte d'eau en mm.

Après le test de plusieurs gouteurs d'eau, nous avons sélectionné quatre diamètres des gouttes d'eau qui sont : 3,7 mm ; 4,0 mm ; 4,6 mm ; 5,6 mm.

III.2.2. Mesure des paramètres de Splash

III.2.2. 1. Déroulement de l'expérience

➤ Préparation du dispositif

Avant chaque série d'expériences, les pots sont remplis de sol jusqu'au bord, pesés et ensuite placés un par un au centre du dispositif. Pour chaque expérience, 5 pots ont été utilisés afin de récolter une masse suffisante de particules de sol détachées. Sur chaque pot, on instille 20 ml d'eau à une température d'environ 20°C avec une fréquence de deux gouttes par seconde. Chaque expérience est répétée 6 fois.

➤ Simulation des gouttes de pluie

Le pot est placé au centre du panneau et soumis à l'exposition des gouttes d'eau. La durée de l'exposition a été choisie de façon à ce que la surface du sol reste toujours au même niveau que les bords du pot afin d'éviter l'altération du processus d'éclaboussure par les parois.

➤ Variation de la pente

On a fait varier la pente de 0°, 2°, 5°, 10°, 15° jusqu'à 20° à l'aide des tiges filetées placées sur les deux côtés du panneau et au centre. Les pentes sont sélectionnées de la recherche bibliographique (Evans, 1980 ; Mouzai, 1992 ; El-Sawaify, 1996 ; Le Bissonais, 2005).

➤ Récolte des masses rejaillies et mesure

Après chaque essai, les particules détachées à partir de la cible et déposées sur le panneau sont lessivées et récoltées de chaque compartiment avec une pissette dans des bécards. Le mélange eau-particules est alors filtré et séché à une température de 105 °C pendant 24 h dans l'étuve et enfin pesé avec une balance électronique précise (10⁻⁴).

Les quantités de sol restantes dans les 5 pots après chaque expérience ont été séchées à l'étuve jusqu'à stabilisation de la masse du contenu du pot, et pesées avant et après pour pouvoir ainsi mesurer la quantité réelle détachée et la comparer ainsi avec celles collectées sur le panneau d'éclaboussure et aussi avec le taux réel de splash calculé par l'équation de Van Dijk .



Figure III.7 : Séchage à l'étuve.

III.2.2. 2. Procédure de calcul

III.2.2.2.1. Calcul de la masse apparente détachée

La masse apparente est la quantité de sol détachée depuis la source et rejaillie sur le panneau de splash, calculée par la formule suivante publiée par (Mouzai et Bouhadeb, 2011) :

$$M_{app} = \frac{\sum M_i}{A_{pot} \cdot n_{goutte}} \quad (III.2)$$

Avec :

M_i : masse totale collectée dans le panneau d'éclaboussure (g), après lessivage et séchage.

A_{pot} : surface totale de détachement (m^2).

$n_{gouttes}$: nombre des gouttes tombantes.

III.2.2.2.2. Masse détachée par impact des gouttes ou « masse de splash »

La masse des particules détachées depuis la source est calculée par la formule de (Mouzai et Bouhadeb, 2011) adaptée :

$$m_i = \frac{M_i}{\pi \cdot l_i \cdot w_i} / N_{goutte} \quad (III.3)$$

m_i : Masse des particules splashées collectées dans le compartiment i et normalisée par unité de surface de l'anneau et par goutte d'eau en ($g/m^2/rad/goutte$).

M_i : Masse déposée dans l'anneau i (g).

l_i : Distance radiale du centre de la source au centre de l'anneau i (m).

w_i : Largeur de l'anneau i (m).

N_{goutte} : Nombre de goutte.

III.2.2.2.3.Masse totale détachée des pots de splash

La masse totale détachée ($M_{dét}$) est quantifiée après séchage et pesée de la masse restante dans les 5 pots après chaque simulation.

$$M_{dét} = \frac{M_{avant} - M_{après}}{A_{cup} \times N_{goutte}} \quad (III.4)$$

M_{avant} : est la masse des pots de splash pesée avant simulation (g)

$M_{après}$: est la masse des pots de splash pesée après simulation, et séchage (g).

A_{pot} : surface totale de détachement (m^2).

$N_{gouttes}$: nombre des gouttes tombantes.

III.2.2.2.4.Distance moyenne de splash Λ

III.2.2.2.4.1. Pour le cas d'une surface horizontale

La distance moyenne de projection Λ est calculée à partir de la pente de la droite de régression (Leguédois et al., 2005)

$$\log m_i^* = B - \frac{1}{\Lambda} \cdot l_i \quad (III.5)$$

où m_i^* correspond au flux mesuré à partir du dépôt m_i de grains éclaboussés et normalisé par l'angle arcsin (R/l_i).

La masse réelle détachée peut être déduite de l'équation (III.6) ci-dessous et comparée avec la masse apparente et aussi avec la masse totale détachée.

$$\mu = \frac{4 \times e^{-B}}{[e^{(R/\Lambda)} - e^{(-R/\Lambda)}]} ; \text{ (Leguédois et al., 2005)} \quad (III.6)$$

III.2.2.2.4.2. Pour le cas d'une surface en pente

On utilisera dans ce cas les équation de Leguédois et al.(2005) adaptée à la géométrie de notre anneau d'éclaboussure, tel que la distance moyenne de projection Λ est calculée à partir de la pente de la droite de régression de l'équation (III.7). (Voir chapitre Théorie)

$$\log m_i^* = C - \frac{1}{\Lambda} \cdot l_i \quad (III.7)$$

Où m_i^* correspond au flux mesuré à partir du dépôt m_i de grains éclaboussés et normalisé par l'angle arcsin (R/l_i).

La masse réelle détachée peut être déduite de l'équation (III.7) ci-dessous et comparer avec la masse apparente et aussi avec la masse totale détachée, en amont et en aval du point d'impact.

$$\mu = \frac{2 \times e^{-C}}{[e^{(R/\Lambda)} - e^{(-R/\Lambda)}]} ; \quad (III.8)$$

Avec

Λ : est la distance moyenne de projection (m).

R : rayon du pot du splash (m).

Dans la présente investigation, nous allons étudier la distribution des particules rejaillies en amont et en aval en calculant les paramètres vu ci-dessus pour chaque diamètre de goutte et pour chaque pente sélectionnée.

CHAPITRE IV

Résultats et Interprétations

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats d'investigations expérimentales conduites pour chaque diamètre de goutte utilisé et chaque pente sélectionnée tout en mettant l'accent sur la distribution radiale des particules détachées suivant les directions amont et aval à partir de la source. Nous allons par la suite donner leurs interprétations et les comparer aux travaux des autres chercheurs. Nous étudierons également les relations qui existent entre les caractéristiques de la goutte de pluie telle que l'énergie cinétique et la pression érosive et les caractéristiques du sol, telle que la pente du sol, en fonction de la masse détachée, de la distance moyenne de projection et la distribution des particules rejaillies en amont et en aval.

IV. 1. Calcul des diamètres équivalents des gouttes d'eau et de la fréquence de chute

Afin de mieux contrôler les conditions de la simulation des gouttes de pluie et de la fréquence de chute sur le phénomène de rejaillissement par impact des gouttes de pluie, une série d'expériences a été menée sur 4 capillaires, afin de vérifier leurs diamètres et de choisir la fréquence de chute, qui permet d'obtenir des gouttes d'eau de forme adéquates.

Tableau IV.1. : Diamètre équivalent des gouttes d'eau

	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M _{moyenne} (g)	D _{équivalent} (mm)
1 ^{er} Goutteur	0,0249	0,0253	0,0278	0,0261	3,7
2 ^{eme} Goutteur	0,0325	0,0324	0,0327	0,0325	4
3 ^{eme} Goutteur	0,0532	0,0518	0,0517	0,0522	4,6
4 ^{eme} Goutteur	0,0864	0,0709	0,0691	0,0755	5,6

Tableau IV.2. : Masse de la goutte (mg) en fonction de la fréquence de chute pour différents diamètres de la goutte.

		Masse de la goutte (mg)										
Fréquence N ^{bre} de gouttes/1sec	D (mm)	1	2	4	5	6	7	9	10	12	15	20
		5,6	73	76	79	80	80	80	82	82	82	84
4,6	45	52	54	55	55	55	58	58	58	61	68	
4	28	32	34	34	34	35	38	38	40	42	49	
3,7	22	26	28	28	28	29	30	30	31	32	37	

D : diamètres des goutteurs (mm)

Les résultats du tableau N°IV.2 montrent que lorsque la fréquence de la chute augmente, la masse des gouttes augmente légèrement pour les différents diamètres analysés. La masse de la goutte est donc proportionnelle à la fréquence.

La fréquence de chute adoptée pour les expériences du splash est de 2 gouttes par seconde puisqu'avec cette fréquence on a observé que l'intervalle de temps entre deux gouttes est suffisant pour ces dernières de prendre leur forme complète, contrairement aux grandes fréquences où les gouttes d'eau sont attachées les unes aux autres à cause de la poussée des gouttes qui suivent.

IV.2. Calcul des paramètres érosifs de la goutte d'eau

Les paramètres érosifs calculés pour chaque diamètre de la goutte sont : la vitesse V, l'énergie cinétique Ec, la quantité de mouvement MV et la pression érosive Pe, pour les différents diamètres, représentés dans le tableau N°IV.3.

Tableau IV.3. : Paramètres érosifs pour différents diamètres pour un volume de 50ml.

D (mm)	3,7	4	4,6	5,6
M (g)	0,026	0,033	0,052	0,076
V (m s⁻¹)	8,430	8,560	8,840	8,940
MV (g m s⁻¹)	0,220	0,278	0,461	0,675
Ec (g m² s⁻²)	0,927	1,190	2,038	3,017
Pe (Pa)	4,66 x10 ⁴	4,81x10 ⁴	5,32x10 ⁴	6,41x10 ⁴

Avec :

M : Masse de la goutte d'eau (g).

D : Diamètre de la goutte d'eau (mm).

V : Vitesse de chute de la goutte (m/s).

MV : Quantité de mouvement de la goutte (g m s⁻¹).

Ec : Energie cinétique de la goutte d'eau (g m² s⁻²).

Pe : Pression érosive de la goutte d'eau (Pa).

L'analyse des résultats du tableau IV.3 montre que l'énergie cinétique augmente de 0,927 g m² s⁻² à 3,017 g m² s⁻² et la pression érosive de 4,66x10⁴ Pa à 6,41x10⁴ Pa pour les diamètres allant de 3,7mm à 5,6 mm.

Cela nous amène à dire que l'énergie cinétique, la quantité de mouvement et la pression érosive de la goutte de pluie dépendent étroitement du diamètre et de la vitesse terminale de chute de la goutte.

Al-Durrah et Bradford (1982), dans leurs recherches sur les mécanismes de l'éclaboussure à la surface du sol sous l'impact des gouttes de pluie, ont trouvé qu'une goutte de 4,6 mm de diamètre et une vitesse de 9 m/s a une énergie cinétique $Ec = 20,82 \times 10^{-4}$ J.

Pour le même diamètre, l'énergie cinétique que nous avons calculée est égal à 2,038 g m² s⁻² = 20,38 x10⁻⁴ J. La légère différence entre ces deux valeurs pourrait être due au fait que la vitesse est une fonction de la hauteur de chute car, d'après Laws (1941), la vitesse d'une goutte d'eau peut atteindre 9m/s pour les gouttes de 6mm pour une hauteur de chute allant de 7 à 20 m, et dans notre étude la vitesse terminale de la goutte a atteint 8,84 m/s pour une hauteur de chute égal à 8m.

IV.3.Caractéristiques du mécanisme de détachement du sol par effet de Splash

Plusieurs stades peuvent être observés lors de l'impact des gouttes d'eau sur un sol initialement sec ; cela débute par un rejaillissement des particules de sol par les premières gouttes tombantes, il y'a alors humidification du sol, ce qui permet de lui donner une certaine cohésion. Cette étape est suivie par un rejaillissement plus important à cause de la décomposition des liaisons entre les particules du sol humidifiées et la formation d'une mince couche d'eau sur la surface du sol. Après, il ya diminution du détachement du sol par le splash due à la croissance de la hauteur de la couche d'eau qui protège la surface de l'effet du splash. On note également, une évolution significative de la taille (diamètre et profondeur) des cavités correspondant à une augmentation du diamètre des gouttes.

Deux approches ont été établies pour expliquer le phénomène d'initiation du mouvement par splash. La première considère la pression qu'exerce un impact vertical ainsi que l'onde de propagation résultante sur la surface du sol. Nearing (1987) a développé un modèle pour calculer cette pression verticale et a montré qu'elle augmente considérablement quand le sol est proche de la saturation.

D'après les expériences qui ont été menées au laboratoire et les résultats de recherches de différents auteurs (Mouzai et Bouhadeh, 2003 ; Leguédois, 2003 ; Leguédois et al.2005), on a remarqué que pour les petits diamètres, les particules détachées au début du processus du splash sont sèches et éjectées seules. Pour les grands diamètres par contre, elles sont éjectées dans des gouttelettes. En effet, d'après les résultats de Nearing (1987), la pression d'impact à la saturation est assez grande pour liquéfier le sol. Selon le modèle de Nearing (1987), l'eau qui provient de la goutte de pluie pourrait se mélanger avec les particules détachées lors de la liquéfaction du sol, donnant des gouttelettes rejaillies chargées en sédiments (Leguédois, 2003). La seconde approche analyse le comportement d'une particule de sol heurtée par une goutte de pluie, selon Park et al.(1982). Il pourrait y avoir une transmission directe d'énergie cinétique des gouttes tombantes aux particules de sol (Park et al., 1982 in Leguédois,2003).

Le taux de détachement a largement été étudié et relié à l'énergie cinétique, au type de sol et à la taille du grain (De Ploey et Savat, 1968 ; Quansah, 1981 ; Sharma et al., 1991). La distance de transport par phénomène de splash a été reliée à la pente de la surface du sol (Savat, 1981 ; Planchon et al., 2000) et à la taille des grains (Poesen & Savat, 1981).

L'éclaboussure de grains implique l'éjection du grain à partir de la surface. Ces grains sont accélérés par la collision grain à grain avant la propagation radiale de la goutte. Dans ce cas, il ya transfert de quantité de mouvement entre la goutte et le grain (Furbish et al., 2007).

IV.4. Mesure des paramètres du splash

IV.4.1. Distribution de la masse du splash sur une surface horizontale

La masse des particules éclaboussées m_i (en g /m² /rad/ goutte), déposées dans le compartiment i , a été évaluée par la même équation, utilisée par Leguédois et al. (2005), et par Mouzai et Bouhadeh (2011), adaptée à la géométrie de notre montage expérimental (demi circulaire),et est exprimée par goutte d'eau.

$$m_i = \frac{M_i}{\pi.l_i.w_i} / N_{goutte} \quad (IV.1)$$

m_i : masse des particules splashées collectées dans le compartiment i et normalisée par unité de surface du de l'anneau et par goutte d'eau en (g/m²/rad/goutte).

M_i : masse déposée dans l'anneau i (g).

l_i : distance radiale du centre de la source au centre de l'anneau i (m).

w_i : largeur de l'anneau i (m).

N_{goutte} : nombre de gouttes.

Les résultats sont illustrés dans la figure VI.1 d'après le tableau VI.4.

Tableau IV.4. : Variation de la masse de splash en fonction du diamètre de la goutte d'eau

Diamètre de la goutte <i>li</i> (distance radiale) (m)	3,7mm <i>mi</i> (g/m2/rad/goutte)	4mm <i>mi</i> (g/m2/rad/goutte)	4,6mm <i>mi</i> (g/m2/rad/goutte)	5,6mm <i>mi</i> (g/m2/rad/goutte)
0,0375	0,05692	0,11040	0,31353	0,83756
0,0625	0,02133	0,04477	0,11096	0,29124
0,0875	0,00893	0,02742	0,07302	0,11695
0,1175	0,00461	0,01144	0,03591	0,06230
0,1525	0,00276	0,00843	0,02292	0,03355
0,1875	0,00214	0,00586	0,01456	0,01424
0,2265	0,00142	0,00372	0,00629	0,00676
0,2695	0,00109	0,00246	0,00503	0,00497
0,3135	0,00081	0,00190	0,00401	0,00482
0,3625	0,00067	0,00112	0,00227	0,00219
0,4165	0,00057	0,00085	0,00154	0,00153
0,4715	0,00047	0,00081	0,00141	0,00168
0,5305	0,00032	0,00056	0,00095	0,00092
0,5945	0,00031	0,00037	0,00078	0,00103
0,6595	0,00023	0,00027	0,00061	0,00052
0,742	0,00017	0,00021	0,00037	0,00043
0,842	0,00014	0,00018	0,00034	0,00039
0,942	0,00013	0,00013	0,00027	0,00030
$\sum mi$	0,103	0,221	0,595	1,381

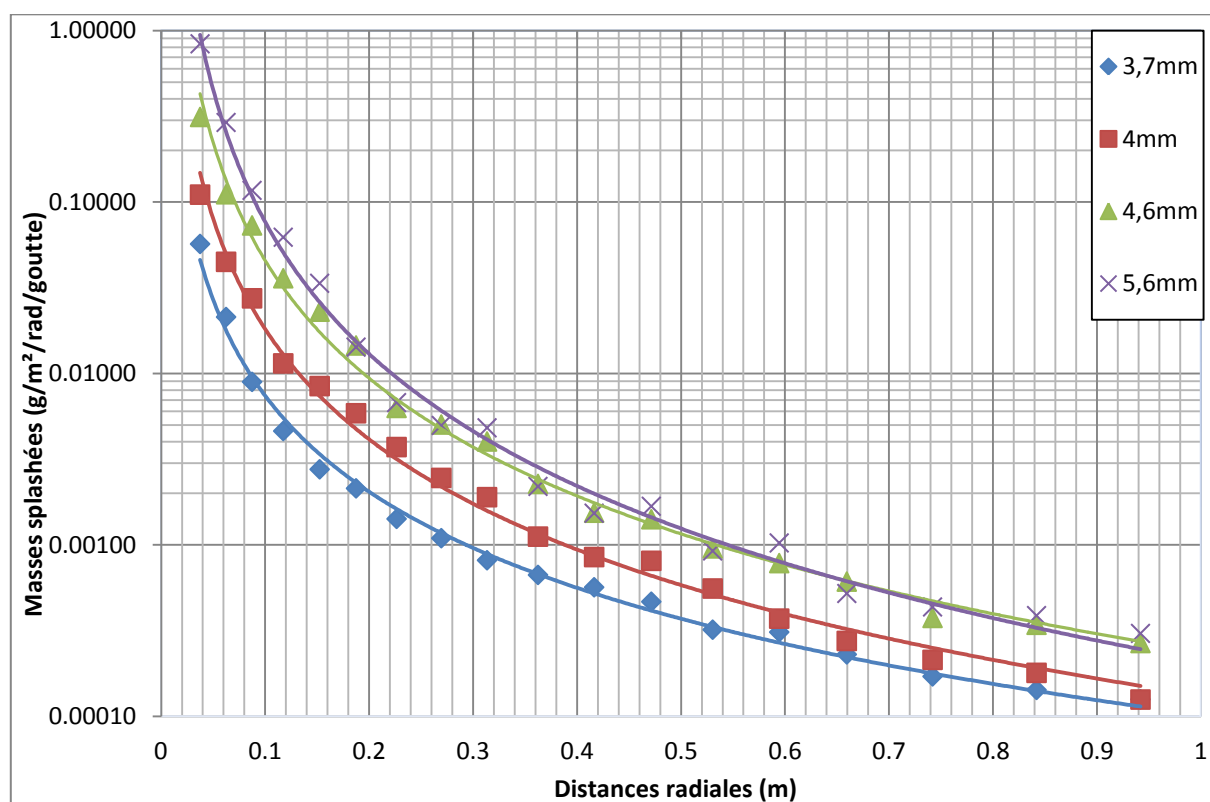


Figure IV.1 : Distribution des particules éclaboussées (splashées) sur une pente horizontale.

Nos résultats confirment ceux de Savat et Poesen (1981), Riezebos et Eperma (1985), Torri et al. (1987) et Van Dijk et al. (2002), Leguédois et al. (2005), Mouzai et Bouhaded (2011). Ils présentent une décroissance exponentielle de la masse des particules splashées avec l'augmentation de la distance radiale à partir du centre, et cela pour chaque diamètre de la goutte d'eau.

Les coefficients de régression obtenus varient entre 0,993 et 0,995.

La masse détachée augmente avec la croissance du diamètre de la goutte. En effet, elles augmentent de 0,103(g/m²/goutte) à 1,381(g/m²/goutte), ce qui laisse croire que le diamètre de la goutte influe significativement sur le taux de détachement par splash.

IV.4.2. Influence du diamètre de la goutte sur le détachement par splash

Les paramètres de splash à évaluer sont calculés par les formules suivantes :

- ✚ La masse apparente détachée est la masse totale déposée dans le panneau d'éclaboussure Mapp en (g/m²/goutte) calculée par l'équation (voir chapitre adaptation du montage expérimentale ; équation (III.2)).
- ✚ La masse réelle détachée (μ) en (g/m²/goutte) est calculé en appliquant le modèle FSDF de Van Dijk. (voir chapitre théorie ; équation (II.18)).
- ✚ La masse totale détachée (Mdét) en (g/m²/goutte) est quantifiée après séchage et pesée de la masse restante dans les 5 pots après chaque simulation. calculée par l'équation (voir chapitre adaptation du montage expérimentale ; équation (III.4)).

IV.4.2.1. Sans intervention de la pente (Pente du sol = 0°)

Afin d'évaluer l'influence du diamètre de la goutte de pluie sur le détachement des particules de sol en dépit de la pente du terrain, on a pris en premier lieu une pente de surface nulle pour que l'impact de ce paramètre n'intervienne pas à ce niveau.

Tableau IV.5 : Variation de la masse apparente détachée (Mapp), de la masse totale détachée (Mdét), et la masse réelle détachée (μ) en fonction du diamètre.

D (mm)	3,7	4	4,6	5,6
ΣM_i (g)	5,917	8,102	12,236	14,187
Surface de détachement (A×5)	0,00628	0,00628	0,00628	0,00628
Nbr. goutte	1875	1400	1025	550
Mapp (g/m ² /goutte)	0,503	0,922	1,901	4,107
μ (g/m ² /goutte)	2,26	2,39	3,56	5,08
M dét. (g/m ² /goutte)	8,71	11,214	14,334	17,167

ΣM_i : Masse totale déposée dans le panneau.

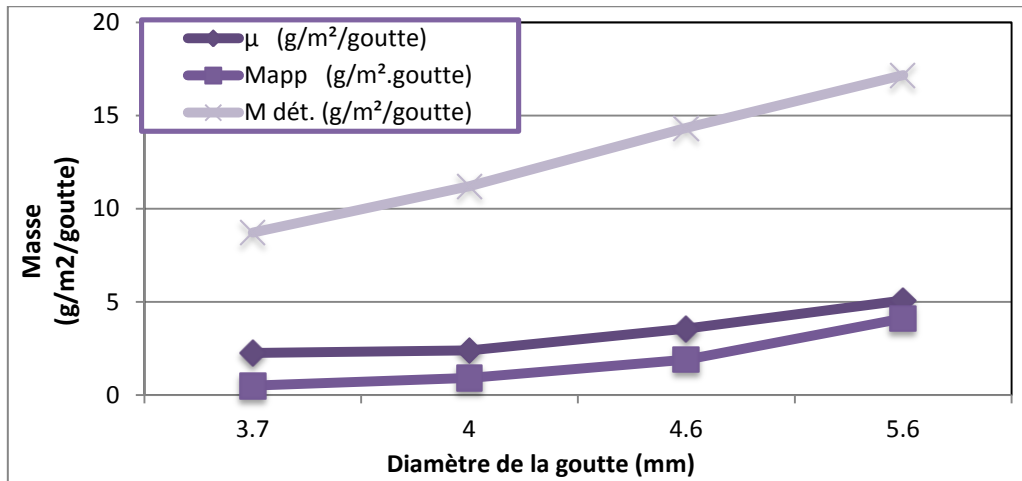


Figure IV.2 : Variation de la masse apparente détachée (M_{app}), de la masse totale détachée ($M_{dét}$), et de la masse réelle détachée (μ) en fonction du diamètre de la goutte.

D'après les résultats du tableau IV.5 et les courbes illustrées sur la figure IV.2, on constate une augmentation simultanée de la masse totale détachée ($M_{dét}$) et de la masse réelle détachée (μ) avec le diamètre de la goutte. On note également une augmentation visible de la masse déposée (récoltée sur le panneau d'éclaboussure) et, par conséquent, de la masse apparente détachée (M_{app}) du splash avec l'accroissement du diamètre de la goutte, ce qui signifie que ce dernier a une influence directe sur le détachement par éclaboussure.

En effet, on remarque que la masse apparente détachée varie de 0,503 g/m²/goutte à 4,107g/m²/goutte, pour des diamètres des gouttes variant de 3,7 mm à 5,6 mm respectivement pour la même pente du sol, et la masse réelle détachée augmente aussi de 2,26 g/m²/goutte à 5,08 g/m²/goutte.

Par contre, on remarque que les valeurs de la masse réelle détachée sont nettement plus importantes que celles de la masse apparente détachée (0,503 g/m²/goutte < 2,26 g/m²/goutte).

IV.4.2.2. Variation de la masse totale et apparente détachées en amont et en aval, en fonction du diamètre de la goutte pour différentes pentes de surfaces

Tableau IV.6 : Variation de la masse totale déposée et de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 2°.

D (mm)		3,7	4	4,6	5,6
$\sum M_i$ (g)	Amont	5,334	7,525	12,27	13,744
M_{app} (g/m ² /goutte)		0,272	0,532	1,087	2,533
$\sum M_i$ (g)	Aval	1,898	3,341	6,852	14,920
M_{app} (g/m ² /goutte)		0,380	0,851	1,596	3,346

$\sum M_i$: Masse totale déposée dans le panneau, M_{app} : Masse apparente détachée.

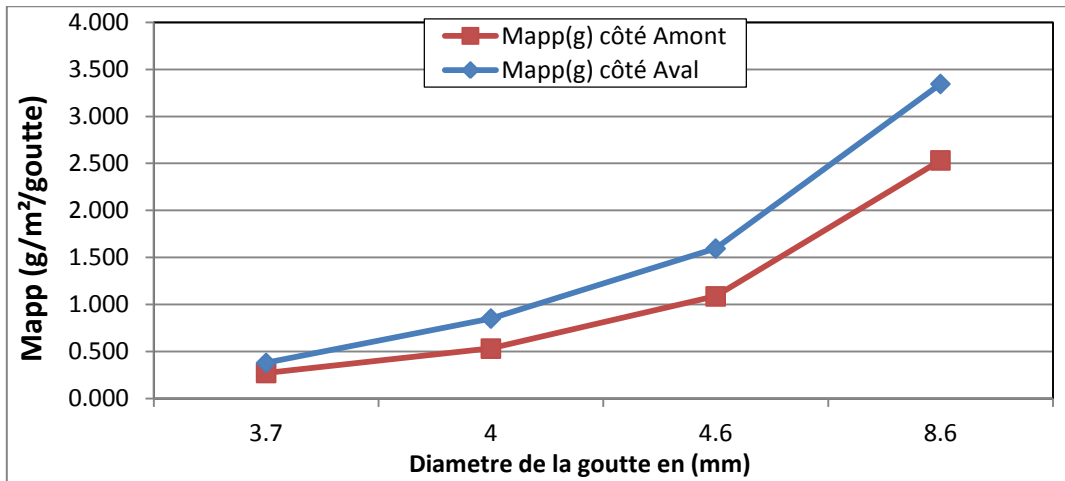


Figure IV.3 : Variation de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 2°.

Tableau IV.7 : Variation de la masse totale déposée et de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 5°.

D (mm)		3,7	4	4,6	5,6
$\sum M_i$ (g)	Amont	4,038	6,414	9,108	16,025
Mapp (g/m ² .goutte)		0,343	0,730	1,415	2,835
$\sum M_i$ (g)	Aval	7,821	10,874	13,264	13,312
Mapp (g/m ² .goutte)		0,664	1,237	2,061	3,854

$\sum M_i$: Masse totale déposée dans le panneau, Mapp: Masse apparente détachement.

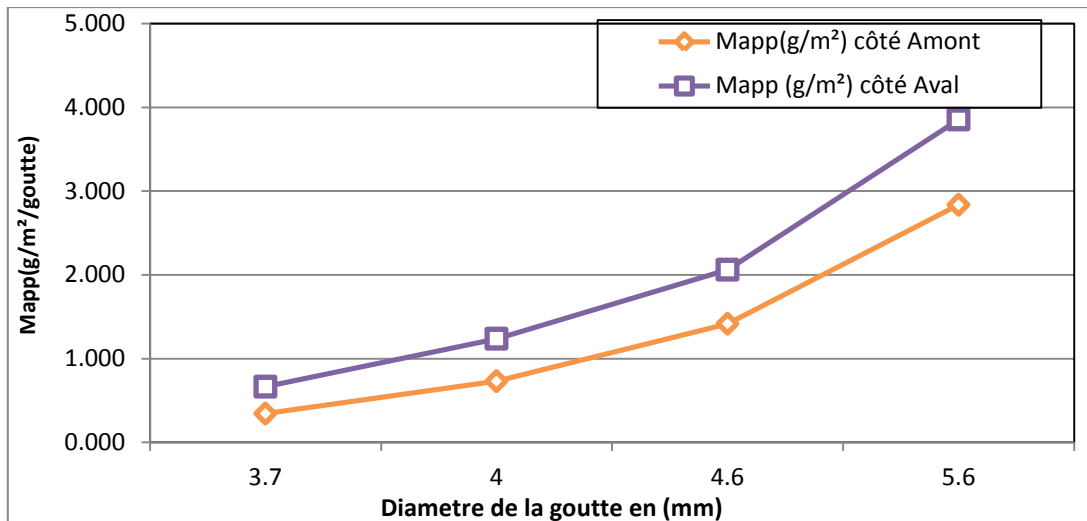


Figure IV.4 : Variation de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 5°.

Tableau IV.8 : Variation de la masse totale déposée et de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 10°.

D (mm)		3,7	4	4,6	5,6
--------	--	-----	---	-----	-----

$\sum M_i$ (g)	Amont	4,320	4,149	6,89	7,027
Mapp (g/m ² /goutte)		0,367	0,513	1,070	2,034
$\sum M_i$ (g)	Aval	6,356	8,356	13,111	15,06
Mapp (g/m ² /goutte)		0,987	1,280	2,037	4,360

$\sum M_i$: Masse totale déposée dans le panneau, Mapp: Masse apparente détachement.

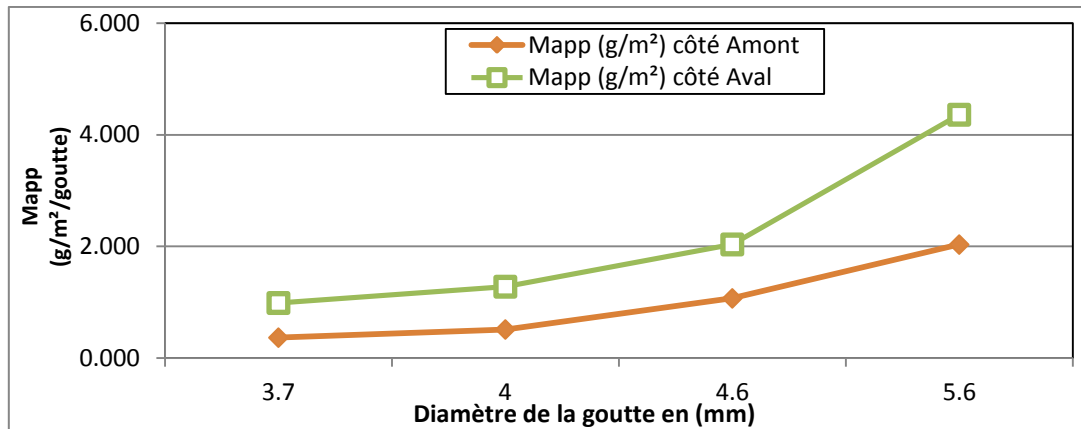


Figure IV.5 : Variation de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 10°.

Tableau IV.9 : Variation de la masse totale déposée et de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 17°.

D (mm)		3,7	4	4,6	5,6
$\sum M_i$ (g)	Amont	2,628	3,715	6,595	6,836
Mapp (g/m ² /goutte)		0,223	0,423	0,869	1,979
$\sum M_i$ (g)	Aval	8,165	14,371	19,279	22,98
Mapp (g/m ² /goutte)		0,693	1,635	2,995	6,653

$\sum M_i$: Masse totale déposée dans le panneau, Mapp: Masse apparente détachement.

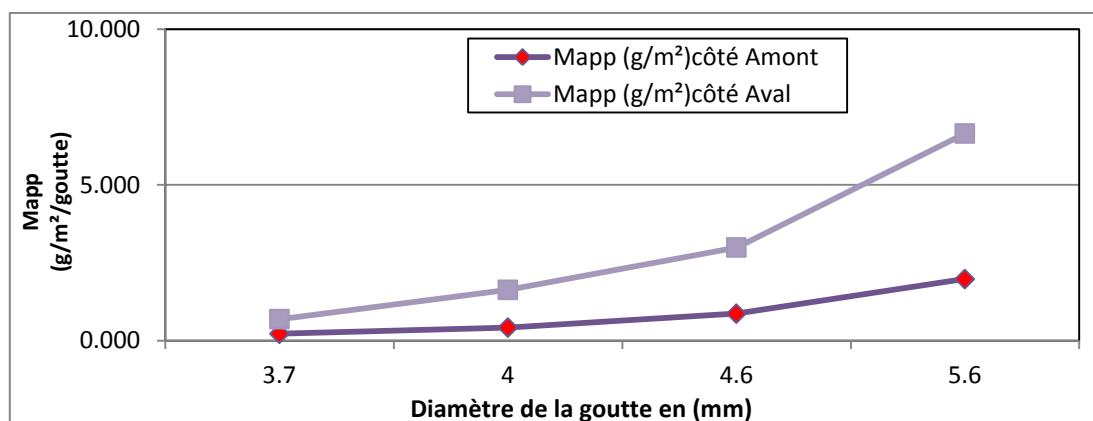


Figure IV.6 : Variation de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 17°.

Tableau IV.10 : Variation de la masse totale déposée et de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte pour une pente de surface égal à 20°.

D (mm)		3,7	4	4,6	5,6
---------------	--	------------	----------	------------	------------

ΣM_i (g)	Amont	2,167	4,901	10,734	10,698
Mapp (g/m ² /goutte)		0,184	0,557	1,424	1,893
ΣM_i (g)	Aval	7,165	14,942	28,262	33,101
Mapp (g/m ² /goutte)		0,608	1,699	3,750	9,583

ΣM_i : Masse totale déposée dans le panneau, Mapp: Masse apparente détachement.

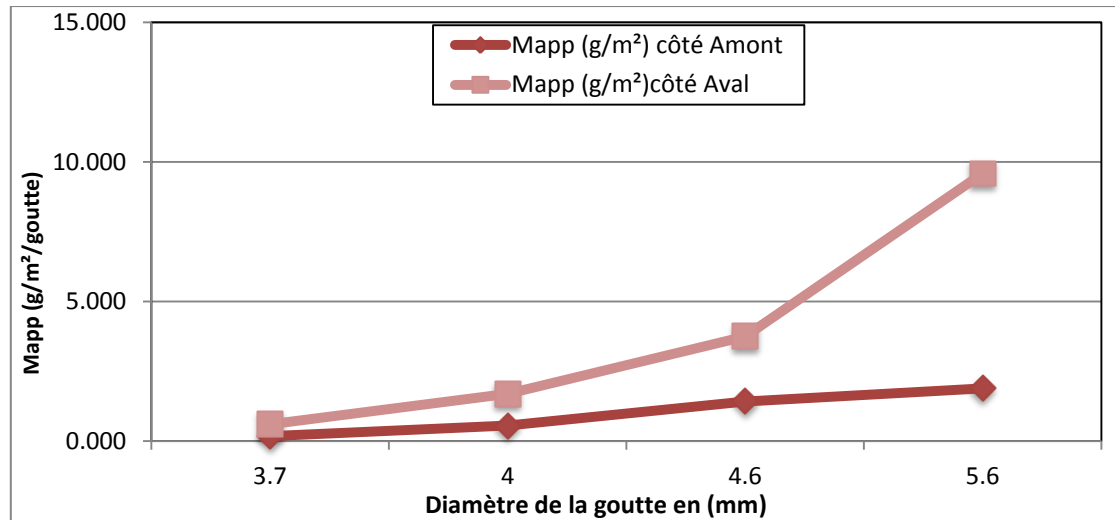


Figure IV.7 : Variation de la masse apparente détachée en fonction du diamètre de la goutte, et comparaison entre la proportion de particules éclaboussées vers l'amont et vers l'aval du point d'impact, pour une pente de sol = 20°.

D'après les résultats des tableaux (IV.6, IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10) et les courbes correspondantes illustrées dans les figures (IV.3, IV.4, IV.5, IV.6 et IV.7), on constate une augmentation simultanée de la masse totale déposée et de la masse apparente détachée avec l'accroissement du diamètre de la goutte, ce qui signifie que ce dernier a une influence directe sur la masse du sol éclaboussée. En effet, on remarque que la masse apparente détachée augmente de 0,380 g/m²/goutte à 3,346 g/m²/goutte, pour des diamètres des gouttes de 3,7 mm à 5,6 mm respectivement pour une pente 2°, et augmente de 0,608g/m²/goutte à 9,583 g/m²/goutte pour une pente égal à 20°, et cela pour les mêmes diamètres. Ceci affirme d'une part l'influence du diamètre de la goutte sur la variation du détachement par splash et montre également l'influence de la pente de surface.

En effet, d'après les résultats de Boujerda (2009), le taux de détachement par splash est 6 fois plus important pour des diamètres des gouttes de 5,9 mm (correspondant à une masse détachée égal à 29,78 g/m²/goutte) par rapport à celles du diamètre de 3,7 mm (masse détachée égal à 5,05 g/m²/goutte). Kinnell (1982) a mentionné que la masse détachée est 9,4 fois plus grande pour des diamètres des gouttes de 5,9 mm (correspondant à une masse détachée de 10,25 mg) que celle des gouttes de diamètre égal à 2,7 mm (correspondant à une masse détachée de 1,10mg). Mouzai (1992) a également étudié l'influence de diamètre de la goutte sur la masse des particules splashées ; il a trouvé qu'elle augmentait de 0,23mg/cm/goutte à 0,63mg/cm/goutte, pour des diamètres de 3,7mm et 5,8mm.

On remarque aussi qu'il ya plus de particules éjectées vers l'aval que vers l'amont, et ces proportions sont en augmentation quasi constante avec l'accroissement de l'angle de pente. Ce

IV.4.3. Variation la masse apparente et de la masse réelle détachée en fonction de l'énergie cinétique de la goutte

L'augmentation du diamètre de la goutte, qui implique une augmentation de son énergie cinétique, engendre un détachement plus important des particules de sol et, par conséquent, de la masse apparente détachée.

Tableau IV.11 : Variation de la masse apparente détachée.

Pente 0°				
Ec (g m²s⁻²)	0,927	1,190	2,038	3,017
Mapp (g/m²/goutte)	0,503	0,922	1,901	4,107

D'après les résultats du tableau IV.11, on constate que le taux de détachement par splash croît avec l'augmentation du diamètre de la goutte et, par conséquent, avec son énergie cinétique, ce qui signifie que cette dernière a une influence directe sur la masse du sol détachée. En effet, on remarque que la masse apparente détachée augmente de 0,503 g/m²/goutte à 4,107g/m²/goutte, pour des énergies cinétiques variant de 0,927 (g m²s⁻²) à 3,017 (g m²s⁻²).

La courbe de la figure IV.8 représentative de cette variation, est mieux ajustée par la fonction exponentielle suivante :

$$M_{app} = 0,237 e^{0,6334Ec} \quad , R^2 = 0,853.$$

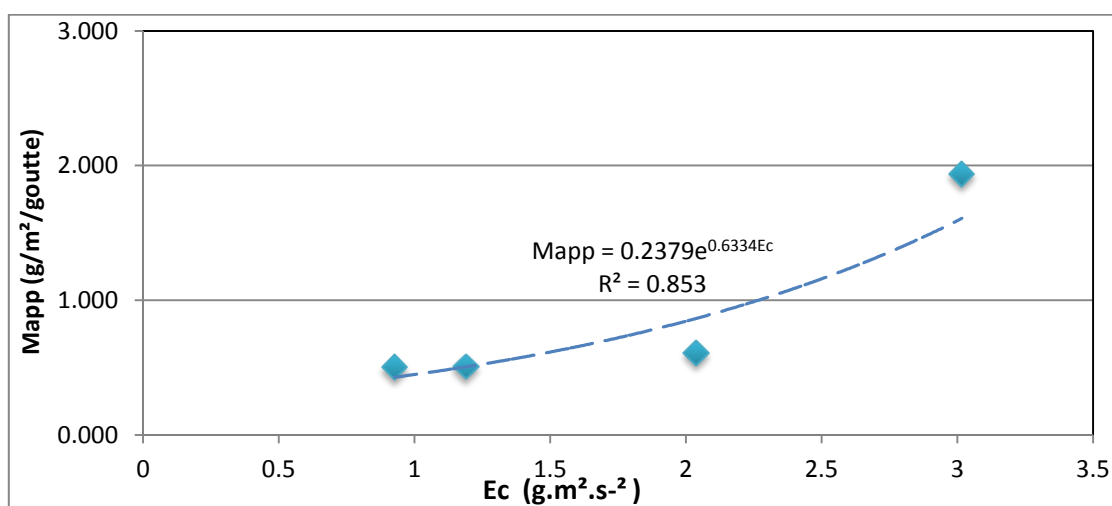


Figure IV.8 : Variation de la masse apparente détachée (Mapp) avec l'énergie cinétique (Ec).

Tableau IV.12 : Equations de régression et coefficient de détermination de la variation de la masse apparente détachée en fonction de l'énergie cinétique de la goutte d'eau.

Equations	R ²
Mapp = 0,4487 Ec ^{1,0467}	0,738
Mapp = 0,6658 Ec – 0,3048	0,804
M app = 0.237e ^{0.6334Ec}	0,853
M app = 1,0882Ln Ec +0,3681	0,681

Tableau IV.13 : Variation de la masse réelle détachée avec l'énergie cinétique de la goutte.

Ec (g m²s⁻²)	0,927	1,190	2,038	3,017
μ (g/m²/goutte)	2,26	2,39	3,56	5,08

D'après les résultats du tableau IV.13, on constate que la masse réelle détachée calculée par la formule (II.17) tirée de l'équation FSDF de VanDijk développée par Leguédois et al., (2005), (voir chapitre Théorie), augmente avec le diamètre de la goutte et, par conséquent, avec son énergie cinétique.

En effet, on remarque que la masse réelle détachée augmente de 2,26g/m²/goutte à 5,08g/m²/goutte, avec l'énergie cinétique qui varie de 0,927 (g m²s⁻²) à 3,017 (g m²s⁻²).

La courbe représentative de cette variation, représentée dans la figure IV.3, est mieux ajustée par la fonction exponentielle suivante :

$$\mu = 1,5343 e^{0,4001Ec} \quad , R^2 = 0,995.$$

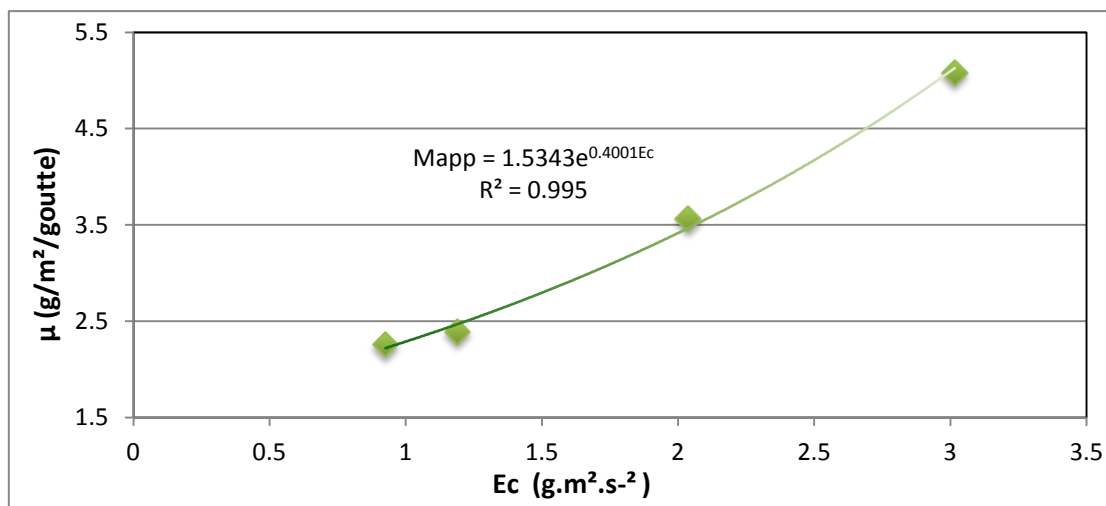


Figure IV.9 : Variation de la masse réelle détachée (μ) avec l'énergie cinétique (Ec).

Tableau IV.14 : Equations de régression et coefficient de détermination de la variation de la masse réelle détachée en fonction de l'énergie cinétique de la goutte d'eau.

Equations	R ²
$\mu = 2,2444 Ec^{0,7044}$	0,976
$\mu = 1,3818 Ec + 0,845$	0,992
$\mu = 1,5343e^{0,4001Ec}$	0,995
$\mu = 2,3971 \ln Ec + 2,175$	0,945

IV.4.4. Effet de la pente du sol sur le détachement par impact des gouttes d'eau

IV.4.4.1. Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente

Les résultats du tableau (IV.15) présentent la variation de la masse totale détachée en fonction de la pente de surface pour chaque diamètre de la goutte.

Tableau IV.15 : Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente et du diamètre de la goutte du côté amont.

Masse totale détachée (g/m ² /goutte)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,7mm	0,263	0,248	0,236	0,215	0,202	0,187
4mm	0,188	0,142	0,110	0,083	0,059	0,088
4,6mm	0,464	0,348	0,247	0,178	0,129	0,464

5,6mm	1,125	0,911	0,697	0,463	0,312	1,125
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Les résultats du tableau IV.15 sont illustrés dans la figure IV.10.

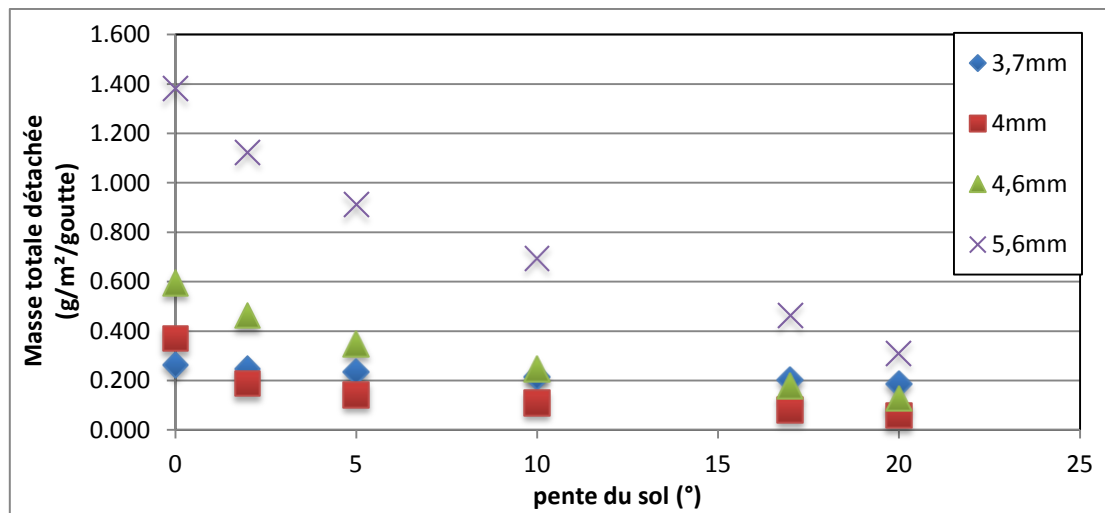


Figure IV.10 : Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente du côté amont.

Tableau IV.16 : Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente et du diamètre de la goutte du côté Aval.

Masse totale détachée (g/m²/goutte)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,7mm	0,263	0,304	0,352	0,400	0,442	0,499
4mm	0,221	0,316	0,391	0,446	0,601	0,746
4,6mm	0,595	0,773	0,949	1,070	1,434	1,874
5,6mm	1,381	1,623	1,959	2,580	3,166	4,070

Les résultats du tableau IV.16 sont illustrés dans les deux figures IV.11

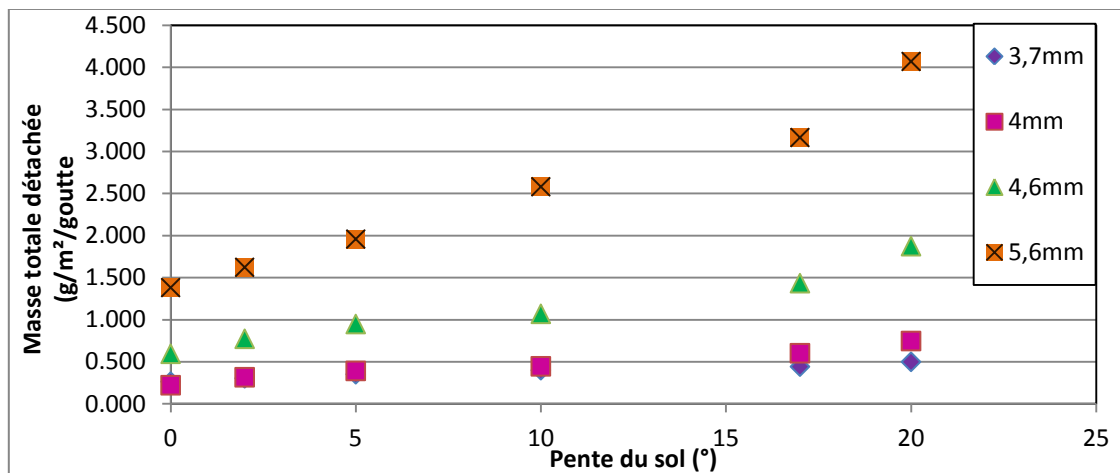


Figure IV.11 : Variation de la masse totale détachée en fonction de la pente du côté aval.

IV.4.4.2. Variation de la masse apparente détachée en fonction de la pente

Le tableau ci-dessous (IV.16) présente la variation de la masse apparente détachée calculée par l'équation (III.2), en fonction de la variation de la pente de surface.

Tableau IV.17 : Variation de la masse apparente détachée, en fonction de la pente côté amont

Pente \ Diamètre	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,7mm	0,503	0,272	0,343	0,367	0,223	0,184

4mm	0,922	0,532	0,73	0,513	0,523	0,557
4,6mm	1,901	1,78	1,415	1,07	0,869	0,64
5,6mm	4,107	3,533	2,835	2,034	1,179	0,76

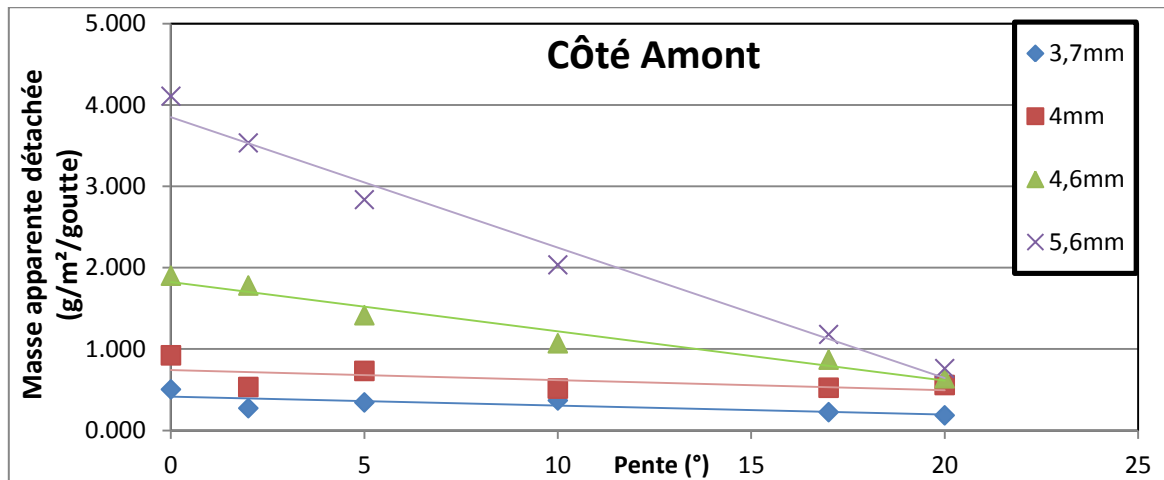


Figure IV.12 : Variation de la masse apparente détachée en fonction de la pente du côté amont

Tableau IV.18 : Variation de la masse apparente détachée, en fonction de la pente côté aval

Pente \ Diamètre	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,7mm	0,503	0,38	0,664	0,987	0,693	0,608
4mm	0,922	0,851	1,237	1,28	1,635	1,699
4,6mm	1,901	1,596	2,061	2,037	2,995	3,75
5,6mm	4,107	3,346	3,854	4,36	6,653	9,584

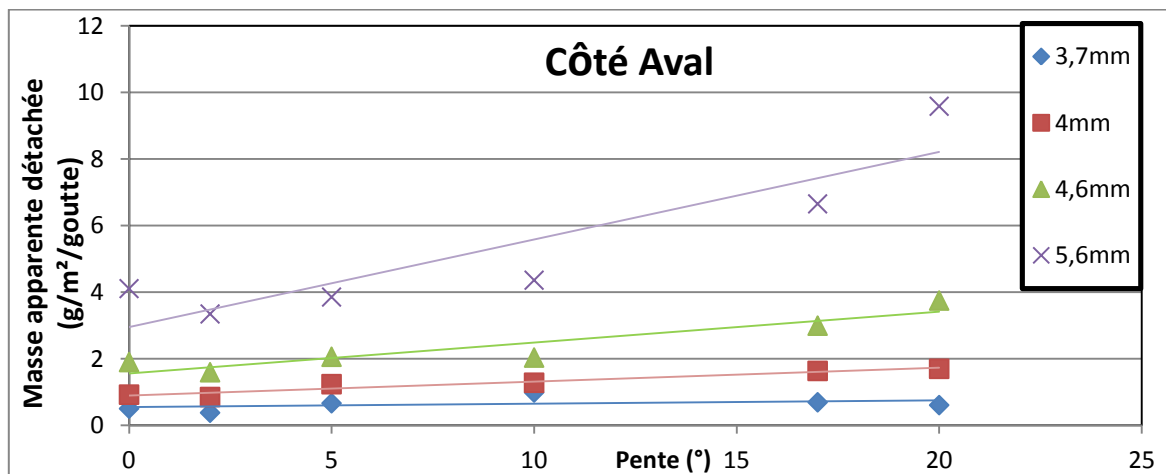


Figure IV.13 : Variation de la masse apparente détachée en fonction de la pente du côté aval.

D'après les résultats du tableau IV.15 et du tableau IV.17, on remarque une augmentation simultanée dans les masses totales détachées et de la masse apparente détachée avec l'augmentation de la pente. Par contre, les résultats du tableau IV.16 et du tableau IV.18 présentent une diminution simultanée de la masse totale détachée et de la masse apparente détachée avec la pente du côté amont.

En effet, pour un même diamètre de la goutte (4mm), on constate que la masse totale détachée du côté aval augmente de 0,221g/m²/goutte à 0,746 g/m²/goutte pour des pentes de surface

qui varie de 0° à 20° ainsi que de la masse apparente qui augmente simultanément de 0,922 g/m²/goutte à 1,699 g/m²/ goutte. Cependant, on enregistre une diminution dans les quantités de particules rejaillies vers l'amont allant de 0,188 g/m²/goutte jusqu'à 0,088 g/m²/goutte pour le même intervalle de pente, ce qui entraîne une diminution des masses totales apparentes qui varient de 0,922 g/m²/goutte à 0,557 g/m²/ goutte. Cela confirme les résultats de Furbish et al. (2007) qui constate qu'il y a plus de particules qui se déplacent en aval au profit du rejaillissement amont.

On conclut donc que la proportion de particules se déplaçant en aval du point d'impact de la goutte augmente avec l'augmentation de la pente du terrain (suivant une fonction linéaire) contrairement au déplacement amont qui diminue avec l'augmentation de cette même pente. Ces résultats confirment ceux de Deploy et Savat (1968) et ceux d'Ellison (1944).

Cela est lié à la géométrie qui contrôle la force d'impact de la goutte, cette force a été interprétée par Furbish et al. (2007) comme étant la quantité de mouvement de la goutte propagée parallèlement à la surface d'impact.

Cette relation « Masse totale détachée-pente de surface » ou « masse apparente -pente de surface » est très bien représentée par une fonction linéaire croissante lorsqu'il s'agit du rejaillissement du côté aval, et par une fonction linéaire décroissante lorsqu'il s'agit du rejaillissement du côté amont.

Les fonctions représentatives de cette variation de la masse totale détachée et de la masse apparente détachée l'amont et vers l'aval, avec la pente, sont indiquées dans le tableau suivant, avec leurs coefficients de détermination respectifs :

Tableau IV.19: Equations de régression et coefficients de détermination.

	Type de fonction	Equations	R ²
Masse totale détachée	Linéaire	$W = 0,023S + 0,245$	0,97
	Exponentielle	$W=0,262 e^{(0,052S)}$	0,94
Masse apparente détachée	Linéaire	$M_{app} = 0,042S + 0,895$	0,94
	Exponentielle	$M_{app} = 0,918 e^{(0,033S)}$	0,81

S : pente de la surface du sol en (°)

En comparant nos résultats avec ceux des autres chercheurs, on remarque qu'ils sont proches et particulièrement ceux de Mouzai (1992) présentés dans le tableau IV.20.

Tableau IV.20 : Equations et coefficients de détermination (%) de la relation entre splash et la pente (Mouzai, 1992).

Type de fonction	Equation	R ²
Linéaire	$W=0,224 + 1,08 S$	98,3
Puissance	$W=0,835 S^{0,382}$	91,6
Exponentielle	$W=0,256 e^{(2,55S)}$	97,6
logarithmique	$W=0,717 + 0,158 \ln S$	87,8

W et S sont la masse des particules splashées en aval et l'angle de la pente (sin θ).

On conclut alors que le détachement par splash dépend de deux paramètres, l'un relatif aux caractéristiques de la pluie (diamètre de la goutte et son énergie cinétique) et l'autre à celui du sol (pente et direction):

1. Une augmentation du diamètre de la goutte implique une augmentation de son énergie cinétique et, par conséquent, engendre un détachement plus important.
2. Indépendamment du diamètre et de l'énergie cinétique de la goutte, l'augmentation de la pente de la surface du sol engendre une augmentation du détachement par splash.

3. La proportion de particules se déplaçant en aval du point d'impact de la goutte augmente avec l'augmentation de la pente de la surface du sol (suivant une fonction linéaire croissante) contrairement au déplacement amont qui diminue avec l'augmentation de cette pente.

En effet, d'après les études menées par Ekern (1951), il existe une augmentation proportionnelle ou linéaire du taux de particules détachées en aval avec l'augmentation de l'angle de pente. Il explique cette augmentation en reportant l'angle de la pente à la force de la goutte d'eau F . Il affirme aussi que les gouttes percutant la surface du sol exercent une force impulsive avec deux composantes : une composante normale ou compressive N , et une composante tangentielle ou de frottement, D . Par combinaison de ses deux composantes, il aboutit à l'équation suivante :

$$Pd = 50 + (\%) \text{ de pente}$$

Où Pd est le pourcentage de matériaux splashés en direction aval (Mouzai, 1992). Puisque plus de 50% des particules sont splashées du côté aval, cette augmentation significative dans le transport par splash, avec l'angle de la pente, est en accord avec les observations d'Ekern (1951) (Quansah, 1981).

Plusieurs résultats auxquels nous avons abouti corroborent ceux trouvés dans la littérature. De Ploey et Savat (1968) ont constaté une augmentation nette de la composante de transport par effet de splash vers l'aval avec l'augmentation de l'angle de pente.

Les investigations d'Ellison (1944), qui sont basées sur des mesures directes de la désagrégation du sol, ont montré que pour une inclinaison de 1 : 10, 75% des matériaux splashés sont transportés en aval et 25% en amont. La même conclusion a été trouvée par Mihara (1959) et Zachar (1982). Pour d'autres chercheurs, la relation reste encore problématique ; Bryan (1979) trouva qu'une fois la couche d'eau formée, la relation devient encore plus complexe.

Afin d'avoir une meilleure vision de cette hypothèse, une comparaison est effectuée entre les quantités détachées, en pourcentages, issues des résultats de cette étude et celles d'autres chercheurs :

Tableau IV.21: Comparaison des pourcentages des masses splashées en amont et en aval avec d'autres résultats pour un diamètre de la goutte égal à 3,7 mm

<i>% de masses splashées en amont /aval</i>					
	<i>En Amont</i>		<i>En Aval</i>		
<i>Pente(*)</i>	<i>Résultats de cette étude</i>	<i>Résultats de Ghadiri and Payne (1988)</i>	<i>Résultats de cette étude</i>	<i>Résultats de Ghadiri and Payne (1988)</i>	<i>Résultats de Ekren (1951)</i>
0	50,00	53,13	50,00	46,88	50
2	46,10	–	53,90	–	52
5	29,14	–	70,86	–	55
10	22,97	41,80	77,03	58,20	60
17	14,96	–	85,04	–	67
20	11,16	15,53	88,84	84,47	70

IV.4.4.3. Comparaison entre la masse apparente et la masse réelle détachée en amont et en aval

Tableau IV.22 : M_{app} et μ pour un diamètre de la goutte égal à 3,7mm

Pente		0°	2°	5°	10°	17°	20°
M_{app} (g/m²/goutte)	Amont	0,503	0,272	0,343	0,367	0,223	0,184
μ (g/m²/goutte)		2,260	2,070	1,940	1,800	1,620	1,400
M_{app} (g/m²/goutte)	Aval	0,503	0,38	0,664	0,987	0,693	0,608
μ (g/m²/goutte)		2,260	2,570	2,880	3,160	3,500	3,970

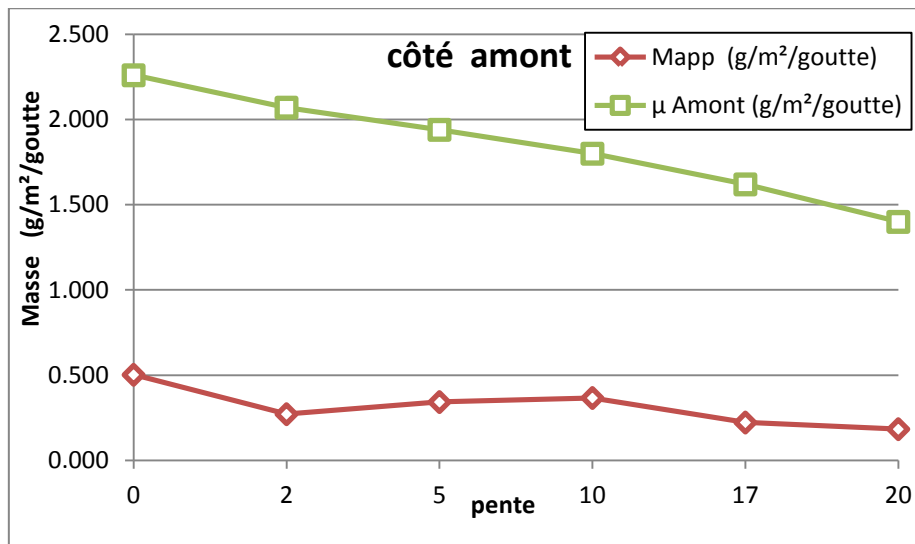


Figure IV.14 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 3,7mm, côté amont.

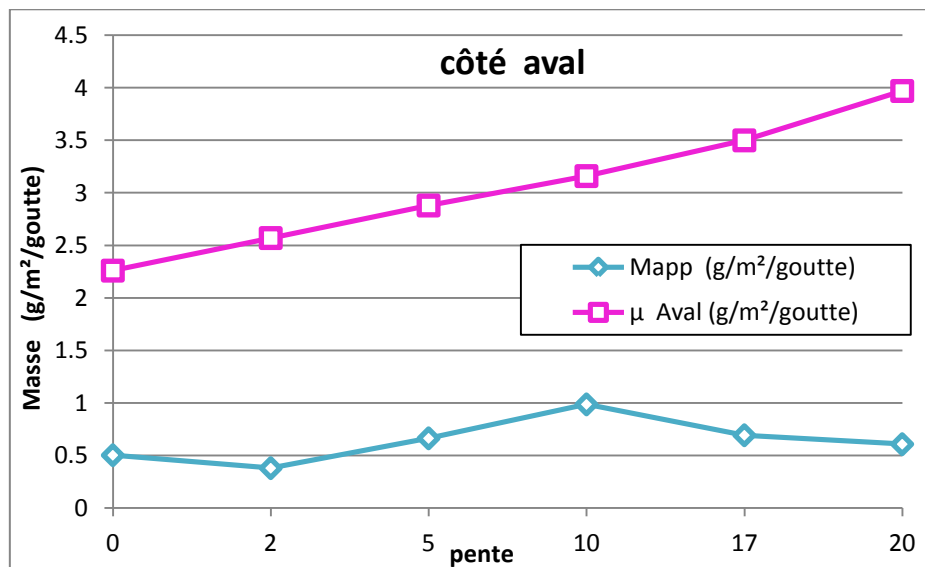


Figure IV.15 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 3,7mm, côté aval.

Tableau IV.23 : Mapp et μ pour un diamètre de la goutte égal à 4mm

Pente		0°	2°	5°	10°	17°	20°
Mapp (g/m ² /goutte)	Amont	0,922	0,532	0,730	0,513	0,523	0,557
	μ (g/m ² /goutte)	2,390	1,95	1,63	1,17	0,94	0,75
Mapp (g/m ² /goutte)	Aval	0,922	0,851	1,237	1,280	1,635	1,699
	μ (g/m ² /goutte)	2,390	3,07	3,69	4,18	4,79	5,63

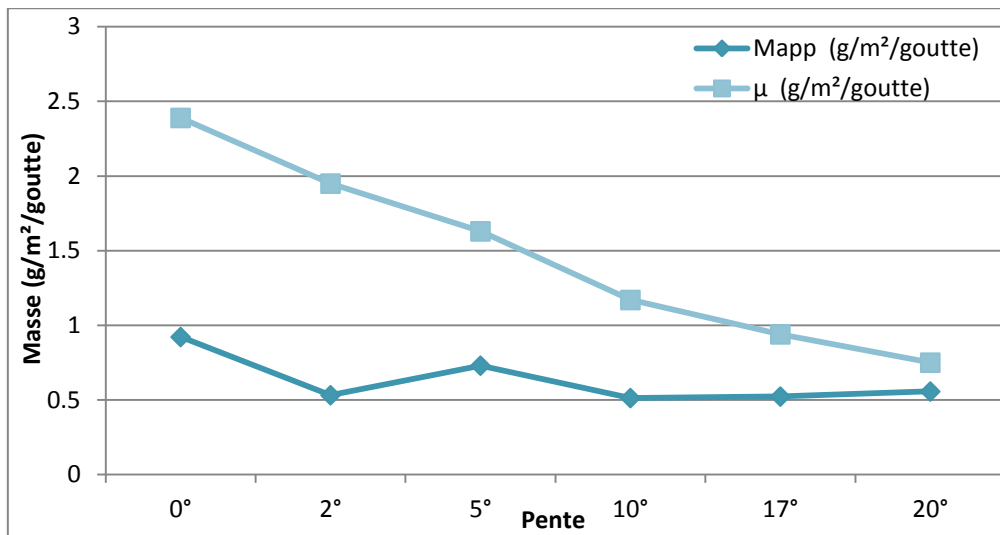


Figure IV.16 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 4mm, côté amont.

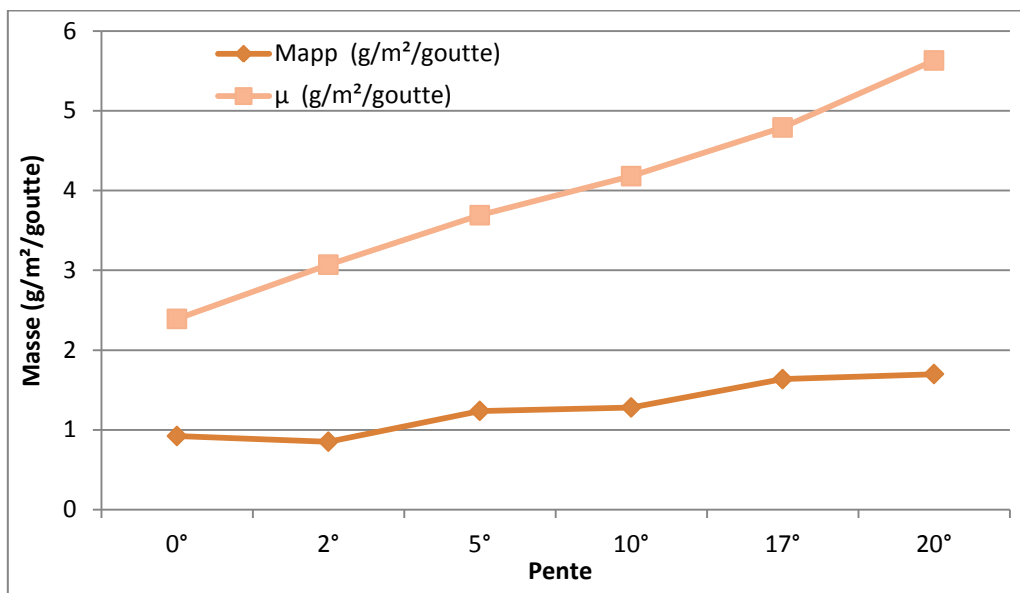


Figure IV.17 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 4mm, côté aval.

Tableau IV.24 : Mapp et μ pour un diamètre de la goutte égal à 4,6mm

Pente		0°	2°	5°	10°	17°	20°
Mapp (g/m ² /goutte)	Amont	1,901	1,087	1,415	1,070	0,869	1,240
μ (g/m ² /goutte)		3,560	2,850	2,350	1,740	1,210	0,810
Mapp (g/m ² /goutte)	Aval	1,901	1,596	2,061	2,037	2,995	3,750
μ (g/m ² /goutte)		3,560	4,170	5,120	6,100	7,690	9,840

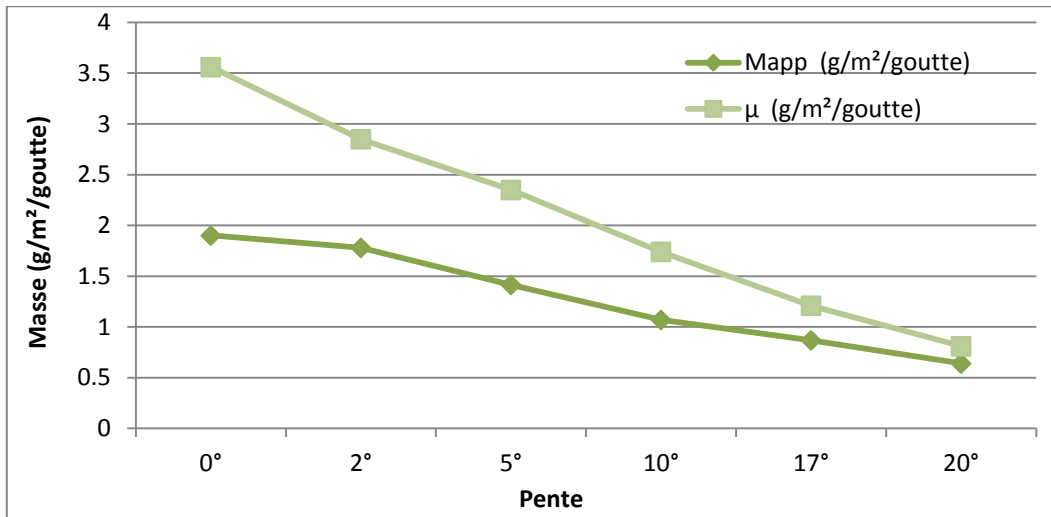


Figure IV.18 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 4,6mm, côté amont.

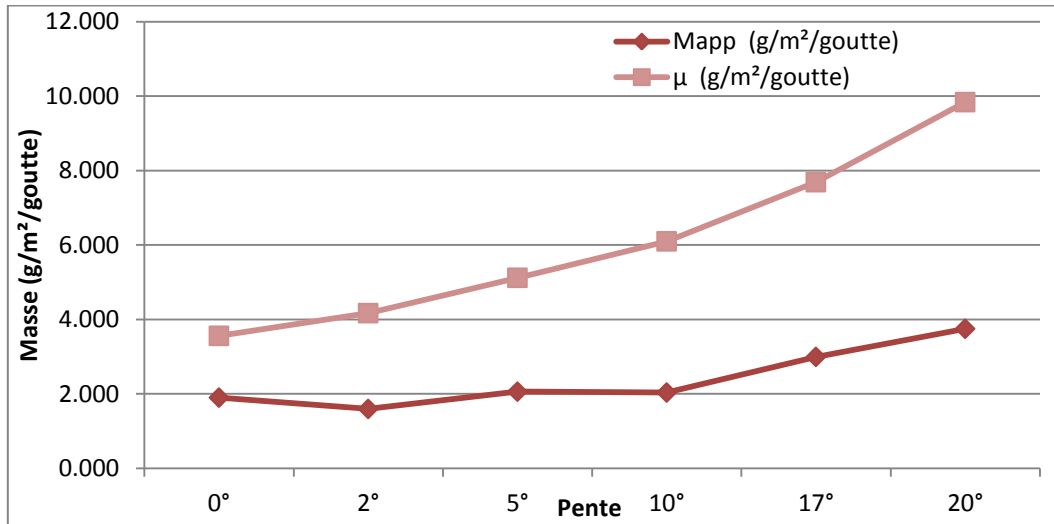


Figure IV.19 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 4,6mm, côté aval.

Tableau IV.25 : Mapp et μ pour un diamètre de la goutte égal à 5,6mm

Pente		0°	2°	5°	10°	17°	20°
Mapp (g/m²/goutte)	Amont	4,107	3,533	2,835	2,034	1,179	0,760
μ (g/m²/goutte)		5,08	4,27	3,15	2,25	1,48	0,990
Mapp (g/m²/goutte)	Aval	4,107	3,346	3,854	4,360	6,653	9,583
μ (g/m²/goutte)		5,080	6,160	7,500	9,260	10,840	14,130

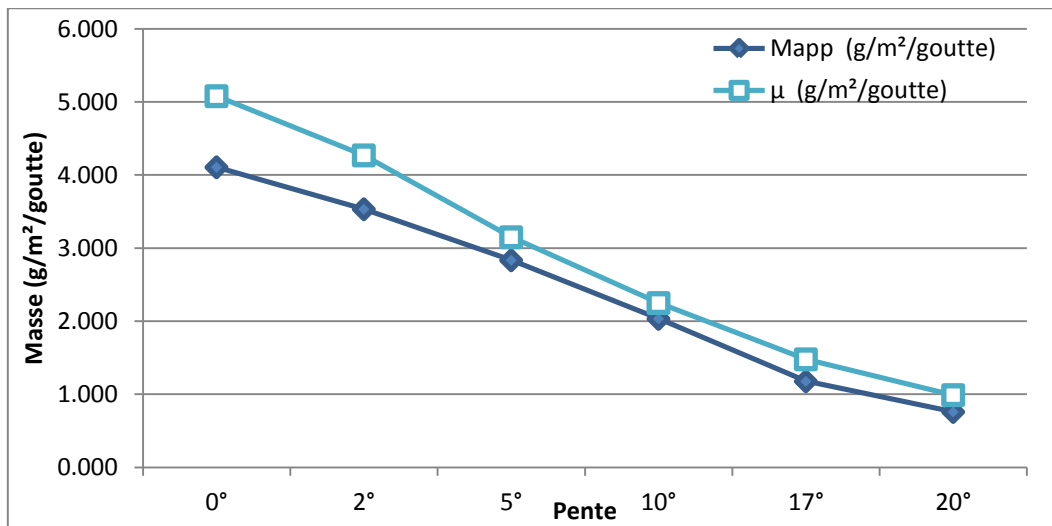


Figure IV.20 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 5,6mm, côté amont.

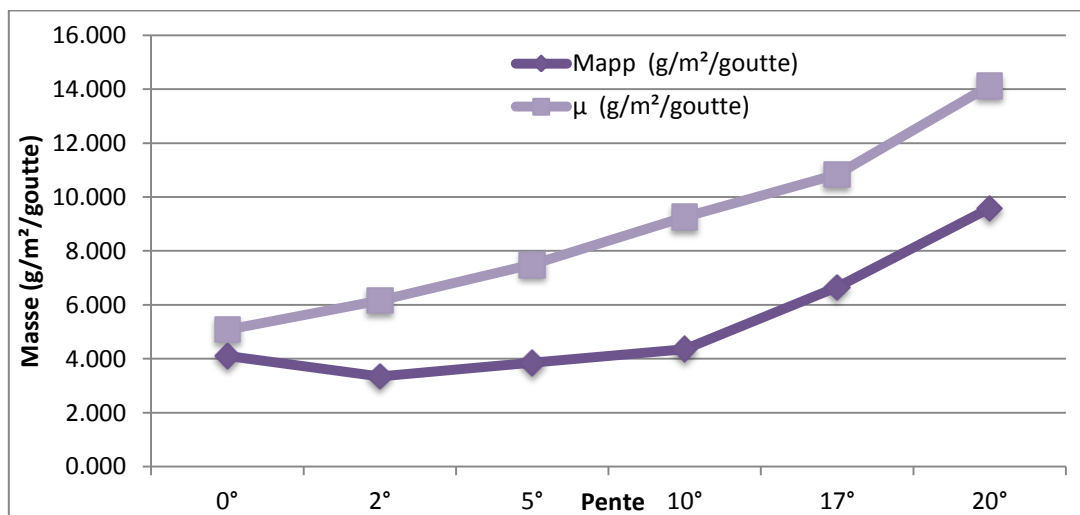


Figure IV.21 : Variation de la masse apparente détachée et de la masse réelle détachée en fonction de la pente pour un diamètre de la goutte égal à 5,6mm, côté aval.

On remarque que du côté aval, que la masse apparente détachée augmente mais très légèrement avec l'augmentation de la masse réelle détachée. Par contre, du côté amont, la masse apparente détachée diminue très légèrement avec la masse réelle détachée qui diminue avec l'augmentation de la pente du sol. En effet, pour un diamètre de la goutte égal à 4 mm la masse apparente détachée varie de 0,922 (g/m²/goutte) à 0,557(g/m²/goutte) du côté amont et de 0,922(g/m²/goutte) à 1,699(g/m²/goutte) du côté aval. Parallèlement, la masse réelle détachée diminue de 3,56(g/m²/goutte) à 0,81(g/m²/goutte) du côté amont, tandis que du côté aval, il augmente de 3,56(g/m²/goutte) à 9,84(g/m²/goutte).

D'autre part, il existe une remarquable différence entre la masse apparente détachée et la masse réelle détachée. Pour un diamètre de la goutte égal à 4 mm et une pente de 0°, la masse apparente détachée est de 0,922 (g/m²/goutte) et la masse réelle détachée est égal à 3,56 (g/m²/goutte). Néanmoins, l'écart entre les deux a tendance à s'atténuer avec l'augmentation de la pente. Pour le même diamètre de la goutte et pour une pente du sol égal à 20°, la masse apparente

détachée atteint 0,557 (g/m²/goutte) du côté amont et 1,699 (g/m²/goutte), du côté aval, et la masse réelle détachée atteint 0,75 (g/m²/goutte) du côté amont, et 5,63 (g/m²/goutte), du côté aval.

D'après Leguédois (2003), cette différence est due à la distance moyenne de splash d'une certaine fraction de particules qui est très petite, et par conséquent, ces particules ne peuvent pas être collectées. La géométrie du panneau est alors responsable de ce phénomène, car elle n'est pas conçue pour collecter significativement des particules avec des distances moyennes de projection inférieures à 4 cm.

On a aussi remarqué qu'une grande partie des particules rejaillies sont déposées dans les compartiments les plus proches et plus on s'éloigne de la source, plus la quantité de particules collectées diminue. La même remarque a été faite par Mouzai et Bouhadeb (2011) qui ont donc conclu que le pot de splash de 4cm de diamètre influence le taux de détachement apparent, ce qui signifie que certaines particules peuvent être détachées mais ne quittent jamais la surface du pot de splash.

La deuxième explication est que certaines particules peuvent être perdues lorsque leurs distances de projection dépassent 1m de rayon. Cette remarque a aussi été mentionnée par Mouzai et Bouhadeb (2011). Toutefois, dans notre étude, on a prévu une barrière à ces particules faite avec du plastic entourant le panneau de splash. Mais visiblement cette solution n'a pas résolu le problème car la majorité des particules sont très fines et se collent au plastic, il est alors difficile de les collecter.

IV.4.5. EFFET DE LA PENTE SUR LA DISTRIBUTION DE LA MASSE DU SPLASH

Sur n'importe quelle pente, l'impact des gouttes de pluie projette les particules de sol dans les directions amont et aval. Il a été montré qu'une plus grande quantité de particules est rejaillie vers l'aval relativement au côté amont, la divergence entre les deux côtés augmente avec l'accentuation de la pente.

Dans cette étude, le pot de splash, la surface du sol et le panneau d'éclaboussure sont sur le même plan. Durant l'expérience, les gouttes détachent les particules de sol afin de niveler la surface horizontalement. Ce processus mène à des variations de projections des particules de leurs points d'impact car l'angle de projection influe sur la distance de rejaillissement. (Mouzai ,1992 ; Savat ,1981 ; Moyerson et De Ploey, 1976).

Nous avons comparé nos résultats avec l'équation de Van Dijk et al. (2002) qui est appliquée séparément à chaque catégorie de diamètre de la goutte et pour chaque pente de la surface du sol. Les différences dans les résultats et ceux publiés par les autres auteurs mènent à une nouvelle description du phénomène d'initiation du mouvement des particules sous l'impact des gouttes de pluie qui combine entre les deux approches explicatives citées dans le paragraphe IV.2, à savoir celle de la pression verticale et de l'empreinte latérale.

Les tableaux ci-dessous (IV.24, IV.26, IV.28, IV.30, IV.32, IV.34, IV.36, IV.38) ainsi que les figures qui les illustrent (IV.22, IV.23, IV.24, IV.25, IV.26, IV.27, IV.28, IV.29) donnent l'évolution du détachement du sol par impact des gouttes de pluie avec l'augmentation de la pente de surface.

Tableau IV.26 : Distribution de la masse des particules rejaillies (mi) en fonction de la pente du sol pour le diamètre 3,7 mm

	mi côté amont (g/m ² /rad/goutte)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°

3,75	0,12437	0,11723	0,11216	0,09880	0,09327	0,08706
6,25	0,05142	0,04895	0,04727	0,04561	0,04479	0,03911
8,75	0,03020	0,02922	0,02740	0,02566	0,02369	0,02221
11,75	0,01848	0,01508	0,01376	0,01271	0,01108	0,01055
15,25	0,01133	0,01052	0,01011	0,00943	0,00813	0,00736
18,75	0,00757	0,00794	0,00731	0,00619	0,00579	0,00563
22,65	0,00490	0,00459	0,00423	0,00383	0,00366	0,00355
26,95	0,00388	0,00365	0,00348	0,00307	0,00287	0,00283
31,35	0,00272	0,00262	0,00256	0,00243	0,00227	0,00216
36,25	0,00204	0,00188	0,00181	0,00171	0,00162	0,00155
41,65	0,00160	0,00148	0,00143	0,00137	0,00131	0,00123
47,15	0,00127	0,00126	0,00120	0,00115	0,00109	0,00106
53,05	0,00098	0,00096	0,00091	0,00088	0,00082	0,00079
59,45	0,00083	0,00079	0,00078	0,00072	0,00069	0,00066
65,95	0,00066	0,00070	0,00064	0,00061	0,00054	0,00051
74,2	0,00042	0,00038	0,00037	0,00034	0,00026	0,00025
84,2	0,00034	0,00030	0,00026	0,00021	0,00017	0,00013
94,2	0,00027	0,00026	0,00021	0,00016	0,00014	0,00011
Σ mi	0,263	0,248	0,236	0,215	0,202	0,187

Les résultats du tableau IV.24 sont illustrés sur la figure IV.22.

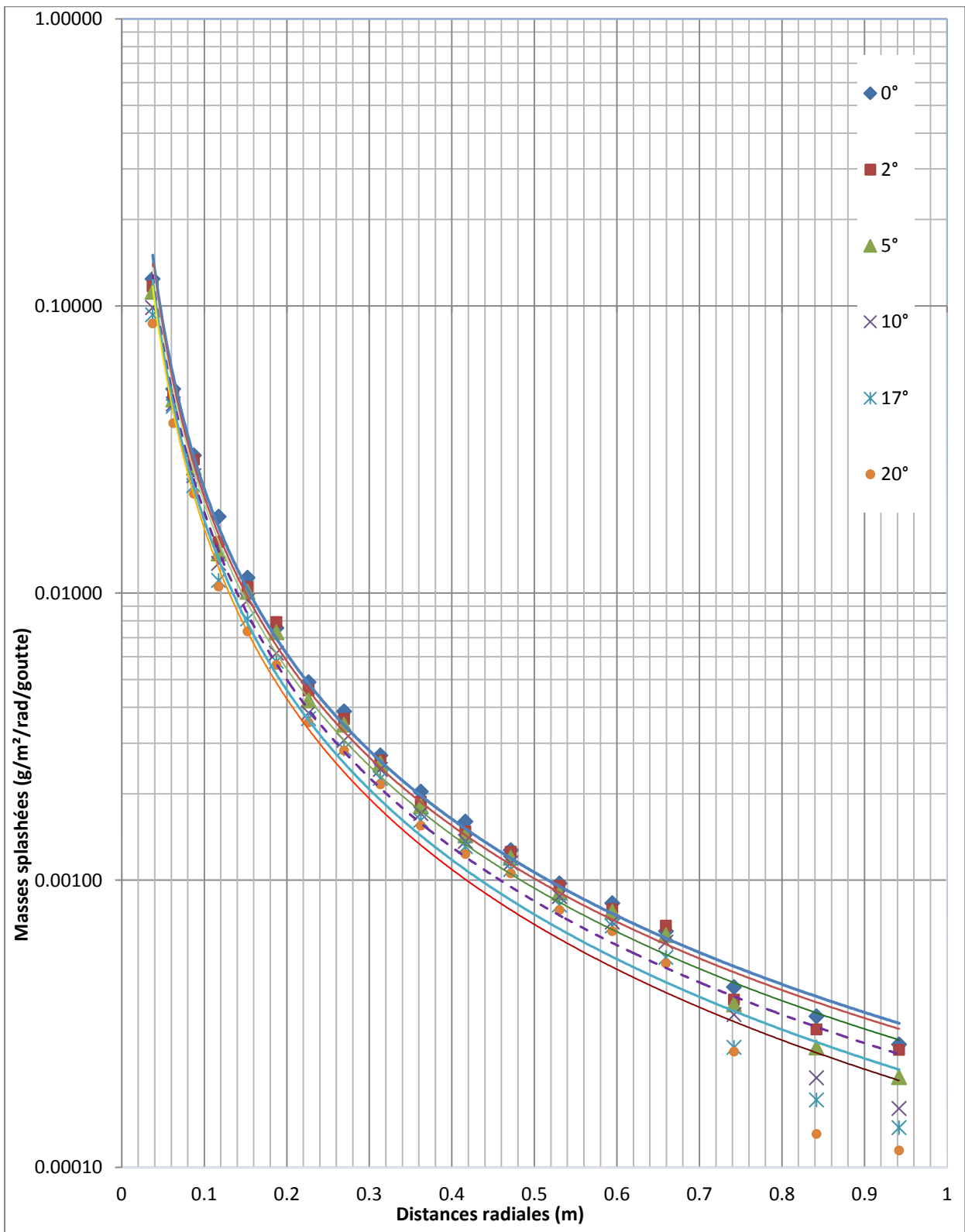


Figure IV.22 : Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.

Tableau IV.27 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaiées vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.

Pente du sol	Puissance		Exponentielle	
	Equation	R ²	Equation	R ²
0°	$m_i = 0,0003 l_i^{-1,911}$	0,997	$m_i = 0,0339 e^{-6,041 l_i}$	0,885
2°	$m_i = 0,0003 l_i^{-1,904}$	0,995	$m_i = 0,032 e^{-6,064 l_i}$	0,885
5°	$m_i = 0,0002 l_i^{-1,922}$	0,993	$m_i = 0,0309 e^{-6,114 l_i}$	0,894
10°	$m_i = 0,0002 l_i^{-1,938}$	0,988	$m_i = 0,0292 e^{-6,215 l_i}$	0,903
17°	$m_i = 0,0002 l_i^{-1,964}$	0,984	$m_i = 0,028 e^{-6,332 l_i}$	0,908
20°	$m_i = 0,0002 l_i^{-1,976}$	0,977	$m_i = 0,027 e^{-6,427 l_i}$	0,919

Tableau IV.28: Distribution de la masse des particules rejaillies (m_i) vers l'aval en fonction de la pente du sol pour le diamètre **3,7 mm**.

	m_i côté aval (mg/m²/rad/goutte)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,75	0,12437	0,14279	0,15891	0,17549	0,18678	0,21188
6,25	0,05142	0,05970	0,07876	0,09120	0,09963	0,11497
8,75	0,03020	0,03711	0,04392	0,05182	0,06416	0,07156
11,75	0,01848	0,01927	0,02153	0,02525	0,02788	0,03103
15,25	0,01133	0,01400	0,01456	0,01631	0,01926	0,02007
18,75	0,00757	0,00908	0,00951	0,01211	0,01421	0,01573
22,65	0,00490	0,00539	0,00650	0,00712	0,00822	0,00958
26,95	0,00388	0,00443	0,00481	0,00576	0,00650	0,00701
31,35	0,00272	0,00318	0,00358	0,00422	0,00476	0,00530
36,25	0,00204	0,00217	0,00240	0,00284	0,00318	0,00339
41,65	0,00160	0,00172	0,00189	0,00210	0,00206	0,00253
47,15	0,00127	0,00137	0,00153	0,00165	0,00156	0,00164
53,05	0,00098	0,00099	0,00106	0,00122	0,00119	0,00123
59,45	0,00083	0,00085	0,00087	0,00091	0,00096	0,00102
65,95	0,00066	0,00070	0,00071	0,00078	0,00081	0,00087
74,2	0,00042	0,00041	0,00046	0,00041	0,00044	0,00050
84,2	0,00034	0,00033	0,00036	0,00035	0,00036	0,00041
94,2	0,00027	0,00026	0,00028	0,00030	0,00028	0,00031
Σm_i	0,263	0,304	0,352	0,400	0,442	0,499

Les résultats du tableau IV.26 sont illustrés sur la figure IV.23.

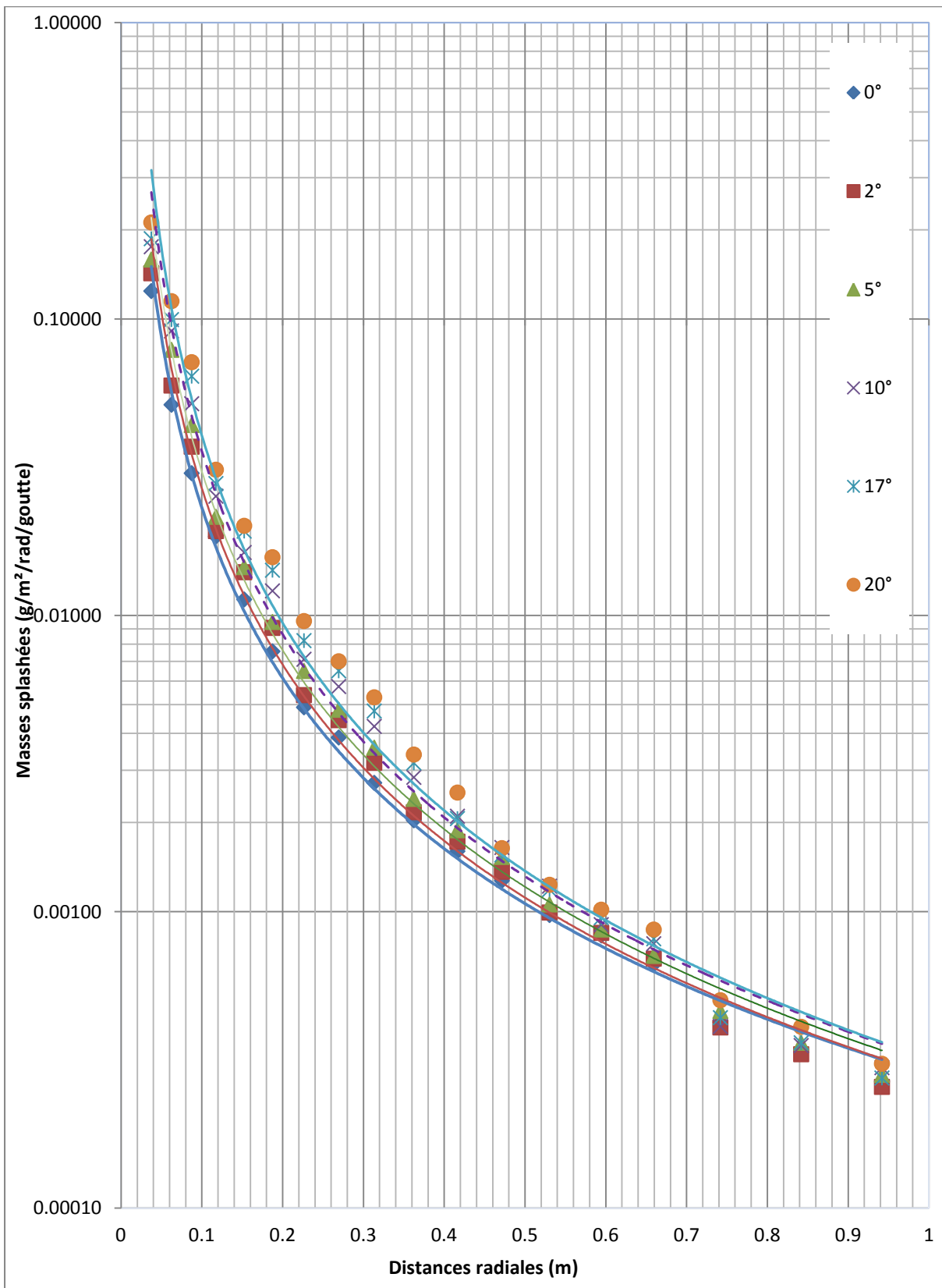


Figure IV.23 : Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.

Tableau IV.29 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 3,7 mm.

Pente du sol	Puissance		Exponentielle	
	Equation	R ²	Equation	R ²
0°	$m_i = 0,0003 l_i^{-1,911}$	0,997	$m_i = 0,0339 e^{-6,041 l_i}$	0,885
2°	$m_i = 0,0003 l_i^{-1,975}$	0,994	$m_i = 0,0405 e^{-6,286 l_i}$	0,894
5°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,006}$	0,995	$m_i = 0,0465 e^{-6,371 l_i}$	0,891
10°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,052}$	0,991	$m_i = 0,0558 e^{-6,573 l_i}$	0,903
17°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,102}$	0,988	$m_i = 0,0648 e^{-6,772 l_i}$	0,911
20°	$m_i = 0,0004 l_i^{-2,11}$	0,989	$m_i = 0,0721 e^{-6,784 l_i}$	0,908

Tableau IV.30 : Distribution de la masse des particules rejaillies (m_i) vers l'amont en fonction de la pente du sol pour le diamètre **4 mm**.

	m_i côté amont ($g/m^2/rad/goutte$)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,75	0,18524	0,09455	0,07383	0,05901	0,04439	0,03329
6,25	0,07512	0,04172	0,02860	0,02188	0,01732	0,01196
8,75	0,04600	0,02101	0,01509	0,01170	0,00859	0,00592
11,75	0,01919	0,01043	0,00834	0,00545	0,00398	0,00266
15,25	0,01415	0,00644	0,00521	0,00374	0,00263	0,00165
18,75	0,00983	0,00386	0,00319	0,00278	0,00192	0,00115
22,65	0,00624	0,00271	0,00195	0,00157	0,00121	0,00072
26,95	0,00412	0,00186	0,00151	0,00121	0,00077	0,00049
31,35	0,00318	0,00140	0,00114	0,00079	0,00054	0,00030
36,25	0,00187	0,00102	0,00078	0,00052	0,00038	0,00018
41,65	0,00142	0,00065	0,00058	0,00039	0,00025	0,00015
47,15	0,00135	0,00051	0,00040	0,00032	0,00019	0,00013
53,05	0,00093	0,00041	0,00029	0,00020	0,00012	0,00009
59,45	0,00062	0,00031	0,00026	0,00016	0,00010	0,00007
65,95	0,00046	0,00027	0,00022	0,00012	0,00008	0,00005
74,2	0,00036	0,00020	0,00013	0,00007	0,00005	0,00003
84,2	0,00030	0,00017	0,00010	0,00007	0,00004	0,00003
94,2	0,00021	0,00013	0,00006	0,00006	0,00004	0,00002
Σm_i	0,371	0,188	0,142	0,110	0,083	0,059

Les résultats du tableau IV.28 sont illustrés sur la figure IV.24.

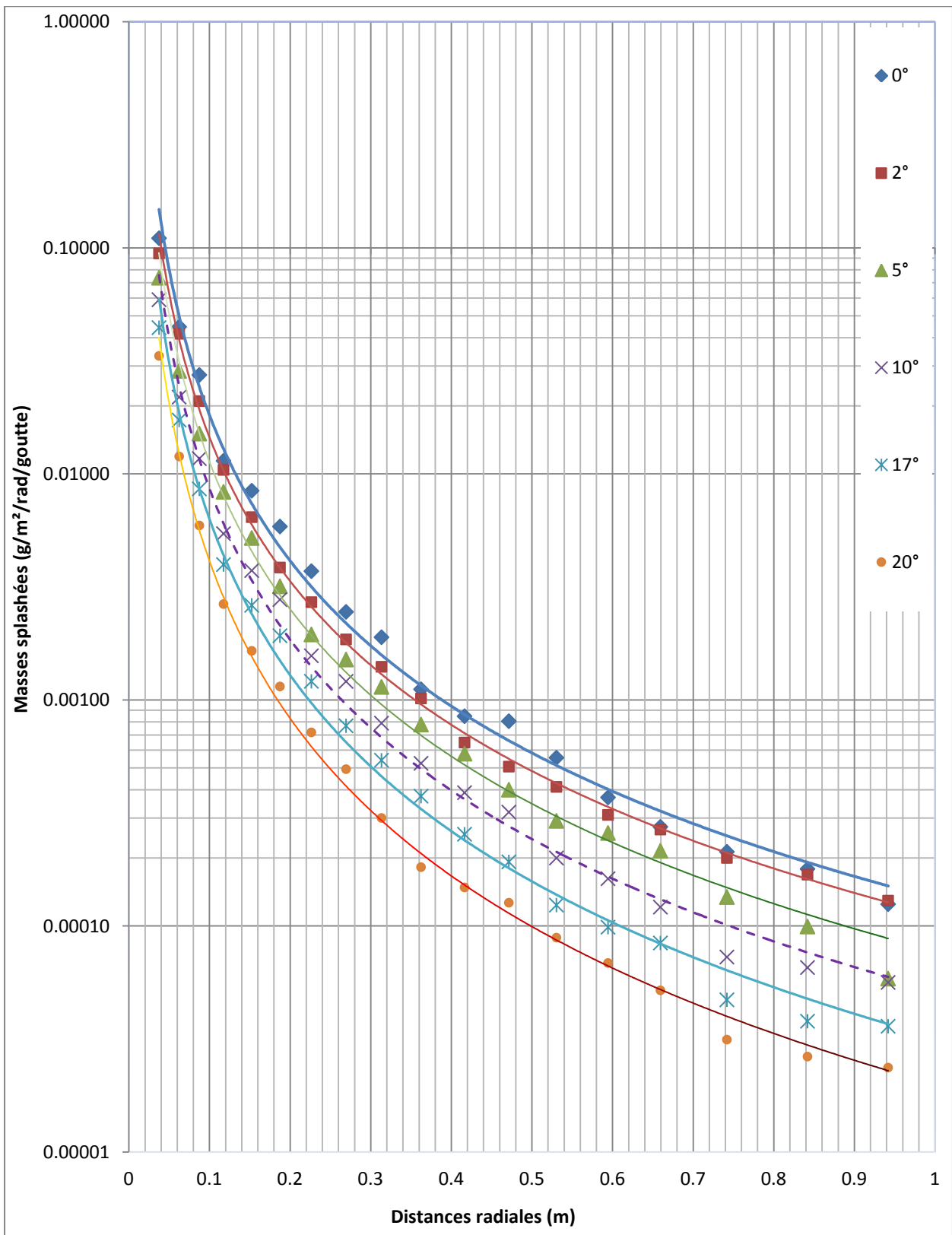


Figure IV.24 : Distribution de la masse des particules rejallies vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol, pour un diamètre de la goutte égal à 4 mm.

Tableau IV.31 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4 mm.

Pente du sol	Puissance		Exponentielle	
	Equation	R^2	Equation	R^2
0°	$m_i = 0,0001 l_i^{-2,137}$	0,994	$m_i = 0,0282 e^{-6,78l_i}$	0,889
2°	$m_i = 0,0001 l_i^{-2,111}$	0,999	$m_i = 0,0212 e^{-6,565 l_i}$	0,858
5°	$m_i = 8.10^{-5} l_i^{-2,166}$	0,994	$m_i = 0,0178 e^{-6,886 l_i}$	0,893
10°	$m_i = 5.10^{-5} l_i^{-2,218}$	0,994	$m_i = 0,0135 e^{-7,032 l_i}$	0,888
17°	$m_i = 3.10^{-5} l_i^{-2,293}$	0,996	$m_i = 0,0101 e^{-7,273l_i}$	0,888
20°	$m_i = 2.10^{-5} l_i^{-2,316}$	0,997	$m_i = 0,0064 e^{-7,256 l_i}$	0,869

Tableau IV.32 : Distribution de la masse des particules rejaillies (m_i) en fonction de la pente du sol pour le diamètre 4 mm (côté aval)

	mi côté aval (g/m²/rad/goutte)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,75	0,11040	0,16419	0,20099	0,21741	0,31706	0,36235
6,25	0,04477	0,06590	0,08153	0,09790	0,12365	0,17665
8,75	0,02742	0,03640	0,04562	0,05513	0,06678	0,09221
11,75	0,01144	0,01662	0,02168	0,02478	0,03289	0,04337
15,25	0,00843	0,01082	0,01414	0,01760	0,02259	0,02625
18,75	0,00586	0,00679	0,00906	0,01166	0,01289	0,01456
22,65	0,00372	0,00431	0,00508	0,00581	0,00743	0,00916
26,95	0,00246	0,00302	0,00384	0,00461	0,00534	0,00662
31,35	0,00190	0,00221	0,00260	0,00309	0,00368	0,00460
36,25	0,00112	0,00146	0,00181	0,00218	0,00252	0,00289
41,65	0,00085	0,00115	0,00143	0,00173	0,00191	0,00227
47,15	0,00081	0,00090	0,00106	0,00123	0,00140	0,00173
53,05	0,00056	0,00062	0,00064	0,00090	0,00098	0,00124
59,45	0,00037	0,00045	0,00054	0,00063	0,00076	0,00094
65,95	0,00027	0,00039	0,00043	0,00049	0,00061	0,00074
74,2	0,00021	0,00023	0,00024	0,00027	0,00030	0,00036
84,2	0,00018	0,00018	0,00020	0,00022	0,00024	0,00029
94,2	0,00013	0,00015	0,00017	0,00019	0,00021	0,00025
∑ mi	0,221	0,316	0,391	0,446	0,601	0,746

Les résultats du tableau IV.30 sont illustrés sur la figure IV.25.

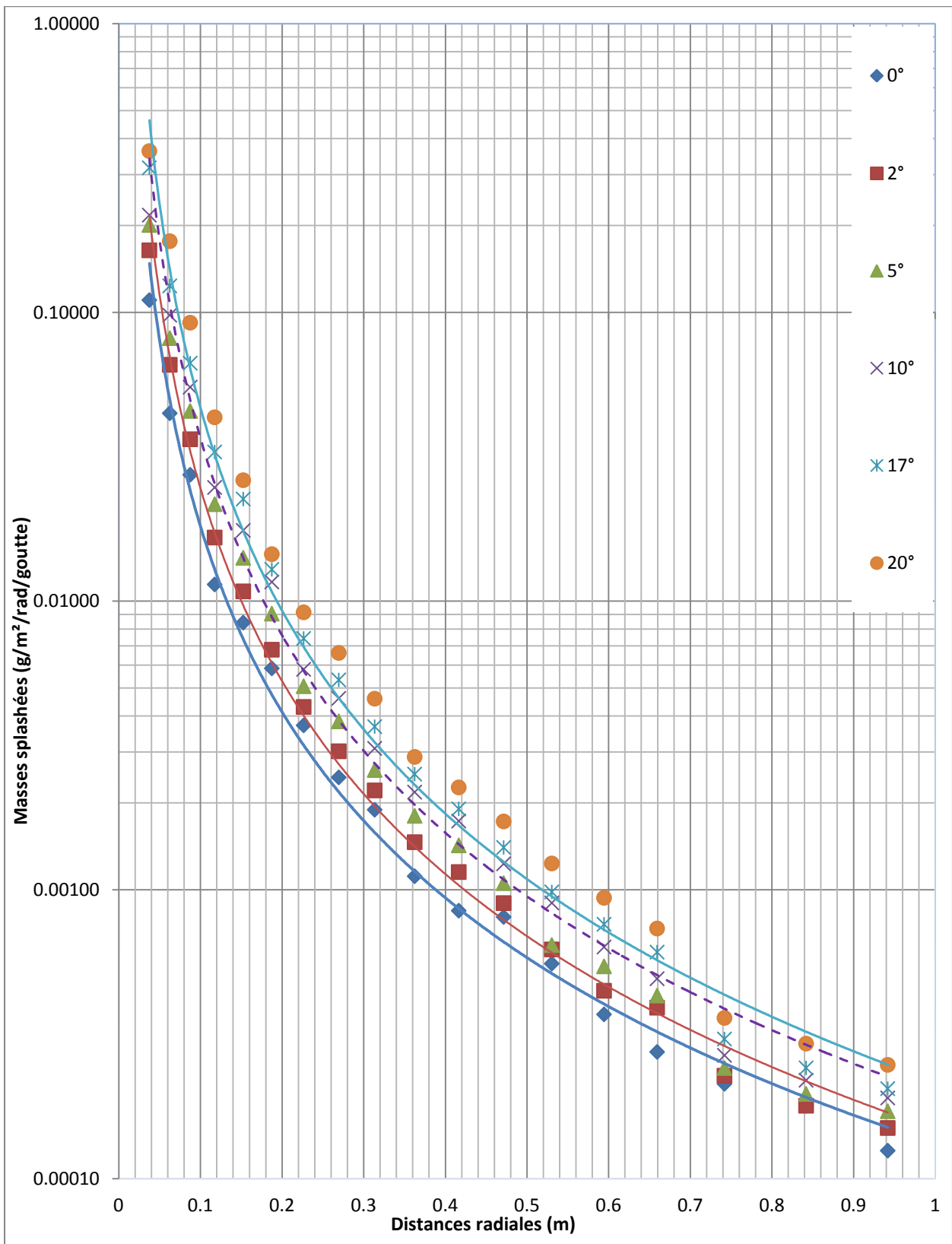


Figure IV.25 : Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale li pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 4 mm.

Tableau IV.33 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4 mm.

Pente du sol	Puissance		Exponentielle	
	Equation	R ²	Equation	R ²
0°	$m_i = 0,0001 l_i^{-2,137}$	0,994	$m_i = 0,0282 e^{-6,78l_i}$	0,889
2°	$m_i = 0,0001l_i^{-2,22}$	0,996	$m_i = 0,0385e^{-7,024 l_i}$	0,886
5°	$m_i = 0,0002 l_i^{-2,269}$	0,994	$m_i = 0,0497e^{-7,214 l_i}$	0,892
10°	$m_i = 0,0002 l_i^{-2,271}$	0,991	$m_i = 0,06e^{-7,267 l_i}$	0,902
17°	$m_i = 0,0002 l_i^{-2,336}$	0,993	$m_i = 0,0769e^{-7,435 l_i}$	0,898
20°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,357}$	0,992	$m_i = 0,0967e^{-7,514 l_i}$	0,896

Tableau IV.34 : Distribution de la masse des particules rejaillies (m_i) en fonction de la pente du sol pour le diamètre **4,6 mm (côté amont)**

	mi côté amont (g/m²/rad/goutte)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,75	0,31353	0,25252	0,19290	0,14229	0,10798	0,07591
6,25	0,11096	0,08447	0,06367	0,04692	0,03247	0,02465
8,75	0,07302	0,05399	0,03913	0,02428	0,01580	0,01203
11,75	0,03591	0,02651	0,01663	0,01110	0,00704	0,00561
15,25	0,02292	0,01660	0,01318	0,00668	0,00463	0,00344
18,75	0,01456	0,01084	0,00802	0,00491	0,00318	0,00257
22,65	0,00629	0,00522	0,00419	0,00288	0,00175	0,00132
26,95	0,00503	0,00407	0,00296	0,00220	0,00154	0,00090
31,35	0,00401	0,00263	0,00217	0,00155	0,00119	0,00070
36,25	0,00227	0,00184	0,00141	0,00102	0,00075	0,00047
41,65	0,00154	0,00138	0,00111	0,00071	0,00053	0,00036
47,15	0,00141	0,00114	0,00089	0,00058	0,00043	0,00029
53,05	0,00095	0,00081	0,00059	0,00043	0,00031	0,00021
59,45	0,00078	0,00066	0,00050	0,00032	0,00024	0,00016
65,95	0,00061	0,00050	0,00038	0,00024	0,00019	0,00014
74,2	0,00037	0,00034	0,00024	0,00017	0,00011	0,00007
84,2	0,00034	0,00032	0,00021	0,00014	0,00009	0,00006
94,2	0,00027	0,00025	0,00019	0,00014	0,00008	0,00005
Σ mi	0,595	0,464	0,348	0,247	0,178	0,129

Les résultats du tableau IV.32 sont illustrés sur la figure IV.26.

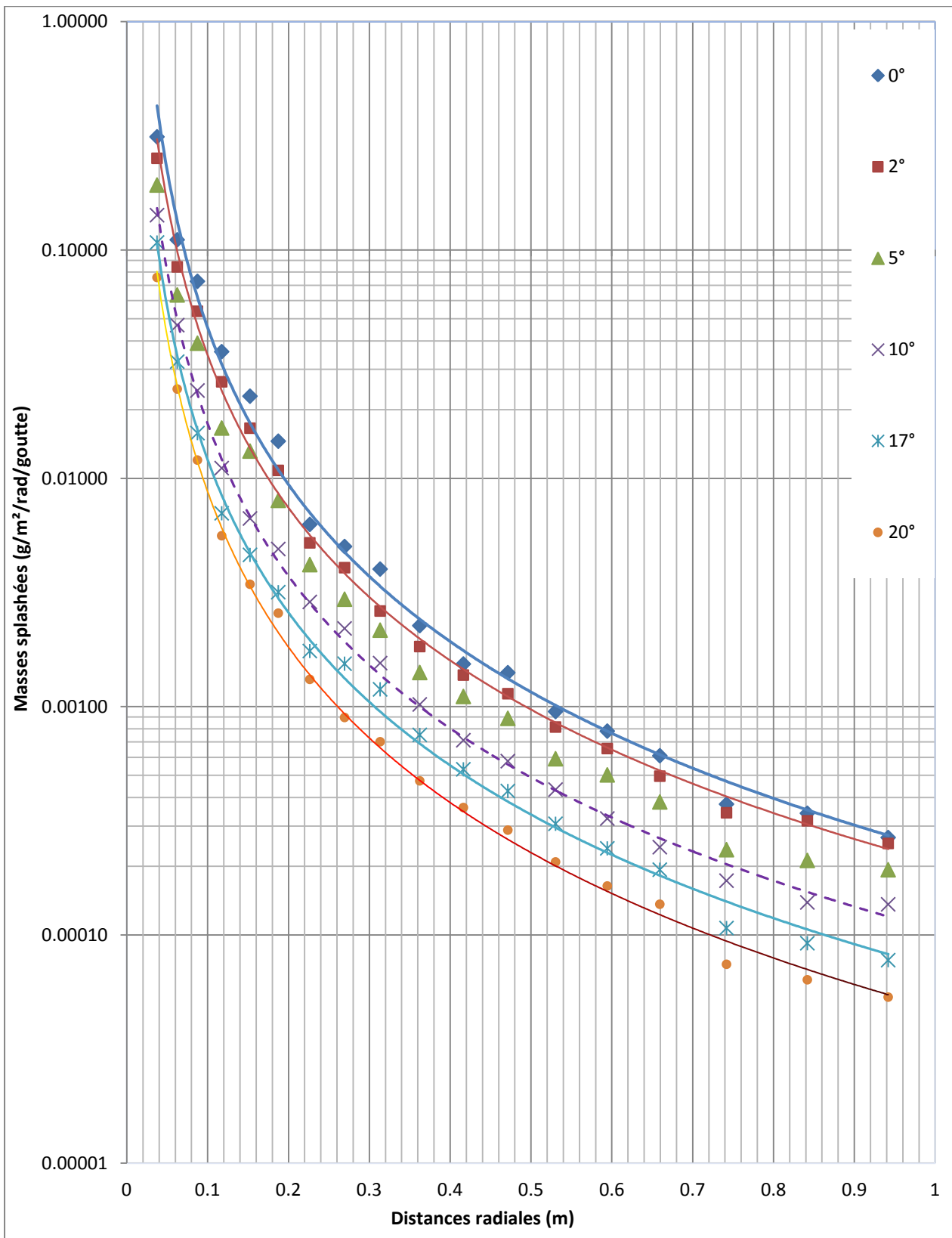


Figure IV.26 : Distribution de la masse des particules rejallies vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 4,6 mm.

Tableau IV.35 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4,6 mm.

Pente du sol	Puissance		Exponentielle	
	Equation	R ²	Equation	R ²
0°	$m_i = 0,0002 l_i^{-2,283}$	0,994	$m_i = 0,0712e^{-7,18l_i}$	0,873
2°	$m_i = 0,0002 l_i^{-2,22}$	0,998	$m_i = 0,0521e^{-6,924 l_i}$	0,861
5°	$m_i = 0,0002l_i^{-2,22}$	0,996	$m_i = 0,0394e^{-6,947 l_i}$	0,867
10°	$m_i = 0,0001l_i^{-2,217}$	0,998	$m_i = 0,026e^{-6,906 l_i}$	0,861
17°	$m_i = 7.10^{-5} l_i^{-2,22}$	0,997	$m_i = 0,0183e^{-6,959l_i}$	0,868
20°	$m_i = 5.10^{-5} l_i^{-2,263}$	0,998	$m_i = 0,0133e^{-7,067 l_i}$	0,863

Tableau IV.36: Distribution de la masse des particules rejaillies (m_i) en fonction de la pente du sol pour le diamètre **4,6 mm** (côté aval)

	mi côté aval (mg/m²/rad/goutte)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,75	0,31353	0,39568	0,45635	0,49742	0,66797	0,83400
6,25	0,11096	0,17200	0,23267	0,25852	0,36033	0,45964
8,75	0,07302	0,08654	0,11487	0,13890	0,17983	0,25701
11,75	0,03591	0,04358	0,05235	0,06421	0,08416	0,13117
15,25	0,02292	0,02810	0,03184	0,03848	0,04993	0,06758
18,75	0,01456	0,01622	0,02168	0,02478	0,03130	0,04568
22,65	0,00629	0,00914	0,01293	0,01632	0,01872	0,02461
26,95	0,00503	0,00683	0,00755	0,00916	0,01294	0,01729
31,35	0,00401	0,00491	0,00572	0,00676	0,00858	0,01134
36,25	0,00227	0,00271	0,00358	0,00441	0,00586	0,00755
41,65	0,00154	0,00198	0,00259	0,00306	0,00416	0,00540
47,15	0,00141	0,00155	0,00195	0,00241	0,00342	0,00422
53,05	0,00095	0,00108	0,00140	0,00164	0,00230	0,00288
59,45	0,00078	0,00089	0,00111	0,00131	0,00167	0,00202
65,95	0,00061	0,00074	0,00092	0,00107	0,00141	0,00166
74,2	0,00037	0,00041	0,00047	0,00053	0,00060	0,00070
84,2	0,00034	0,00036	0,00041	0,00047	0,00053	0,00058
94,2	0,00027	0,00031	0,00036	0,00042	0,00047	0,00050
Σ mi	0,595	0,773	0,949	1,070	1,434	1,874

Les résultats du tableau IV.34 sont illustrés sur la figure IV.27.

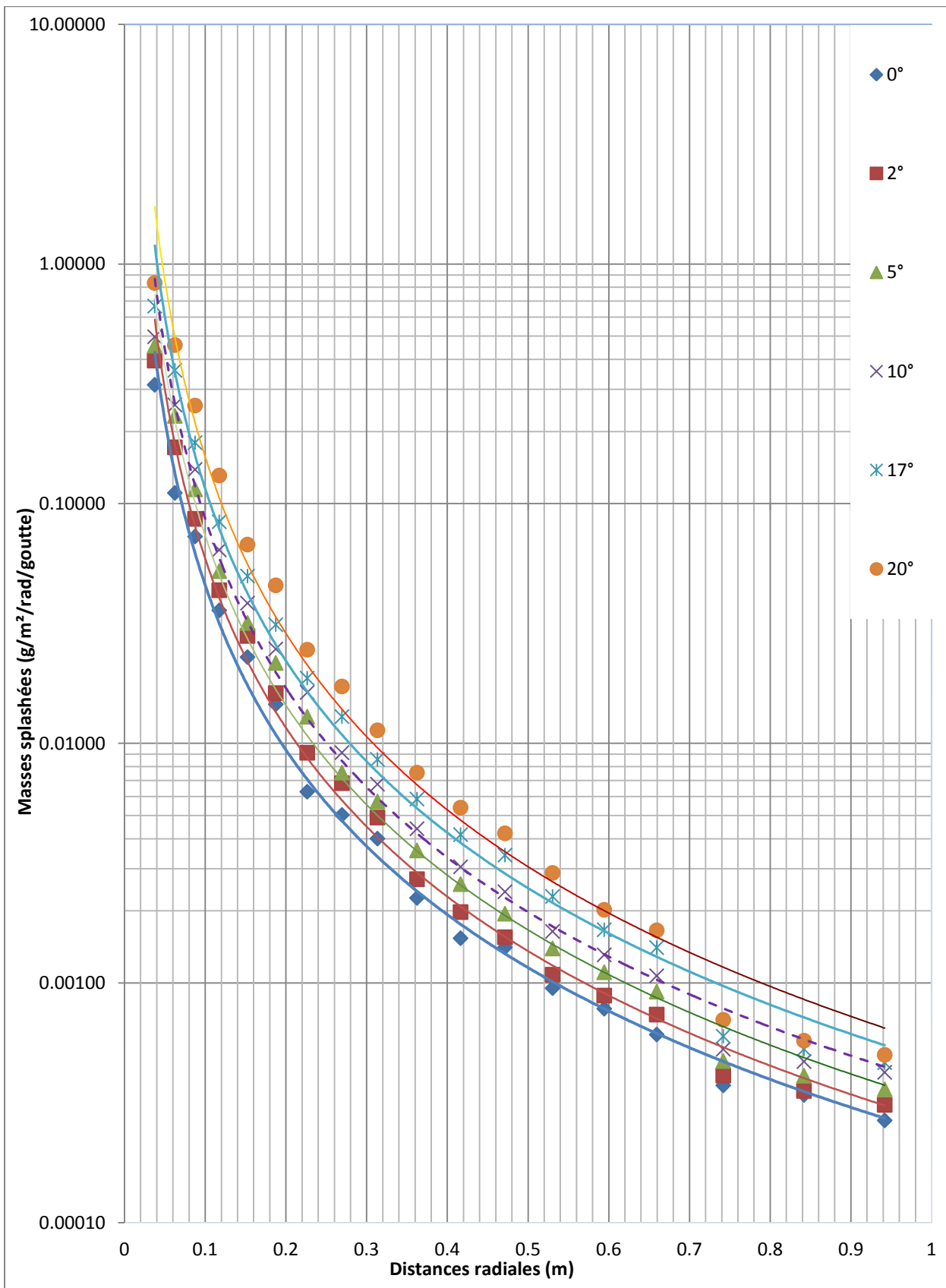


Figure IV.27 : Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale li pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 4,6 mm.

Tableau IV.37 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 4,6 mm.

Pente du sol	Puissance		Exponentielle	
	Equation	R ²	Equation	R ²
0°	$m_i = 0,0002 l_i^{-2,283}$	0,994	$m_i = 0,0712e^{-7,18l_i}$	0,873
2°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,342}$	0,995	$m_i = 0,0937e^{-7,388 l_i}$	0,879
5°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,355}$	0,993	$m_i = 0,1193e^{-7,461 l_i}$	0,886
10°	$m_i = 0,0004 l_i^{-2,348}$	0,991	$m_i = 0,1416e^{-7,475 l_i}$	0,893
17°	$m_i = 0,0005l_i^{-2,383}$	0,989	$m_i = 0,1933e^{-7,632 l_i}$	0,901
20°	$m_i = 0,0006 l_i^{-2,447}$	0,985	$m_i = 0,2755e^{-7,913 l_i}$	0,914

Tableau IV.38 : Distribution de la masse des particules rejaillies (m_i) en fonction de la pente du sol pour le diamètre **5,6 mm** (côté amont)

	m_i côté amont (mg/m²/rad/goutte)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,75	0,83756	0,68658	0,57334	0,45743	0,30573	0,21137
6,25	0,29124	0,23236	0,17440	0,13656	0,09105	0,05893
8,75	0,11695	0,09905	0,08287	0,05196	0,03255	0,01961
11,75	0,06230	0,04667	0,03648	0,02172	0,01397	0,00881
15,25	0,03355	0,02758	0,02095	0,01253	0,00789	0,00537
18,75	0,01424	0,01046	0,00776	0,00525	0,00471	0,00291
22,65	0,00676	0,00645	0,00427	0,00305	0,00225	0,00153
26,95	0,00497	0,00458	0,00336	0,00244	0,00153	0,00092
31,35	0,00482	0,00381	0,00231	0,00181	0,00105	0,00068
36,25	0,00219	0,00179	0,00155	0,00118	0,00070	0,00052
41,65	0,00153	0,00122	0,00097	0,00082	0,00051	0,00035
47,15	0,00168	0,00119	0,00078	0,00059	0,00037	0,00024
53,05	0,00092	0,00076	0,00055	0,00041	0,00025	0,00016
59,45	0,00103	0,00077	0,00040	0,00031	0,00017	0,00012
65,95	0,00052	0,00045	0,00037	0,00026	0,00013	0,00010
74,2	0,00043	0,00030	0,00025	0,00014	0,00009	0,00006
84,2	0,00039	0,00027	0,00023	0,00011	0,00007	0,00006
94,2	0,00030	0,00023	0,00019	0,00009	0,00007	0,00006
Σm_i	1,381	1,125	0,911	0,697	0,463	0,312

Les résultats du tableau IV.36 sont illustrés sur la figure IV.28.

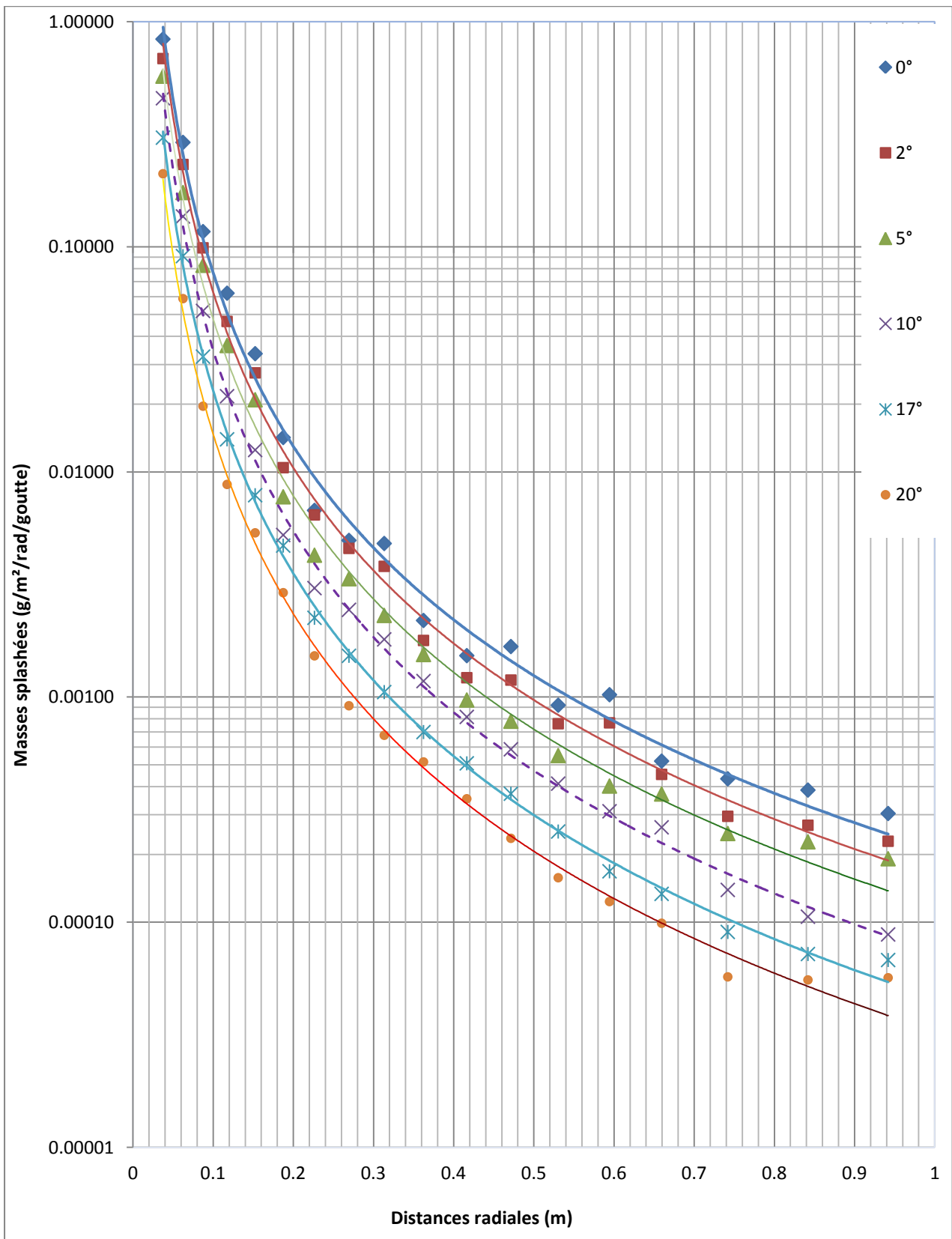


Figure IV.28 : Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 5,6mm.

Tableau IV.39 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejaillies vers l'amont suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 5,6 mm.

Pente du sol	Puissance		Exponentielle	
	Equation	R ²	Equation	R ²
0°	$m_i = 0,0002l_i^{-2,56}$	0,993	$m_i = 0,116 e^{-7,835 l_i}$	0,826
2°	$m_i = 0,0002 l_i^{-2,592}$	0,996	$m_i = 0,0973e^{-7,978 l_i}$	0,838
5°	$m_i = 0,0001l_i^{-2,608}$	0,995	$m_i = 0,0721e^{-7,947 l_i}$	0,821
10°	$m_i = 7.10^{-5}l_i^{-2,672}$	0,998	$m_i = 0,0555e^{-8,272 l_i}$	0,849
17°	$m_i = 5.10^{-5}l_i^{-2,697}$	0,999	$m_i = 0,0365e^{-8,324l_i}$	0,845
20°	$m_i = 3.10^{-5}l_i^{-2,653}$	0,997	$m_i = 0,0227e^{-8,121 l_i}$	0,830

Tableau IV.40 : Distribution de la masse des particules rejaillies (m_i) en fonction de la pente du sol pour le diamètre 5,6 mm (côté aval)

	mi côté aval (g/m²/rad/goutte)					
Distance	Pente					
Li (cm)	0°	2°	5°	10°	17°	20°
3,75	0,83756	0,94739	1,12479	1,42675	1,74381	2,07596
6,25	0,29124	0,36235	0,44614	0,59788	0,70658	1,06440
8,75	0,11695	0,14931	0,18279	0,27823	0,36073	0,48529
11,75	0,06230	0,07090	0,08467	0,11478	0,15058	0,19575
15,25	0,03355	0,04057	0,05039	0,06696	0,08353	0,09746
18,75	0,01424	0,02157	0,02696	0,03774	0,04853	0,06093
22,65	0,00676	0,00839	0,01392	0,02107	0,02583	0,03201
26,95	0,00497	0,00663	0,00886	0,01130	0,01405	0,01832
31,35	0,00482	0,00532	0,00677	0,00853	0,01038	0,01289
36,25	0,00219	0,00273	0,00352	0,00497	0,00639	0,00782
41,65	0,00153	0,00190	0,00267	0,00329	0,00483	0,00620
47,15	0,00168	0,00190	0,00231	0,00269	0,00314	0,00409
53,05	0,00092	0,00126	0,00144	0,00195	0,00221	0,00274
59,45	0,00103	0,00114	0,00126	0,00149	0,00178	0,00212
65,95	0,00052	0,00064	0,00078	0,00102	0,00133	0,00158
74,2	0,00043	0,00052	0,00063	0,00067	0,00071	0,00074
84,2	0,00039	0,00041	0,00047	0,00055	0,00061	0,00064
94,2	0,00030	0,00034	0,00038	0,00045	0,00049	0,00056
Σ mi	1,381	1,623	1,959	2,580	3,166	4,070

Les résultats du tableau IV.38 sont illustrés sur la figure IV.29.

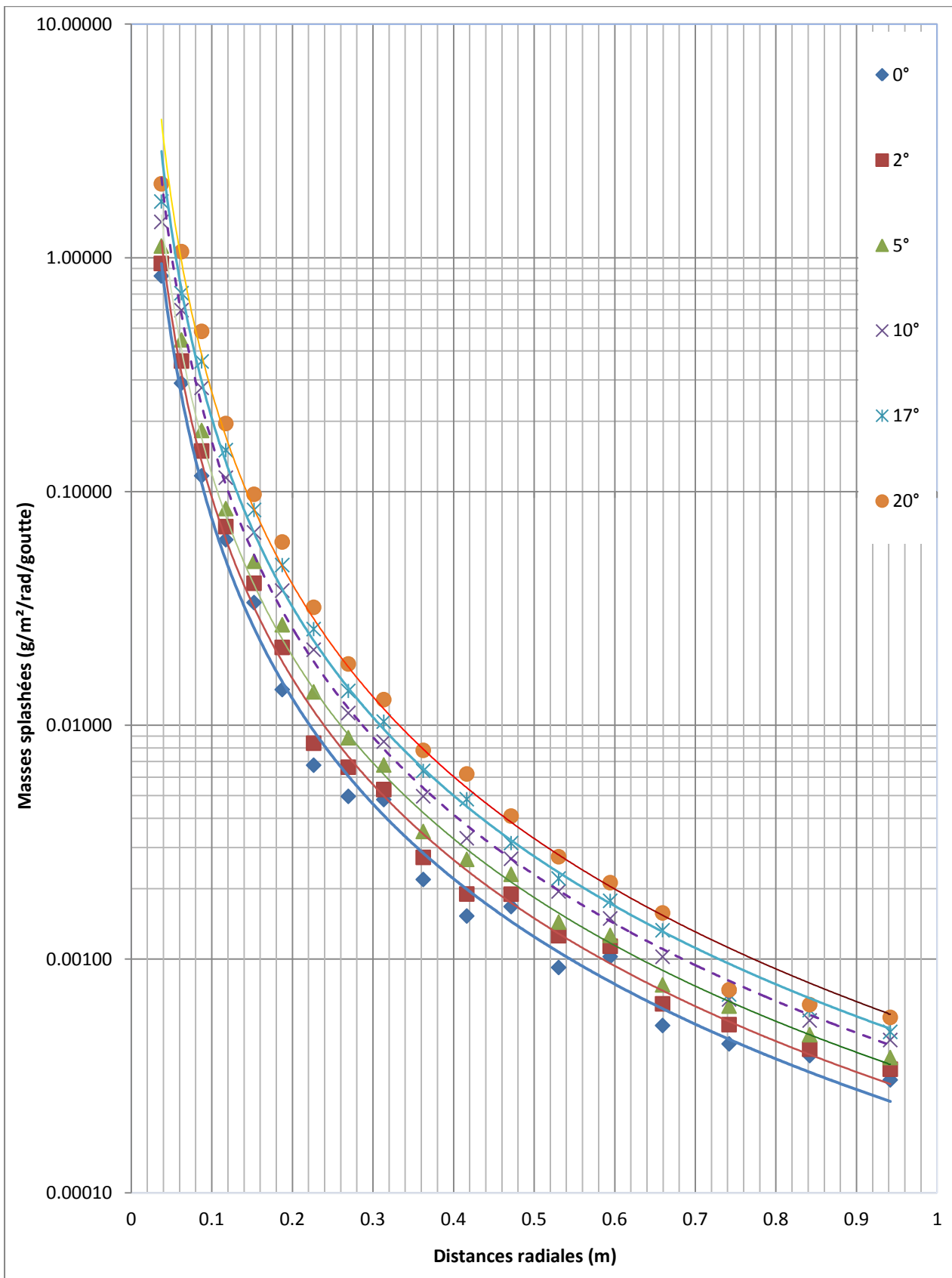


Figure IV.29 : Distribution de la masse des particules rejaillies vers l'aval suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface et pour un diamètre de la goutte égal à 5,6 mm.

Tableau IV.41 : Equations de régression de la distribution de la masse des particules rejallies vers l'aval suivant la distance radiale l_i pour différentes pentes de surface du sol et pour le diamètre de la goutte égal à 5,6 mm.

	Puissance		Exponentielle	
Pente du sol	Equation	R ²	Equation	R ²
0°	$m_i = 0,0002l_i^{-2,56}$	0,993	$m_i = 0,116 e^{-7,835 l_i}$	0,826
2°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,577}$	0,995	$m_i = 0,1468 e^{-7,945l_i}$	0,860
5°	$m_i = 0,0003 l_i^{-2,595}$	0,997	$m_i = 0,1916e^{-8,073 l_i}$	0,857
10°	$m_i = 0,0004 l_i^{-2,65}$	0,996	$m_i = 0,271 e^{-8,299 l_i}$	0,868
17°	$m_i = 0,0004l_i^{-2,682}$	0,995	$m_i = 0,3503 e^{-8,457 l_i}$	0,879
20°	$m_i = 0,0005 l_i^{-2,734}$	0,993	$m_i = 0,466 e^{-8,66 l_i}$	0,885

Les tableaux IV.26, IV.28, IV.30, IV.32, IV.34, IV.36, IV.38 et IV.40 représentent la distribution des masses détachées suivant la distance radiale (l_i) pour les diamètres des gouttes de 3,7mm ; 4mm ; 4,6mm et 5,6mm, des deux côtés (amont et aval) du point d'impact de la goutte. Les résultats de ces tableaux sont représentés graphiquement sur les figures IV.22, IV.23, IV.24, IV.25, IV.26, IV.27, IV.28 et IV.29.

L'allure des courbes des résultats expérimentaux valide la fonction de distribution fondamentale du splash FDSF de Van Dijk (2002), comme elle a validé les résultats de plusieurs chercheurs Riezebos & Epema, 1985 ; Savat et Poesen, 1981 ; Leguédois, 2003 ; Furbish et al., 2007 ; Mouzai et Bouhadeb, 2011.

En effet, les tableaux IV.27, IV.29, IV.31, IV.33, IV.35, IV.37, IV.39 et IV. 41, représentent les équations de régression de la distribution de la masse du splash suivant la distance radiale l_i pour différentes pente de surface. En analysant les différents coefficients de corrélation obtenus, on remarque que la relation est mieux représentée par une fonction en puissance que par la fonction exponentielle. Pour un diamètre de la goutte égal à 3,7mm, les coefficients de détermination R² varient entre 0,977 à 0,997 pour la fonction puissance alors que, pour la fonction exponentielle de type $m_i = a e^{(li/b)}$ avec $b < 0$, ils varient entre 0,885 à 0,919.

On remarque que le coefficient 'a' est proportionnel à la pente. En effet, ses valeurs augmentent de 0,0339 à 0,0721 avec l'augmentation de la pente du sol de 0° jusqu'à 20°, tandis que

l'exposant « b » est inversement proportionnel à l'augmentation de la pente de surface car on constate une diminution de ce coefficient allant de -6,041 à -6,784 pour la même augmentation de la pente et cela du côté aval. Par contre, du côté amont, le coefficient 'a' varie inversement avec la pente, puisqu'il diminue de 0,0339 à 0,027 tandis que « b » diminue de -6,041 à -6,427.

On remarque aussi que la masse totale du splash du côté aval augmente avec l'augmentation de la pente de la surface. En effet, pour un diamètre de 3,7mm, les masses splashées augmentent de 0,263 g/m²/rad/goutte à 0,499 g/m²/rad/goutte, pour des pentes de la surface variant de 0° à 20°. Par contre, cette masse de splash, du côté amont, diminue avec l'augmentation de pente (de 0,263 g/m²/rad/goutte à 0,187 g/m²/rad/goutte). Cela est étroitement lié à la géométrie du sol qui contrôle la force d'impact de la goutte.

VI.4.6. PENTE DU SOL ET DISTANCE MOYENNE DE PROJECTION (DISTANCE DE SPLASH)

L'adaptation de nos résultats expérimentaux à la théorie de Van Dijk (2002) nécessite en deuxième lieu la transformation des valeurs de m_i « des masses de splash » en logarithme pour les ajuster au modèle linéaire publié par (Leguédois et al. ,2005), et que nous avons adapté à notre montage expérimental pour les sols en pente (voir Chapitre Théorie).

De cet ajustement logarithmique on tire les valeurs des distances moyennes de projection « distance moyenne de splash Λ ».

Les paramètres de cette adaptation logarithmique sont représentés ci dessous par les droites de régression de la variation du « log m_{i*} » en fonction de la pente de surface suivant la distance radiale de projection li :

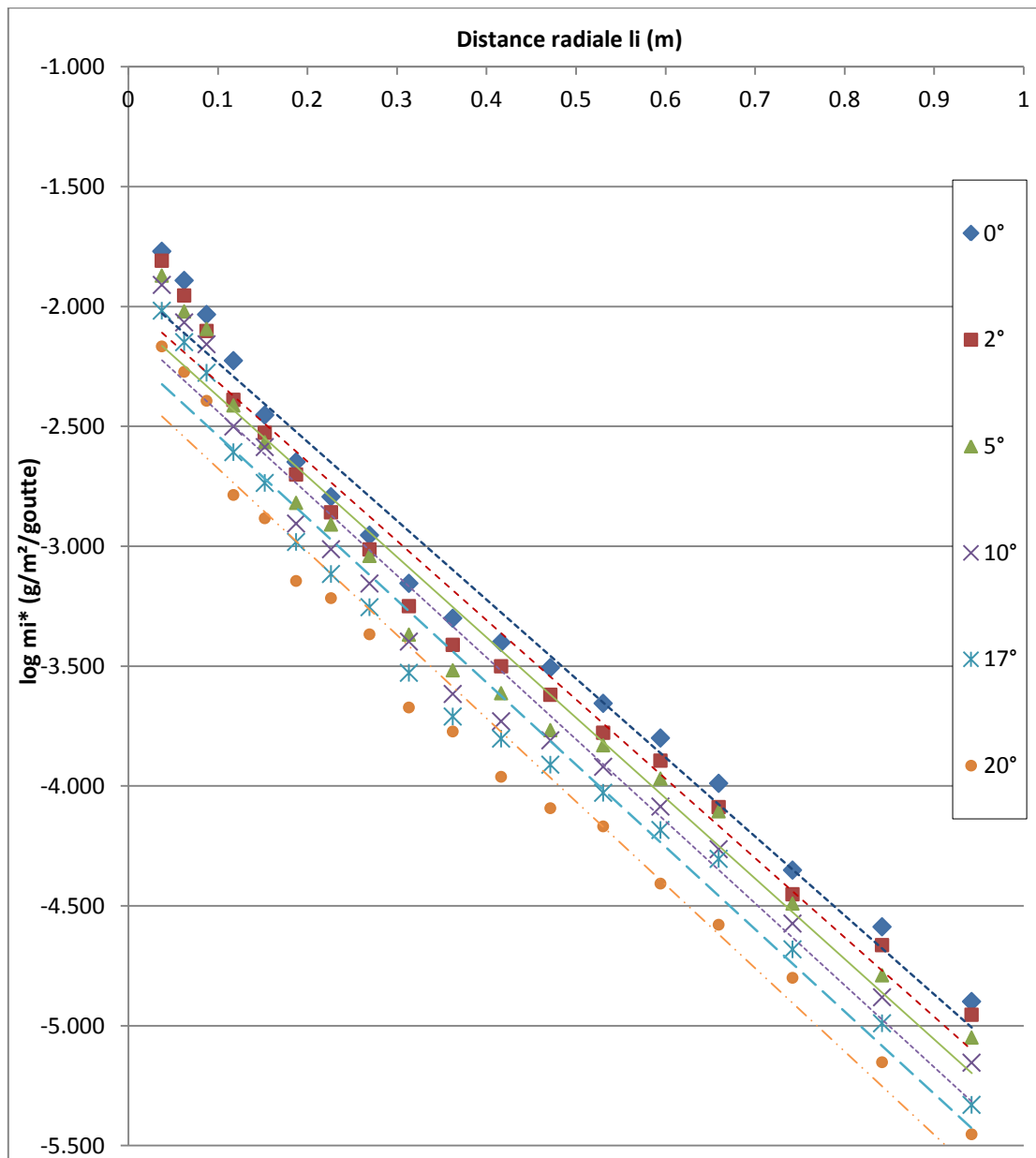


Figure IV. 30 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 3,7 mm côté amont).

Tableau IV.42 : Equations de régression de la variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 3,7 mm côté amont.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	$\log m_i^* = -3,293 li - 1,906$	0,976	30,37	2,26
2°	$\log m_i^* = -3,310 li - 1,986$	0,973	30,23	2,07
5°	$\log m_i^* = -3,355 li - 2,038$	0,968	29,81	1,94
10°	$\log m_i^* = -3,419 li - 2,096$	0,968	29,25	1,80
17°	$\log m_i^* = -3,474 li - 2,328$	0,972	29,15	1,62
20°	$\log m_i^* = -4,211 li + 2,520$	0,989	28,79	1,40

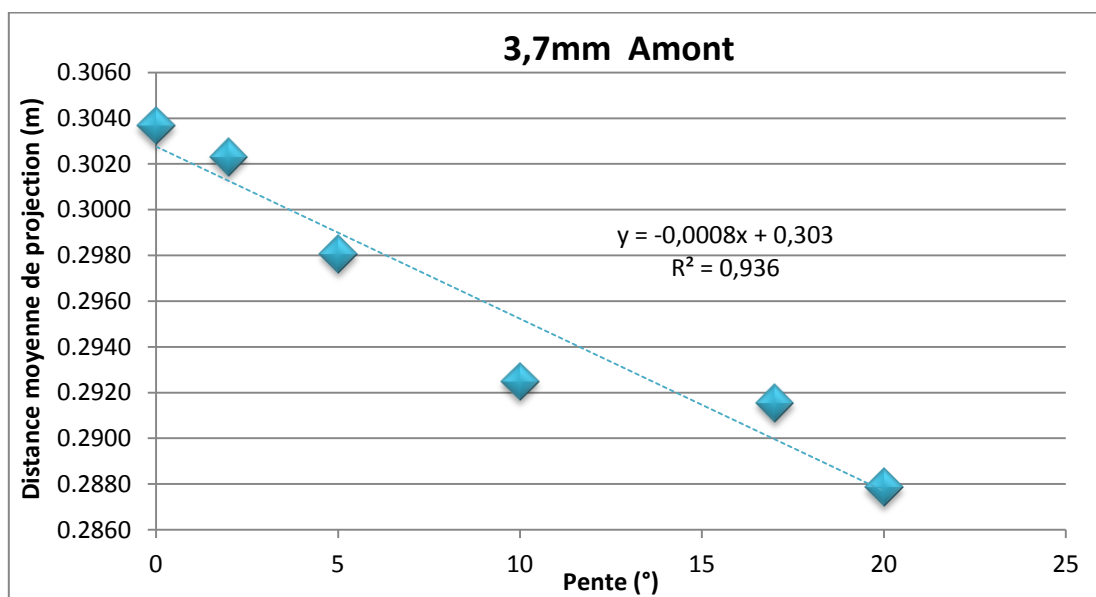


Figure IV. 31 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre de 3,7 mm côté amont).

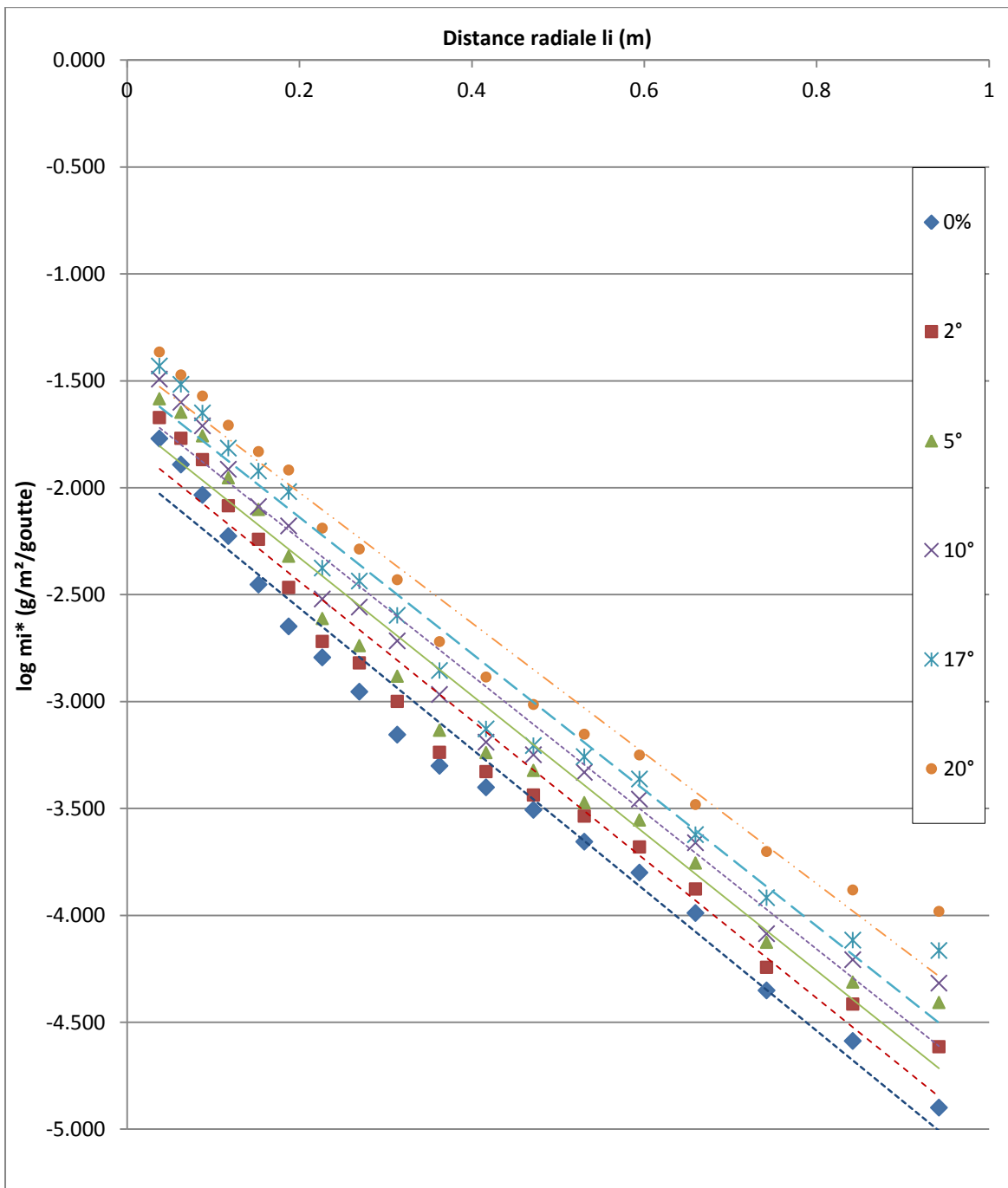


Figure IV. 32 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 3,7 mm côté aval).

Tableau IV.43 : Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection ‘Λ’ ; pour le diamètre de 3,7 mm côté aval.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	$\log m_i^* = -3,293 li - 1,906$	0,976	30,37	2,26
2°	$\log m_i^* = -3,247 li - 1,790$	0,968	30,77	2,57
5°	$\log m_i^* = -3,217 li - 1,685$	0,962	31,02	2,88
10°	$\log m_i^* = -3,197 li - 1,60$	0,969	31,28	3,16
17°	$\log m_i^* = -3,187 li - 1,501$	0,968	31,39	3,50
20°	$\log m_i^* = -3,048 li - 1,414$	0,975	32,63	3,97

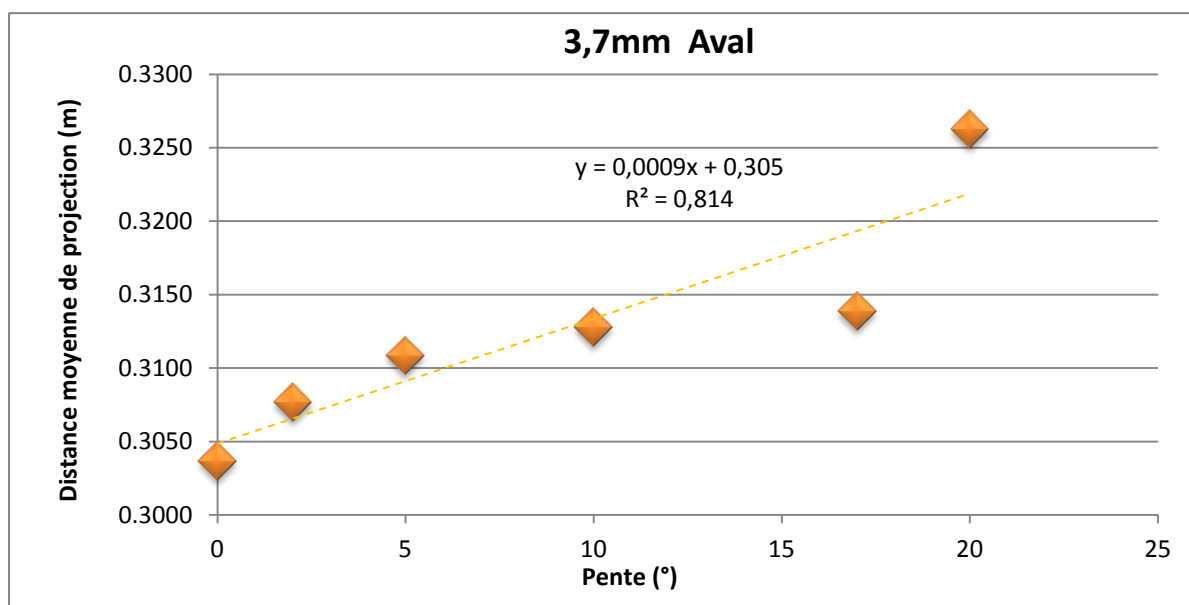


Figure IV. 33 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre de 3,7 mm côté aval).

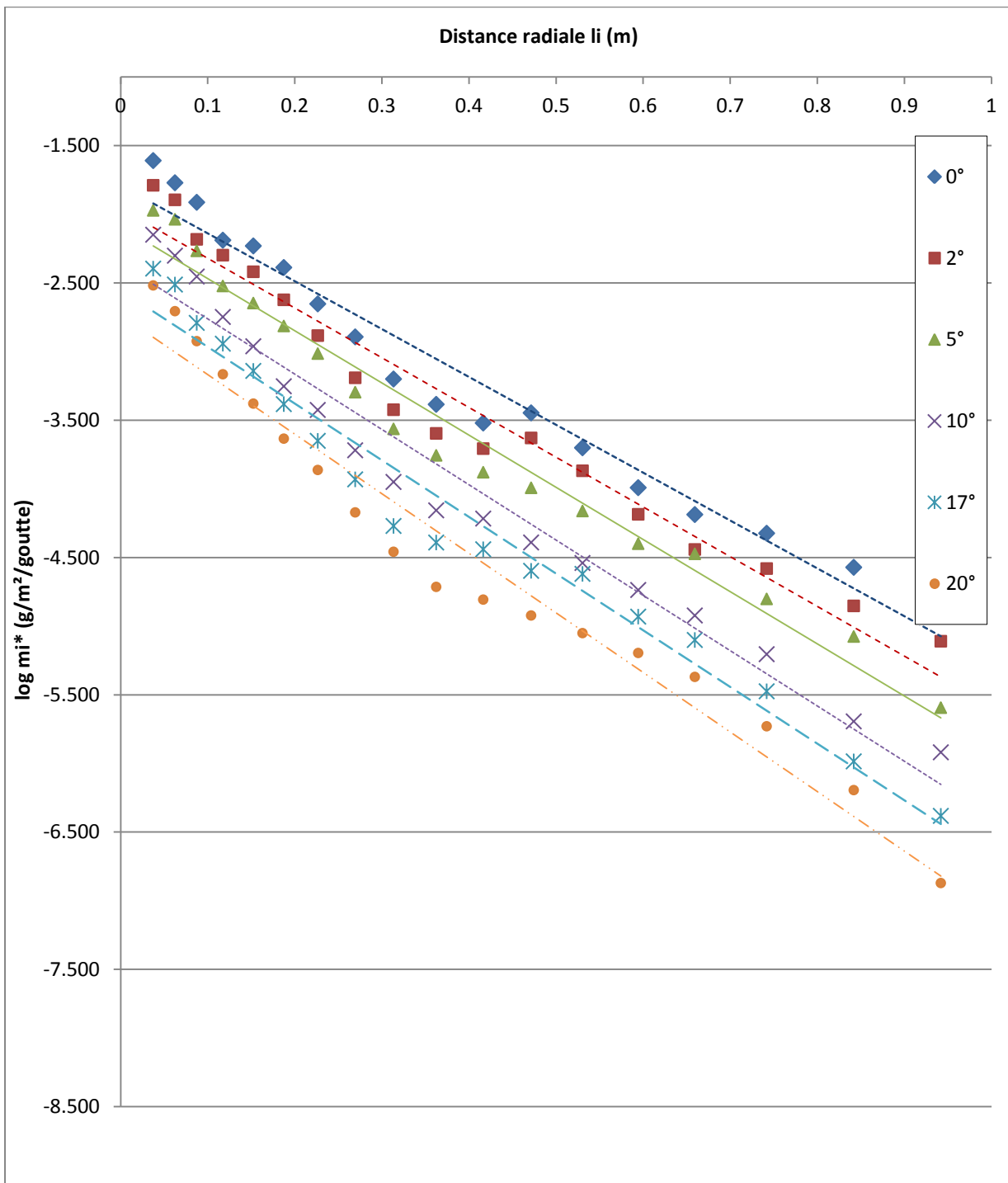


Figure IV. 34 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4 mm côté amont).

Tableau IV.44: Equations de régression de la variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'A'; pour le diamètre 4 mm côté amont.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	$\log m_i^* = -3,485 li - 1,790$	0,958	28,69	2,39
2°	$\log m_i^* = -3,623 li - 1,958$	0,963	27,60	1,95
5°	$\log m_i^* = -3,802 li - 2,087$	0,974	26,30	1,63
10°	$\log m_i^* = -4,027li - 2,359$	0,965	24,83	1,17
17°	$\log m_i^* = -4,127 li - 2,554$	0,969	24,23	0,94
20°	$\log m_i^* = -4,338 li - 2,735$	0,964	23,05	0,75

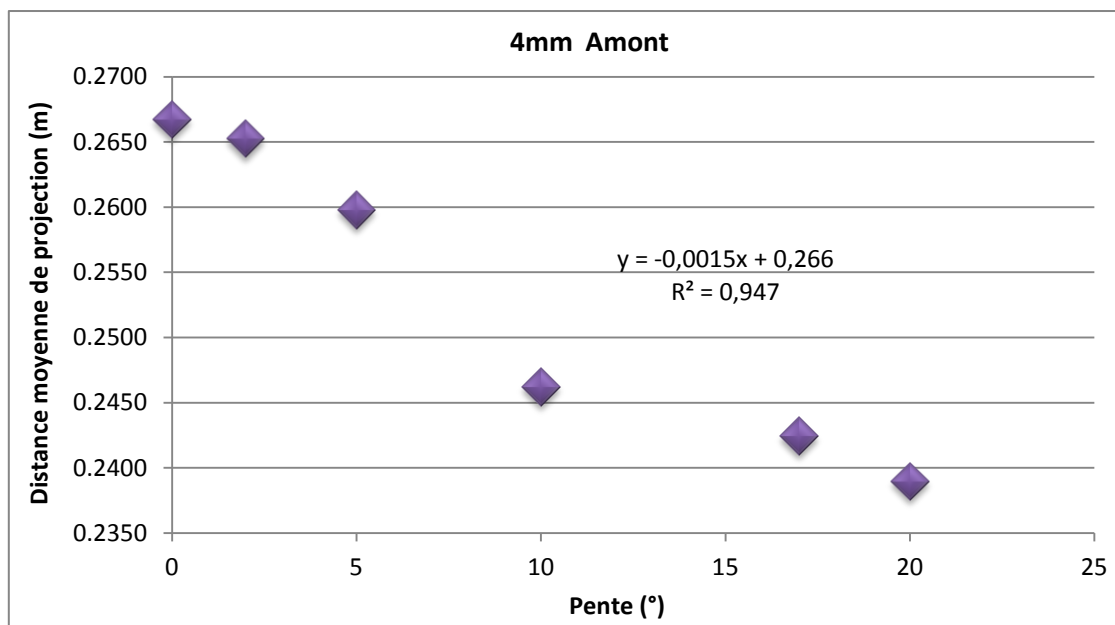


Figure IV. 35 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 4 mm côté amont).

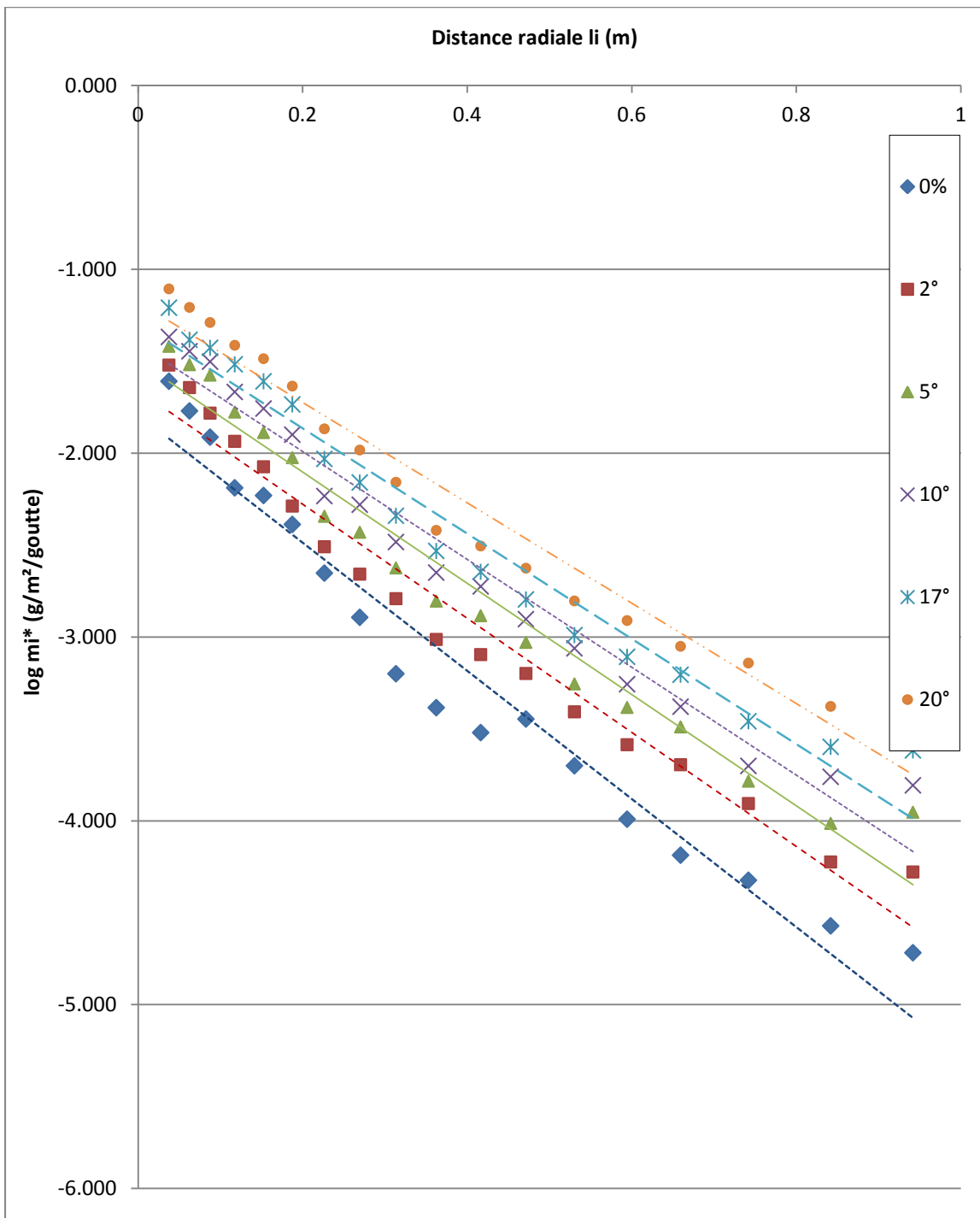


Figure IV. 36 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4 mm côté aval).

Tableau IV.45 : Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection ‘Λ’ ; pour le diamètre 4 mm côté aval.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	log m _i * = -3,485 li - 1,790	0,958	28,69	2,39
2°	log m _i * = -3,102 li - 1,657	0,969	32,24	3,07
5°	log m _i * = -3,024 li - 1,498	0,964	33,07	3,69
10°	log m _i * = -2,932 li - 1,405	0,967	34,10	4,18
17°	log m _i * = -2,862 li - 1,293	0,963	34,94	4,79
20°	log m _i * = -2,728 li - 1,180	0,959	36,65	5,63

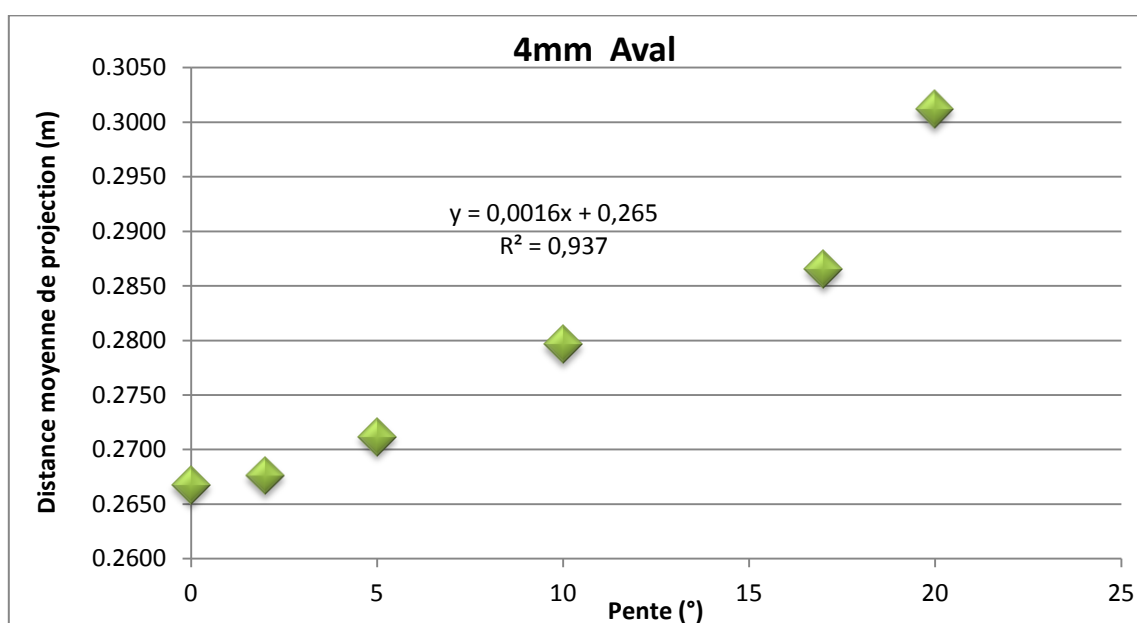


Figure IV. 37 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 4 mm côté aval).

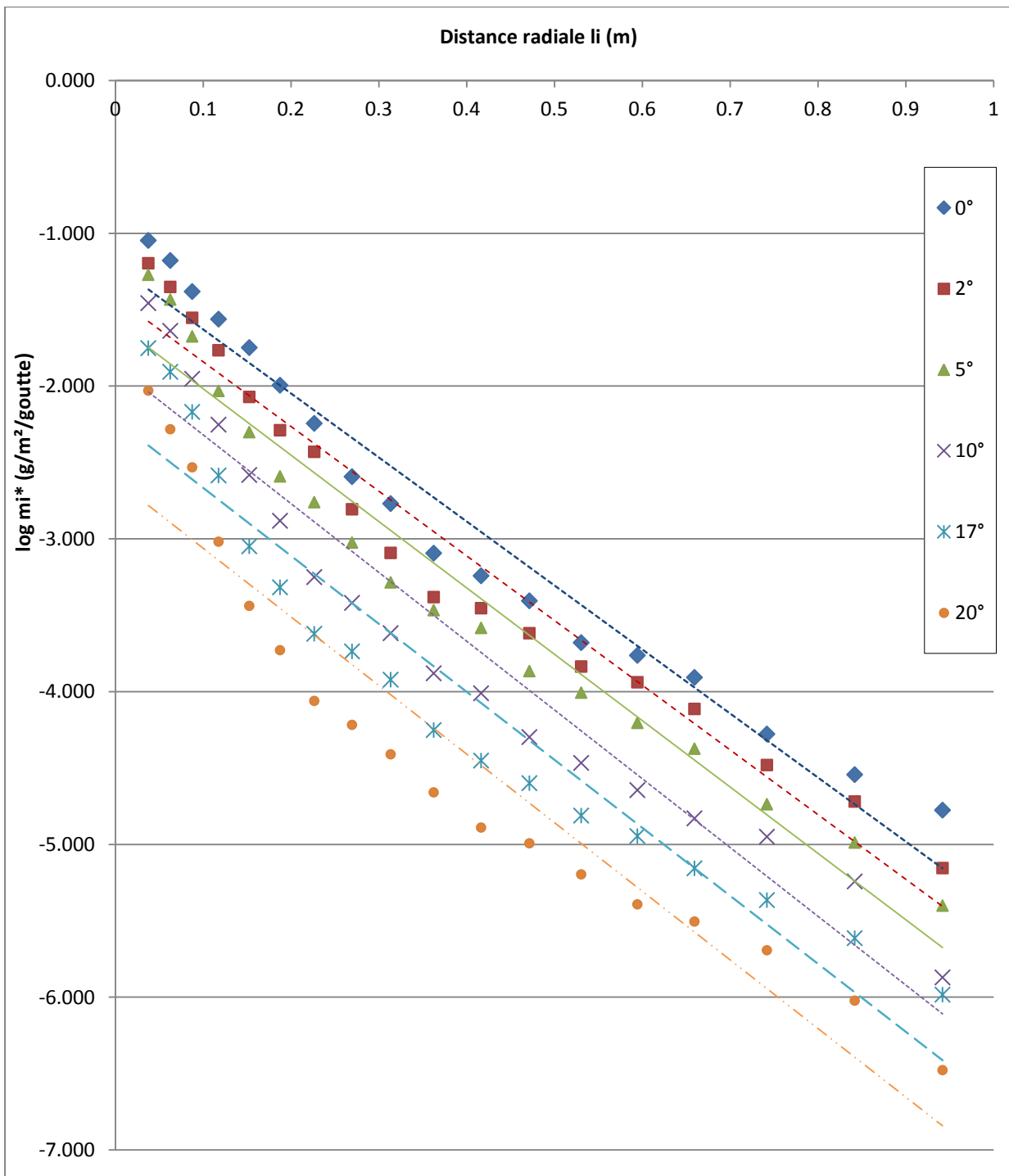


Figure IV. 38 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4,6 mm côté amont).

Tableau IV.46 : Equations de régression de la variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ'; pour le diamètre 4,6 mm côté amont.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	$\log m_i^* = -4,190 li - 1,211$	0,962	23,92	3,56
2°	$\log m_i^* = -4,232 li - 1,419$	0,959	23,64	2,85
5°	$\log m_i^* = -4,342 li - 1,585$	0,957	23,04	2,35
10°	$\log m_i^* = -4,50 li - 1,870$	0,938	22,73	1,74
17°	$\log m_i^* = -4,449 li - 2,223$	0,922	22,47	1,21
20°	$\log m_i^* = -4,49 li - 2,613$	0,922	22,27	0,81

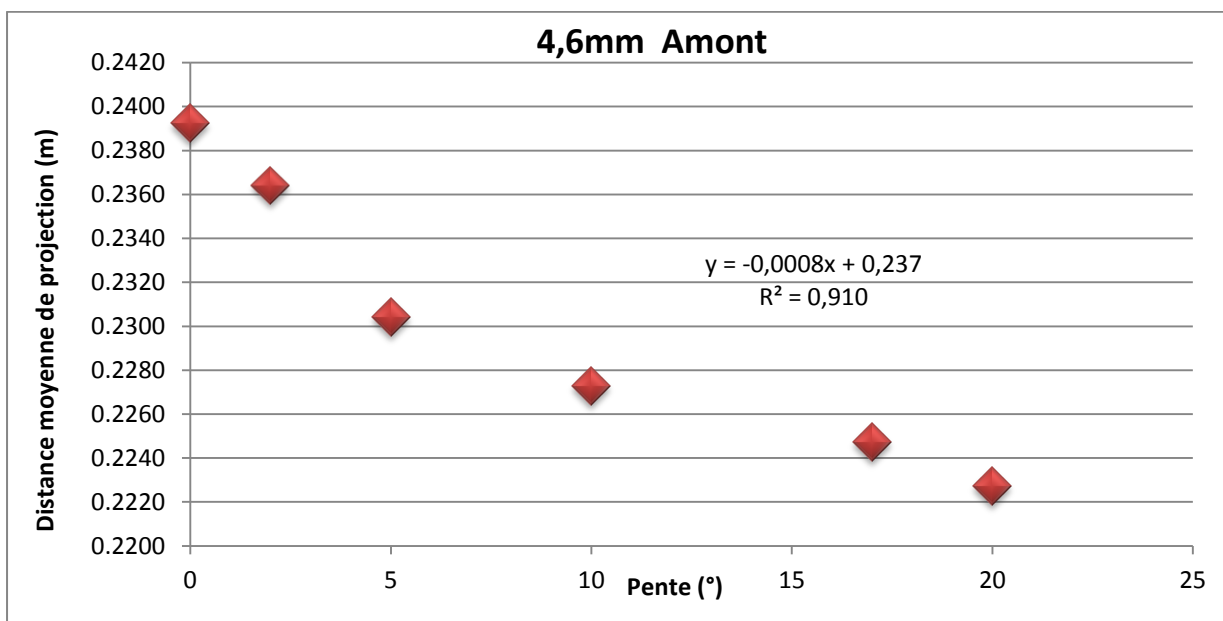


Figure IV. 39 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre de 4,6 mm côté amont).

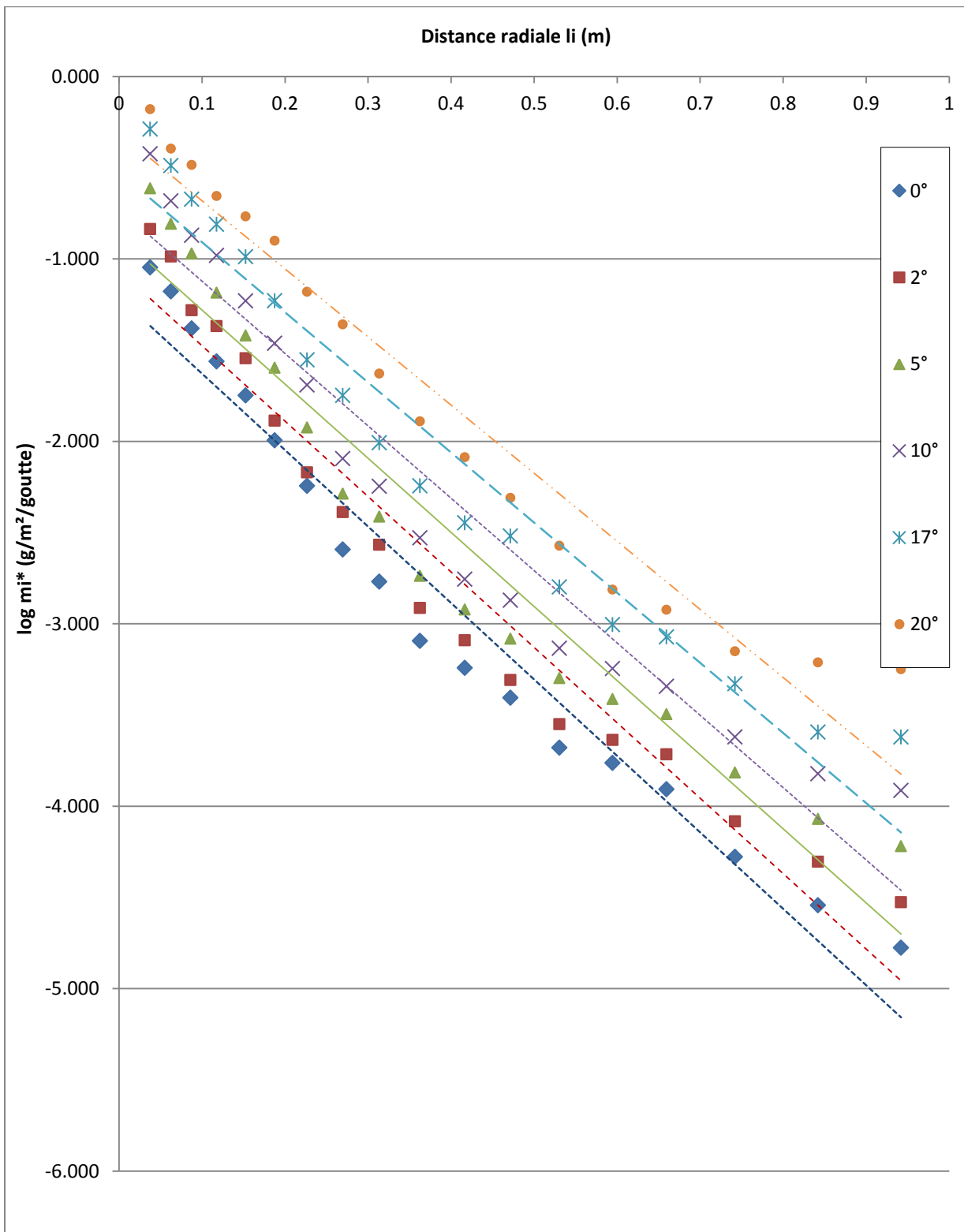


Figure IV. 40 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 4,6 mm côté aval).

Tableau IV.47 : Equations de régression de la variation du flux normal du splash « logmi* » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection ‘Λ’ ; pour le diamètre 4,6 mm côté aval.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	$\log m_i^* = -4,190 \text{ li} - 1,211$	0,962	23,92	3,56
2°	$\log m_i^* = -4,132 \text{ li} - 1,064$	0,953	24,21	4,17
5°	$\log m_i^* = -4,06 \text{ li} - 0,876$	0,943	24,63	5,12
10°	$\log m_i^* = -3,966 \text{ li} - 0,727$	0,937	25,25	6,10
17°	$\log m_i^* = -3,842 \text{ li} - 0,525$	0,947	26,04	7,69
20°	$\log m_i^* = -3,732 \text{ li} - 0,309$	0,953	26,81	9,84

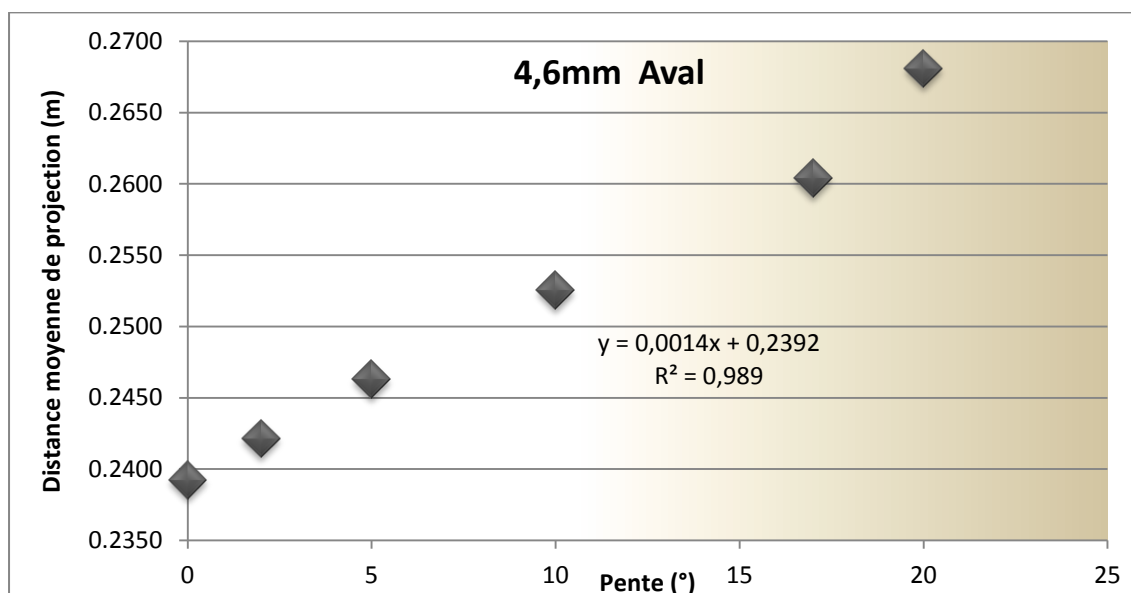


Figure IV. 41 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 4,6 mm côté aval).

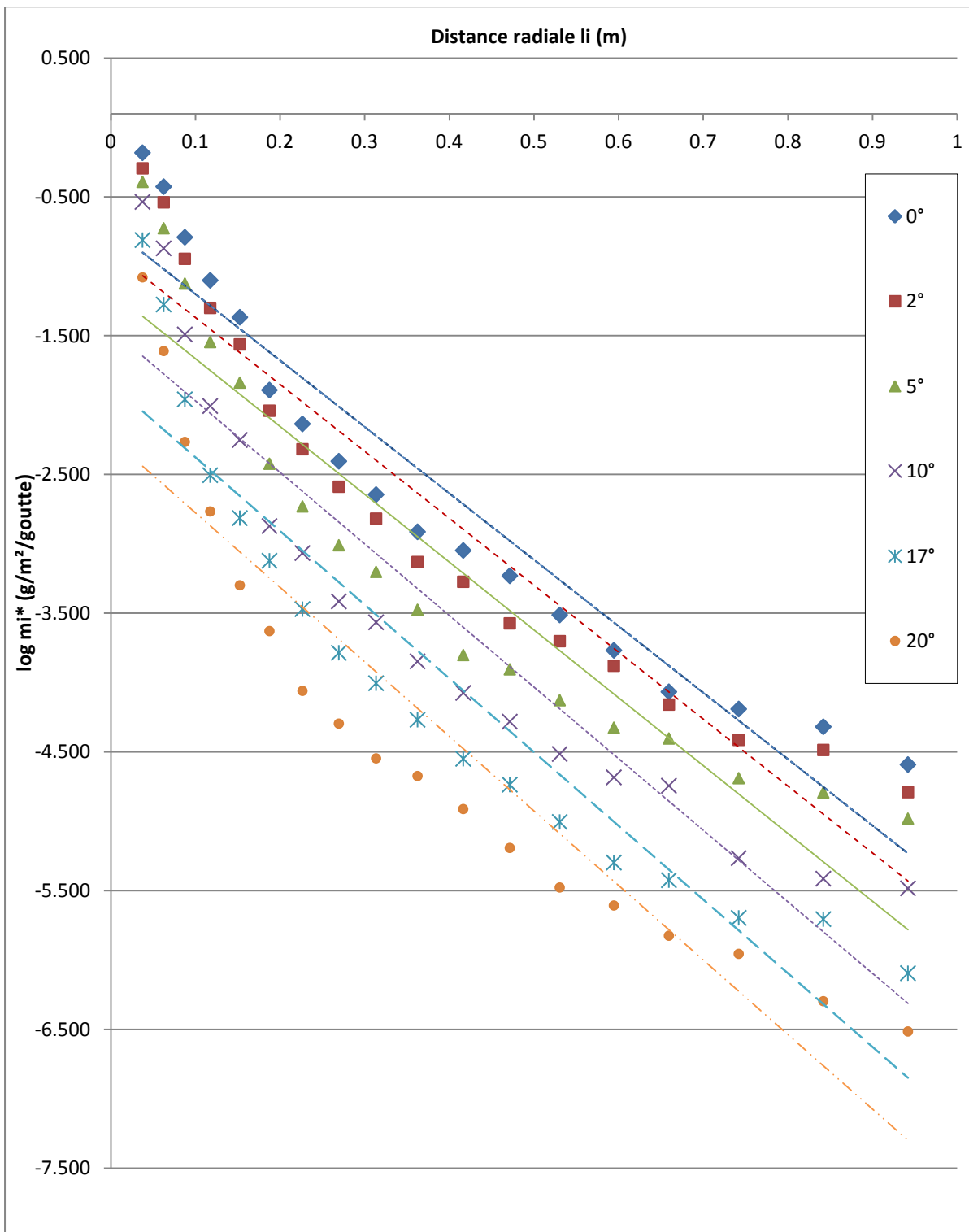


Figure IV. 42 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 5,6 mm côté amont).

Tableau IV.48 : Equations de régression de la variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 5,6 mm côté amont.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	$\log m_i^* = -4,788 li - 0,721$	0,919	20,92	5,08
2°	$\log m_i^* = -4,824 li - 0,887$	0,912	20,75	4,27
5°	$\log m_i^* = -4,888 li - 1,177$	0,875	20,49	3,15
10°	$\log m_i^* = -5,157 li - 1,455$	0,890	19,38	2,25
17°	$\log m_i^* = -5,311 li - 1,847$	0,881	18,83	1,48
20°	$\log m_i^* = -5,372 li - 2,240$	0,863	18,62	0,99

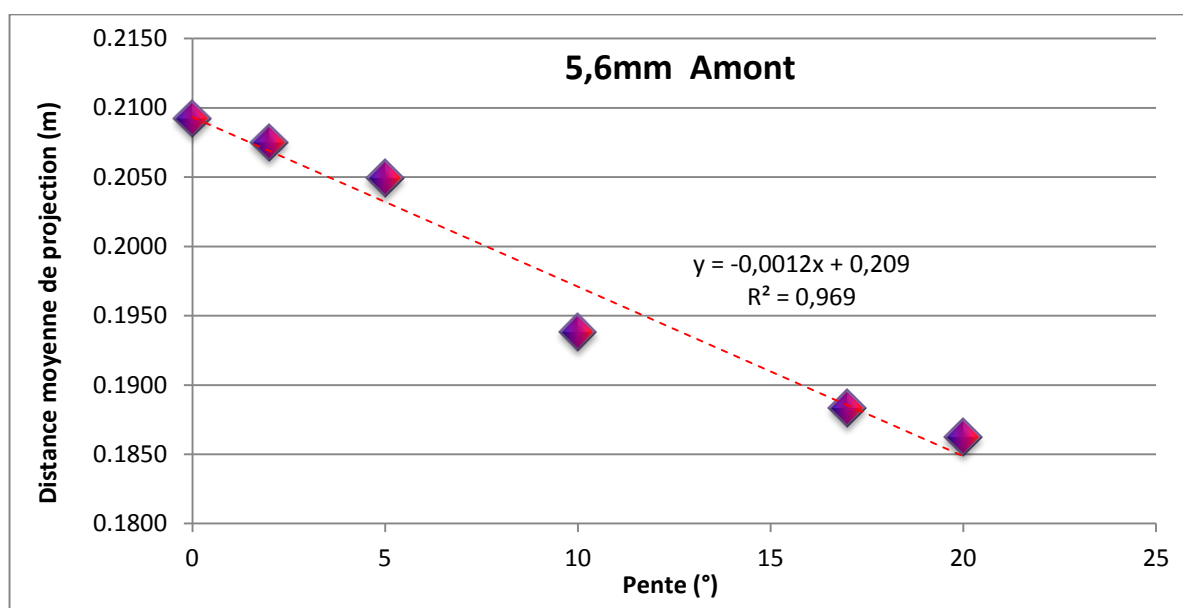


Figure IV. 43 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 5,6 mm côté amont).

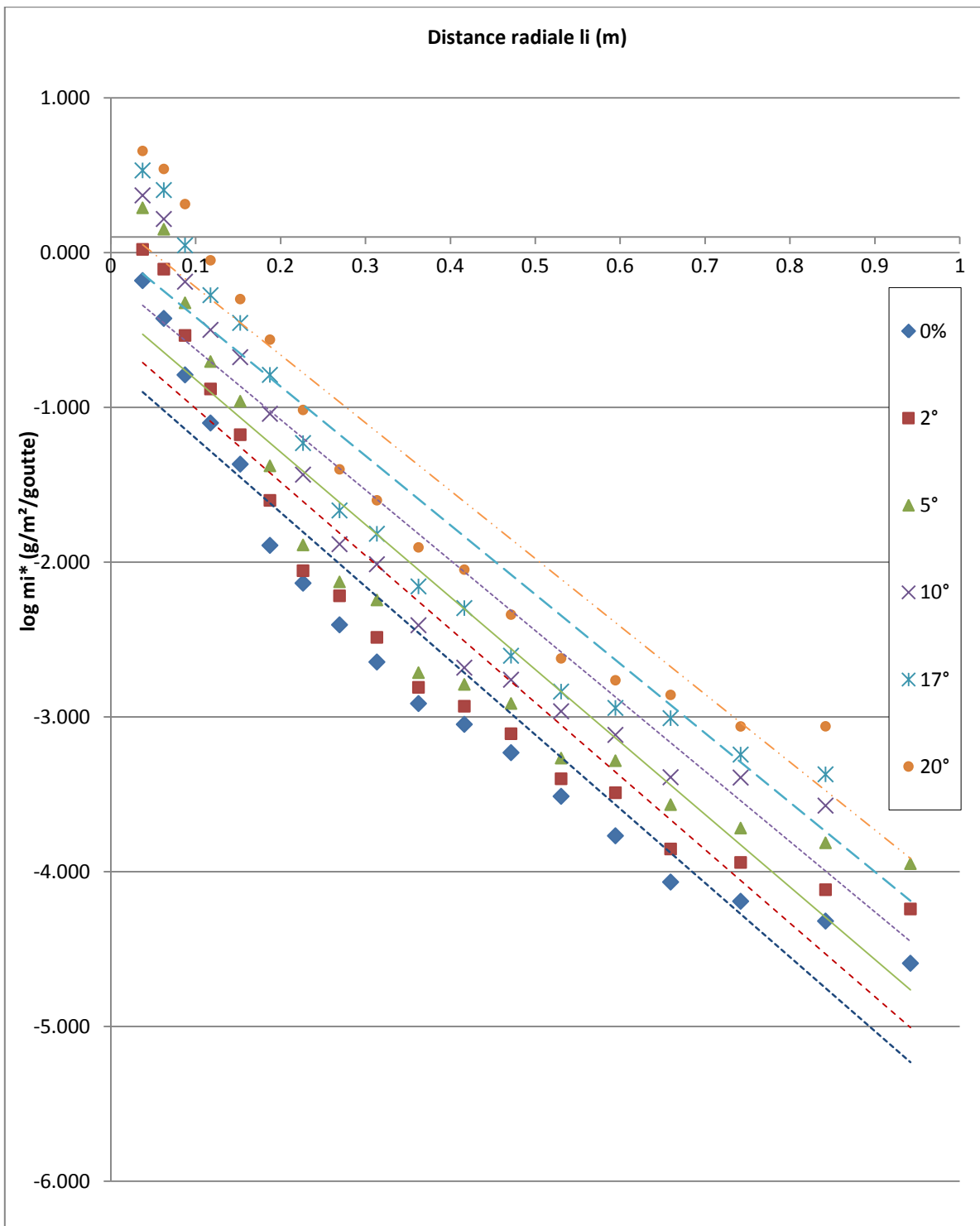


Figure IV. 44 : Variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la distance l_i pour différentes pentes du sol (diamètre 5,6 mm côté aval).

Tableau IV.49 : Equations de régression de la variation du flux normal du splash « $\log m_i^*$ » en fonction de la pente de surface et pour différentes distances moyennes de projection 'Λ' ; pour le diamètre 5,6 mm côté aval.

Pente du sol	Equation	R ²	Λ (cm)	μ (g/m ² /goutte)
0°	log mi* = -4,788 li - 0,721	0,919	20,92	5,08
2°	log mi* = -4,750 li - 0,533	0,896	21,05	6,16
5°	log mi* = -4,682 li -0,352	0,874	21,37	7,50
10°	log mi* = -4,541li -0,172	0,875	22,03	9,26
17°	log mi* = -4,479 li +0,0305	0,870	22,37	10,84
20°	log mi* = -4,383 li + 0,214	0,864	22,83	14,13

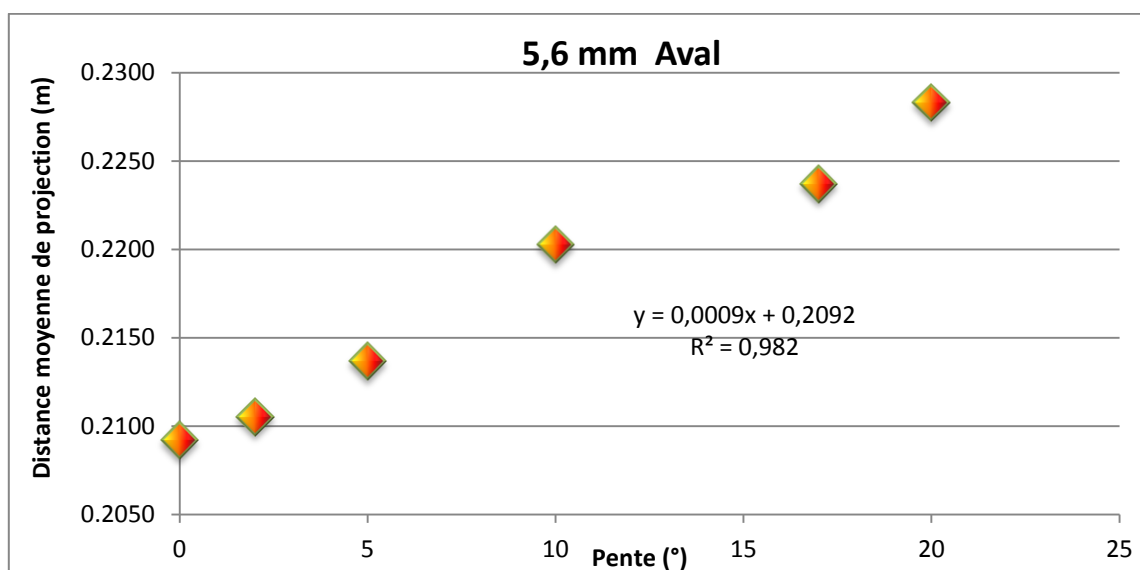


Figure IV. 45 : Variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente (pour un diamètre 5,6 mm côté aval).

Les résultats présentés dans les tableaux IV.33, IV.34 IV.35 IV.36 IV.37 IV.38 IV.39 et IV.40 montrent que la relation entre la distance moyenne de projection « distance moyenne de splash » et la pente est proportionnelle du côté aval. Du côté amont, il existe une relation inversement proportionnelle entre la distance moyenne de projection et la pente de surface qui diminue avec l'augmentation de cette dernière.

En effet, d'après les graphiques IV.31, IV.33 IV.35 IV.37 IV.39 IV.41 IV.43 et IV.45 qui présentent la variation de la distance moyenne de projection en fonction de la pente du sol, on remarque que pour un même diamètre de la goutte de pluie (3,7mm), on note une faible augmentation qui varie de 30,37 cm à 32,63 cm pour une pente de surface allant de 0° à 20° respectivement du côté aval. Par contre, du côté amont, les distances moyennes de projection diminuent progressivement avec l'augmentation de l'angle de pente.

La relation entre la distance moyenne de projection « Λ » et la pente de surface est mieux exprimée par une courbe de tendance linéaire de type : $y = a x + b$

Où : x = angle de pente en (°) ; et y = Λ (cm)

Différentes formes ont été trouvées dans la recherche bibliographique pour exprimer la relation Pente -distance moyenne de projection. Mouzai (1992) proposa d'exprimer les résultats de son étude sur cette relation par une fonction puissance : $\bar{x} = 19.49 (\sin\theta)^{0.0358}$ avec $R^2 = 62,6\%$.

Savat (1981) quant à lui, examina la relation entre la distance moyenne de projection « Λ » et la pente de surface est proposa la relation suivante : $\bar{y}, y = 15,8 - 0,52 \alpha$

Tel que \bar{y} : Distance moyenne de splash côté aval et y : est la distance de splash moyenne côté amont, Ou encore : $\bar{y}, y = 0,158 - 0,301 \sin \alpha$.

Poesen et Savat (1981) ont supposé que le coefficient 0,301 été indépendant du diamètre de la particule (D_{50}) et ont alors remplacé 0,158 par son correspondant, la relation fut alors : $\bar{y}, y = 0,0192 * D_{50}^{-0,218} - 0,301 \sin \alpha$. Ils ont proposé cette équation comme une prédiction approximative des distances moyennes de projection en amont et en aval sous l'impact d'une pluie tombant verticalement sur un sol de pente variant entre -20° et $+20^\circ$ et cela pour un diamètre de sédiment D_{50} (de $70\mu\text{m}$ à $20\mu\text{m}$) Mouzai (1992).

La divergence dans les équations exprimant la relation entre la pente et la distance moyenne de projection obtenus par Savat (1981) et revus par Poesen et Savat (1981), ainsi que les résultats de Mouzai (1992) et ceux de Boujerda (2009) avec les équations de la présente étude, pourrait être due aux différentes conditions de travail et aux équipements utilisés.

IV.4.CONCLUSIONS

On conclut alors qu'indépendamment du diamètre et de l'énergie cinétique de la goutte, l'augmentation de la pente de la surface du sol engendre une augmentation du détachement par splash. La proportion de particules se déplaçant en aval du point d'impact de la goutte augmente avec l'augmentation de la pente de la surface du sol suivant une fonction linéaire croissante, contrairement au déplacement amont qui diminue avec l'augmentation de cette pente suivant une fonction linéaire décroissante, tel que les coefficients de corrélation qui varient entre 0,968 et 0,975.

En effet, d'après les études menées par Ekern (1951), il existe une augmentation proportionnelle ou linéaire du taux de particules détachées en aval avec l'augmentation de l'angle de pente. Il explique cette augmentation en reportant l'angle de la pente à la force de la goutte d'eau F . Il affirme aussi que les gouttes percutant la surface du sol exercent une force impulsive avec deux composantes : une composante normale ou compressive N , et une composante tangentielle ou de frottement, D .

Plusieurs résultats auxquels nous avons abouti corroborent ceux trouvés dans la littérature. De Ploey et Savat (1968) ont constaté une augmentation nette de la composante de transport par effet de splash vers l'aval avec l'augmentation de l'angle de pente. La relation est bien décrite par une fonction en puissance.

Les investigations d'Ellison (1944), qui sont basées sur des mesures directes de la désagrégation du sol, ont montré que pour une inclinaison de 1 :10, 75% des matériaux splashés sont transportés en aval et 25% en amont. La même conclusion a été trouvée par Mihara (1959) et Zeghar (1982). Pour d'autres chercheurs, la relation reste encore problématique ; Bryan (1979) trouva qu'une fois la couche d'eau formée, la relation devient encore plus complexe.

Cependant, Il existe une relation proportionnelle entre la distance moyenne de projection et la pente de surface du côté aval, cette corrélation se traduit par une augmentation des distances moyennes de projections avec l'augmentation de la pente, d'autre par une diminution de ces distances avec l'augmentation de la pente du côté amont, ce qui rend la relation inversement proportionnelle.

D'un autre côté, les distances moyennes de splash sont plus importantes du côté aval que du côté amont et cela explique le fait que les particules rejaillies se déplacent plus loin en aval avant d'atteindre la surface ($\Lambda=32,63$ cm côté aval contre $\Lambda=28,79$ cm côté amont, pour le même diamètre de la goutte (3,7mm) et la même pente du sol 20°). Les particules qui autrement sont projetées vers l'amont, finissent par être transférées en aval par l'effet de la raideur de la pente ; ce dernier point confirme la théorie de Furbish et al. (2007) qui suggèrent que l'asymétrie contribuant au transport aval des grains se compose de deux parties.

- La première partie comprend les quantités : il ya plus de particules qui se déplacent vers l'aval qu'en amont avec l'augmentation de la pente de surface.
- La deuxième partie concerne les distances : en moyenne les particules se déplacent plus loin en aval de la pente ascendante. Ceci est en partie un effet géométrique dû à l'asymétrie dans les distances de déplacement résultant de la troncature géométrique des trajectoires paraboliques des particules, mais il est principalement dû à la variation radiale de la quantité de mouvement parallèle à la surface de la goutte propagée. Le transport parallèle à la surface augmente approximativement linéairement avec la pente.
- La masse réelle détachée est nettement plus importante que la masse apparente détachée. Les particules détachées à partir de la source (masse totale détachée), et les particules collectées du panneau de splash (masse apparente détachée), dépendent des dimensions du pot de splash et de la surface du panneau d'éclaboussure. La géométrie du dispositif est à améliorer afin d'aboutir à des résultats applicables à l'échelle réelle.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail avait pour objet l'étude de l'impact de la pente comme paramètre très important dans la génération de l'érosion du sol par phénomène de splash sur la distribution des particules détachées et rejaillies en amont et en aval sous l'impact de la goutte de pluie qui tombe verticalement sur un point qui est la source du détachement.

Ainsi, afin de mieux cerner ce phénomène, la théorie de Van Dijk et al. (2002) et développée par Leguëdois et al. (2005) fut prise comme la base sur laquelle s'appuie la présente étude. Cette théorie nous a permis d'appréhender le mécanisme de détachement par splash en déduisant ses caractéristiques tel que la masse totale détachée et éjectée suivant une distance radiale de la source, et de la distance moyenne parcourue.

Une série d'expériences ont été menées au laboratoire LEGHYD de l'USTHB qui nous a conduits aux résultats et conclusions suivantes :

1. Le diamètre de la goutte de pluie a un effet significatif sur le détachement par splash, En effet, les résultats obtenus montrent que la masse des particules détachées varie exponentiellement avec la taille de la goutte d'eau comme mentionné dans tous les travaux effectués auparavant. En effet, elles augmentent de 0,103(g/m²/goutte) à 1,381(g/m²/goutte) pour un diamètre de la goutte qui varie de 3,7mm à 5,6mm. Il influe ainsi sur la masse apparente détachée, qui augmente de 0,503 g/m²/goutte à 4,107g/m²/goutte, et par conséquent sur la masse réelle détachée qui augmente aussi de 2,26 g/m²/goutte à 5,08 g/m²/goutte.
2. L'augmentation du diamètre de la goutte implique l'augmentation de son énergie cinétique, par conséquent cette dernière influe positivement sur le taux de détachement par impact des gouttes qui se traduit par l'accroissement de la masse apparente détachée de 0,503 g/m²/goutte à 4,107g/m²/goutte, lorsque l'énergie cinétique varie de 0,927 (g m²s⁻²) à 3,017 (g m²s⁻²), indépendamment de la pente de surface.
3. La pente de la surface du sol a un effet significatif sur la masse totale détachée par le splash. L'analyse des résultats a montré que cette masse est linéairement reliée à l'angle de pente. Les valeurs élevées des coefficients de corrélation des équations, donnant la distribution de la masse détachée en fonction de la distance radiale de projection (variant entre 0,985 et 0,999), justifient la susceptibilité au détachement des particules sur des surfaces en pente.
4. La variation de la distance moyenne de projection reste ambiguë à cause de la géométrie. Toutefois, on remarque une augmentation significative des distances de projection avec l'augmentation de la pente de surface du côté amont. Par contre, on enregistre une diminution des distances moyennes de projections avec l'augmentation de la pente de surface du côté aval.
5. L'inégalité de distribution des quantités de masses détachées vers l'amont et vers l'aval, ainsi que les distances moyennes de projection qui sont plus importantes du côté aval que du côté amont, est due à l'effet de la raideur de la pente de surface ; il y a donc plus de particules rejaillies se déplaçant plus loin en aval qu'en amont.

Ainsi, les différentes équations, exprimant les relations entre les paramètres traités et les caractéristiques du splash, sont comparables à celles proposées dans la littérature. Nous souhaitons, dans des études ultérieures, examiner d'autres paramètres comme la texture ou la résistance du sol au

cisaillement ou encore introduire l'effet de l'énergie cinétique d'une façon plus détaillée dans le but de clarifier leurs relations avec les caractéristiques du splash sous l'effet de la variation de la pente.

Il est nécessaire de souligner les erreurs de mesures susceptibles d'arriver lors de la manipulation, et qui sont dues au montage expérimental non adapté (quantification des flux amont et aval doit se faire simultanément lors d'une seule simulation et non pas séparément).

La grande difficulté dans cette étude expérimentale a été l'influence du vent sur la direction de la goutte d'eau lors de sa chute, et la dimension du pot de splash recevant les gouttes comme déjà mentionnée dans Leguédois et al.(2005) et dans Mouzai et Bouhaded (2011). Le panneau de splash est lui aussi à améliorer, vu que la forme d'un demi cercle n'est pas vraiment pratique pour quantifier l'éclaboussure en amont et en aval, et il faut aussi agrandir sa surface de récolte.

Il est toutefois nécessaire de développer un nouveau modèle théorique qui soit plus adapté et plus simple à utiliser, afin de quantifier le splash en amont et en aval (quantité et distances de projection) en fonction de la variation de la pente de surface, et qui tient en compte d'autres paramètres plus au moins importants tels que les forces de détachement de la goutte sur une surface inclinée, et le comportement du sol dans ce cas de figure.

On s'est rendu compte de la nécessité de développer un modèle théorique (ou numérique) adapté au montage expérimental utilisé dans notre expérimentation, et qui soit plus facile à utiliser et riche en faisant intervenir d'autres paramètres plus au moins importants dans l'étude de l'effet de la pente sur le splash.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Durrah MM & Bradford J M. (1982).** The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. Soil Science Society of America Journal, 46 : 1086–1090.
- Allen, R. F. (1988a).** (The mechanics of splashing). *Journal of Colloid and Interface Science*, 124(1):309–316.
- Atlas, David, Carlton W. Ulbrich, (1977):** Path- and Area-Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation in the 1–3 cm Band. *J. Appl. Meteor.*, 16, 1322–1331.
- Beard. K.V. and H.R. Pruppacher (1969)** A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel. *Journal of Atmospheric Science*, 26(5): 1066-1072.
- Bobbe B.W. (2004).** Effect of soil texture, slope gradient and rainfall intensity on runoff and erosion. Chapter 4. University of Pretoria etd.
- Boiffin J. (1984).** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies, Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Boudjerda M. (2009).** Etude des effets des paramètres de la goutte d'eau, de l'inclinaison de la surface et de la rugosité du sol, sur les caractéristiques du splash. Thèse Magistère à l'USTHB.
- Bouriche F. (2010).** Evaluation d'une relation entre l'érodibilité du sol et les paramètres hydrauliques de ruissellement. Thèse Magistère à l'USTHB.
- Bolline, A. (1975).** La mesure de l'intensité du splash sur sol limoneux. *Pédologie* 25 (3), 199-210.
- Bradford J M. & Nearing M.A. (1982).** Single water drop splash detachment and mechanical properties of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49 no^o3.
- Bryan, R.B., (1981):** Soil erosion under simulated rainfall in the field and laboratory: variability of erosion under controlled conditions. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.*, 133: 391-404.
- Bryan, R. B. (2000).** (Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope). *Geomorphology*, 32:85–415.
- Bultot F. & Coppens A. (1985).** Puissance d'une averse. *Journal des Sciences Hydrologiques*. Circulaire 3, B-1180.
- Chow W.T., Maidment D.R., Mays L.W., (1988).** *Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill: 572.
- De Ploey, J & Savat, J. (1968) :** Contribution à l'étude de l'érosion par le splash. *Z. Geomorph.* 12, 174-193.
- De Ploey, J., (1972):** A quantitative comparison between rainfall erosion capacity in a tropical and a middle-latitude region. *Geographical Polonica*, 23: 141-150.
- Ekern, P.C., (1951):** Raindrop impact as the force initiating soil erosion soil sci. Soc. Amer. Proc., vol. 15, pp: 7-10.
- Ellison W.D. (1944).** Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 25:131–136, 181–182.
- El Swaify S.A., Dangler E. W., and Armstrong C. L. (1982).** *Soil Erosion by Water in the Tropics*. Department of Agronomy and Soil Science. College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- Evans R., (1980).** Characteristics of water-eroded fields in lowland England. *Assessment of Erosion*. 1980 pp. 77-87.
- Farrell, D. A., Moldenhauer, W. C. & Larson, W. E. (1974).** ((Splash correction factors for erosion studies)). *Soil Science Society of America Proceedings*, 38(3):510–514.

- Fournier F. (1965).** Mesure de l'érosion: Principes de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesure. In : Planification des réseaux hydrologiques. Paris : AIHS, 1965, (67), p. 343-355. (Publications - AIHS ; 67). Planification des Réseaux Hydrologiques : Symposium, Québec (CA), 1965/06/15-22.
- Fox D.M., Bryan R.B. and Price A.G., (2004).** The Role of Soil Crusting in Desertification and Strategies to Reduce Crusting Impact. International Workshop on Desertification, Cape-Town 8-20 April, 2002. Published in G.B. Wiersma (ed.), Special Issue of Environmental Monitoring and Assessment 99 : 149-159.
- Furbish D. J. & Hamner K. K, M. Schmeckle, M. N. Borosund, S. M. Mudd, (2007).** Rain splash of dry sand revealed by higher-speed imaging and sticky paper splash targets .Journal of Geophysical research ,vol .112.
- Francis Xavier Mkanda, 2000.** Determinants of Soil Erosion and Conservation Options in Malawi Catchment State of Current Knowledge on the Lake Malawi/Nyasa ecosystem and its application to Future Management. 4 October 2000, World Bank Group Headquarters, Washington, D.C.
- Ghadiri, H. & Payne, D. (1988).** ((The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil)). *Journal of Soil Science*, 39:563–575
- Ghadiri, H. and Payne, D. 1977-** Raindrop impact stress and the breakdown of soil crumbs. *J. Soil Sci.* 28: 247-258.
- Govers, G. and Poesen, J. (1988).** Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology* 1: 343-354.
- Green, T. & Houk, D. (1980).** (The resuspension of underwater sediment by rain). *Sedimentology*, 27:607–610.
- Gunn, Ross, Gilbert D. and Kinzer, (1949).** The terminal velocity of fall for water droplet in stagnant air. *J. Meteor.*, 6,243-248.
- Huang, C., J. M. Bradford, and J. M. Cushman (1983),** A numerical study of raindrop impact phenomena: The elastic deformation case, *J. Soil Sci. Soc. Am.*, 47, 855– 861.
- Hudson Norman W. 1995.** Soil and water conservation in semi-arid areas. *FAO bulltins* 57 .
- Kazuki Nanko et al., (2008).** Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities. *CATENA*. Volume 72, Issue 3, 31 January 2008, Pages 348–361
- Kinnell P. I. A. (1982).** Laboratory Studies on the Effet of drop Size on Splash Erosion. *J. agric. Engng Res.* (1982) 27, 43 P 1-439.
- Kinnell, P.I.A., (2005):** Raindrop impact induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrol Process.* 19, 2815– 2844.
- Kirkby, M. (1971),** Hillslope process-response models based on the continuity equation, *Inst. Br. Geogr. Spec. Publ*, 3, 15{30.
- Laws JO. (1941).** Measurements of the fall velocity of water drops and raindrops. *Transaction, American. Geophysical Union* 24 : 452-460.
- Le Bissonnais Y et Le Souder C. (1995).** Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des sols*, 2, 1, 1995, pages 43-56.
- Loch, R. J. & Foley, J. L. (1994).** ((Measurement of aggregate breakdown under rain: Comparison with tests of water stability and relationships with field measurements of infiltration)).
- Legout C, Leguédois S, Le Bissonnais Y. (2005).** Splash distance and size distributions for various soils. *Geoderma* 124 : 279–292.
- Leguédois S. (2003).** Mécanismes de l'érosion diffuse des sols Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Docteur de l'université d'orleans.
- Leguédois S, Planchon O, Legout C and Le Bissonnais Y. (2005).** Splash Projection Distance for Aggregated Soils: Theory and Experiment, *Soil Science Society of America Journal.* 69: 30–37.
- Macary F. et Berville D. (2003).** Bilan des connaissances sur l'érosion et les phénomènes de ruissellement.
- Madden, L.V., Wilson, L.L. and Ntahimpera, N., (1998).** Calibration and evaluation of an

electronic sensor for rainfall kinetic energy. *Phytopathology*, 88(9): 950-959.

Mati BM (1994). Splash transport of soil on a slope under various crop covers. *Agricultural Water management* 26, 59-66.

McIntyre, D. S. (1958a). ((Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact)). *Soil Science*, 85(4):185-189.

Meyer, D and H. Wischmeier. (1969)- Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. Am. Soc. Agric. Engr.* 12(6): 754-758, 762.

Meyer LD. 1981. (How rainfall intensity affects interrill erosion). *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 23 : 1472-1475.

Mihara, Y. (1959), Raindrops and soil erosion, *Jpn. Natl. Inst. Agric. Sci. Bull., Engl. Transl.*, 1, 1 – 52.

Moeyerson J. et De Ploey J., (1976). Quantitative data on splash erosion, simulated on unvegetated slopes. *Zei tschrift fur geomorphologie. Supp. Bd.25*.

Mouzai L. (1992). Drop characteristics and rainsplash effects on the hydraulics of overland flow and soil erosion, A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of P.h.D.

Mouzai L et Bouhadef M. 2003). Water drop erosivity : Effects on soil splash Erosivité de la goutte d'eau : Effets sur l'arrachement des particules de sol, *Journal of Hydraulic Research* 41 : 61-68.

Mouzai L et Bouhadef M. (2011). Shear strength of compacted soil : effects on splash erosion by single water drops, *Earth Surface Processes and Landforms* 36 : 87-96.

Mosley, M.P. (1974). Experimental study of rill erosion, *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs* 17 (5), 909-913.

Nanko K, Mizugakia S, Onda Y. (2008). Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities, *Catena* 72 (2008) 348-361.

Nearing, M. A. (1987). ((Theoretical one-dimensional water to soil impact pressures)). *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 30(2):369-373.

Park, S.W., J.K. Mitchell, and G.D. Budenzer. (1982). Splash erosion modeling: Physical analyses. *Trans. ASAE*. 25:357-361.

Planchon, O., Esteves, M., Silvera, N. & Lapetite, J.-M. (2000). (Raindrop erosion of tillage induced microrelief: possible use of the diffusion equation). *Soil and Tillage Research*, 56:131-144.

Poesen J. (1981). Rainwash experiments on the erodibility of loose sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* Volume 6, Issue 3-4, pages 285-307.

Poesen J and Savat J. (1981). Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part II : Detachability and transport ability measurements. *Catena* 8: 19-41.

Poesen J & Torri D. (1988). The effect of cup size on splash detachment and transport measurements. Part I: Field measurements. Dans Imerson & Sala, éditeurs, *Geomorphic processes, environments with strong seasonal contrasts. Vol I: Hillslope processes, volume 12 de Catena supplement*, pages 113-126.

Proffitt APB, Rose CW and Hairsine PB. (1991). Rainfall detachment and deposition: Experiments with low slopes and significant water depths. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 325-332.

Quansah, C. (1981). (The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport). *Journal of Soil Science*, 32:215-224.

Reyssat E. (2007). Gouttes, films et jets : quand les écoulements modèlent les interfaces, Thèse de doctorat, l'université Paris 7-Denis Diderot.

Riezebos HT and Epema GF. (1985). Drop shape and erosivity. Part II: splash detachment, transport and erosivity indices. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 10, pp: 69-74.

Rose, C. W. (1985). (Developments in soil erosion and deposition models). *Advances in Soil Science*, 2:2-63.

- Salle C. et Poesen J. (2000).** Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy. *Water Resources Research*. Volume 36, Issue 9, pages 2721–2729, September 2000.
- Savat, J. (1981).** ((Work done by splash: laboratory experiments)) . *Earth Surface Processes and Landforms*, 6:275–283.
- Sharma, P. P. (1996).** Interrill erosion. Dans Agassi, M., éditeur, *Soil erosion, conservation, and rehabilitation*, Chapitre 7, pages 125–152. Dekker, New York.
- Sogon S. (1999).** Thèse de doctorat Erosion des sols cultivés et transport des matières en suspension dans un bassin versant de brie. Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne U.F.R de Géographie Displne.
- Sreenivas, L., Johnston, J. R. & Hill, H. O. (1947)** Some relationships of vegetation and soil detachment in the erosion process. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 11, 471-474.
- Sutherland R.A. et Tolosa C.A, (1996).** Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. *Environmental Pollution*, Volume 110, Issue 3, Pages 483-495.
- Torri D, & Poesen J, (1992).** The effect of soil surface slope on rainsplash detachment. *Cremlingen .Catena*, 19: 561-578.
- Van Dijk A. I. J. M. (2002).** Water and Sediment Dynamics in Bench-terraced Agricultural Steeplands in West Java, Indonesia, Vrije Universiteit Amsterdam. *Soil Science*. November 1990. Vol. 150, No. 5.
- Van Dijk, A. I. J. M., Meesters, A. G. C. A. & Bruijnzeel, L. A. (2002).** (Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments). *Soil Science Society of America Journal*, 66:1466–1474.
- Wan, Y., El-Swaify, S. A. & Sutherland, R. A. (1996).** (Partitioning interrill splash and wash dynamics: A novel laboratory approach). *Soil Technology*, 9:55–69.
- Wainwright, J., Parsons, A. J. & Abrahams, A. D. (1995).** (A simulation study of the role of raindrop erosion in the formation of desert pavements). *Earth Surface Processes and Landforms*, 20:277–291.
- Wright, A. C. (1986).** (A physically-based model of the dispersion of splash droplets ejected from a water drop impact). *Earth Surface Processes and Landforms*, 11:351–367.
- Young, R. A. et Wiersma, J. L. (1973):** The role of rainfall impact in soil detachment and transport. *Water Resources Research*, 9(6):1629–1636
- Young R.A., Mutchler C.K. (1969).** Effect of slope shape on erosion and runoff. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 12: 231-233
- Zeghar D. 1982.** Soil erosion développements. *Soil. Sci*, n°10 P 157.
- Zhou G, Wei X and Yan J. (2002).** Impacts of eucalyptus (*Eucalyptus exserta*) plantation on sediment yield in Guangdong Province, Southern China-a kinetic energy approach. *Catena* 49 : 231– 251.
- Zingg, R.W., (1940):** Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agric. Engr.*, 21: 59-64.