



HAL
open science

Modélisation 3-D de l'interception de la pluie par le bananier : effets des caractéristiques physiques du couvert sur les flux d'eau et d'énergie cinétique transmis au sol

Celine Bassette

► **To cite this version:**

Celine Bassette. Modélisation 3-D de l'interception de la pluie par le bananier : effets des caractéristiques physiques du couvert sur les flux d'eau et d'énergie cinétique transmis au sol. Sciences du Vivant [q-bio]. Université des Antilles et de la Guyane, 2005. Français. NNT : . tel-02832992

HAL Id: tel-02832992

<https://hal.inrae.fr/tel-02832992v1>

Submitted on 7 Jun 2020

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

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



Institut National de la Recherche Agronomique
Unité Agropédoclimatique



THÈSE

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR EN PHYSIQUE

Présentée par

Céline BASSETTE

**MODÉLISATION 3-D DE L'INTERCEPTION DE LA PLUIE
PAR LE BANANIER : EFFETS DES CARACTÉRISTIQUES
PHYSIQUES DU COUVERT SUR LES FLUX D'EAU ET
D'ÉNERGIE CINÉTIQUE TRANSMIS AU SOL**

Soutenu le 02 Février 2005, devant le jury composé de :

Constantin PONTIKIS :

Président

John H. C. GASH :

Rapporteur

Laurent HUBER :

Rapporteur

Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY:

Examineur

François BUSSIÈRE :

Examineur et encadrant de thèse

Christian ASSELIN DE BEAUVILLE :

Examineur et directeur de thèse

Je remercie tout particulièrement le Conseil Régional de la Guadeloupe et le Département « Environnement et Agronomie » de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) pour avoir accepté de financer ma thèse et pour leur confiance en ce projet.

*Je voudrais remercier tout particulièrement deux membres de mon jury de thèse : messieurs **John Gash** et **Laurent Huber** pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse, m'honorant ainsi de leur intérêt pour mes travaux. J'ai été également très honorée de la participation à mon jury de thèse de messieurs **Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry** qui a accepté de critiquer ce mémoire, en particulier l'aspect modélisation tridimensionnelle, **François Bussière** et **Christian Asselin de Beauville** qui ont contribué à ces travaux et enfin **Constantin Pontikis** qui a accepté de présider ce jury.*

*Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué au sein de l'Unité Agropédoclimatique (APC) de l'Institut National de Recherche Agronomique, centre des Antilles-Guyane. Aussi, je remercie le D.U de l'Unité, **Harry Ozier Lafontaine** pour m'avoir accueillie dans son laboratoire de recherche.*

*Je tiens à remercier **Christian Asselin de Beauville** pour avoir accepté de diriger cette thèse, et tout particulièrement **François Bussière** pour m'avoir encadrée pendant toute la durée de mes travaux, accueillie au sein de son équipe de travail (MADERE) et aidée à me confirmer en tant que chercheur. Je le remercie pour la confiance qu'il a placée en moi.*

*Je suis reconnaissante envers les membres de mon comité de pilotage tout au long de ma thèse, **Michael Chelle**, **Yves Le Bissonnais** et **Philippe Cattan**, qui ont su parfaitement cadrer le déroulement des travaux.*

*Le travail présenté dans ce mémoire n'aurait pas pu se faire sans l'aide technique de **Philippe Artis** et **Jean-Baptiste Nanette** qui m'ont accompagnée au cours de mes expérimentations, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain, mais surtout **Alain Fouéré** sans qui les problèmes de modélisation n'auraient pas été résolus.*

*J'ai une pensée particulière pour **Harry Ozier Lafontaine**, **Jorge Sierra**, **Yves-Marie Cabidoche** et **Raymond Bonhomme** pour m'avoir apporté leur savoir et avoir été des soutiens scientifiques. Je leur adresse tout ma gratitude avec un petit sourire quant à mes lacunes initiales en statistiques (**Raymond Bonhomme** pour son efficacité, sa simplicité à expliquer ce qui nous paraît inaccessible et **David Renaudeau** pour m'avoir initiée au logiciel SAS) et en pédologie (**Yves-Marie Cabidoche** a fait des miracles en ramenant à la terre la physicienne que je suis !). A **Cado** et **Rio** : merci pour les discussions amicales qui remontaient le moral.*

*Le dispositif d'étude des gouttes n'aurait pu être conçu sans l'aide du Laboratoire d'analyse de l'Unité APC, en particulier **Lucienne Desfontaines** et **Guy Gougougnan**.*

*Mais, une thèse ne repose pas uniquement sur des bases scientifiques. Elle est aussi un partage, un échange avec des personnes venus d'autres horizons qui vous touchent par leurs qualités humaines, leur soutien. Aussi, un grand **Mèsi** à ceux qui ont été là aux moments opportuns :*

Thierry Bajazet, avec qui j'ai beaucoup appris et partagé, tant sur le plan scientifique qu'humain, Marie-Chantal Ferdinand pour sa joie, Fred Burner pour sa bonté, Marie-Françoise Zébus pour son aide et toutes ses astuces, Frédérique Razan pour les agréables histoires du midi, Jean-Louis Diman pour le Kenbé red et tous ceux et celles avec qui j'ai partagé des moments agréables dans cette Unité. A Julie et à Line : courage car le bout du tunnel est proche. Et à tous ceux et celles de l'APC : un grand merci pour votre soutien et vos encouragements pour ma soutenance.

*Enfin, je n'aurais pas achevé ce travail sans l'aide ô combien importante de celle qui a été tout le temps à mes côtés et partagé mes joies et mes peines : **ma famille.***

Mais à qui d'autre pensiez-vous ?

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	5
<i>Chapitre 1 Synthèse bibliographique</i>	9
1.1 Nécessité de la connaissance du devenir des intrants en bananeraie	9
1.1.1 Le bananier	9
1.1.2 Architecture et flux d'eau sur le bananier	10
1.1.3 Quels sont les risques environnementaux en bananeraie ?.....	11
1.2 Interception de la pluie par les végétaux	14
1.2.1 Les pertes par stockage et évaporation au cours de l'interception	14
1.2.2 Les facteurs qui influent sur l'interception de la pluie	14
1.2.3 Calcul du bilan hydrologique du couvert.....	17
1.3 Etude du fonctionnement des végétaux par la modélisation	19
1.3.1 Etude des interactions entre les plantes et leur environnement.....	19
1.3.2 Approches modulaires et représentation 3-D des plantes	19
1.3.3 Méthodes d'enregistrement 3-D des architectures	20
1.4 Modèles informatiques et approches 3-D	22
1.4.1 Langages informatiques pour l'étude de la croissance des plantes	22
1.4.2 De l'approche 1-D à 3-D pour l'étude des échanges avec l'environnement	23
1.4.3 Les modèles d'interception de la pluie	23
<i>Chapitre 2 Matériels et méthodes</i>	25
2.1 Les dispositifs expérimentaux	25
2.1.1 La digitalisation des architectures.....	25
2.1.2 La simulation de pluie et la mesure des distributions de pluie au sol	28
2.1.3 Etude de l'interception locale de la pluie	30
2.1.4 Expérimentations pour l'amélioration des dispositifs expérimentaux	34
2.2 Présentation du modèle DROP	38
2.2.1 Description du modèle	38
2.2.2 Principe de fonctionnement du modèle.....	41
2.2.3 Comparaison des cartographies de distribution de pluie mesurées et simulées	46
2.3 Améliorations apportées au modèle DROP	46
2.3.1 Récapitulatif des améliorations portées	46
2.3.2 Modélisation des phénomènes locaux d'interception	47
2.3.3 Reconstitution d'une plante enregistrée dans plusieurs repères 3-D.....	48
2.3.4 Amélioration de la représentation de l'architecture	49
2.3.5 Calcul des surfaces foliaires.....	54
2.3.6 Application du modèle à plusieurs plantes.....	56
<i>Chapitre 3 Résultats expérimentaux et lois d'interception</i>	57
3.1 Evaluation de la fiabilité des dispositifs expérimentaux	57
3.1.1 Introduction.....	57
3.1.2 Evaluation de la simulation de la pluie	57
3.1.3 Evaluation de la sensibilité de la digitalisation	61
3.1.4 Discussion.....	66
3.2 Lois d'interception	68
3.2.1 Introduction.....	68
3.2.2 Capacité de stockage.....	70
3.2.3 Le splash	73
3.2.4 Hauteur maximale du splash.....	77
3.2.5 Mesure de la proportion d'eau transmise en throughfall.....	80

3.2.6	Modélisation des lois d'interception.....	82
Chapitre 4 Evaluation du modèle DROP.....		95
4.1	Evaluation du modèle architectural.....	95
4.1.1	Introduction.....	95
4.1.2	Capacité de DROP-TRI à décrire les surfaces foliaires du bananier.....	95
4.1.3	Discussion.....	98
4.2	Evaluation de DROP-INT pour la simulation des écoulements de pluie.....	99
4.2.1	Introduction.....	99
4.2.2	Capacité de DROP-INT à simuler les écoulements sous un bananier.....	100
4.2.3	Discussion.....	108
Chapitre 5 Applications du modèle DROP.....		111
5.1	Localisation des zones d'écoulement préférentiel sous bananier.....	111
5.1.1	Introduction.....	111
5.1.2	Simulation des énergies cinétiques et des débits sous bananier.....	112
5.1.3	Discussion.....	117
5.2	Simulation des écoulements sous des bananiers en interaction.....	118
5.2.1	Introduction.....	118
5.2.2	Surfaces interceptrices de bananier, avec et sans interaction d'autres bananiers.....	118
5.2.3	Effets de l'interaction entre bananiers sur les distributions de pluie.....	119
5.2.4	Effets des interactions entre bananiers sur les énergies cinétiques et les débits de pluie.....	120
5.2.5	Comparaison des répartitions des écoulements simulés et mesurés au champ.....	123
Conclusions et perspectives.....		129
Bibliographie.....		133
Annexes.....		143
Annexe A.....		145
Annexe B.....		147
Annexe C.....		151
Annexe des articles.....		153

Introduction générale

La redistribution de la pluie par un couvert végétal peut avoir non seulement un impact considérable sur le transfert de solutés et de matière dans le sol, mais aussi sur la prolifération de maladies, par dispersion de spores dans le feuillage, en raison des flux d'eau et des éclaboussures générés sous le couvert et en son sein. En effet, la pluie interceptée est redistribuée en deux types de flux, le *stemflow* localisé sur le tronc ou la tige principale et le *throughfall* réparti sous le feuillage, tous deux tributaires de l'architecture du couvert. Au cours de l'interception, de fines gouttelettes d'eau sont projetées par éclaboussures (*splash*), pouvant entraîner alors les spores au fur et à mesure dans le feuillage. En conséquence, l'étude des processus d'interception est essentielle, d'une part pour mieux prédire le devenir des produits agro-chimiques et leur impact sur l'environnement et la santé humaine, et d'autre part pour mieux comprendre l'occurrence de maladies par dispersion de spores dans le couvert.

Ces risques sont particulièrement élevés en milieu tropical marqué par une forte pluviométrie car ces flux préférentiels peuvent lessiver les engrais et les produits phytosanitaires utilisés en culture intensive et entraîner leur ruissellement ou infiltration en profondeur dans les sols. En effet, en Guadeloupe, la culture bananière sur la Basse-Terre se développe essentiellement sous une pluviométrie variant entre 2.5 et 4.5 m de pluie/an. Cependant, elle peut être limitée par la disponibilité en nutriments, ainsi que par des pathogènes et des prédateurs tels que les nématodes, les charançons, les champignons et les rats. En culture intensive, la recherche de rendements élevés se fait en approvisionnant la plante en minéraux par l'apport massif d'engrais NPK (nitrate, phosphate et potassium), soit 400 kg/hectare/an d'unité d'azote, et en luttant contre les maladies et les prédateurs par l'apport de pesticides (18 kg/hectare). L'efficacité de ces méthodes réside essentiellement dans la rémanence des intrants dans les parcelles. Aussi, afin de pallier leur lessivage, d'importantes quantités sont apportées et leur stabilité chimique a été renforcée.

Des études préliminaires sur les flux d'eau générés sous bananeraie en Guadeloupe, travaux effectués par l'INRA en collaboration avec le CIRAD, ont mis en évidence l'importance du *stemflow*. Ce flux le long du pseudo-tronc du bananier, constitué par l'eau écoulee sur les feuilles, se concentre au pied du bananier, zone où sont épanchés en totalité les fertilisants et la majeure partie des produits phytosanitaires, facilitant leur lessivage. De plus, le *throughfall*, comprenant des gouttes gravitaires (grosses gouttes de taille supérieure à celle des gouttes incidentes), peut provoquer le détachement de fines particules de sol (Moss et Green, 1987), du fait de leur fort potentiel érosif, puis la formation d'une croûte étanche à la surface du sol (Shainberg et al., 1992), facilitant ainsi le ruissellement.

Les écoulements le long des feuilles accompagnés de splash peuvent également constituer des vecteurs de propagation de champignons sur les bananiers puisque certaines études menées en Afrique et au sud-est asiatique, ont montré que la Cercosporiose du bananier se développait principalement par dispersion des ascospores et conidies par lessivage et par splash (Marin et al., 2003; Coste et al., 2004).

L'architecture du bananier confère à la plante un caractère fortement redistributif de la pluie en raison des larges feuilles qui sont érigées lorsqu'elles sont émergentes, favorisant l'approvisionnement du *stemflow*, et planophiles lorsqu'elles sont plus âgées, facilitant la protection du sol. Il est donc important de comprendre les mécanismes de redistribution de la pluie, de quantifier et localiser les flux potentiels présentant un risque de lessivage et d'infiltration des intrants dans les sols, en étudiant l'impact de l'architecture des plantes sur ces flux. Dans ce cadre, l'objectif général de nos recherches est de produire des connaissances indispensables pour l'évaluation des risques liés aux pratiques actuelles et permettant de tester les techniques correctrices d'épandage d'intrants plus respectueux de l'environnement.

Les travaux sur la redistribution de la pluie développés à l'INRA portant initialement sur le maïs ont permis de créer le modèle DROP issu du couplage d'un modèle architectural de plante avec un modèle de distribution d'eau sur une plante (Bussière et al., 2002). Ce modèle permet de représenter en 3-D l'architecture de la plante et de prédire les écoulements au sein du feuillage et sur la tige principale. Il utilise en entrée les données architecturales des plantes et fournit une cartographie 2-D des distributions d'eau sous celles-ci   la surface du sol. C'est sur ces bases que nous avons développé notre travail de modélisation en améliorant DROP afin de traiter les architectures plus complexes du bananier et prendre en compte les processus physiques d'interception.

Le modèle ainsi amélioré permet de simuler les mécanismes qui peuvent provoquer le lessivage des produits agro-chimiques et l'érosion des sols. L'approche de modélisation qui est proposée dans ce mémoire est innovante car, contrairement à la plupart des modèles d'interception (modèle de Gash, de Rutter ou Wimo (Rutter et Morton, 1975; Gash, 1979; Hormann et al., 1996)), elle aborde les phénomènes à l'échelle de la surface élémentaire de feuille (quelques centimètres carrés), qui jusque là a peu été étudiée (Calder, 1986). Nous avons dû, pour cela, distinguer deux types de pluie : la pluie primaire (pluie incidente au-dessus des plantes) et la pluie secondaire (les égouttages) constituant toutes deux le throughfall.

Le travail a nécessité les étapes suivantes :

- L'implémentation des modifications du code du modèle pour son amélioration et son adaptation au bananier.
- La mise au point de techniques de mesure permettant d'étudier les processus locaux d'interception (stockage, splash, évaporation et transmission).
- L'établissement des lois d'écoulement en fonction des propriétés des surfaces (inclinaison, flexibilité et mouillabilité) et de celles des gouttes d'impact (diamètre, énergie cinétique relative aux vitesses et hauteur de chute) afin de les introduire dans le modèle.
- La généralisation du modèle à un ensemble de bananiers en interaction et son évaluation en parcelle.

Nous avons organisé ce mémoire de thèse en cinq chapitres.

Le premier chapitre permet de poser les problèmes liés au contexte bananier et met en évidence la nécessité et le caractère innovant de la modélisation pour répondre à de tels problèmes. Dans ce chapitre, nous présentons un bilan bibliographique sur les risques environnementaux spécifiques en Guadeloupe et, plus généralement, les différents modèles d'interception développés jusque là. Nous justifions également le choix de la méthode en nous basant sur les études préliminaires faites sur la modification de la pluie par les végétaux et les propriétés physiques des impacts de gouttes.

Le second chapitre présente les dispositifs expérimentaux utilisés et leur mise en œuvre. Nous présentons également le modèle initial et ses améliorations pour décrire les architectures complexes et les processus d'interception.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux. En premier lieu, l'accent a été porté sur l'impact de la qualité de la mesure sur la modélisation des architectures et de la distribution de la pluie. En second lieu, les résultats des expérimentations sur l'interception en terme de stockage sur les feuilles, de splash et de transmission en stemflow et throughfall, sont présentés et analysés. Enfin, nous proposons des lois empiriques décrivant les phénomènes d'interception locaux, mesurés expérimentalement.

Dans le quatrième chapitre, nous évaluons le modèle global à l'échelle du bananier en nous intéressant aux réponses architecturales et pluviométriques, rendant compte des redistributions 2-D de la pluie à la surface du sol. Les cartographies simulées des redistributions de la pluie sous bananier isolé ont été comparées à celles mesurées expérimentalement sous simulateur de pluie.

Enfin, dans le cinquième et dernier chapitre, nous présentons des applications du modèle qui ont permis d'évaluer ses capacités à simuler les interactions entre plantes et de déterminer les zones à risque sous la couronne foliaire pour lesquelles de fortes énergies cinétiques de gouttes pourraient apparaître. Les résultats de simulation des répartitions du throughfall sous les couronnes foliaires ont été comparés à ceux mesurés au champ.

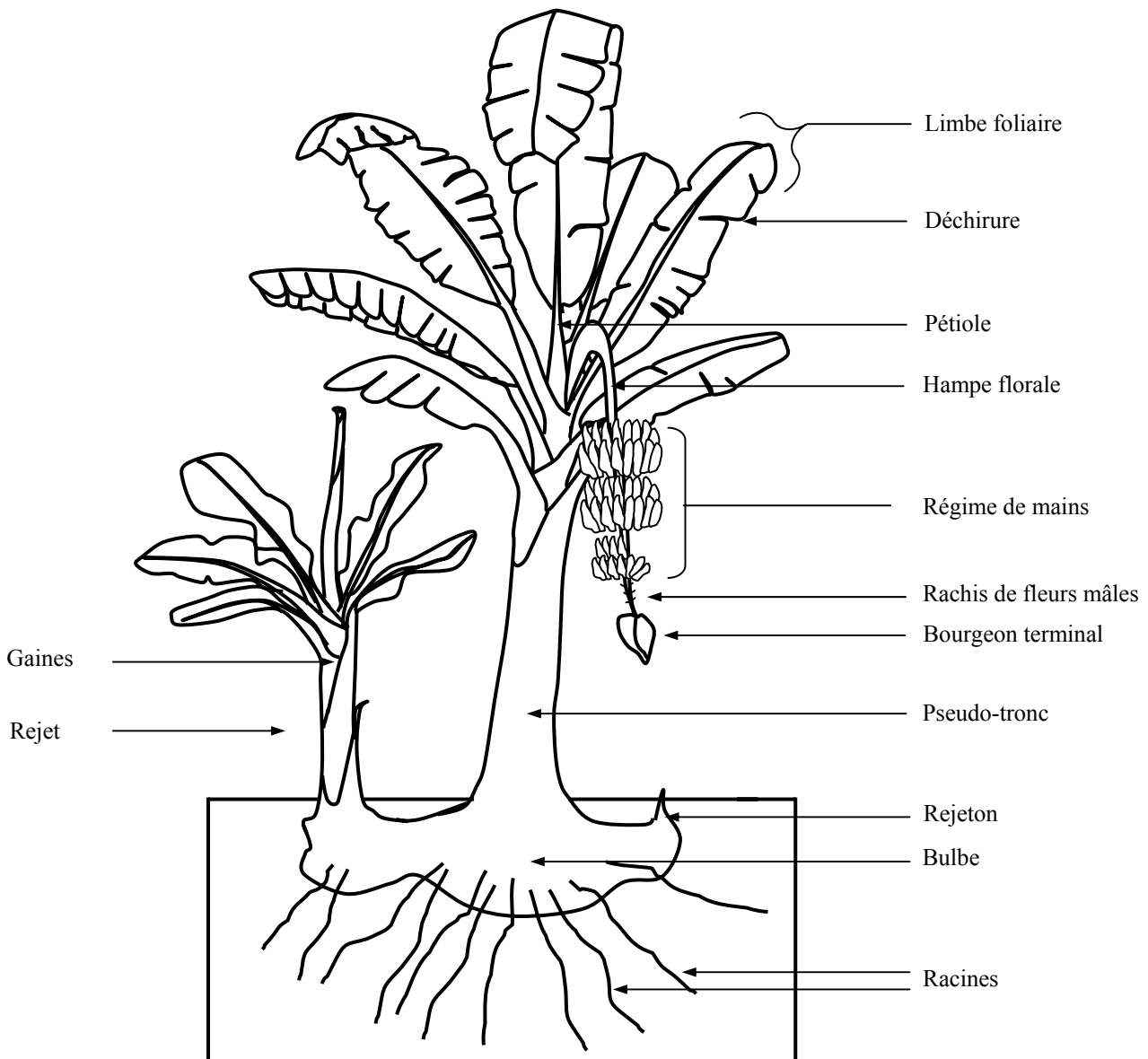


Figure 1.1 : Schéma d'un bananier et de son inflorescence.

Chapitre 1 Synthèse bibliographique

1.1 Nécessité de la connaissance du devenir des intrants en bananeraie

1.1.1 Le bananier

Le Bananier est une monocotylédone qui se développait, dans son berceau d'origine, sous couvert forestier en milieu tropical humide. De ce fait, il a besoin pour sa croissance d'humidité et de peu d'ensoleillement. Une pluviométrie minimale de l'ordre de 100 à 150 mm par mois et une température moyenne de l'air de 25°C sont les conditions propices à son développement. Le bananier est constitué d'un bulbe (le rhizome) d'où partent des gaines foliaires imbriquées, assemblées en pseudo-tronc et terminées par des feuilles. Elles s'amincissent dans leur partie supérieure pour former chacune un pétiole terminé par un très large limbe. Les feuilles comportent une nervure centrale qui sépare le limbe en deux parties allongées presque symétriques. Elles apparaissent au sommet du pseudo-tronc, à l'intérieur des gaines des feuilles préalablement développées, leur nombre pouvant aller jusqu'à 30. Une fois la dernière feuille émise, le développement végétatif cesse et une inflorescence, appelée hampe, apparaît. La hampe, dont l'extrémité est un bourgeon terminal, est constituée de plusieurs étages florifères, appelés mains, apparaissant le long du rachis. Ces étages sont composés, dans leur première partie, de fleurs femelles produisant des fruits, tandis que leur partie terminale jusqu'au bourgeon, est constituée de fleurs mâles qui ne vivent que quelques heures après leur apparition (Figure 1.1).

Le bulbe du bananier donne des ramifications latérales qui sortent de terre à sa périphérie : ce sont des rejetons ou rejets. Le bananier est cultivé en cycles variant de 8 à 12 mois selon la température moyenne ambiante et démarrant à la coupe du pied mère après totale floraison, puis récolte et développement d'un de ses rejetons préalablement sélectionné. La bananeraie en culture intensive perdure environ 4 cycles mais certaines bananeraies, les bananeraies pérennes, peuvent subsister jusqu'à 50 ans.

Le bananier a des besoins édaphiques très particuliers pour son développement. En effet, ses racines qui ont un pouvoir de pénétration faible, sont plus fines et irrégulières en présence d'un sol compact. A l'inverse, dans des sols sablo-argileux ou sablo-limoneux, elles sont bien aérées : leur architecture montre d'abondantes racines moyennes à grosses pouvant descendre jusqu'à 60 cm de profondeur (Lecompte, 2002). Elles sont principalement réparties dans la couche supérieure du sol : 80 à 90% des racines se trouvent entre 0.2 et 0.3 m de profondeur (Champion, 1963). En ce sens, un sol aéré et poreux est nécessaire pour un bon développement des racines. La plante nécessite également pour son développement un sol riche en azote et en potassium : compte tenu des pertes par lessivage, un apport de près de 400 Kg/ha d'azote et 1500 Kg/ha de potassium est requis pour un rendement de 50 T/ha (Dorel, 2001). Elle est peu sensible au pH des sols (de 4.5 à 8.0) et tolère en particulier l'aluminium habituellement toxique dans les sols acides. L'extension racinaire en surface est limitée par des nématodes (parasites), principalement les *Radopholus similis*, et des insectes

appelés charançons (*Cosmopolites sordidus*) qui attaquent les racines et le bulbe du bananier, causant des nécroses racinaires.

1.1.2 Architecture et flux d'eau sur le bananier

L'architecture du bananier est fortement redistributive de l'eau de pluie en raison de ses larges feuilles qui sont érigées verticalement pour les plus récentes et horizontales pour les plus anciennes. La pluie redistribuée au sol est composée du stemflow (flux le long du pseudo-tronc) et du throughfall, flux constitué à la fois de l'eau interceptée par les feuilles puis redistribuée au sol par égouttage et de la pluie incidente passant à travers le feuillage. Les pluies observées en Guadeloupe sont caractérisées par des intensités ne dépassant généralement pas 30 mm.h^{-1} (Asselin de Beauville et al., 1988; Cattan et al., 2005) et des diamètres médians (D_{50}) de goutte de l'ordre de 2 mm (Asselin de Beauville et al., 1988; Choïnard, 2000). Les gouttes issues du throughfall sont des gouttes gravitaires (de diamètre supérieur à celui des pluies incidentes) dont le diamètre médian varie en fonction de la position des égouttages sur le limbe. La mesure des diamètres d'égouttages sous les bananiers placés sous simulateur de pluie (Deltalab), a en effet montré que la taille des gouttes variait entre 5.5 et 6.9 mm (Figure 1.2), selon qu'elles étaient émises à partir d'un bord, d'un bout ou d'une déchirure de feuille (Sansoulet, 2002). Les gouttes de throughfall peuvent être émises à des hauteurs élevées dans la mesure où, à l'âge adulte, certaines variétés de bananiers peuvent atteindre une hauteur de 8 m. De ce fait, ces gouttes gravitaires génèrent des énergies cinétiques importantes contribuant au phénomène d'érosion. A ce jour, seul le volume de pluie redistribué en throughfall sous bananier a été étudié. La connaissance de la répartition du throughfall en fonction de la distance au tronc du bananier, qui permettrait de localiser les zones à risque d'érosion sous la couronne foliaire, reste donc un domaine à découvrir.

Les études menées par Jimenez et Lhomme (1994) ont montré que le stemflow représente près de 10% de la pluie incidente sur un bananier. Il augmente avec l'indice de surface foliaire (LAI), représentant jusqu'à 30 fois la pluie incidente (Nouvellon, 1999; Cattan et al., 2005). Pour des parcelles de bananiers de variété « Grande Naine », plantées avec une densité de 1800 pieds/ha et un écart entre pieds de $2.35 \text{ m} \times 2.35 \text{ m}$, les hauteurs d'eau de stemflow peuvent représenter jusqu'à 52 fois la pluie incidente, avant le stade de floraison des bananiers et jusqu'à 82 fois la pluie incidente, dans le cas de parcelles avec régimes (Nouvellon, 1999).

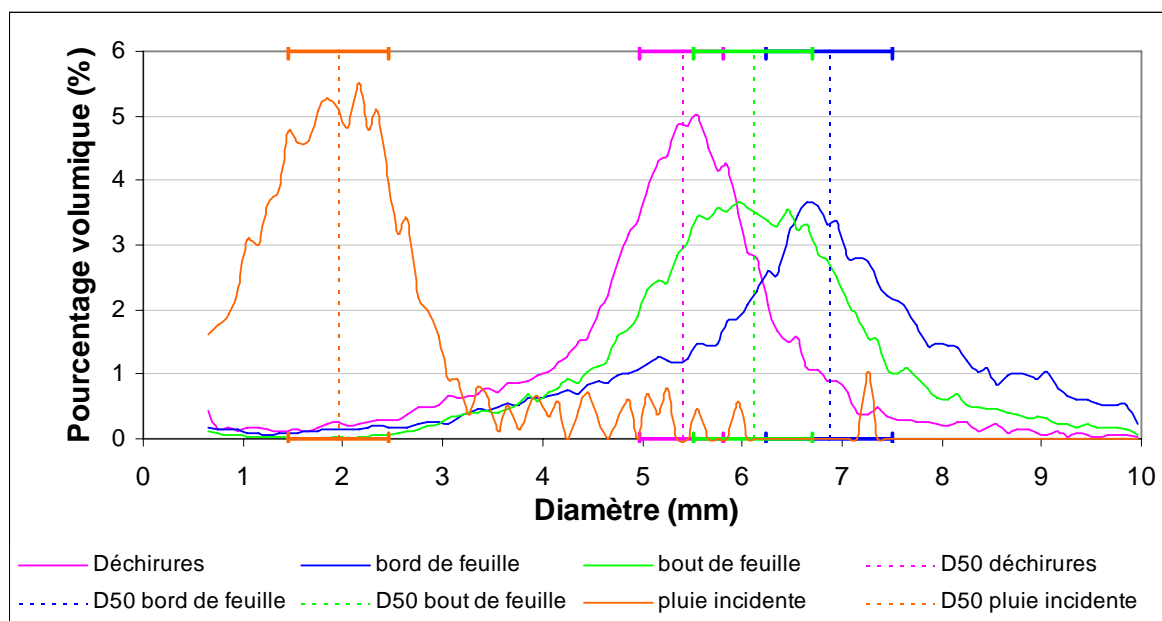


Figure 1.2 : Distribution volumique des diamètres de gouttes de pluie incidente et des principaux sites d'égouttage des feuilles du bananier. Les égouttages sont issus de bouts de feuille, de déchirures ou de bords de feuille. Les pointillés représentent le diamètre médian (D_{50}) et les barres horizontales, leurs écarts-types. D'après Sansoulet (2002).

1.1.3 Quels sont les risques environnementaux en bananeraie ?

La culture bananière en Guadeloupe se développe essentiellement en Basse-Terre (à 90%) en raison de la richesse de ses sols volcaniques et de la pluviométrie importante de cette zone. Son développement sur cette partie de l'île s'est fait principalement et anciennement sur des andosols (à l'intérieur des terres, en altitude et au sud), des sols ferrallitiques (à l'intérieur des terres et au Nord-Est) et plus récemment sur les sols bruns à halloysite localisés sur les côtes du sud-est de la Basse-Terre (Figure 1.3). Son développement plus récent sur vertisols en Grande-Terre, zone beaucoup plus sèche, a été possible grâce au développement des techniques d'irrigation.

Le caractère intensif de la culture se traduit par de forts apports en engrais NPK (azote, phosphore et potassium), par l'emploi répété de tracteurs et autres engins lourds, soit pour la destruction des anciennes bananeraies à replanter, soit pour le travail du sol. Ces pratiques peuvent avoir des impacts importants sur les propriétés des sols sur lesquels sont plantés les bananiers. En effet, le régime hydrique excédentaire de la zone Basse-Terrienne (2.5 à 4.5m de pluie/an) additionné du fort potentiel d'infiltration des andosols (elle peut varier entre 30 et 500 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ pour des systèmes mécanisés ou non (Perret et Dorel, 1999; Dorel et al., 2000)) et un drainage correspondant à 30% de la pluviométrie saisonnière (Khamsouk, 2001), induisent le lessivage des sols, entraînant les minéraux en profondeur dans les nappes. Les sols à allophanes, sols jeunes du sud de la Basse-Terre, ont la particularité d'avoir une CEC (capacité d'échange cationique) variable en fonction du pH du sol. En effet, dans les sols à fort pH, les nitrates sont peu retenus alors que le potassium est sorbé. Dans le cas des andosols à allophanes, donc à pH acide, c'est le contraire qui se produit. En cas de forte pluviométrie, le potassium est lessivé (près de 1/3), ce qui conduit les agriculteurs à renforcer les épandages d'intrants NPK, allant jusqu'à 18 T/ha/an. La généralisation des apports

massifs d'engrais à la Grande-Terre a posé le problème de la saturation des sols en solutés. En effet, les vertisols sur lesquels sont implantées les bananeraies, sont par principe riches en minéraux et ont une CEC élevée (avoisnant les 60 cmol/kg), ce qui contribue à la fixation des nitrates.

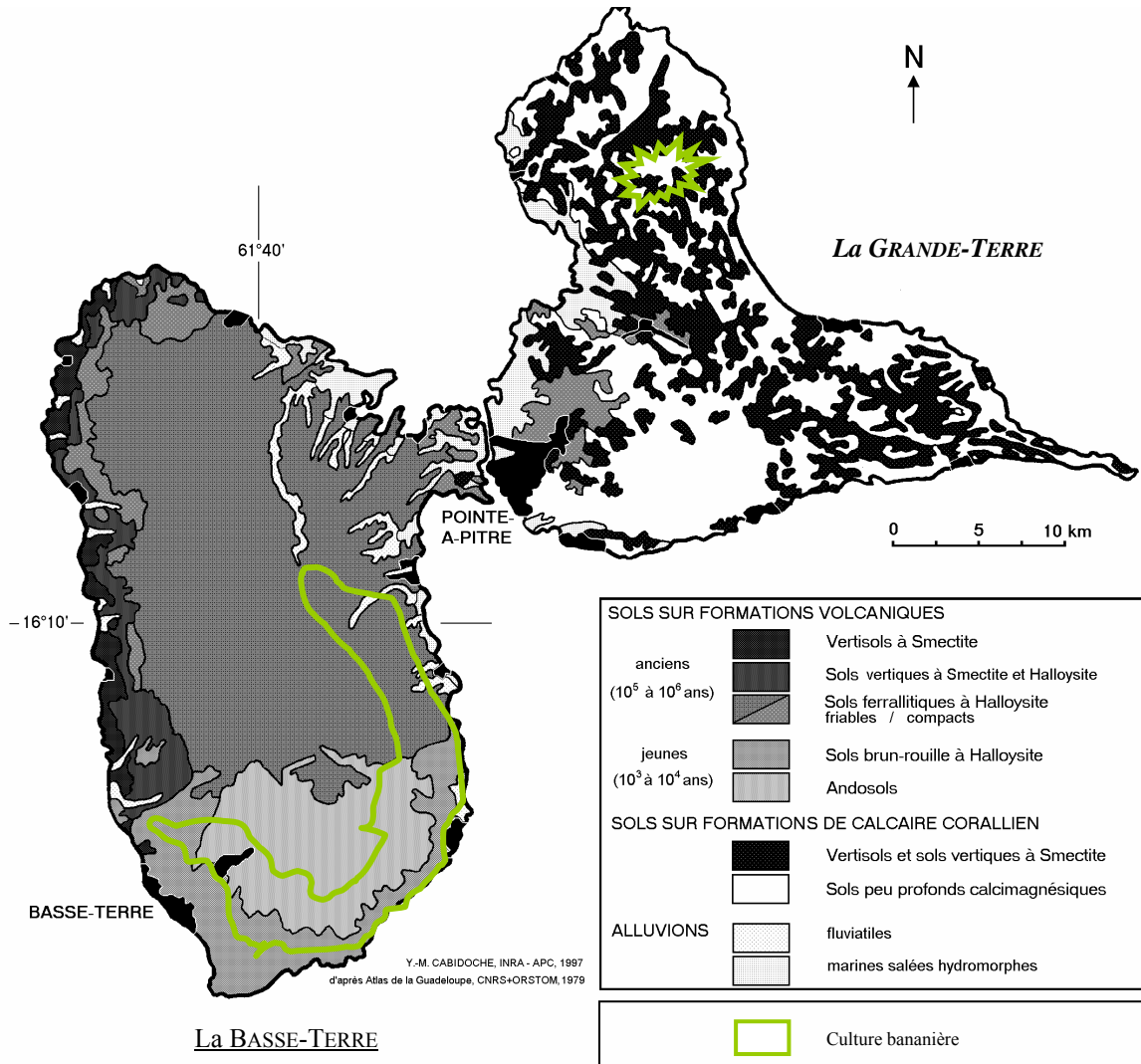


Figure 1.3 : Carte des sols et des zones de culture bananière en Guadeloupe sur la Basse-Terre et la Grande-Terre.
(Extrait de (Cabidoche, 2001)).

En général, le travail du sol augmente l'infiltrabilité superficielle des sols et réduit le ruissellement. Cependant, il peut entraîner une érodibilité superficielle suite à la fragmentation des agrégats de surfaces. L'emploi répété d'engins dégrade la structure des sols, les compacte et crée des semelles lissées, associées à une importante diminution de leur conductivité hydraulique et de leur macroporosité en profondeur (Perret et Dorel, 1999), réduisant ainsi le drainage et leurs réserves en eau (Cabidoche, 2001) et limitant l'enracinement des bananiers. Le compactage des sols peut donc entraîner l'augmentation du ruissellement. Cependant, en raison de leur conductivité hydraulique supérieure à 30 mm.h⁻¹,

le ruissellement reste en général faible quand l'intensité de la pluie est inférieure à 30 mm.h⁻¹, intensité peu souvent atteinte en Guadeloupe (Asselin de Beauville et al., 1988; Cattan et al., 2005).

D'autres impacts plus importants sur l'environnement liés aux pratiques culturales visant à lutter contre les parasites, insectes et champignons, sont apparus plus récemment et ont motivé nos travaux de recherche. En effet, les produits phytosanitaires en bananeraie ont été mis en cause dans la pollution des eaux de certains captages de la Basse-Terre à la fin des années 90. Les pesticides sont épandus soit au pied des bananiers sous forme de granulés (cas des nématicides et insecticides), soit sous forme d'aérosols (cas des fongicides et herbicides). Les nématicides et insecticides ont été créés à partir de molécules actives, les macromolécules, qui ont la particularité d'être très stables. Les premiers produits phytosanitaires appliqués étaient composés d'organo-chlorés, tels que le HCH (hexachlorocyclohexane) ou lindane, la dieldrine et le chlordécone. Ces macromolécules se dégradent à très long terme (leur durée de vie étant de l'ordre de 12 ans pour la dieldrine) ou pas du tout (cas du chlordécone), elles ont été interdites en 1993 en Guadeloupe. Elles ont alors été remplacées par des organo-phosphorés plus dégradables et solubles, tels que le terbufos et le cadusafos (commercialisés sous les noms de « Counter » et de « Rugby ») et d'autres molécules telles que l'aldicarbe contenues dans le « Témik ». Cependant, en raison de leur haute toxicité, le « Counter » a été lui aussi interdit en décembre 2003, ainsi que le « Témik » en juillet 2004. Etant épandus au pied des bananiers, zone pour laquelle une forte proportion de la pluie incidente (près de 10% (Jiménez et Lhomme, 1994)) est redistribuée en stemflow, ces molécules pourraient être plus facilement dissoutes et transportées en profondeur dans les sols et nappes phréatiques par infiltration et percolation ou par ruissellement, sous l'effet du stemflow. Le ruissellement qui est accru par le compactage des sols est cependant un phénomène très rarement observé dans des cultures bananières en Guadeloupe car les andosols ont un fort potentiel d'infiltration (Perret et Dorel, 1999; Dorel et al., 2000). Cependant, en cas de pluie à forte énergie cinétique, les sols peuvent former une croûte superficielle étanche qui accroît le ruissellement (Le Bissonais et Singer, 1992). Le risque principal en bananeraie réside essentiellement en le lessivage de produits phytosanitaires. D'ailleurs, il a été montré un important impact du stemflow sur leur devenir et celui des minéraux des sols, pour des couverts de maïs et de pommes de terre (Saffigna et al., 1976; Parkin et Codling, 1990)

Parallèlement, les flux localisés en throughfall directement sous le feuillage sont très souvent caractérisés par des gouttes gravitaires de plus gros diamètres que ceux de la pluie incidente, de fortes énergies cinétiques. En conséquence, ces gouttes sont plus érosives (Herwitz, 1987; Moss et Green, 1987; Le Bissonais et Singer, 1992; Hall et Calder, 1993). Dans le cas du bananier, leurs diamètres sont près de 3 fois supérieurs à ceux des gouttes de pluie incidente. La grande majorité des bananiers en Guadeloupe étant plantée sur des andosols qui ont la particularité d'être stables, peu d'érosion s'observe en bananeraie. Cependant, elle s'observe en bananeraie développée dans le sud de la Martinique (Khamsouk, 2001). Les gouttes gravitaires peuvent également entraîner le compactage du sol.

En conséquence, en raison de la corrélation entre leur localisation et celle des épandages d'intrants, nous nous sommes intéressés au stemflow et au throughfall comme potentiels vecteurs, soit de contamination des nappes phréatiques et des rivières par les molécules actives des produits phytosanitaires par lessivage et infiltration ou soit d'érosion dans le cas de plantations pour lesquelles le travail du sol aurait été récemment effectué.

1.2 Interception de la pluie par les végétaux

1.2.1 Les pertes par stockage et évaporation au cours de l'interception

Lorsque la pluie atteint une surface, les gouttes qui la composent sont transformées par l'impact : elles se divisent en petites gouttelettes (processus de **splash**). Celles-ci, en fonction de leurs tailles, peuvent s'évaporer directement (**évaporation directe**) dans le feuillage (cas des fines gouttelettes) ou être stockées à la surface des feuilles environnantes. Certaines gouttes de splash peuvent atteindre des vitesses et des hauteurs importantes et être ainsi projetées à des distances allant au-delà de 60 cm de leur point d'impact (Macdonald et McCartney, 1987). Au cours d'événements pluvieux continus et suffisamment longs, les gouttelettes projetées sont stockées (processus de **stockage**) sur les feuilles, et, en glissant, peuvent s'unir à d'autres par coalescence. L'eau est alors accumulée à certains endroits du feuillage selon l'inclinaison et les propriétés de surface des feuilles. Les surfaces favorisant cette coalescence sont principalement plates ou concaves, mais les feuilles à duvet peuvent également retenir les gouttelettes en surface et favoriser le stockage (Armstrong et Mitchell, 1988). En fonction de l'ensoleillement, du taux d'humidité de l'air et de la résistance aérodynamique des surfaces interceptrices, l'eau stockée sur les surfaces de feuille est progressivement évaporée : c'est l'**évaporation indirecte**. Sur des feuilles inclinées, les gouttes interceptées s'écoulent et lorsqu'elles atteignent les bords de feuille et que les forces de tension à l'interface eau-feuille sont inférieures à la force de gravité les entraînant vers le bas, elles s'égouttent. Ce phénomène d'égouttages est plus marqué quand les pluies sont saturantes et permettent au couvert d'atteindre sa **capacité de stockage** : les feuilles, branches et tige ne pouvant plus stocker, l'eau excédentaire interceptée alimente alors les égouttages. En général, les égouttages sont caractérisés par des diamètres de gouttes supérieurs à ceux des gouttes primaires (Herwitz, 1987; Armstrong et Mitchell, 1988; Hall et Calder, 1993) (Figure 1.2). Aussi, le stockage et l'évaporation directe ou indirecte constituent **les pertes en eau par interception**. Seuls la pluie incidente, les égouttages au sol et le stemflow, constituent des ressources candidates à l'infiltration dans le sol.

1.2.2 Les facteurs qui influent sur l'interception de la pluie

1.2.2.1 Les propriétés de la pluie

L'interception de la pluie par les végétaux est fortement liée aux propriétés physiques de la pluie incidente. En effet, selon la taille des gouttes (Calder, 1986; Calder, 1996a; Liu, 1998), leurs propriétés physiques (tension de surface, densité, vitesse de chute et viscosité), l'intensité (Armstrong et Mitchell, 1988; Van Elewijck, 1989b; Mohamound et Ewing, 1990), la durée (Mohamound et Ewing, 1990; Rotz et al., 1991) ou l'inclinaison de la pluie (Herwitz et Slye, 1992), les phénomènes d'interception seront plus ou moins marqués. Les pluies inclinées sous l'effet du vent tendent à pénétrer d'avantage dans le couvert et donc à être interceptées par un plus grand nombre de surface. En dépit du fait que les surfaces interceptrices (surfaces des différents organes du couvert qui interceptent la pluie) peuvent augmenter dans le cas d'une pluie inclinée, une diminution de la capacité de stockage du couvert s'observe quand la vitesse du vent croît (Hormann et al., 1996). De plus, en cas de pluie inclinée, les plantes ou arbres formant le couvert n'interceptent pas de la même manière : les végétaux les plus exposés (ceux ayant les plus hautes couronnes ou étant à la lisière du couvert) interceptent d'avantage que leurs voisins (Herwitz et Slye, 1992; Herwitz et Slye, 1995). L'inclinaison de la pluie joue aussi un rôle sur les redistributions au sol. Par

exemple, les stemflows mesurés pour un couvert forestier d'eucalyptus et de pins se sont avérés être plus importants pour des pluies inclinées que des pluies verticales (Crockford et Richardson, 1990b).

La vitesse de chute et la taille des gouttes incidentes, déterminant les énergies cinétiques des gouttes, sont des paramètres qui influent également sur l'interception (Massman, 1983; Calder, 1986) et donc sur les processus de splash, de stockage et d'évaporation. Quand la vitesse des gouttes incidentes augmente, leur énergie augmente, ce qui a pour conséquence d'augmenter les hauteurs et les distances atteintes par les gouttelettes de splash (Pietravalle et al., 2001). Mais ce processus peut également entraîner un détachement des gouttelettes déjà stockées sur les surfaces interceptrices (Herwitz, 1987). Pour de gros diamètres de gouttes de pluie incidente ou des égouttages tombant de hauteurs élevées, les gouttes sont soumises à de forts cisaillements au cours de leur chute pouvant provoquer leur déformation, voire leur éclatement et modifier ainsi l'interception. En effet, l'étude des propriétés des gouttes d'impact sur le splash produit a montré que la viscosité des gouttes avait peu d'effet sur le splash mais que la tension à l'interface air-eau affectait la taille des gouttes de splash (Mundo et al., 1995; Huber et al., 1997; Rieber et Frohn, 1999). Pour une goutte en chute libre, D_{max} , le diamètre maximal stable (diamètre qu'elle peut conserver sans s'éclater au cours de sa chute en air libre) est donné par l'équation suivante (Pruppacher et Klett, 1978) :

$$D_{max} = \frac{8\sigma}{C_D \rho_a U_\infty^2} \quad \text{Eq. 1.1}$$

D_{max} est exprimé en mètre, σ est la tension à l'interface air-eau (N.m^{-1}), C_D , nombre adimensionné, est le coefficient de traînée, ρ_a est la masse volumique de l'air (kg.m^{-3}) et U_∞ correspond à la vitesse limite de la goutte (m.s^{-1}).

Le coefficient de traînée C_D est calculé en fonction de la valeur du nombre de Reynolds Re (Clift et al., 1978). Re est adimensionné et exprime le rapport entre l'inertie des gouttes et leur viscosité dynamique μ ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$). Il est donné par l'équation :

$$Re = \frac{\rho_a D v}{\mu} \quad \text{Eq. 1.2}$$

Où v (m.s^{-1}) est la vitesse atteinte par les gouttes juste avant l'impact et D (m) leur diamètre initial.

La tension σ (N.m^{-1}) dépend de la température T ($^\circ\text{C}$) de l'air environnant et permet de maintenir la cohésion de la goutte et donc sa forme sphérique. Pour une température inférieure à 40°C , elle est donnée par l'équation (Pruppacher et Klett, 1978) :

$$\sigma = 1 \times 10^{-3} (76.1 - 0.155T) \quad \text{Eq. 1.3}$$

A cours de l'interception, le splash n'est pas un processus systématique. Il survient uniquement quand certaines conditions, liées aux propriétés des gouttes, sont réunies. Ohnesorge (1936) a montré que son occurrence dépendait essentiellement de deux grandeurs adimensionnées, le nombre de Reynolds Re , et le nombre d'Ohnesorge Oh , calculés pour une goutte de masse volumique ρ (kg.m^{-3}). Le nombre d'Ohnesorge est calculé par la formule suivante :

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D}} \quad \text{Eq. 1.4}$$

L'étude du splash en fonction de Oh et de Re a montré l'existence d'une fonction puissance entre ces deux grandeurs, séparant le splash du dépôt des gouttes et caractérisée par un coefficient k (Mundo et al., 1995), tel que :

$$k = Oh Re^{1.25} \quad \text{Eq. 1.5}$$

Une autre grandeur adimensionnée, le nombre de Weber We , exprimé en fonction de Oh et de Re et traduisant le rapport entre la tension de surface de la goutte et la pression de Bernoulli existant entre deux fluides, peut être employée pour mesurer l'instabilité des gouttes. Il est utilisé également pour déterminer la limite entre le dépôt et le splash des gouttes sur une surface donnée :

$$We = (Re Oh)^2 = \frac{\rho D v^2}{\sigma} \quad \text{Eq. 1.6}$$

Le splash survient alors pour des valeurs de We supérieures à 200 (Rieber et Frohn, 1999), correspondant à de faibles tensions de surface des gouttes.

La durée de la pluie ainsi que son intensité sont également deux facteurs influant sur l'interception. En effet, l'interception est plus importante pour de longs événements pluvieux puisqu'en augmentant la durée de la pluie, le couvert tend à atteindre sa capacité de stockage (Mohamound et Ewing, 1990). Cependant, l'intensité de la pluie joue un rôle inverse : pour une même durée de pluie, l'interception est plus faible quand l'intensité de l'événement pluvieux augmente (Mohamound et Ewing, 1990; Loustau et al., 1992a; Loustau et al., 1992b).

1.2.2.2 Influence des propriétés du couvert

Les caractéristiques des feuilles qui influent sur l'interception sont leur inclinaison (Van Elewijck, 1989a; Fitt et al., 1992), leur flexibilité (Stedman, 1979; Herwitz, 1987; Fitt et al., 1992), leur état de surface plus ou moins cireux (Weiss, 1988; Huber et al., 1997) et leur âge (Fitt et al., 1992).

La rigidité, l'inclinaison ou l'état de surface des surfaces interceptrices (cireux, à duvet, sec ou humide) jouent également un rôle important dans le phénomène de splash (Reynolds et al., 1987; Huber et al., 1998; Rieber et Frohn, 1999). Les branches plus rigides et de surface plus poreuse que les feuilles ont tendance à produire des gouttelettes de splash plus fines (Herwitz, 1987) qui s'évaporent plus facilement. Les feuilles, plus flexibles, absorbent la quantité de mouvement de gouttes qui produisent alors moins de splash (Stedman, 1979). Le type et la texture des surfaces interceptrices restent des facteurs très importants pour l'interception. Ainsi, les branches stockent d'avantage l'eau de pluie que les feuilles (Herwitz, 1987; Liu, 1998) et les feuilles cireuses produisent plus de splash que les feuilles à duvet (Huber et al., 1997). Ce caractère hydrophile des branches se traduit par une capacité plus faible à produire du splash (Herwitz, 1987).

La structure et la nature du couvert influent énormément sur sa capacité de stockage. Par exemple, pour des arbres à aiguilles, il a été montré que la capacité de stockage des cyprès était supérieure à celle des pins (Liu, 1998). Et pour une forêt de chênes à sous bois herbacé, les herbes interceptaient moins que la litière et encore moins que les chênes : les précipitations annuelles étaient interceptées à 18% par les herbes, 20.7% par la litière et 25.4% par le couvert de chênes (Mohamound et Ewing, 1990). L'inclinaison des surfaces affecte l'interception en diminuant le splash (Van Elewijck, 1989a; Huber et al., 1997) et en

favorisant le stockage pour de faibles inclinaisons (Herwitz, 1987; Armstrong et Mitchell, 1988). La capacité de stockage et le diamètre moyen des gouttes d'égouttages varient donc en fonction du type du couvert. Enfin, la structure du couvert modifie les énergies cinétiques et la distribution de taille des gouttes (Eschner, 1965; Brandt, 1989; Hall et Calder, 1993).

1.2.3 Calcul du bilan hydrologique du couvert

L'étude de l'interception de la pluie par les végétaux s'est essentiellement développée afin de déterminer le bilan hydrologique des couverts forestiers (Helvey et Patric, 1965; Rutter et al., 1971; Rutter et Morton, 1975; Rutter et Morton, 1977; Gash et Morton, 1978; Gash, 1979). La pluie incidente ou pluie brute (P_g) se décompose en pluie évaporée E , en pluie secondaire ou throughfall (P_t) et en stemflow (P_s) :

$$P_g = E + P_t + P_s \quad \text{Eq. 1.7}$$

L'évaporation E qui est constituée de l'évaporation directe (le splash) et de l'évaporation indirecte (le stockage) est assimilée à la pluie interceptée I , communément appelée **interception**.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour calculer ces différentes grandeurs à l'échelle du couvert. La pluie incidente, le stemflow et le throughfall sont déterminés en mesurant le volume d'eau recueilli dans des collecteurs placés respectivement au sol à l'extérieur des couronnes, autour des troncs et sous les couronnes. L'évaporation réelle E (mm) du couvert est habituellement calculée à partir de l'évaporation potentielle E_p , du stockage effectif du couvert C et de sa capacité maximale de stockage S . Tant que le couvert n'a pas atteint sa saturation, E n'est que partielle et peut être estimée par la formule proposée par Rutter et ses collègues (1971) :

$$E = (CS^{-1})E_p \quad \text{Eq. 1.8}$$

L'évaporation potentielle est donnée par l'équation de Penman-Monteith dérivant de celle de Penman (1948) appliquée à des couverts saturés (Rutter et al., 1971). Elle exprime le taux d'évapotranspiration comme étant la combinaison du bilan d'énergie radiative (le rayonnement net R_n) avec le transfert aérodynamique (transfert de masse) pour une résistance de surface nulle (cas du couvert humide saturé) :

$$\lambda E_p = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (e_a^* - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma} \quad \text{Eq. 1.9}$$

Où les paramètres utilisés sont définis de la manière suivante :

λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J.kg^{-1})

E_p : évapotranspiration de Penman-Monteith (mm.s^{-1})

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur en fonction de la température de l'air (Pa.K^{-1})

γ : constante psychrométrique (Pa.K^{-1})

ρ : densité de l'air à pression constante (kg.m^{-3})

C_p : capacité calorifique de l'air humide à pression constante ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

e_a^* : pression de vapeur saturante de l'air (Pa)

e_a : pression de vapeur de l'air (Pa)

r_a : résistance aérodynamique du couvert (s.m^{-1})

C et S s'expriment généralement en millimètre (mm) de pluie. La quantité d'eau C retenue sur le couvert par unité de temps est composée d'eau éliminée par drainage et d'eau évaporée. Expérimentalement, afin d'estimer l'évaporation de l'eau stockée sur un arbre, l'eau stockée a pu être évaluée en mesurant l'augmentation du poids de l'arbre après la pluie, au moment où le drainage de la couronne s'annulait (Aston, 1979; Teklehaimanot et Jarvis, 1991).

La capacité de stockage peut être calculée par deux méthodes :

- La méthode de Leyton, Reynolds et Thompson (Leyton et al., 1967) qui consiste à déterminer le point d'inflexion de la courbe de la **pluie nette** (throughfall + stemflow) en fonction la **pluie brute**. Ce point correspond au point de saturation du couvert. Cette méthode est souvent sujette aux erreurs dans la mesure où les points observés sont dispersés en nuage (Figure 1.4).
- La méthode d'Aston (1979) qui consiste à asperger avec une pluie artificielle des petits arbres en laboratoire et à les peser afin de déterminer l'augmentation de leurs poids. Cette augmentation correspond à l'interception de ces arbres.

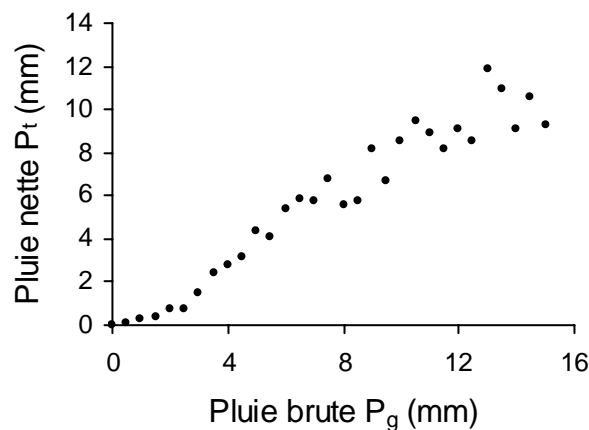


Figure 1.4 : Pluie nette en fonction de la Pluie brute d'après Leyton et ses collaborateurs (1967) permettant d'estimer la capacité de stockage.

L'interception I a été calculée également à l'aide d'une régression linéaire en fonction de la pluie brute P_g (Rutter et Morton, 1975) :

$$I = a P_g + b \quad \text{Eq. 1.5}$$

Où a et b sont des constantes dépendant du couvert. Pour une plantation de bananiers de type *Plantain*, les valeurs de a et b ont été estimées à 0.0625 et 0.249 respectivement (Jiménez et Lhomme, 1994).

1.3 Etude du fonctionnement des végétaux par la modélisation

1.3.1 Etude des interactions entre les plantes et leur environnement

L'environnement des plantes qu'il soit climatique, souterrain ou végétal, affecte leur développement. En effet, les paramètres liés à l'environnement aérien et qui influent sur la croissance des plantes sont principalement la lumière, la température de l'air, son humidité, la vitesse du vent et la pluviométrie. Les propriétés physiques des sols sur lesquels se développent les plantes influent également, à savoir : leur température, leur résistance à la pénétration, leur conductivité hydraulique et leur porosité. Enfin, des compétitions peuvent exister entre plantes mais aussi, entre organes d'une même plante dans la mesure où les parties aériennes rentrent en compétition pour les ressources lumineuses et les parties souterraines, pour l'eau et les minéraux présents dans le sol. L'étude des relations entre les plantes et tous ces facteurs permet de mieux comprendre le développement des plantes mais reste complexe car ces échanges sont fortement liés au développement et à l'architecture des plantes. Afin de comprendre ces interactions, des modèles de fonctionnement des plantes ont été développés pour l'étude des interactions entre l'environnement et des plantes. Ces modèles permettent de traiter simultanément les mécanismes physiques et biologiques (interception lumineuse, transferts d'eau et de carbone dans les plantes) contrôlant leur croissance.

1.3.2 Approches modulaires et représentations 3-D des plantes

Afin de mieux comprendre les mécanismes de croissance des plantes, des modèles ont été développés pour décrire les plantes de façon réaliste, en se basant sur l'étude de leurs caractéristiques physiologiques (Godin, 1999; Lewis, 1999). Les modèles 3-D proposant une représentation virtuelle des parties aériennes des plantes développent trois types d'approche modulaire :

- La représentation géométrique des plantes en les décomposant en organes tels que des feuilles, des branches formées de nœuds et d'entre-nœuds, des fruits, des bourgeons ou des racines, tient compte des positions spatiales et des formes des éléments. Cependant, elle ne tient pas compte des connexions entre les organes.
- La représentation spatiale des plantes ne prévoit pas une description précise de ces différents organes mais propose de les regrouper dans des cellules communément appelées voxels, formant un maillage 3-D. Chaque cellule est caractérisée par plusieurs paramètres tels que l'inclinaison, les propriétés optiques et la densité foliaire des éléments la composant.
- La représentation topologique des plantes se base sur la représentation des différents éléments les composant en tenant compte des connexions existant entre eux.

De nos jours, grâce à l'avancée technologique faite dans le domaine informatique, ces modèles 3-D sont plus communément utilisés. L'un des phénomènes qui a été le plus étudié durant ces vingt dernières années est la croissance des plantes combinant à la fois la représentation spatiale et topologique. Ces deux approches permettent la simulation de la croissance des plantes par modification de l'architecture, soit par l'ajout, soit par le retrait d'éléments les composant. La simulation de l'architecture à l'aide de voxels a été utilisée pour modéliser l'interception lumineuse par les couverts (Gastellu-Etchegorry et al., 1996) et l'approche topologique a été appliquée pour modéliser les flux de masse d'eau et de carbone (Nikinma et al., 2004) et mesurer l'architecture des plantes. L'étude des interactions entre les plantes et leur micro-environnement nécessite une bonne description de leurs surfaces d'échange fournie de façon plus précise par une représentation géométrique (Dauzat, 1993).

Plus récemment, la modélisation 3-D s'est généralisée au système racinaire pour l'étude des transferts d'eau sol/racines (Chopard, 2004; Drouet et al., 2004).

1.3.3 Méthodes d'enregistrement 3-D des architectures

Les différentes techniques de digitalisation 3-D de l'architecture peuvent être divisées en deux groupes : la digitalisation utilisant un pointeur (digitalisation ultrasonique et électromagnétique) et celle n'en utilisant pas (stéréovision et lancer de rayon). La stéréovision consiste en la prise de photos de la partie de la plante à enregistrer à l'aide de caméras placées sous deux angles de vue différents, pris de part et d'autre de la plante (Ivanov et al., 1995). Les caméras sont caractérisées par leurs plans images S_1 et S_2 ainsi que leurs centres optiques (O_1 et O_2). Le point P , dont les coordonnées x_p , y_p et z_p sont à déterminer, a pour image sur S_1 et S_2 , P_1 et P_2 respectivement. Il se trouve alors à l'intersection entre la droite ($P_1 O_1$) et ($P_2 O_2$) comme présenté en Figure 1.5.

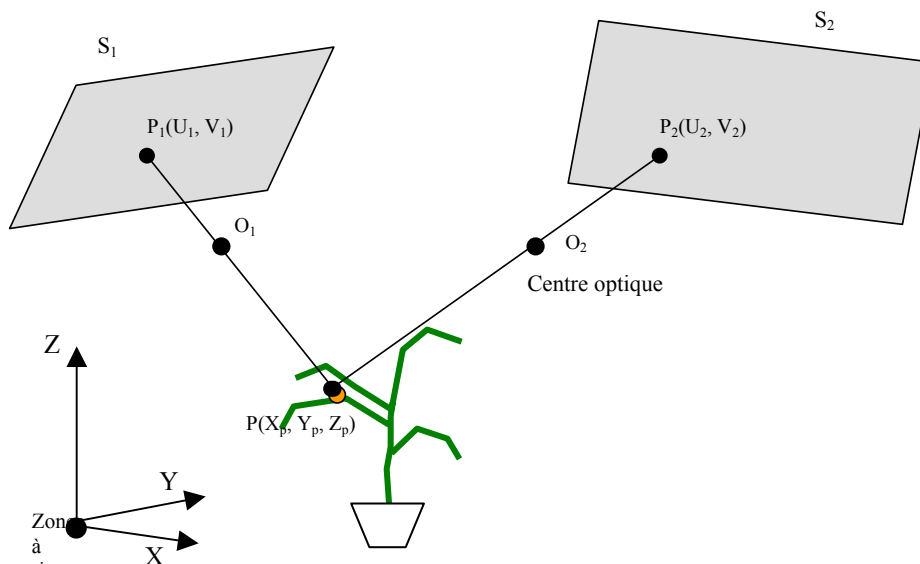


Figure 1.5 : Principe d'enregistrement de l'architecture d'une plante par stéréovision. Le point P est à localiser dans l'espace 3-D à l'aide de deux caméras de plan image S_1 et S_2 et de centre optique O_1 et O_2 . D'après Ivanov et ses collaborateurs (1995).

La méthode de lancer de rayon consiste à envoyer un rayon laser sur l'objet à déterminer. Celui-ci renvoie le rayon vers des miroirs jusqu'à une caméra vidéo, dans le cas du Cyberware 4020/Ps Digitizer, ou vers la lentille d'une caméra laser, dans le cas du Laser Design Inc. 3D Digitizer System (Figure 1.6). Connaissant les distances entre la source d'émission du rayon et les miroirs ou la lentille de la caméra, la position du point est calculée dans l'espace en utilisant les relations trigonométriques et optiques (Moullia et Sinoquet, 1993).

La digitalisation par pointeur permet de calculer les coordonnées d'un stylet pointant à différents endroits sur la plante. Le calcul se fait en convertissant en distance la mesure du

temps de propagation des ondes ultrasoniques émises par le stylet (cas de la digitalisation à ultrasons) ou par mesure d'inductance des bobines fournissant les angles d'Euler et les coordonnées tridimensionnelles du stylet récepteur d'ondes électromagnétiques émises par l'appareil (cas de la digitalisation électromagnétique).

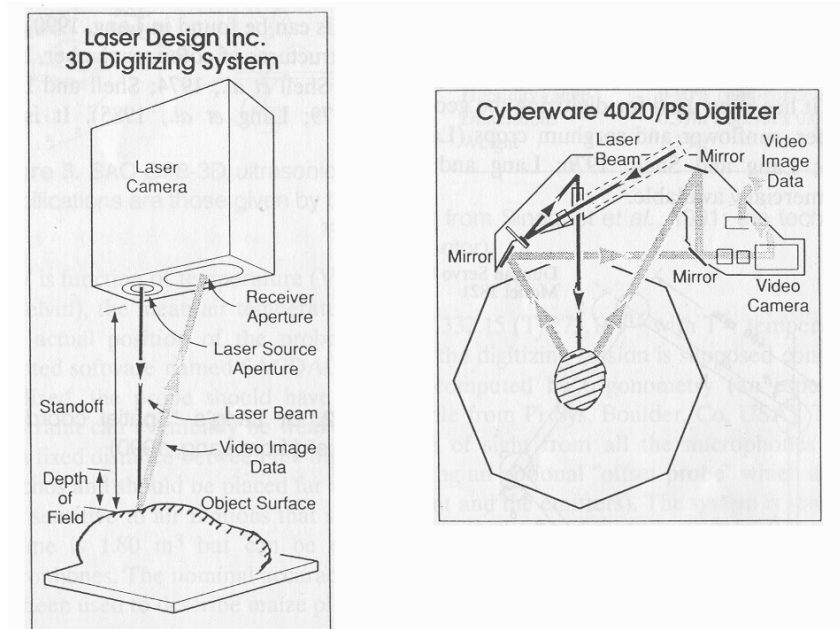


Figure 1.6 : Systèmes de digitalisation par Lancer de rayon. Extrait de (Mouliat et Sinoquet, 1993).

Ces techniques de digitalisation 3-D présentent toutes des avantages et des inconvénients résumés en Tableau 1.1. Leurs gammes d'utilisation sont fortement dépendantes des conditions de mesure et de l'objet à localiser dans l'espace. La mesure par digitalisation avec contact de l'élément à enregistrer, permet de choisir à l'avance le point à définir dans l'espace, ce que ne permet pas celle sans contact (Stéréovision et Lancer de rayon). Enfin, de toutes les techniques, la moins sensible au phénomène de masquage par une autre partie de la plante, est la digitalisation électromagnétique.

Type de digitalisation	Facilité de transport	Utilisation et Sensibilité à l'environnement	Sensibilité au masquage	Volume de mesure	Adaptation aux formes complexes
Ultra sonore	0	En laboratoire : sensible aux turbulences de l'air et aux variations de température	++	++	+++
Electromagnétique	+++	Au champ : sensible aux métaux et à l'électromagnétisme	0	+++	+++
Stéréovision	0	En laboratoire et applicable au champ avec une précision moindre	+++	+	+++
Lancer de rayon	0	En laboratoire	+++	+	+

Tableau 1.1 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des techniques de mesure architecturales 3-D utilisant la Stéréo vision, le Lancer de rayon et les Digitaliseurs à ultrasons et électromagnétique. Les aptitudes évaluées sont classées selon les symboles suivants : nulle (0), faible (+), moyen (++), et important (+++).

1.4 Modèles informatiques et approches 3-D

1.4.1 Langages informatiques pour l'étude de la croissance des plantes

Différentes techniques de modélisation de l'architecture des plantes ont été utilisées jusqu'à ce jour. Afin de modéliser la structure des plantes, un langage informatique permettant de coder des différents organes et leur développement, a été proposé. L'un des premiers modèles qui a été utilisé pour simuler le développement des végétaux a été développé à l'aide du formalisme L-system, basé sur les travaux menés par Lindenmayer (Lindenmayer, 1968). Le développement de la visualisation graphique par ordinateur a permis l'application de cette grammaire pour la visualisation de la structure des plantes. Le L-system a été largement appliqué pour simuler la croissance et le développement des végétaux (Prunskiewicz et al., 1997; Diaz-Ambrona et al., 1998; Fournier et Andrieu, 1998). L'activité photosynthétique des plantes a été également étudiée par la méthode de Monte Carlo en utilisant un algorithme de Lancer de rayon pour simuler le régime radiatif des plantes par télédétection (Gautier et al., 2000) ou à partir de données architecturales fournies par stéréovision (Lewis, 1999).

Le nombre d'espèces végétales étudiées par les modèles 3-D croissant de plus en plus, les scientifiques ont été amenés à proposer une standardisation de la représentation des architectures. En ce sens, un logiciel informatique, AMAPmod, permettant de regrouper des informations relatives aux différentes structures de végétaux a été conçu à partir d'observations et de mesures in situ (Godin et al., 1999). Il permet une représentation à l'aide de graphiques multi-échelles de l'arborescence à différents niveaux de la plante. Afin de consulter la base de données architecturales, un langage commun a été élaboré : le AML (AMAP Modeling Language). En fonction de la partie de la plante à étudier, ce langage permet à l'utilisateur d'analyser et de modifier les organes de la plante et leurs connections. De cette manière, sa topologie peut être étudiée à différent niveau en tenant compte de la position spatiale de ses composants.

D'autres méthodes de modélisation combinant les approches géométrique et topologique ont été développées pour mesurer et visualiser des architectures de plantes, en particulier leurs feuilles. Ces méthodes consistent à représenter en 3-D la plante à partir des coordonnées géométriques des éléments la composant fournies par digitalisation. Pour cela, les scientifiques ont développé des programmes informatiques capables de traiter ces données géométriques pour une modélisation 3-D des architectures. Les feuilles sont alors modélisées à l'aide de la discrétisation 3-D des nervures et de la largeur des limbes (Sinoquet et al., 1991; Rakocevic et al., 2000) ou utilisent une méthode de représentation plus détaillée des feuilles en triangles jointifs (España et al., 1999b; Bussière et al., 2002). La digitalisation a été développée à la base pour des représentations de feuilles, et son application aux arbres et aux systèmes racinaires ne s'est faite que récemment (Drouet, 2003).

1.4.2 De l'approche 1-D à 3-D pour l'étude des échanges avec l'environnement

Les ressources lumineuses et hydriques étant indispensables à la création de biomasse des végétaux, l'interception lumineuse et le bilan hydrique ont été largement étudiés pour mieux comprendre le fonctionnement des plantes. Différentes approches de modélisation des couverts ont été proposées selon l'échelle à laquelle étaient étudiés ces végétaux. A l'échelle de la parcelle, le couvert était représenté par une couche unique de végétation et une distribution foliaire homogène ; l'approche 1-D était donc suffisante (Deardoff, 1978; Sellers et al., 1986). L'étude des compétitions entre les plantes a nécessité de s'intéresser à une plus petite échelle, celle de la plante, voire celle de l'organe pour décrire le couvert de façon plus détaillée en 2-D ou 3-D (Sinoquet, 1993; Sinoquet et Andrieu, 1993). Certains modèles 3-D ont été utilisés pour l'étude de l'interception lumineuse par les cultures de maïs (Sinoquet et al., 1991; España et al., 1999b). D'autres études ont été menées pour évaluer l'effet de l'architecture sur l'interception lumineuse (Gastellu-Etchegorry et al., 1996; Lewis, 1999; Pommel et al., 2001).

Les premiers modèles proposant une description réaliste des architectures se sont basés sur une approche 2-D convertie en 3-D afin d'estimer le profil de surface foliaire par la méthode des silhouettes (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1978) ou par stéréovision (Ivanov et al., 1995). Ces méthodes ne pouvaient être appliquées à l'étude de la croissance des plantes. Enfin, d'autres modèles 3-D ont utilisé une description détaillée des différents organes des plantes pour étudier l'interception lumineuse en s'intéressant à leurs propriétés physiques et optiques. Ces modèles ont alors utilisé des données architecturales obtenues par la méthode de digitalisation 3-D à ultrasons (Mouliat et Sinoquet, 1993; Sinoquet et Rivet, 1997) ou électromagnétique (Drouet, 2003). Leur application à l'étude de l'interception de la pluie ne s'est faite que récemment.

1.4.3 Les modèles d'interception de la pluie

Les premiers modèles simulant l'interception de la pluie ont été utilisés pour évaluer les pertes dans le bilan hydrique des systèmes forestiers (cf. 1.2.3) La première approche développée (approche empirique) permettait d'établir des régressions entre la pluie incidente et l'interception (Helvey et Patric, 1965). Cependant, ce type d'approche ne tient pas compte des paramètres affectant l'interception, tels que la vitesse du vent ou l'intensité de la pluie. Afin de mieux prendre en compte l'évaporation de la pluie interceptée par le couvert, Rutter et ses collègues (1971) ont proposé une approche numérique utilisant des données horaires de la pluie et des paramètres météorologiques. Puis, la structure du couvert, sa capacité de

stockage et son drainage ont été introduit dans le modèle de Rutter pour prédire l'interception par différentes forêts (Rutter et Morton, 1975). Cette approche assez lourde, a été simplifiée par Gash en développant une approche analytique en moyennant le taux d'évaporation et la pluie incidente (Gash, 1979). Plusieurs modèles ont été développés à partir du modèle de Gash, montrant une forte influence de paramètres tels que le vent, l'intensité de la pluie, la taille des gouttes incidentes et leurs vitesses de chute (Massman, 1983; Rowe, 1983; Herwitz, 1985; Calder, 1986).

Afin de mieux comprendre les phénomènes d'interception, de nombreuses études se sont portées sur le splash. Elles ont d'abord cherché à évaluer l'effet des propriétés de la pluie telles que le spectre de taille des gouttes incidentes (Huber et al., 1997; Huber et al., 1998), l'intensité et la durée de la pluie (Shaw, 1987; Ghadiri et Payne, 1988). Ces propriétés ont été également étudiées pour comprendre les phénomènes de propagation de maladies fongiques par dispersions des spores par splash (Grove et al., 1985; Shaw, 1987; Yang et al., 1990; Madden et al., 1992; Ntahimpera et al., 1998) ou évaluer le processus d'érosion dû à l'impact des gouttes au sol (Ghadiri et Payne, 1988; Shainberg et al., 1992). Les études portant sur le splash se sont également intéressées aux propriétés des surfaces interceptrices (rigidité, mouillabilité, rugosité et inclinaison) (Herwitz, 1987; Ghadiri et Payne, 1988; Fitt et al., 1992). Les travaux menés sur les effets érosifs des gouttes de throughfall ont montré une forte influence de la structure des végétaux sur l'interception et plus particulièrement sur les diamètres d'égouttages (Finney, 1984; Herwitz, 1987; Hall et Calder, 1993).

Grâce à ces études, des modèles analytiques ou numériques d'interception étudiant les phénomènes de splash (Pietravalle et al., 2001), ou d'évaporation et de stockage en fonction la structure du couvert (Watanabe et Mizutani, 1995), ont été développés. Cependant, elles ne tenaient compte que de la taille des gouttes secondaires. Compte tenu que la taille des gouttes de pluie est modifiée par l'architecture des couverts et que les diamètres d'égouttages sont supérieurs à ceux des gouttes de pluie primaire (Herwitz, 1987; Moss et Green, 1987; Hall et Calder, 1993), la non prise en compte de la modification de la pluie par le couvert ne peut être adaptée à une approche 3-D décrivant l'interception à l'échelle des surfaces foliaires. Récemment, un modèle développé pour étudier la propagation des maladies chez certaines plantes par dispersion par splash a été proposé en combinant un modèle d'architecture 3-D à un modèle de distribution spatiale de la pluie et du splash dans un couvert (Saint-Jean et al., 2003). Ce modèle utilise l'approche de Monte Carlo fournissant les propriétés statistiques des gouttelettes de splash produites ; propriétés permettant de déterminer leurs trajectoires.

Enfin, l'approche tridimensionnelle permettant de mieux décrire les surfaces interceptrices a été utilisée afin de modéliser l'interception de la pluie par les végétaux et d'évaluer les risques de pollution par lessivage de produits agro-chimiques sous l'effet des écoulements préférentiels sur les plantes (Bussière et al., 2002). C'est ce dernier modèle qui a été utilisé au cours de cette thèse afin de simuler la redistribution 2-D de la pluie au sol, tout en tenant compte des processus d'interception décrits à une plus fine échelle : celle de l'élément foliaire.

Chapitre 2 Matériels et méthodes

2.1 Les dispositifs expérimentaux

2.1.1 La digitalisation des architectures

Elle a pour but d'enregistrer les architectures de plante par leurs coordonnées 3-D. Celles-ci sont enregistrées dans un fichier texte (d'extension « .D3D »). Pour cela, la technique de digitalisation allie deux outils : un digitaliseur 3-D à ultrasons ou électromagnétique et un logiciel permettant à la fois de piloter les étapes de digitalisation, d'enregistrer les coordonnées des points représentant la plante et de visualiser ces points. Au cours des expérimentations le digitaliseur ultrasonique a principalement été utilisé.

2.1.1.1 Le digitaliseur à ultrasons

Le digitaliseur à ultrasons GP8-3D (Science Accessory Corporation, Stratford, CT, USA) a été utilisé pour enregistrer les architectures de jeunes plantes en pot, âgées de 4 à 5 mois. Les ondes sonores étant sensibles aux turbulences atmosphériques et aux variations de température, l'appareil a été utilisé en laboratoire à température constante. Son principe de fonctionnement est basé sur la mesure du temps de parcours des ultrasons dans l'air, connaissant leur vitesse de propagation.

L'appareil est composé d'un stylet sur lequel sont fixés deux émetteurs, de 4 récepteurs (A, B, C et D sur la Figure 2.1) placés sur un cadre vertical et déterminant le **repère initial de digitalisation** [A, Xs, Ys, Zs) et d'un boîtier central électronique permettant de mesurer le temps de parcours du son entre les émetteurs du stylet et les quatre microphones. Le boîtier est relié à un ordinateur qui recueille les données émises continuellement par le digitaliseur. Dans ce boîtier, le temps est alors converti en distance en utilisant l'équation de propagation du son dans l'air libre. La vitesse v (m.s⁻¹) du son en fonction de la température T (en Kelvin) est donnée par :

$$v = 332.15 \left(\frac{T}{273.16} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Afin d'enregistrer l'architecture de la plante, l'utilisateur pointe le stylet sur les points la décrivant. Leurs coordonnées 3-D sont alors calculées par trigonométrie et enregistrées par ordinateur dans un fichier informatique d'extension « .D3D » grâce au logiciel « D3D.EXE » spécifiquement conçu pour contrôler le digitaliseur. La précision de la mesure est de l'ordre de 1 cm mais dépend également de l'opérateur manipulant le stylet.

Au cours de la mesure, la plante est positionnée dans le volume de mesure de 5.36 m³ délimité par le cadre carré de 1.75 m de côté supportant les récepteurs. Le **repère de référence** [O, X, Y, Z) dans lequel sont stockées les coordonnées des points est créé par translation et rotation du **repère initial de digitalisation** [A, Xs, Ys, Zs) lié au cadre des

récepteurs (Figure 2.1). Le repère de référence permet de relier la position de la plante au cours de la digitalisation à celle qu'elle avait lorsqu'elle était placée sous la pluie, opération importante pour la localisation des flux par le modèle DROP.

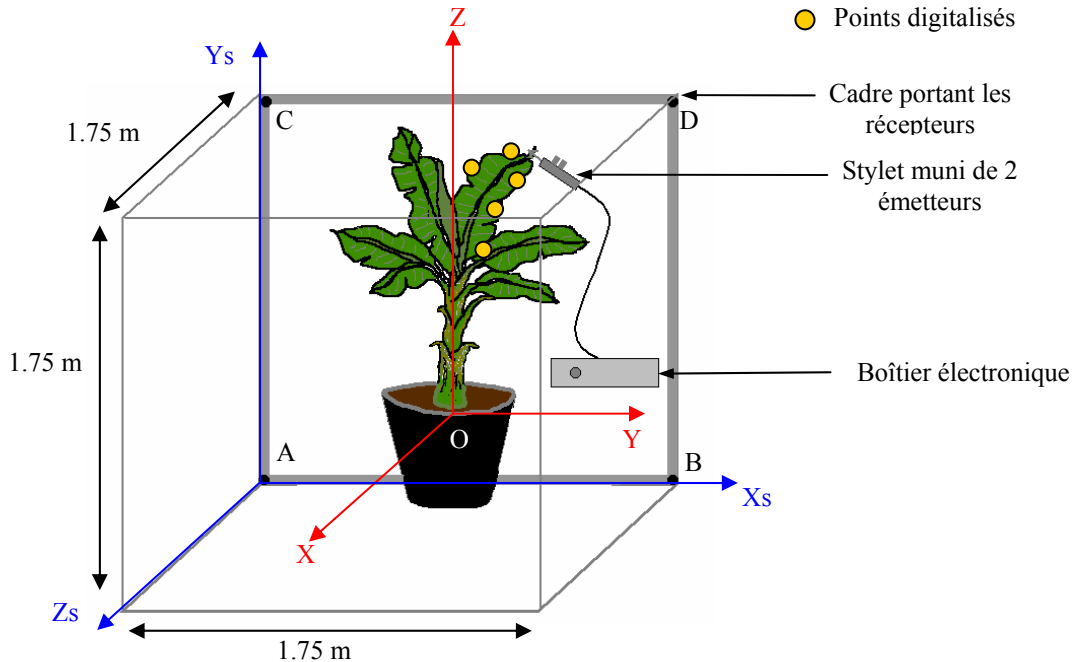


Figure 2.1 : Schéma représentant le digitaliseur à ultrasons et son volume de mesure. Le repère initial du digitaliseur est représenté par $[A, X_s, Y_s, Z_s]$ et celui de référence pour les expérimentations, par $[O, X, Y, Z]$.

2.1.1.2 Le digitaliseur électromagnétique

Pour des bananiers adultes, le digitaliseur à ultrasons ne pouvait être utilisé du fait de son volume de mesure limité. Le digitaliseur électromagnétique a donc été utilisé pour la mesure des architectures de gros bananiers en plein air et pour l'application du modèle à des plantes en interaction.

L'appareil 3SPACE FASTRAK (Polhemus), est composé d'une sphère comprenant 3 bobines émettrices de champs électromagnétiques, d'un récepteur en forme de stylet comprenant 3 bobines réceptrices de champs électromagnétiques et d'un boîtier électronique permettant de générer les champs magnétiques et calculer la position et l'orientation du récepteur dans l'espace. Le référentiel d'origine, dans lequel sont calculés les coordonnées et l'inclinaison du stylet, est lié à la sphère émettrice. Les coordonnées du stylet récepteur sont données en coordonnées cartésiennes et son inclinaison est donnée par les angles d'Euler ψ , θ et ϕ , qui sont respectivement l'azimut ou précession, l'élévation ou nutation et la rotation propre du stylet. L'inconvénient de cette technique est directement lié aux propriétés des champs électromagnétiques. En effet, ceux-ci étant déformés par la présence de matériaux tels que le fer ou l'acier, l'utilisation du digitaliseur ne peut se faire à l'intérieur d'un bâtiment. Il est donc préconisé pour des mesures en plein champ. Sa précision dépend de la distance d entre le stylet et la sphère. Elle est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-4} d$ et son volume de mesure, d'environ 261 m^3 .

Pour la digitalisation au champ, un repère orthonormé de référence est placé au milieu des bananiers. Il est formé d'un repère en bois de 17 cm de côté positionné horizontalement sur un trépied muni d'un niveau. La digitalisation électromagnétique se fait à l'aide du même logiciel « D3D.EXE » utilisé pour piloter et contrôler le digitaliseur à ultrasons. Chaque plante est alors digitalisée puis enregistrée dans un fichier d'extension « .D3D » renseignant sur les positions en X, Y et Z des axes du repère et les coordonnées 3-D des plantes. L'enregistrement des coordonnées des axes du repère pour chaque plante digitalisée permet de replacer l'ensemble des bananiers dans le repère de référence en utilisant la méthode de changement de repère par résolution de Cramer (cf. chap. 2.2.1). Le dispositif de mesure électromagnétique est présenté en Figure 2.2.

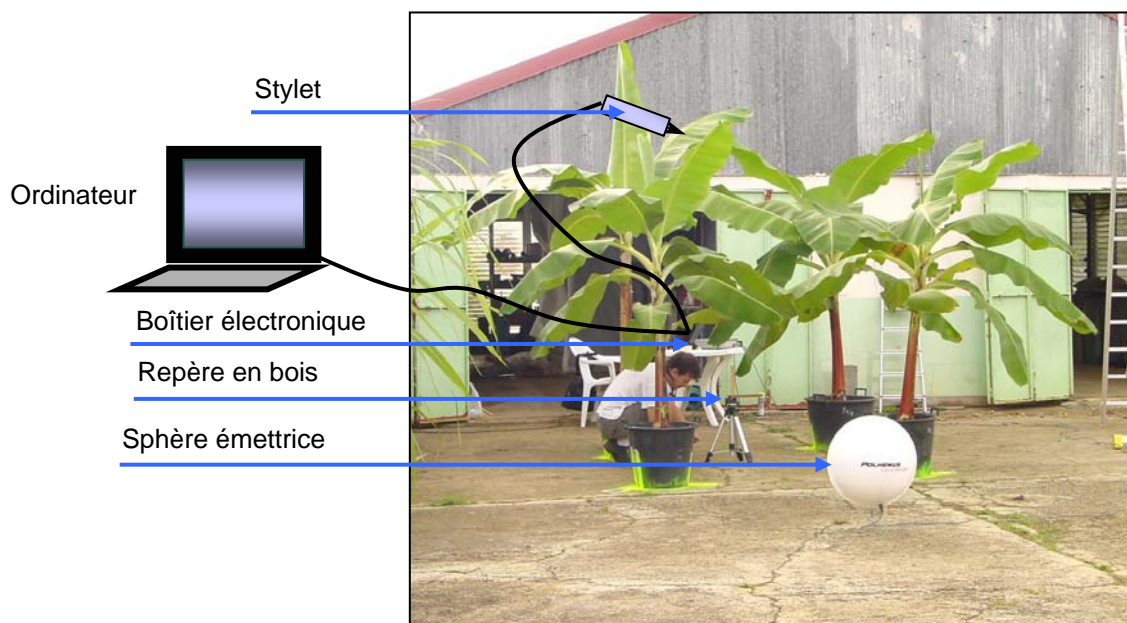


Figure 2.2 : Dispositif de digitalisation avec le digitaliseur électromagnétique.

2.1.1.3 Procédure de digitalisation

Les étapes de la digitalisation sont gérées à l'aide du logiciel « D3D.exe ». Ce logiciel permet de numériser la position des points représentant les plantes pour décrire en 3-D leurs structures et enregistrer la hiérarchisation de leurs organes (tiges, nœuds, bordures et nervures de feuilles). Son module de visualisation à l'écran de la position des points délimitant les organes numérisés permet le contrôle simultané des enregistrements des données. Cette visualisation en temps réel a pour but de détecter d'éventuelles erreurs de mesure dues à l'opérateur ou à la présence d'obstacles entre les émetteurs et les récepteurs (cas du digitaliseur ultrasonique) et de les corriger en retournant à une étape antérieure dans la procédure de digitalisation. Les principales étapes de la digitalisation à l'aide du digitaliseur ultrasonique sont les suivantes pour des plantes isolées :

- i) La création du fichier d'enregistrement des données d'extension « .D3D ».
- ii) La digitalisation du repère de référence en commençant par l'origine O du repère située au niveau du collet du bananier, puis 3 points A, B et C situés sur le bord du pot dans lequel est planté le bananier.
- iii) La digitalisation du point localisant le collet du bananier d'où partent les feuilles (point superposé au point O en ii).

iv) La digitalisation successive des feuilles numérotées en commençant par les points de la nervure, les points du bord gauche puis ceux du bord droit de la feuille.

Dans le cas où l'enregistrement de l'architecture de la plante s'est fait dans plusieurs positions, suite à des translations et/ou des rotations de la plante, les étapes i) à iv) sont reprises pour chaque position de la plante. L'étape ii) permet alors de définir le repère intermédiaire lié au déplacement de la plante, dans lequel est enregistrée une partie de ses données architecturales.

Dans le cas de la digitalisation électromagnétique, chaque bananier est enregistré dans un fichier de données. Les étapes de digitalisation sont pratiquement les mêmes que pour la digitalisation ultrasonique à l'exception de l'étape ii). En effet, l'enregistrement du repère de référence (repère en bois utilisé au cours de la digitalisation électromagnétique) se fait par la digitalisation de son origine O, puis de ses axes (Ox), (Oy) et (Oz). L'enregistrement de chaque architecture de bananier se fait en respectant les étapes i) à iv) également. La procédure de changement de repère est présentée en Annexe B.

2.1.1.4 La mesure des surfaces foliaires

Les surfaces foliaires L_A ont été d'abord mesurées expérimentalement à l'aide d'un planimètre, pour un échantillon de 19 feuilles de bananiers. A partir des résultats obtenus, nous avons pu établir une relation allométrique en fonction de la largeur l et de la longueur L de la feuille :

$$L_A = 0.78 \times L \times l \quad (R^2 = 0.98) \quad \text{Eq. 2.2}$$

Les surfaces interceptrices L_W , surfaces de feuille recevant de la pluie incidente ou des égouttages et qui ne sont pas masquées par d'autres feuilles ont été mesurées expérimentalement à l'aide de photos prises à la verticale, au-dessus des plantes. Ce protocole a été appliqué à 6 bananiers. En utilisant le logiciel « ImageJ[®] », les surfaces de feuilles recevant de la pluie directe ont pu être estimées par traitement d'image pour ces 6 bananiers dont les photos présentaient le moins de déformations optiques.

2.1.2 La simulation de pluie et la mesure des distributions de pluie au sol

2.1.2.1 La simulation de la pluie

La mesure de l'interception de la pluie par les bananiers a été effectuée expérimentalement en utilisant un simulateur de pluie (Deltalab, Voreppe, France, licence ORSTOM) mis au point par Asseline et Valentin (1978). Il est constitué d'une buse placée à 4.5 m au dessus du sol et fixée à un bras oscillant à vitesse constante dans un plan vertical (Figure 2.3a). Le bras est animé au moyen d'une unité de pilotage selon un angle de balayage correspondant à une intensité de pluie. L'angle de balayage du bras varie entre 0° et 135°, ce qui correspond à des intensités de pluie variant entre 15 et 150 mm.h⁻¹ pour une pression dans la buse de 1 bar. Toutefois, des pluies de plus forte intensité peuvent être générées pour des pressions plus élevées. La durée (en minutes) de la simulation de pluie est programmée par l'unité de pilotage en même temps que l'angle de débatement (Figure 2.3b).

Le dispositif de simulation de pluie a été utilisé pour simuler une pluie au-dessus d'un bananier en pot et permettre la mesure des masses d'eau redistribuées sous la plante en stemflow et en throughfall.

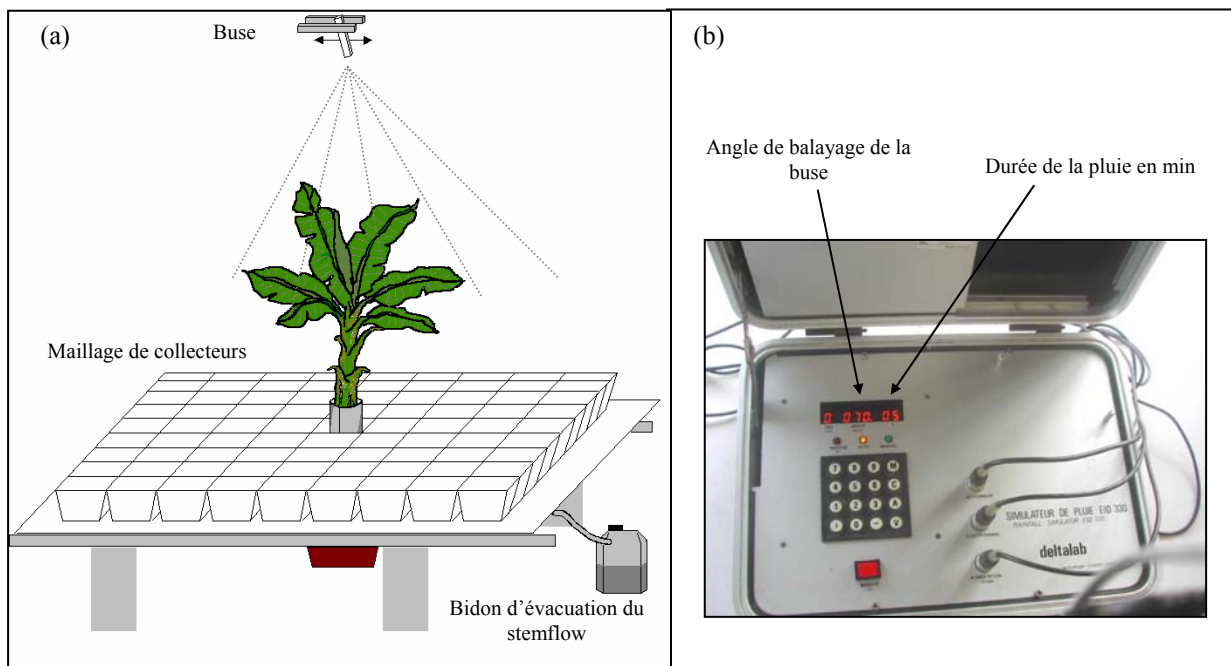


Figure 2.3 : (a) Dispositif de simulation de pluie. (b) Unité de pilotage du simulateur de pluie (Deltalab ORSTOM).

2.1.2.2 Mesure de la distribution de la pluie

La mesure des distributions de pluie au sol sous les plantes se fait à l'aide d'un maillage de pluviomètres. Ceux-ci sont des collecteurs d'eau carrés (13.6 cm de côté), profonds de 7 cm et placés sous la plante sur un plan horizontal, et un collecteur cylindrique de stemflow fixé de façon étanche autour du pseudo-tronc du bananier (Figure 2.4). Dans le cas d'une plante isolée, la plante est positionnée au centre du maillage dont la taille est ajustée en fonction du diamètre de sa couronne et en laissant à sa périphérie au moins une rangée de collecteurs recevant de la pluie incidente. Un repère de référence lié à la plante est utilisé pour localiser sa position et son orientation. C'est également le repère de référence utilisé pour la digitalisation.

L'évaluation des distributions se fait par pesée manuelle des collecteurs. Deux mesures des nappes de pluie distribuées au sol sont faites :

- Une première aspersion est effectuée sans plante afin d'évaluer la nappe de pluie incidente.
- Une seconde aspersion est effectuée en présence de la plante, afin d'évaluer la nappe de pluie transmise sous la plante.

La durée de la pluie simulée est choisie de manière à atteindre **le régime permanent** de transfert d'eau correspondant à l'état de mouillage pour lequel la capacité maximale de stockage du bananier est atteinte. Enfin, le dispositif peut être complété par une balance supportant la plante dans son pot, afin d'enregistrer ses variations de poids pendant et après l'événement pluvieux, et d'estimer le stockage et le taux d'évaporation de la plante. Cette pesée se fait de manière automatique en connectant la balance à une campbell CR10X enregistrant toutes les minutes le poids de la plante dans son pot. Pour nos expérimentations, cette pesée continue n'a pas été utilisée en raison de problèmes de mesure liés à la sensibilité

de la balance qui ne permettait pas un enregistrement correct des variations de poids des bananiers.

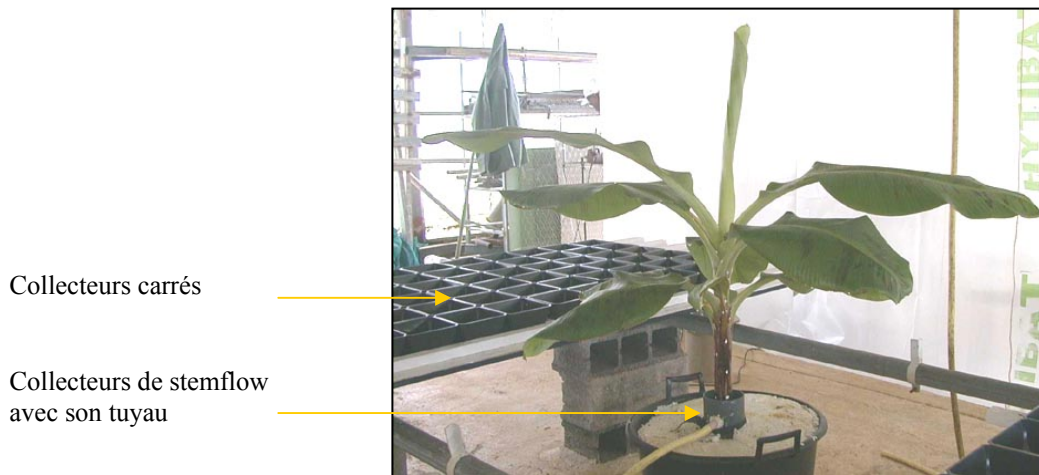


Figure 2.4 : Dispositif de pluviomètres utilisés pour mesurer le throughfall, la pluie primaire et le stemflow.

2.1.3 Etude de l'interception locale de la pluie

2.1.3.1 Caractéristiques de pluie incidente et des échantillons de feuille étudiés

Afin d'évaluer les paramètres influant sur l'interception, des expérimentations ont été menées sur différentes caractéristiques de pluie incidente (diamètres et énergies cinétiques variables) et différentes caractéristiques de feuille (inclinaison, âge et flexibilité variables). Des gouttes de 2.3, 3.5 et 6 mm de diamètre ont été lâchées de différentes hauteurs sur des échantillons carrés de feuille de bananier. Ces échantillons de 52 cm² ont été prélevés sur des feuilles, à deux stades de développement des bananiers : sur des bananiers de 4 à 5 mois et de 10 à 11 mois. Les échantillons ont été prélevés en deux endroits des limbes foliaires pour lesquels la flexibilité du limbe pourrait différer : au niveau du bord des limbes (feuille plus flexible) et près de la nervure (feuille plus rigide). Les lâchers de gouttes ont été faits pour sept inclinaisons de feuille : 0, 5, 10, 17, 27, 37 et 47°. Les gouttes incidentes ont été lâchées à des hauteurs de 0.6 et 7.4 m pour des diamètres de 2.3 mm, 1.1 m pour ceux de 3.5 mm, et 0.06, 0.08, 0.01, 0.014, 0.2, 0.6, 1.1, 1.6 et 7.4 m pour ceux de 6 mm. Les caractéristiques des lâchers de goutte sont récapitulées dans le Tableau 2.1 qui suit.

Diamètre mm	Hauteur m	Vitesse m.s ⁻¹	Ec μJ	Ec/Ec _{max} %
6	0.06	1.08	66.1	0.57
6	0.08	1.21	82.5	0.72
6	0.1	1.36	104.5	0.91
6	0.14	1.62	147.9	1.28
6	0.2	1.95	215.2	1.87
6	0.6	3.37	642.3	5.57
6	1.1	4.38	1082.6	9.39
6	1.6	5.36	1626.0	14.11
6	7.4	10.00	5654.6	49.06
<u>6</u>	<u>60.2</u>	<u>14.28</u>	<u>11525.1</u>	<u>100.00</u>
3.5	1.1	4.38	214.9	17.80
<u>3.5</u>	<u>47.8</u>	<u>10.37</u>	<u>1207.1</u>	<u>100.00</u>
2.3	0.6	3.33	33.6	16.43
2.3	7.4	7.62	175.3	85.71
<u>2.3</u>	<u>29.7</u>	<u>8.23</u>	<u>204.6</u>	<u>100.00</u>

Tableau 2.1 : Paramètres de lâcher de gouttes utilisés pour l'étude de l'interception de la pluie sur des échantillons de feuille de 52 cm². Ec est l'énergie cinétique et Ec/Ec_{max} est l'énergie cinétique relative par rapport à Ec_{max}, l'énergie cinétique maximale théorique. Les paramètres soulignés correspondent à des valeurs théoriques non testées expérimentalement.

2.1.3.2 Le dispositif de lâcher de gouttes

Le dispositif utilisé a été conçu spécifiquement pour l'étude de l'interception à l'échelle de la feuille. Il comprend un mini simulateur de pluie permettant de délivrer simultanément des gouttes de diamètre constant sur un échantillon de feuille de 52 cm² avec différentes inclinaisons. Ce dispositif est composé d'une pompe péristaltique et d'une plate-forme horizontale mobile verticalement sur laquelle sont fixés des embouts coniques ou des aiguilles de seringues d'où sont émises les gouttes d'eau. Des tubes Technicon de faible section sont connectés en entrée, à l'intérieur et en sortie de la pompe péristaltique. L'eau délivrée est puisée à l'aide des tubes d'entrée dans un récipient (Figure 2.5). L'intensité de la pluie délivrée est fonction de la section interne des tubes de la pompe. Pour la présente étude, ils ont été choisis avec une section de 0.51 mm, excepté pour des lâchers de gouttes de 2.3 mm à 7 m de haut (section de 0.76 mm permettant d'émettre les gouttes correctement en chute libre).

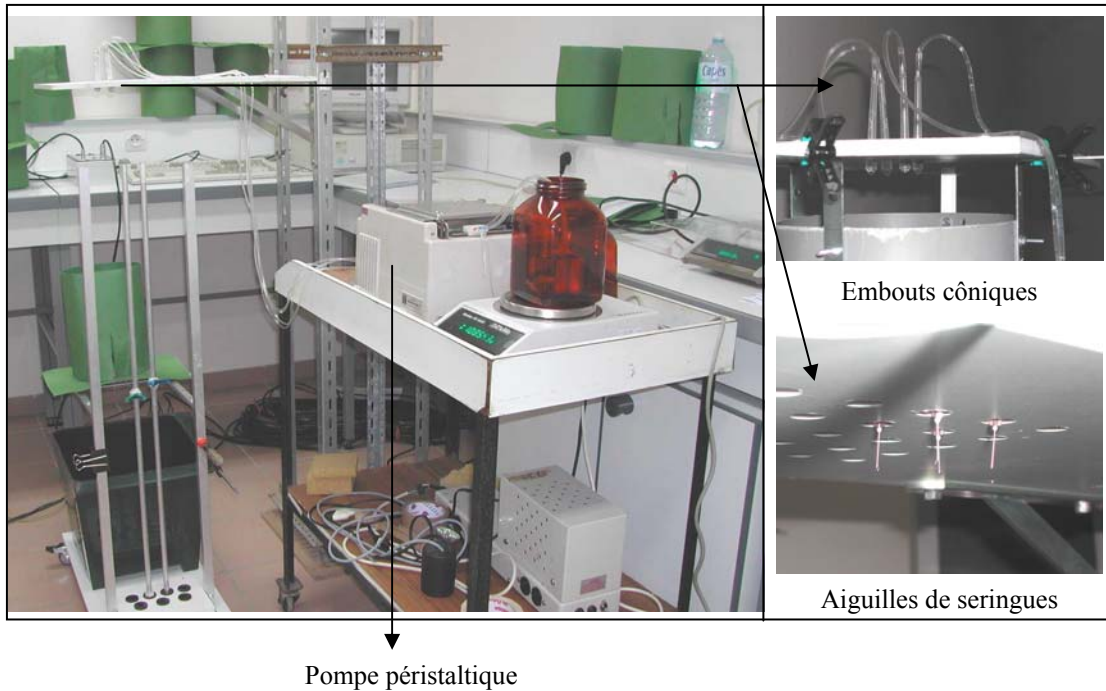


Figure 2.5 : Mini simulateur de pluie utilisant une pompe péristaltique. Les vues agrandies de droite montrent la plate-forme en PVC munie d'embouts côniques en plastique (photo du haut) ou d'aiguilles de seringues (photo du bas).

Les gouttes de diamètre de 3.5 et 6 mm ont été obtenues en fixant, à chaque sortie des tubes, des embouts côniques de pipette de section variable. Pour les plus petits diamètres, des aiguilles de seringues hypodermiques ont été utilisées (Figure 2.5). Le calibrage des diamètres de gouttes s'est fait à l'aide d'un disdromètre (Figure 2.6c) en testant plusieurs sections de cône et tailles de seringues pour émettre les gouttes. Sous la plate-forme horizontale délivrant la pluie, les gouttes sont interceptées par un échantillon de feuille placé sur deux tiges flexibles en aluminium fixées à un double statif également en aluminium (Figure 2.6a). L'inclinaison de l'échantillon est calculée par trigonométrie l'aide de la différence entre les hauteurs des deux tiges et la distance entre les deux barres du double statif les soutenant. En vue d'évaluer les masses d'eau éclaboussées à la surface d'un échantillon de feuille et les hauteurs maximales de splash atteintes, un buvard circulaire a été placé autour de l'échantillon de feuille et un autre buvard a été placé à l'horizontale sous le premier (Figure 2.6b). L'eau s'égouttant entre la feuille et le buvard horizontal est récupérée dans un bac placé au sol. Les masses d'eau incidentes éclaboussées (splash) et transmises sont mesurées par pesée respectivement du récipient d'alimentation en eau, des buvards (cylindrique et horizontal) et du bac (Figure 2.6a). A la fin de la pluie, l'eau stockée à la surface de la feuille est prélevée à l'aide d'un papier absorbant appliqué sur la feuille après aspersion. La masse d'eau stockée est alors évaluée par pesée du papier absorbant.

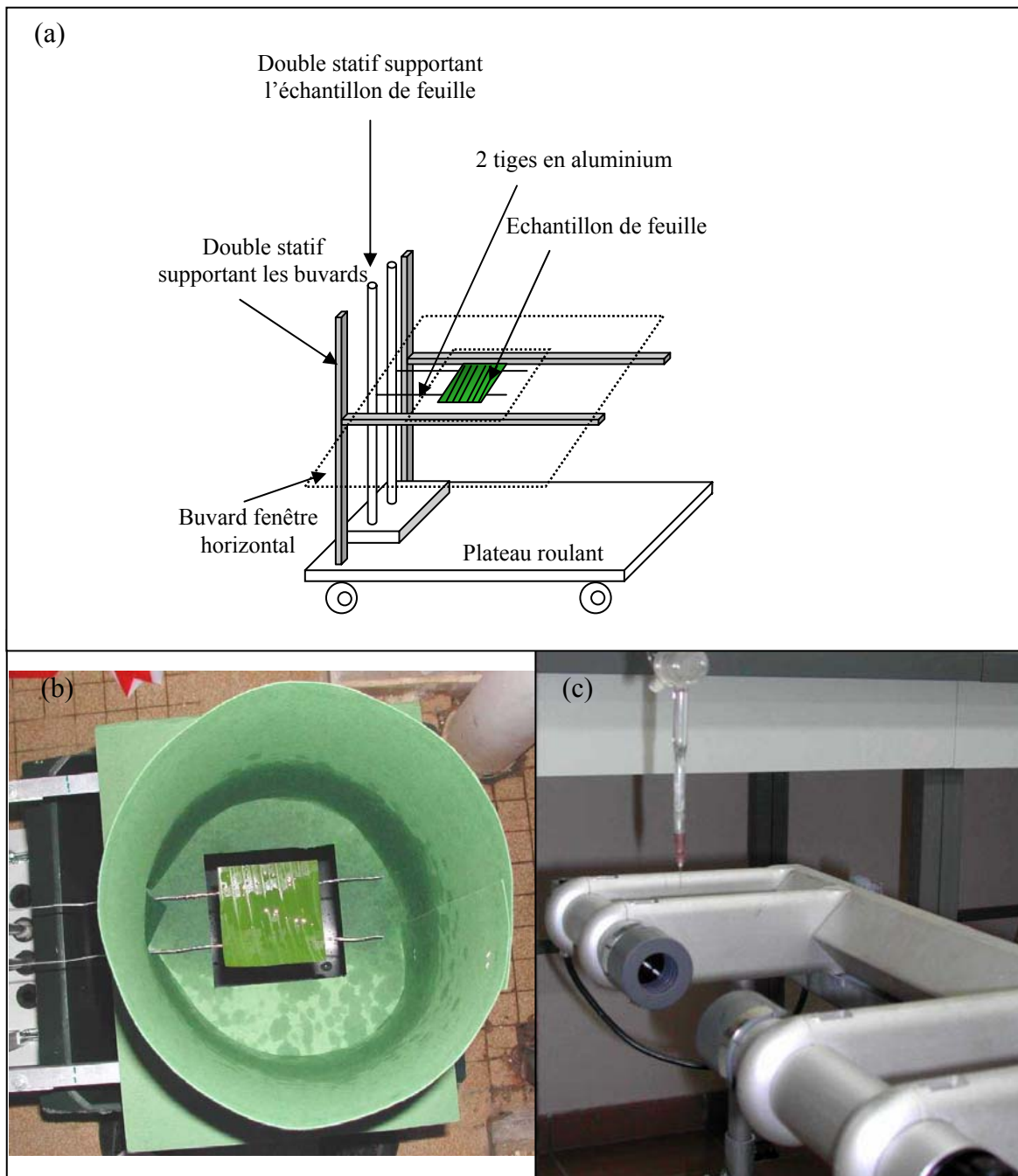


Figure 2.6 : (a) Dispositif de doubles statifs supportant l'échantillon de feuille et les buvards. (b) Buvards cylindrique et horizontal récupérant le splash. (c) Capteur du disdromètre utilisé pour calibrer le diamètre des gouttes.

Le dispositif a été utilisé en atmosphère close afin de limiter l'évaporation et les turbulences nuisibles à la pesée de faibles quantités d'eau. Pour des lâchers de 7 m de haut, un tube en PVC a été placé entre la plate-forme délivrant les gouttes et l'échantillon de feuille, afin de limiter les turbulences sur les gouttes en chute libre. Le tube est muni à sa base d'un filtre absorbant avec une fenêtre en son centre. Ce filtre permet de récupérer les gouttes tombant à l'aplomb hors de l'échantillon de feuille (Figure 2.7).

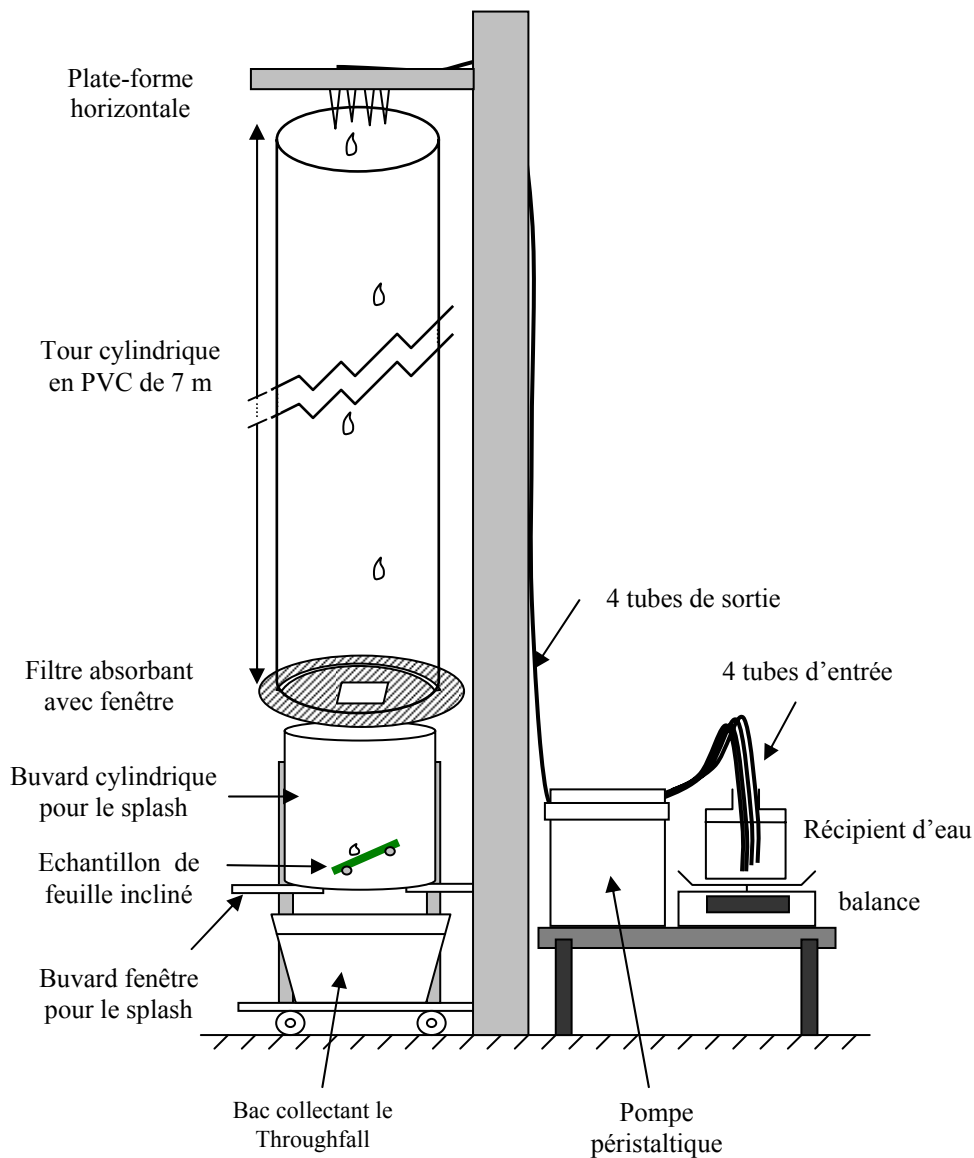


Figure 2.7 : Dispositif de lâcher de goutte quand le mini simulateur de pluie est placé au dessus d'un tube limitant les turbulences de l'air.

2.1.4 Expérimentations pour l'amélioration des dispositifs expérimentaux

Afin d'évaluer la fiabilité des dispositifs expérimentaux, certains tests ont été effectués sur les dispositifs de simulation de pluie et de digitalisation. La mesure des distributions d'eau de pluie sous les bananiers nécessitant d'effectuer deux simulations de pluie de caractéristiques identiques mesurés par un maillage de collecteurs d'eau, il apparaissait essentiel de s'assurer de la bonne répétabilité des nappes produites par le simulateur de pluie. Pour la digitalisation, la précision de l'appareil devait être évaluée pour connaître son impact sur la simulation des distributions de pluie. De plus, la question de l'allègement de la mesure se posait car la durée de la digitalisation pouvait largement dépasser 1h 30 min par bananier.

2.1.4.1 Amélioration du dispositif de simulation de pluie

Le caractère reproductible des nappes d'eau délivrées par le simulateur de pluie implique :

- La meilleure homogénéité possible de la répartition des volumes d'eau pour une caractéristique précise de pluie (durée de la pluie, angle de débattement de la buse, pression de l'eau constants).
- Un maillage parfaitement identique entre deux répétitions de nappe.
- Des pertes minimales d'eau par splash dans les collecteurs.

Afin de s'assurer de ces conditions expérimentales, des séries de test visant à évaluer les contraintes liées au maillage, la répétabilité des mesures de distribution de pluie et le contrôle du splash dans les collecteurs ont été menées.

Les contraintes liées au maillage de collecteurs :

Les précédentes expérimentations de simulation de pluie se faisaient en déposant les collecteurs carrés côte à côte sur un plate-forme, simplement à vue d'œil (Figure 2.8a). Un mauvais positionnement d'un collecteur pouvait alors engendrer un déplacement des autres collecteurs et par conséquent, une déformation du maillage. En conséquence, la plate-forme sur laquelle sont disposés les collecteurs a été munie de lattes fixées à égale distance sur sa largeur pour caler les collecteurs. La distance entre les lattes a été ajustée à la taille des collecteurs (Figure 2.8b). Deux séries de lattes positionnées perpendiculairement aux autres ont été placées au centre du maillage afin de délimiter la position du pseudo-tronc.

La répétabilité et l'homogénéité de la pluie sous le simulateur :

La répétabilité et l'homogénéité des nappes de caractéristiques identiques ont été établies en procédant à plusieurs répétitions de pluie. La largeur de la nappe de pluie délivrée par le simulateur étant fonction de l'angle de balayage de la buse, nous avons choisi un angle de 70° permettant de mouiller toute la surface d'un bananier isolé de taille moyenne. Pour cet angle de balayage, l'intensité moyenne délivrée par la buse est de l'ordre de 115 mm.h⁻¹. Des séries de répétitions de nappe de pluie sur une petite surface autour du centre du maillage, puis sur une plus large surface ont été faites :

- a) 7 répétitions d'une pluie de durée de 2 min, un angle de 70° et une pression de 1.2 bars sur un maillage carré composé de 5×5 collecteurs, correspondant à une surface au sol de l'ordre de 0.5 m² et une intensité de la pluie de 115 mm.h⁻¹.
- b) 4 répétitions d'une pluie de durée de 5 min, un angle de 70° et une pression de 1.2 bars sur un maillage carré composé de 9×9 collecteurs, correspondant à une surface de l'ordre de 1.5 m² et une intensité de la pluie de 114.8 mm.h⁻¹.

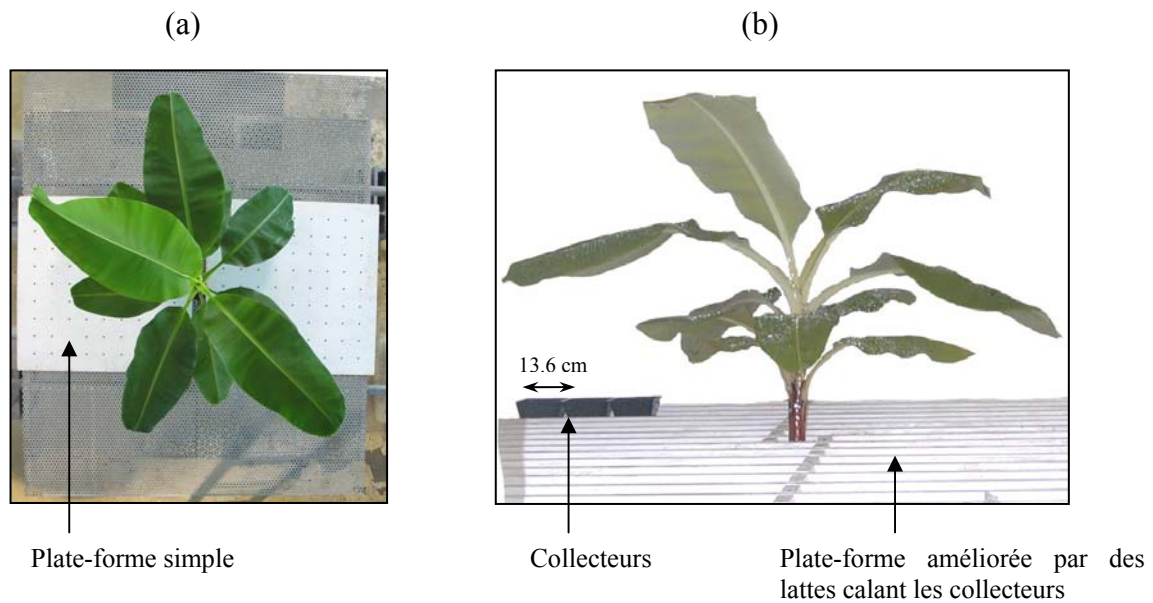


Figure 2.8 : Plates-formes supportant le maillage de collecteurs sous simulateur de pluie. (a) dispositif initial ; (b) dispositif amélioré pour un bon positionnement des collecteurs.

Afin d'estimer l'homogénéité de la pluie délivrée par le simulateur, le coefficient d'uniformité (CU) de la pluie, défini par Christiansen (1942) a été calculé pour chaque répétition de pluie, à l'aide de la formule suivante :

$$CU = 100 \frac{D'}{M} \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$\text{Avec : } M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{et} \quad D' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - M|$$

Où CU est le coefficient d'uniformité exprimé en %, n est le nombre des mesures (X_i) effectuées sur la nappe, M est la moyenne des mesures effectuées sur l'ensemble de la nappe testée et D' est la moyenne des valeurs absolues des écarts par rapport à M .

Evaluation du splash dans les collecteurs :

La qualité de la mesure par collecteur peut être affectée par les éclaboussures de gouttes entre les collecteurs. En effet, la masse d'eau mesurée dans un collecteur isolé est sous-estimée car des gouttelettes de splash sont projetées hors du collecteur au moment de l'impact. Cependant, en présence de collecteurs côte à côte, les phénomènes de splash interagissent entre les collecteurs, faussant ainsi la mesure de façon aléatoire. Afin de limiter ces éclaboussures, un collecteur d'eau carré de 13.6 cm de côté muni de « brise-gouttes » en éponge ou filet, a été placé à une position fixe sous le simulateur de pluie. La simulation de pluie a été fixée à 2 min avec un angle de débattement de 90° correspondant à une intensité de 81.3 mm.h^{-1} . Les « brise-gouttes » utilisés sont répertoriés comme suit :

Brise gouttes	Code
Aucun	E0
mousse sèche, 49 mm d'épaisseur	MS49
mousse humide, 49 mm d'épaisseur	MH49
éponge humide, 63 mm d'épaisseur	EH63
éponge humide, 32 mm d'épaisseur	EH32
éponge humide, 18 mm d'épaisseur	EH18
éponge humide, 5 mm d'épaisseur	EH05
éponge métallique	EM
éponge ondulée	EOND
filet vert fin	FVF
moustiquaire	MOST

Tableau 2.2 : Nomenclature de brise-gouttes utilisés pour limiter le splash dans les collecteurs de throughfall.

Pour chaque « brise-gouttes » testé, 4 à 16 répétitions de pluie ont été faites, leur nombre croissant avec la variabilité des masses d'eau recueillies. Les masses d'eau moyennes par collecteur muni de « brise-gouttes » ont été comparées à celles mesurées dans un collecteur simple, en absence de « brise-gouttes ».

2.1.4.2 Amélioration du dispositif de digitalisation

Une bonne modélisation des distributions d'eau sur les plantes nécessite une représentation fiable des bassins versants formés sur les feuilles. Ceci impose à la fois une bonne précision de l'appareil de digitalisation et un choix de points digitalisés décrivant correctement les maxima et minima des ondulations de bord de feuille. Afin d'obtenir une meilleure représentation des architectures, l'opérateur du digitaliseur tend à augmenter le nombre de points digitalisés, ce qui augmente la durée de la digitalisation et le nombre de triangles traités dans le modèle. Aussi, nous avons cherché à évaluer les impacts de la précision de l'appareil et du nombre de points digitalisés sur la modélisation.

Impact de la précision du digitaliseur :

Les digitalisations ayant été principalement faites à l'aide du digitaliseur ultrasonique, l'impact de sa précision (de l'ordre de 1 cm) a été évalué sur la simulation des surfaces foliaires totales (L_A) et sur trois paramètres importants pour la modélisation des flux d'eau : le nombre de points d'égouttages (DP) par feuille, la surface moyenne des bassins versants (WA) et leur inclinaison moyenne (WI). Pour cela, un bruit aléatoire de ± 1 cm a été introduit dans les coordonnées d'un bananier utilisées en entrée du modèle. Au total, 25 jeux de données ont été ainsi créés pour permettre différentes simulations (cf. Annexe Article 1).

Impact du nombre de points digitalisés :

Les données architecturales complètes de trois bananiers, B1, B2 et B3, ont été dégradées progressivement en effaçant un certain nombre de points sur les tracés de nervure et de bords de feuille enregistrés. Quand cela était possible, étaient effacés :

- 1 point sur 8, soit 16 % de dégradation
- 1 point sur 6, soit 22% de dégradation
- 1 point sur 4, soit 44 % de dégradation
- 1 point sur 2, soit 56 % de dégradation
- 3 points sur 4, soit 74% de dégradation

Les impacts de ces dégradations ont été évalués sur la modélisation des surfaces foliaires totales (L_A) de chaque bananier, le nombre de points d'égouttages par feuille (DP), la surface

des bassins versants (*WA*) et leur inclinaison (*WI*). Enfin, les feuilles des bananiers ont été ordonnées pour cette étude en 2 classes de surfaces (C1 et C2) et 3 classes d'inclinaison correspondant à 30°, 40° et 60° (cf. Annexe Article 1).

2.2 Présentation du modèle DROP

2.2.1 Description du modèle

Le modèle DROP « *Distribution of Rainfall On Plants* », est un modèle mécaniste qui simule la distribution de la pluie sur les plantes en traitant des données architecturales des plantes et en simulant les phénomènes physiques d'interception de la pluie et de redistribution des écoulements, dans le couvert jusqu'au sol. En entrée, il utilise les données géométriques de plantes, sous forme de coordonnées 3-D. En sortie, il fournit une cartographie des distributions de la pluie sous les plantes, sur un maillage donné. La répartition de la pluie est donnée par une matrice de hauteurs d'eau dans les collecteurs formant le maillage. Pour évaluer les capacités du modèle, ce maillage de sortie est choisi par l'opérateur de manière à ce qu'il corresponde au maillage utilisé au cours de la mesure.

Écrit en langage C++, DROP est composé d'un programme informatique pilotant un ensemble de sous-programmes (ou exécutables) réunis en modules. Le modèle se décompose globalement en deux modules, DROP-TRI et DROP-INT, ayant des fonctions bien distinctes. Le premier permet de décrire en 3-D les architectures à partir de données mesurées en situation réelle, alors que le second simule les interceptions et les écoulements sur les surfaces jusqu'au sol.

Initialement, DROP était composé de 3 sous-programmes d'extension « .cpp », « D3D2DIG », « matra » et « Fabm5 », et d'un programme principal « simulation » faisant appel aux 3 premiers. DROP a été développé au cours de cette thèse en lui ajoutant un quatrième sous-programme « D3Dbilan » et en modifiant simultanément les trois autres (cf. chap.2.3). Selon les données architecturales déjà enregistrées, le programme principal fait appel à tous ou certains sous-programmes. Ainsi, le module DROP-TRI est principalement constitué du sous-programme « matra5 » mais peut englober également « D3Dbilan » et « D3D2DIG », alors que « Fabm5 » constitue essentiellement le module DROP-INT.

Les écoulements d'eau de pluie s'effectuent des plus hautes vers les plus basses zones du couvert et dépendent des propriétés des surfaces interceptrices (tensions de surface, inclinaisons, aires, flexibilité, texture) et de celles de la pluie incidente. Aussi, a-t-il fallu développer des algorithmes permettant de représenter la topologie des surfaces.

Le module DROP-TRI permet de créer les triangles représentant les plantes. Pour cela, il utilise en entrée les données géométriques tridimensionnelles des plantes enregistrées par **digitalisation** et fournit en sortie les informations géométriques et topologiques sur les surfaces créées. Les fichiers d'entrée sont alors utilisés pour représenter les feuilles en séries de triangles jointifs. Cette opération est communément appelée **la triangulation**. Les informations sur les surfaces sont répertoriées dans des fichiers de sortie du module sous forme de matrice dont les lignes comportent les paramètres suivants :

- Dans le fichier d'extension « .PLG », les paramètres de chaque triangle sont : le numéro de feuille sur laquelle il se trouve, le numéro de chacun de ses sommets, le numéro de son sommet le plus bas, le numéro de **l'exutoire** (sommet le plus bas d'un ensemble de triangles formant un **bassin versant** d'où s'égoutte l'eau) au quel il est rattaché, son propre numéro du triangle, son aire et les coordonnées 3-D de sa normale.

- Dans le fichier d'extension « .NDS », les paramètres de chaque sommet sont : ses coordonnées 3-D, le numéro de feuille sur laquelle il se trouve, sa localisation (sur un bord, la nervure ou une extrémité), les numéros des triangles auxquels il est rattaché et le numéro du triangle ayant la plus forte pente parmi ces triangles.

Deux fichiers renseignant sur les triangles et leurs sommets sont également créés pour une utilisation simplifiée des données :

- Un fichier d'extension « .TRI » stockant le numéro du triangle, le numéro de la feuille à laquelle il appartient, les coordonnées 3-D et la localisation (sur le bord gauche, le bord droit ou la nervure) de ses trois sommets, le rang de ces sommets sur leurs tracés respectifs.
- Un fichier d'extension « .SMT » renseignant sur les coordonnées 3-D du sommet, le numéro de feuille sur laquelle il se situe, sa localisation (sur un bord, la nervure ou une extrémité) et les numéros de tous les triangles auxquels il est rattaché.

Le module DROP-TRI fournit d'autres fichiers renseignant sur les traitements effectués sur les données architecturales :

- Un fichier d'extension « .DIG » fournissant pour chaque point digitalisé un code d'information (mis à la valeur 1), le numéro de la plante, le numéro de la feuille sur laquelle se trouve le point, la localisation du point (sur le bord gauche, le bord droit ou la nervure), un code de visualisation (mis à la valeur 0) et les coordonnées 3-D de ce point.
- Un fichier d'extension « .FEU » fournissant pour chaque feuille le numéro de feuille, le nombre maximal de points sur le bord gauche puis sur le bord droit de cette feuille.

DROP-INT, lui, simule les interceptions sur les surfaces et les distributions d'eau en utilisant les sorties du module DROP-TRI. Afin de modéliser les interceptions par les surfaces, puis les écoulements, une **discrétisation de l'espace** en surfaces élémentaires (ou **pixels**) est faite. Cette discrétisation consiste à projeter chaque triangle de feuille sur une grille horizontale de pixels et à affecter aux pixels un codage correspondant à la hauteur de pluie reçue par les surfaces élémentaires de triangle (Figure 2.9). Elle permet de convertir des données analytiques en données numériques. Le passage de l'un à l'autre se fait selon la procédure développée en Annexe A.

La grille de pixels est appelée encore **maillage de discrétisation**. La simulation des écoulements se fait triangle par triangle, du plus haut vers le plus bas, en modifiant la grille de pixels selon des quantités d'eau reçues à la surface de chacun des triangles. Les connexions entre les triangles établies dans le module DROP-TRI permettent de transmettre les quantités d'eau d'un triangle à un autre sur une même feuille. Dans le cas où l'eau interceptée est dirigée vers un **exutoire** de feuille, c'est-à-dire un sommet bas commun à plusieurs triangles, elle s'égoutte et est transférée soit à un triangle de feuille en dessous, soit directement au sol. Une fois tous les triangles traités, le module fournit une carte des répartitions des écoulements au sol sous forme de matrice à i lignes et j colonnes (M_{ij}) où chaque valeurs représente la hauteur d'eau de pluie reçue au sol par un pixel (i,j). Cette matrice correspond au maillage de discrétisation composé de i pixels sur sa longueur et j pixels sur sa largeur. Afin de fournir une carte comparable à la mesure, elle est alors adaptée en cumulant les pixels pour former le maillage de collecteurs utilisé pour la mesure des volumes d'eau réellement transmis au sol. Ainsi, une matrice finale M_{kl} est fournie en sortie du modèle, simulant un maillage au sol (plan (O, x, y) sur lequel sont placés les collecteurs d'eau) de k collecteurs en x et l collecteurs en y (Figure 2.10). La projection verticale des triangles sur la grille de discrétisation fournit également des renseignements sur les recouvrements entre feuilles. Pour cela, un autre codage, correspondant nombre de recouvrement foliaire (niveau d'ombrage) appliqué à chaque pixel de la grille, est utilisé. Aussi, une deuxième matrice (M'_{ij}), correspondant au nombre de recouvrement foliaire des

pixels, est créée dans le module DROP-INT. Elle est également adaptée au maillage de collecteur en cumulant les valeurs des pixels ombragés dans chaque collecteur pour créer la matrice M'_{kl} des ombres au sol. Ainsi, DROP-INT fournit en sortie deux fichiers texte (extension « .txt ») :

- « debit.txt » correspondant à la matrice des hauteurs d'eau par collecteur dans le maillage de sortie.
- « ombre.txt » correspondant à la matrice des degrés d'ombrage par collecteur dans le maillage de sortie.

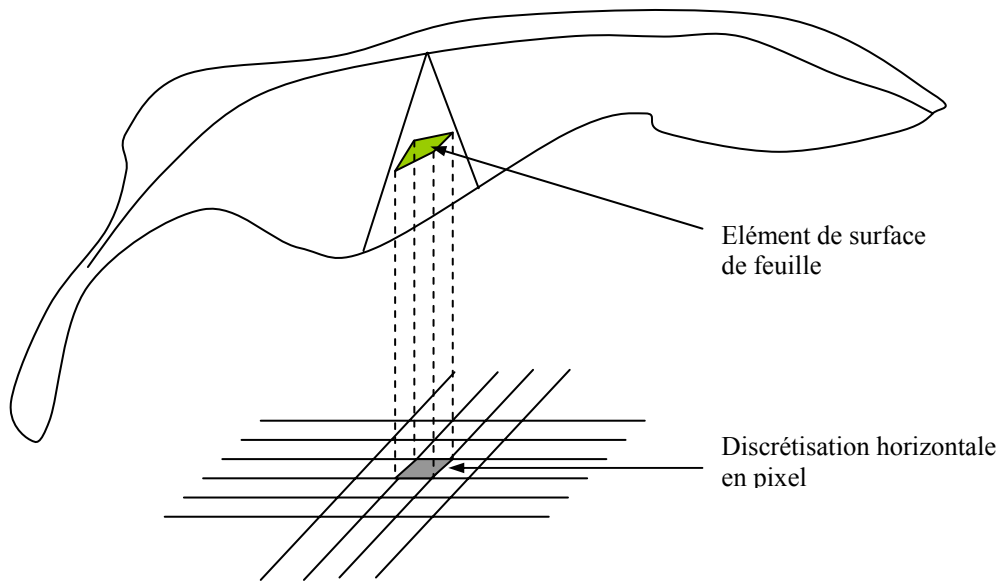


Figure 2.9 : Projection d'une surface élémentaire de feuille sur les pixels de la grille de discrétisation

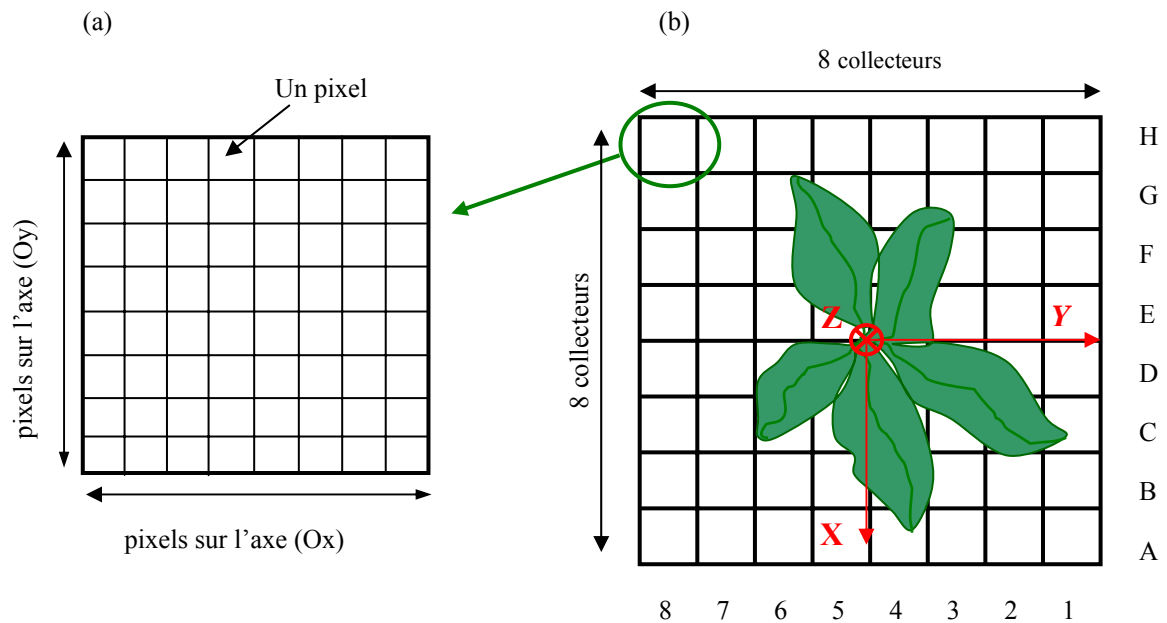


Figure 2.10 : Maillage de discrétisation utilisé pour la simulation des écoulements et du maillage de collecteurs. (a) Un collecteur de throughfall (de $13.6\text{ cm} \times 13.6\text{ cm}$) décrit par un maillage de discrétisation en pixels. (b) Maillage de collecteurs pour la mesure des distributions au sol et maillage de simulation donné par la matrice M_{kl} , avec $k=l=8$.

2.2.2 Principe de fonctionnement du modèle

2.2.2.1 Triangulation pour la représentation des feuilles

Les coordonnées 3-D d'une feuille digitalisée sont fournies sous forme de trois séries de points, la première correspondant au bord gauche de la feuille, la seconde au bord droit et la troisième à la nervure (Figure 2.11). La triangulation se fait en projetant orthogonalement les points des séries de bord de feuille sur la nervure et en les connectant à leurs projetés. Elle utilise pour cela les propriétés du calcul vectoriel.

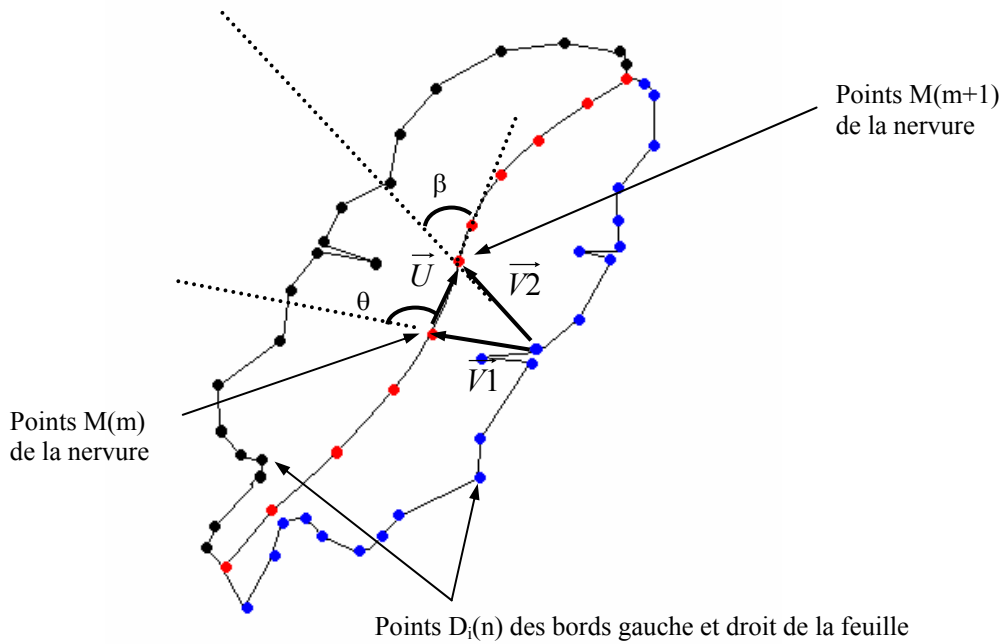


Figure 2.11 : Représentation des 3 séries de points enregistrés par digitalisation et des vecteurs utilisés pour le calcul des projections.

Les points $D_i(n)$ sur les séries des bords gauche et droit de feuille sont notés $D_1(n)$ (avec $0 \leq n \leq n_g$), et $D_2(n)$ (avec $0 \leq n \leq n_d$) respectivement. Les points de la nervure sont notés $M(m)$ (avec $0 \leq m \leq m_{\max}$). La première étape de la triangulation consiste à projeter perpendiculairement les points $D_i(n)$ de bord de feuille sur les segments connectant les points $M(m)$ de la nervure. Trois vecteurs, (\vec{U} , $\vec{V1}$ et $\vec{V2}$) sont alors créés pour déterminer la position des points $D_i(n)$ par rapport aux points $M(m)$ et créer les triangles de feuille. Le vecteur \vec{U} relie les points $M(m)$ et $M(m+1)$ sur la nervure, alors que $\vec{V1}$ et $\vec{V2}$ relient les points $D_i(k)$ à $M(m)$ et $M(m+1)$ respectivement (Figure 2.11). Les vecteurs \vec{U} et $\vec{V1}$ définissent un angle θ et les vecteurs \vec{U} et $\vec{V2}$, un angle β , calculés à partir des produits scalaires $\vec{U} \cdot \vec{V1}$ et $\vec{U} \cdot \vec{V2}$, respectivement. Chaque point $D_i(k)$ est alors projeté perpendiculairement en $P_i(n)$ sur le segment $[M(m) M(m+1)]$ si et seulement si :

$$\cos \theta < 0 \text{ et } \cos \beta > 0$$

Dans le cas contraire les points $D_i(n)$ sont projetés de la manière suivante :

- Si $\cos \theta = 0$, la projection se fait en $M(m)$.
- Si $\cos \theta > 0$, la projection se fait en $P_i(n-1)$.
- Si $\cos \beta = 0$, la projection se fait en $M(m+1)$.
- Si $\cos \beta < 0$, on teste alors la projection sur le segment suivant compris entre $M(m+1)$ et $M(m+2)$.

En appliquant ces tests à chaque série de points de bord de feuille, deux séries de points sont créées sur la nervure. Les points de digitalisation de la nervure sont alors remplacés par les deux séries de points $P_1(n)$ et $P_2(n)$ créées pour les côtés gauche et droit de la feuille. Pour chaque limbe, les triangles sont créés à partir de deux séries correspondant au bord de feuille et à la nervure recréée (figure 2.12). Les triangles représentant les limbes gauche et droit peuvent par endroit être espacés ou se superposer lorsque la série de points initialement digitalisés sur la nervure décrit des zig-zags en raison d'erreur de mesure au cours de la digitalisation. A l'issue de la triangulation, les données simplifiées des triangles, fournies par les fichiers d'extension «.TRI» et «.SMT», peuvent être utilisées pour visualiser l'ensemble de la plante modélisée. Cette visualisation se fait à l'aide de logiciels conçus pour la visualisation 3-D tels que POV-Ray® (Persistence of Vision, 2004) et permet d'évaluer la fiabilité de la triangulation.

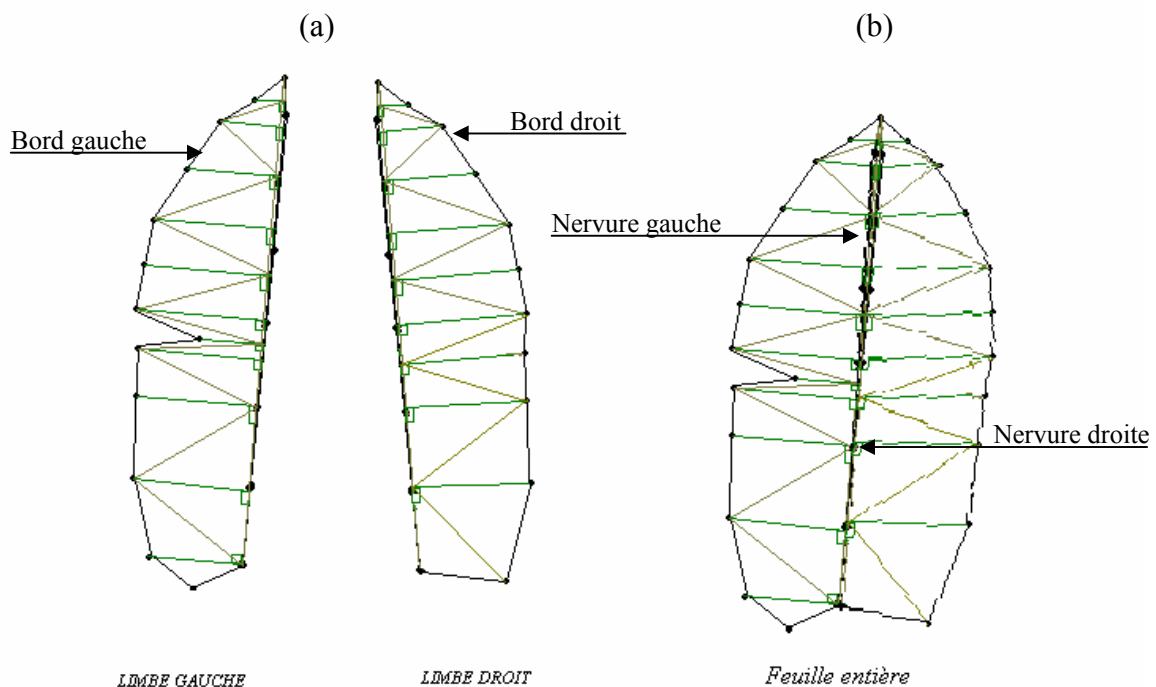


Figure 2.12 : Schéma représentant la triangulation par projection orthogonale des points de bord sur la nervure. (a) Pour chaque limbe. (b) Pour la feuille entière.

2.2.2.2 La discrétisation de l'espace pour la modélisation des écoulements

La modélisation des écoulements se fait du plus haut triangle vers le bas selon les lois d'écoulement répondant aux trois hypothèses suivantes :

- La pluie incidente est homogène et verticale.
- L'eau s'écoule toujours des éléments les plus haut vers les plus bas.
- Un élément $A(x, y, z)$ ayant reçu de l'eau ne peut la transmettre à un autre élément $B(x, y, z')$ situé verticalement en dessous de lui ($z' < z$), sauf s'il est un exutoire d'une feuille.

La discrétisation permet de combiner des informations concernant les hauteurs d'eau reçues par les petites surfaces élémentaires des triangles, leur degré d'ombrage dans le feuillage et la position en (x, y) de leur projection au sol. La taille de la grille de discrétisation est choisie de manière à être comparable au maillage de collecteurs utilisé pour la mesure et sa surface correspond à la surface au sol de la scène à modéliser. La discrétisation permet également de simuler les écoulements verticaux (égouttages) d'un exutoire d'une feuille vers une autre feuille ou le sol.

La première étape de la modélisation des écoulements consiste à classer tous les triangles de feuille du plus haut au plus bas en leur attribuant un numéro d'ordre décroissant. En deuxième étape, le plan horizontal est discrétisé en une grille horizontale. Sa résolution est définie par l'utilisateur du modèle. Cependant, la taille optimale du côté d'un pixel pour la simulation doit être comprise entre de 2 et 6 mm, tailles correspondant aux diamètres des gouttes de pluie incidente et d'égouttages sous les bananiers (cf. 1.1.3). En troisième étape, on définit chaque pixel (i,j) par la hauteur d'eau qu'il reçoit et son degré d'ombrage en utilisant deux matrices de coefficients « **debit(i,j)** » et « **ombre(i,j)** ». La pluie incidente étant supposée homogène, les hauteurs d'eau reçues par les pixels sont les mêmes initialement. Aussi, au dessus de la plante, les pixels (i,j) de la grille prennent tous la valeur 1 (soit $debit(i,j)=1$) pour représenter la pluie incidente (Figure 2.13). Pour représenter les ombrages, ils prennent tous la valeur 0 au dessus de la plante : $ombre(i,j)=0$. En quatrième étape, les matrices associées à la grille sont progressivement mises à jour en fonction de la présence d'élément foliaire et de leurs caractéristiques (points bas d'un triangle, exutoire de feuille et position par rapport au pseudo-tronc). Cette mise à jour se fait en plusieurs étapes dont le nombre est fonction du nombre de triangles à traiter. Ainsi, pour un ensemble de n triangles, l'étape $n-3$ de la mise à jour correspond à la simulation des écoulements des triangles numérotés de n à $n-3$ (Figure 2.13). La dégradation se fait à la fois pour la matrice des coefficients $ombre(i,j)$ et pour celle des coefficients $debit(i,j)$.

La mise à jour de la matrice des coefficients ombre(i,j) :

Elle est fonction uniquement de la présence de feuille. Les triangles sont un à un projetés sur la grille de discrétisation. Dès qu'un élément foliaire est projeté sur un pixel de la grille, le coefficient ombre(i,j) associé au pixel est alors incrémenté de la valeur 1. En résumé, les coefficients ombre(i,j) peuvent être classés en trois catégories :

- $ombre(i,j)=0$ quand il n'y a aucune feuille au dessus du pixel(i,j) : on est en présence de sol nu.
- $ombre(i,j)=1$ quand on est en présence d'une seule surface de feuille se projetant sur le pixel (i,j).
- $ombre(i,j)>1$ quand il y a plusieurs surfaces de feuille se projetant sur le pixel (i,j) : les feuilles se masquent entre elles.

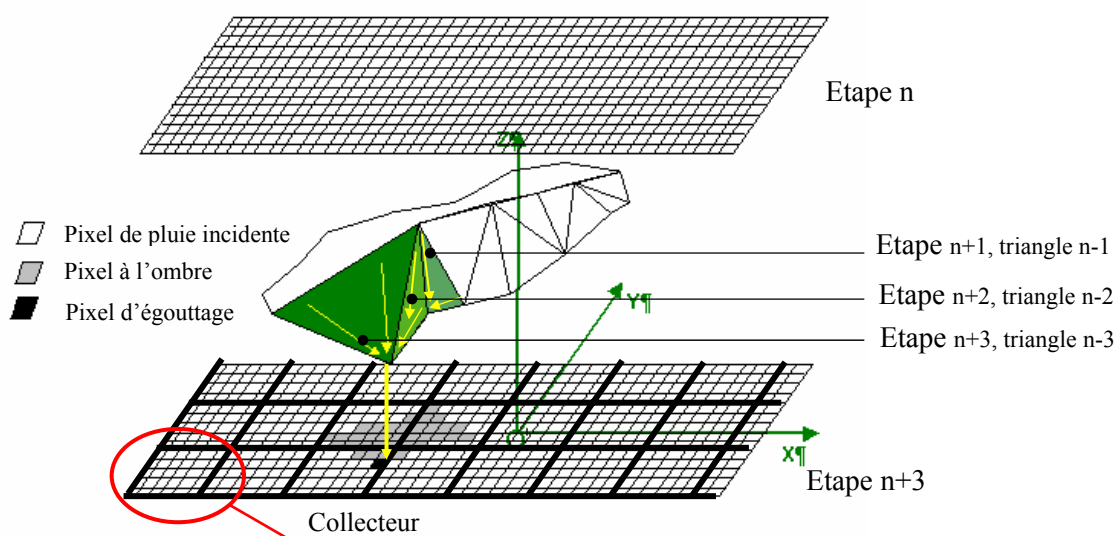


Figure 2.13 : Schéma représentant les 3 étapes successives de mise à jour de la grille de discrétisation pour la simulation des écoulements sur les triangles.

La mise à jour de la matrice des coefficients $debit(i,j)$:

Elle est à la fois fonction de la présence de feuille et des caractéristiques des surfaces élémentaires de feuille. L'eau de pluie reçue par un triangle s'écoule vers son point bas. Chaque triangle possède un point bas qui se projette sur un pixel de la grille de discrétisation. Une surface élémentaire d'un triangle qui intercepte de la pluie la transmet au plus bas sommet du triangle et ainsi de suite. Initialement, tous les pixels sont caractérisés par un coefficient $debit(i,j)=1$ correspondant à l'état initial de la grille de discrétisation. Lorsqu'un élément d'un triangle intercepte de la pluie et la transmet à un point bas, son coefficient $debit(i,j)$ prend la valeur 0 (il n'y a plus d'eau dessus) et celui du pixel associé au point bas est augmenté de la valeur du pixel interceptant. Ainsi, les coefficients $debit(i,j)$ peuvent être classés en trois catégories :

- $debit(i,j)=1$ quand le pixel associé à un élément de surface de feuille ou de sol reçoit de la pluie incidente.
- $debit(i,j)>1$ quand le pixel associé à un élément de surface de feuille reçoit un volume d'eau supérieur à celui de la pluie incidente : c'est un point bas de triangle ou un exutoire.
- $debit(i,j)=0$ quand le pixel associé à un élément de surface de feuille a intercepté de la pluie et l'a transmise à un autre élément de surface.

La modélisation se traduit par le combinaison des deux matrices de coefficients $ombre(i,j)$ et $debit(i,j)$:

- $debit(i,j)=1$ et $ombre(i,j)=0$ caractérisent une surface élémentaire de sol qui reçoit de la pluie incidente.
- $debit(i,j)=1$ et $ombre(i,j)=1$ caractérisent une surface élémentaire de feuille qui reçoit de la pluie incidente.

- $debit(i,j)=0$ et $ombre(i,j)=1$ caractérisent une surface élémentaire de triangle de feuille qui a intercepté de la pluie incidente et l'a transmise au sommet bas du triangle.
- $debit(i,j)>1$ et $ombre(i,j)=1$ caractérisent une surface élémentaire de triangle de feuille comprenant un point d'égouttages et qui n'est masquée par aucune feuille.
- $debit(i,j)>1$ et $ombre(i,j)\geq 1$ caractérisent soit une surface élémentaire de triangle de feuille comprenant un point d'égouttages et qui est masquée par une ou plusieurs autres feuilles, soit un stemflow.

Ainsi, les interceptions et les écoulements sont simulés pour des pixels ombragés ($ombre(i,j)\geq 1$). Une fois tous les triangles traités, la grille obtenue nous renseigne sur les écoulements localisés et sur les ombrages à l'échelle du pixel. Les mesures se faisant à l'échelle des collecteurs d'eau utilisés pour mesurer les masses d'eau recueillies sous les bananiers, les valeurs des pixels sont alors cumulées pour les deux matrices de coefficients $debit(n,k)$ et $ombre(n,k)$ sur un maillage plus large correspondant au maillage de collecteurs (Figure 2.13).

2.2.3 Comparaison des cartographies de distribution de pluie mesurées et simulées

Les répartitions d'eau de pluie données par la cartographie de sortie du modèle sont comparées à la mesure, en les exprimant sous forme de rapports. Deux cartographies sont utilisées : l'une correspond à la répartition de la pluie incidente, et l'autre, à la répartition de pluie modifiée par la présence de la plante. Le rapport de la seconde par la première permet d'établir une cartographie des **coefficients de transmission** (K_t) de la pluie par collecteur. Cette cartographie renseigne directement sur les localisations des zones sous les plantes où les flux d'eau transmis au sol sont plus importants que ceux de la pluie incidente. Elles sont définies de la manière suivante :

- Si pour un collecteur $K_t=1$, toute l'eau de pluie incidente a été transmise au sol.
- Si pour un collecteur $K_t>1$, la pluie transmise au sol dans ce collecteur est supérieure à celle reçue.
- Si pour un collecteur $0<K_t<1$, la pluie transmise au sol dans ce collecteur est inférieure à celle reçue. Quand $K_t=0$, la pluie est entièrement interceptée.

2.3 Améliorations apportées au modèle DROP

2.3.1 Récapitulatif des améliorations portées

Le modèle DROP à la base simulait l'interception de la pluie pour une seule plante sans prendre en compte les pertes en eau dues au stockage et au splash. En conséquence, l'interception était « conservative » : le rapport entre les hauteurs d'eau transmises au sol et celles incidentes au dessus des plantes étant égal à 1. L'amélioration principale du modèle consistait donc à modéliser les phénomènes d'interception afin de mieux simuler les écoulements dans le feuillage et les hauteurs d'eau transmises au sol. L'objectif du projet de thèse étant d'évaluer pour une bananeraie les zones à risques (zones où le lessivage des pesticides serait important), le modèle devait donc simuler des écoulements pour un ensemble de plantes en interaction. De plus, les premières applications de DROP au bananier ont montré certaines difficultés liées à la représentation de l'architecture et à l'enregistrement des données géométriques des plantes. En conséquence, d'autres améliorations du modèle ont dû être envisagées.

La triangulation développée sur maïs supposait que les feuilles étaient entières et se terminaient en pointe. Cette hypothèse ne pouvait s'appliquer au bananier qui présente des formes complexes de feuille avec des limbes souvent déchirés (les laminations) et des bouts de limbes en général arrondis. La triangulation initiale représentait les feuilles de bananier parfois biaisées. Il était donc nécessaire de développer une triangulation prenant en compte les formes complexes des feuilles. Un autre défaut de représentation des feuilles était lié à la méthode de digitalisation. En effet, la triangulation créant deux séries de points pour simuler la nervure (cf. 2.2.2), ces deux tracés pouvaient être espacés par endroit quand le tracé de points digitalisés sur la nervure était représenté en zig-zags. Par conséquent, la représentation des nervures a été améliorée en introduisant dans le module DROP-TRI une procédure de lissage des nervures.

D'autres améliorations ont été apportées afin de faciliter l'évaluation du modèle et les techniques de modélisation. Deux algorithmes permettant de calculer les surfaces des feuilles et de calculer les énergies cinétiques des gouttes sous le feuillage et leur distance au tronc ont été introduits. Enfin, pour résoudre le problème de masquage des feuilles lors de l'enregistrement de l'architecture, un sous-programme « D3Dbilan.cpp » a été ajouté au modèle. Il permet de reconstituer une plante quand elle a été enregistrée en plusieurs positions, dans le volume de mesure du digitaliseur.

2.3.2 Modélisation des phénomènes locaux d'interception

L'introduction des phénomènes d'interception a nécessité la mise au point d'expérimentations spécifiques sur le stockage, le splash et l'évaporation de l'eau de pluie sur de petites surfaces de feuille de bananier, phénomènes non étudiés jusque là. Ces expérimentations ont permis d'établir des lois d'interception en se basant sur des études préliminaires qui ont montré que :

- Les diamètres des gouttes de pluie incidente au Domaine de Duclos (site des expérimentations) présentaient un D_{50} de l'ordre de 2 mm pour des intensités moyennes de 5 mm.h^{-1} et généraient sous bananier des diamètres d'égouttages de l'ordre de 6 mm. Ces égouttages généraient localement des intensités moyennes de $30 \text{ mm.h}^{-1} \text{ mm}$ (Choisnard, 2000).
- Le simulateur de pluie utilisé pour les expérimentations produisait des gouttes de diamètre médian de 2 mm pour des intensités comprises entre 50 et 150 mm.h^{-1} . Pour ces diamètres incidents, trois catégories d'égouttages pouvaient être observées sous bananier : des égouttages sur le bord, les déchirures et les bouts de feuille. Les diamètres médians mesurés pour ces catégories étaient respectivement de 6.9, 5.5 et 6 mm (Sansoulet, 2002).

Aussi, deux D_{50} de pluie ont été choisis pour représenter la pluie incidente et les égouttages : la pluie incident (ou **pluie primaire**) a été caractérisée par des diamètres de 2 mm et les égouttages (ou **pluie secondaire**) ont été caractérisés par des diamètres de 6 mm. L'interception a été modélisée à saturation du couvert en calculant, pour chaque triangle de feuille le bilan en eau à l'aide de P_t (mm) la pluie transmise en égouttage, sa capacité de stockage C (mm), un coefficient de perte par splash K_{spl} et de la pluie P_{in} (mm) reçue par le triangle comme suit :

$$P_t = P_{in} (1 - K_{spl}) - C \quad \text{Eq. 2.4}$$

La capacité de stockage est calculée pour l'ensemble du triangle traité alors que les pertes par splash et la pluie incidente sont calculées pour chaque surface élémentaire le composant. Ainsi, le terme $P_{in} (1 - K_{spl})$ représente l'eau transmise en absence de stockage en tenant compte des pertes par éclaboussure. Si le triangle traité est composé de n surfaces élémentaires, alors $P_{in} - (P_{in} \times K_{spl})$ s'exprime par :

$$P_{in} (1 - K_{spl}) = \sum_n [p_{in}(i,j)(1 - k_{spl}(i,j))] \quad \text{Eq. 2.5}$$

Où $p_{in}(i,j)$ est la pluie reçue par une surface élémentaire et $k_{spl}(i,j)$ est le coefficient de perte par splash de cette surface. Le modèle calcule donc le bilan hydrique d'abord à l'échelle du pixel (sans prise en compte du stockage) puis à l'échelle du triangle (en prenant en compte le stockage).

La modélisation des interceptions et des écoulements se fait en distinguant le type de pluie en présence (pluie primaire ou pluie secondaire). Pour cela, trois paramètres caractérisant chaque pixel (i,j) sont utilisés : « intercept(i,j) » pour quantifier le nombre de fois que le pixel est alimenté par un autre pixel, « ombre(i,j) » pour quantifier le degré d'ombrage du pixel et « waterH(i,j) » pour calculer la hauteur de pluie reçue par le pixel. Lorsque le pixel (i,j) est associé à un point d'égouttages, $waterH(i,j)$ est calculé en fonction du coefficient de splash K_{spl} et de la capacité de stockage C du triangle sur lequel se trouve ce point d'égouttages. K_{spl} et C sont estimés en fonction du diamètre D des gouttes incidentes sur le triangle, de l'inclinaison θ de celui-ci et de la hauteur h de chute des gouttes. Les combinaisons entre « intercept(i,j) » et « ombre(i,j) » permettent de définir la pluie reçue par l'élément de feuille se projetant sur le pixel (i,j) :

- Si $intercept(i,j)=1$ et $ombre(i,j)=1$ alors, l'élément de feuille reçoit de la pluie incidente.
- Si $intercept(i,j)>1$ et $ombre(i,j)>=1$ alors, l'élément de feuille reçoit de la pluie secondaire, soit des égouttages.

Tout comme la précédente version du modèle, les interceptions et écoulements ne sont simulés qu'en présence d'élément foliaire, soit pour les pixels (i,j) ombragés ($ombre(i,j)>1$). Lorsque les écoulements et interceptions sont traités pour tous les triangles de feuille, les valeurs des pixels sont alors cumulées pour créer deux matrices de coefficients $waterH(n,k)$ et $ombre(n,k)$ sur un maillage plus large correspondant au maillage de collecteurs. Ces matrices correspondent aux deux cartographies fournies en sortie du module DROP-INT.

2.3.3 Reconstitution d'une plante enregistrée dans plusieurs repères 3-D

Les premières applications du modèle sur les plantes de maïs se faisaient sans difficulté en utilisant le digitaliseur à ultrasons. En effet, la disposition très espacée des feuilles sur la tige principale permettait de placer la plante au cours de la digitalisation de façon à ce que les feuilles ne se masquent pas entre elles. De cette manière, l'enregistrement des données était facilité. Cependant, l'application de cette technique au bananier a présenté certaines contraintes car les grandes feuilles rapprochées se masquaient entre elles et imposaient de déplacer certaines feuilles qui empêchaient la propagation des ondes sonores. Aussi, plusieurs répétitions de la mesure devaient être faites jusqu'à ce quelle soit considérée comme fiable. Le déplacement de la plante dans le volume de mesure s'est avéré être une solution à cette contrainte.

Afin de positionner en face des récepteurs du digitaliseur les parties des bananiers difficilement mesurables dans le repère de référence, des rotations et translations des plantes

ont dû être réalisées. Pour chaque position de la plante, un repère intermédiaire constitué de 4 points, était choisi à la base de chaque bananier (Figure 2.14). Connaissant la position de ces 4 points dans le repère de référence, chaque partie de la plante ainsi enregistrée pouvait être replacée dans le repère de référence grâce à un algorithme spécifique résolvant un système d'équations par *la méthode de Cramer* (Chambadal, 1986).

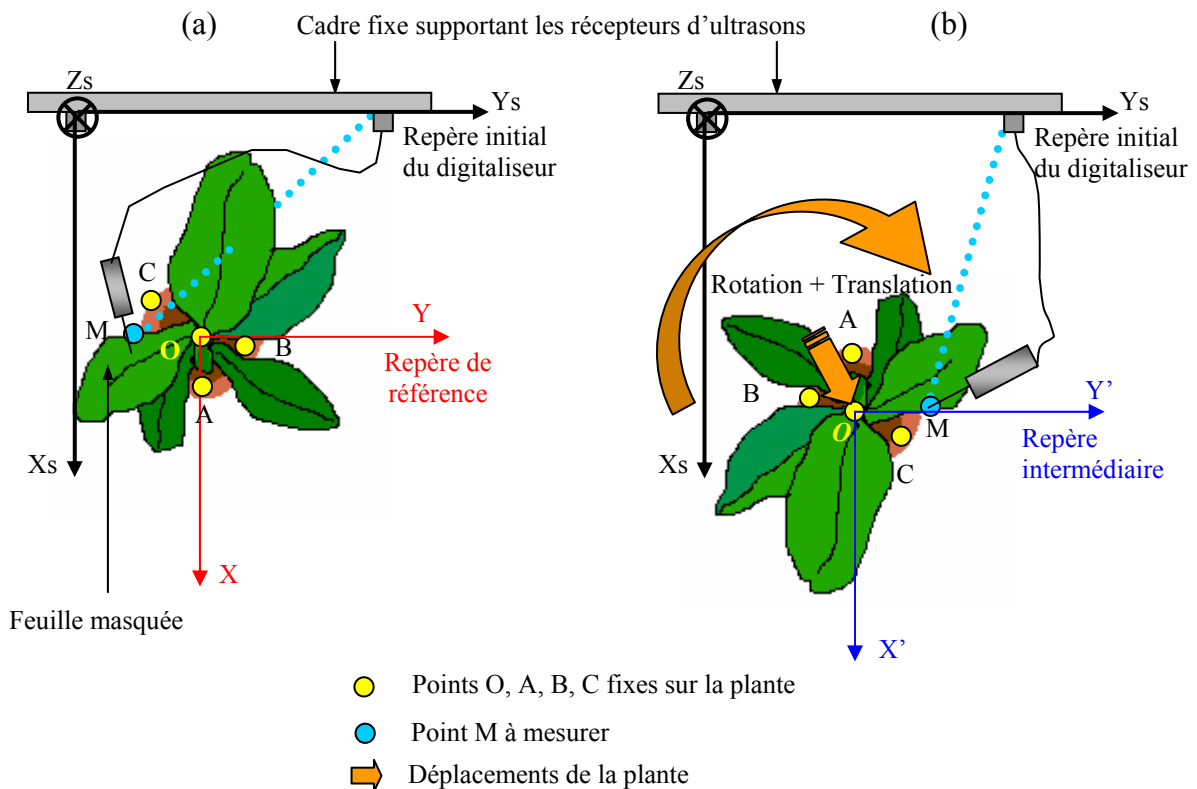


Figure 2.14 : Schéma représentant une vue de dessus du système de digitalisation. (a) Plante dans le repère de référence. (b) Plante dans le repère intermédiaire, après rotation et translation.

Le changement de repère est modélisé selon l'algorithme présenté en Annexe B et est développé dans « D3Dbilan.cpp ». Par la suite, un fichier d'extension « .D3D » regroupant les coordonnées de tous les points décrivant la plante dans le repère de référence est créé.

2.3.4 Amélioration de la représentation de l'architecture

2.3.4.1 Amélioration de la représentation des nervures

Au cours de la digitalisation, des erreurs pouvaient être commises en raison de la précision du digitaliseur et de l'habileté de son opérateur. Suite à ces erreurs, les nervures pouvaient être représentées en « zig-zags ». La triangulation conduit à la création de deux limbes foliaires (gauche et droit) délimités par une série de points de bord de feuille et une autre série de points de nervure. La représentation de la nervure en deux séries de points peut conduire à la formation par endroit de larges espaces entre les limbes foliaires (Figure 2.15). Afin de réduire ce défaut, deux opérations de **lissage des nervures** sont effectuées dans le

module DROP-TRI. La première programmée dans le sous-programme « D3D2test.cpp » est faite systématiquement et la seconde s'effectue de façon itérative dans le sous-programme « matra.cpp » et a pour but d'améliorer si nécessaire la première à la demande de l'utilisateur. Le lissage consiste à modifier les points entre les deux extrémités de la nervure. Ces points $m[i][k]$ représentant la nervure sont remplacés par le milieu des segments qui l'encadrent (Figure 2.16) :

$$m[i][k] = \frac{1}{2} (m[i+1][k] + m[i][k]) \quad \text{Eq. 2.6}$$

Où i est le numéro d'ordre des points sur la nervure, k prenant les valeurs 0, 1 et 2 pour représenter les coordonnées en x , y et z respectivement.

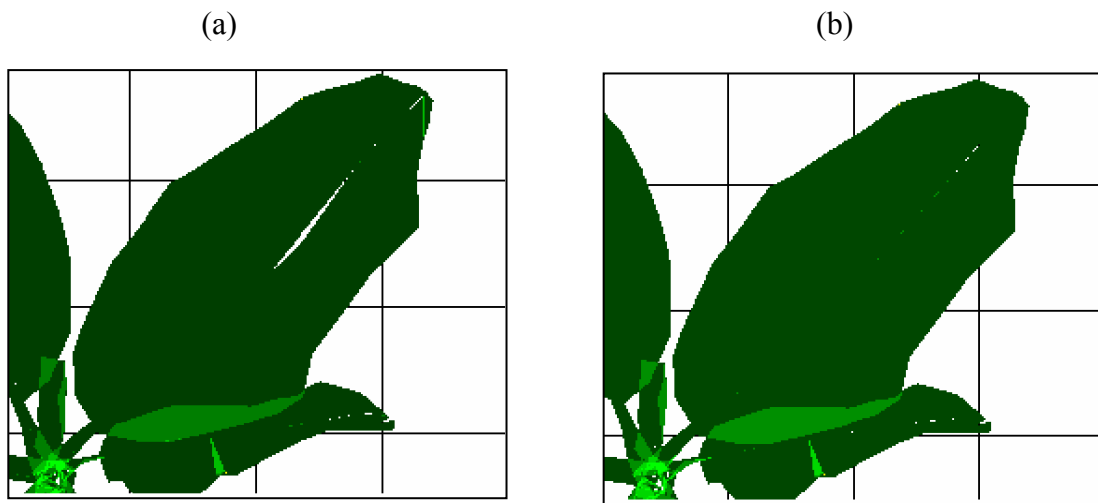


Figure 2.15 : Représentation d'une feuille sous POV-Ray® après triangulation. (a) Sans lissage de la nervure. (b) Avec lissage de la nervure.

La procédure de lissage introduite dans « D3D2test.cpp » n'est appliquée qu'à partir du 3^{ème} point de la nervure. Elle est présentée en Annexe C sous forme d'organigramme de programmation. Afin de contrôler la bonne opération de lissage, les nouvelles coordonnées des points de nervure recréés sont stockées dans un fichier d'extension « .LIS ».

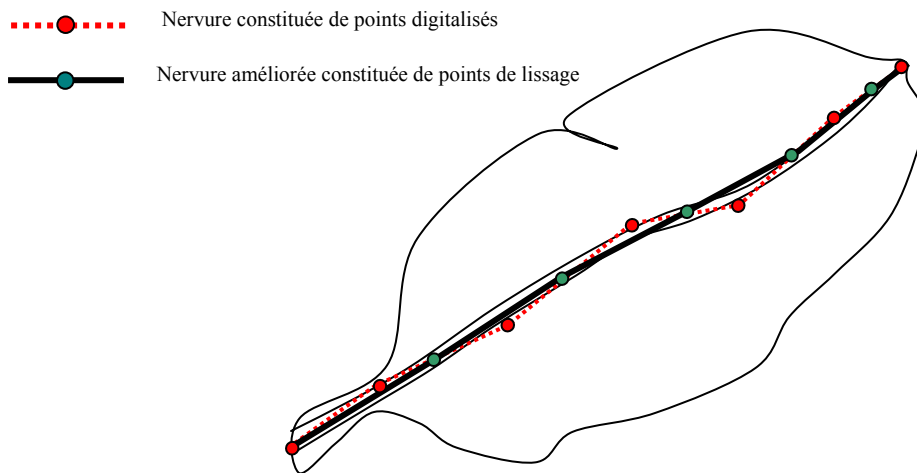


Figure 2.16 : Correction des points de la nervure après lissage.

2.3.4.2 Triangulation adaptée aux formes complexes de feuille

L'application du modèle DROP initialement développé sur maïs (Bussière et al., 2002), a montré que la triangulation ne fournissait pas une bonne représentation des feuilles de bananier. Trois types d'erreurs apparaissaient en début de gaine ou de limbes, au niveau des déchirures de limbes et des extrémités de feuille (Figure 2.17).

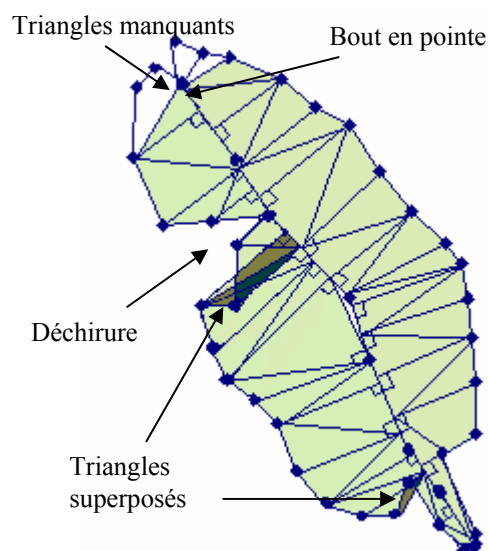


Figure 2.17 : Type d'erreurs de modélisation obtenues avec la triangulation initialement développée sur maïs : au niveau des débuts de limbe, des déchirures et des extrémités de feuille.

Cas des débuts de gaine :

Les premiers points de bord de feuille représentant la gaine étaient souvent positionnés plus bas que ceux de début de nervure masquée par la gaine des précédentes feuilles. Ils ne pouvaient donc être projetés orthogonalement sur la nervure conformément à la procédure décrite en section 2.2.2.1. Un test sur la position des points du bord de feuille par rapport au premier segment de la nervure a été implanté dans le module DROP-TRI. Ainsi, tous les points $D_i(n)$ de bord de feuille qui ne trouvent aucun segment en face d'eux, sont désormais projetés sur le premier point de la nervure, soit $M(0)$.

Cas des extrémités de feuille :

En bout de feuille, les nervures de bananier sont généralement plus courtes que les limbes. En conséquence, les points de bord de feuille ne pouvaient être projetés en face sur un segment de nervure. Afin de mieux représenter ces bouts, les points de bord de feuille compris entre $D_i(n)$ et $D_i(n_{\max})$, le dernier point sur le bord de feuille, sont projetés sur $M(m_{\max})$, le dernier point de la nervure, lorsqu'ils sont dans la configuration suivante : $\cos \theta < 0$ et $\cos \beta < 0$.

Où θ est l'angle compris entre les vecteurs \vec{U} et \vec{V}_1 , l'angle β étant compris entre \vec{U} et \vec{V}_2 , comme présenté en Figure 2.18a.

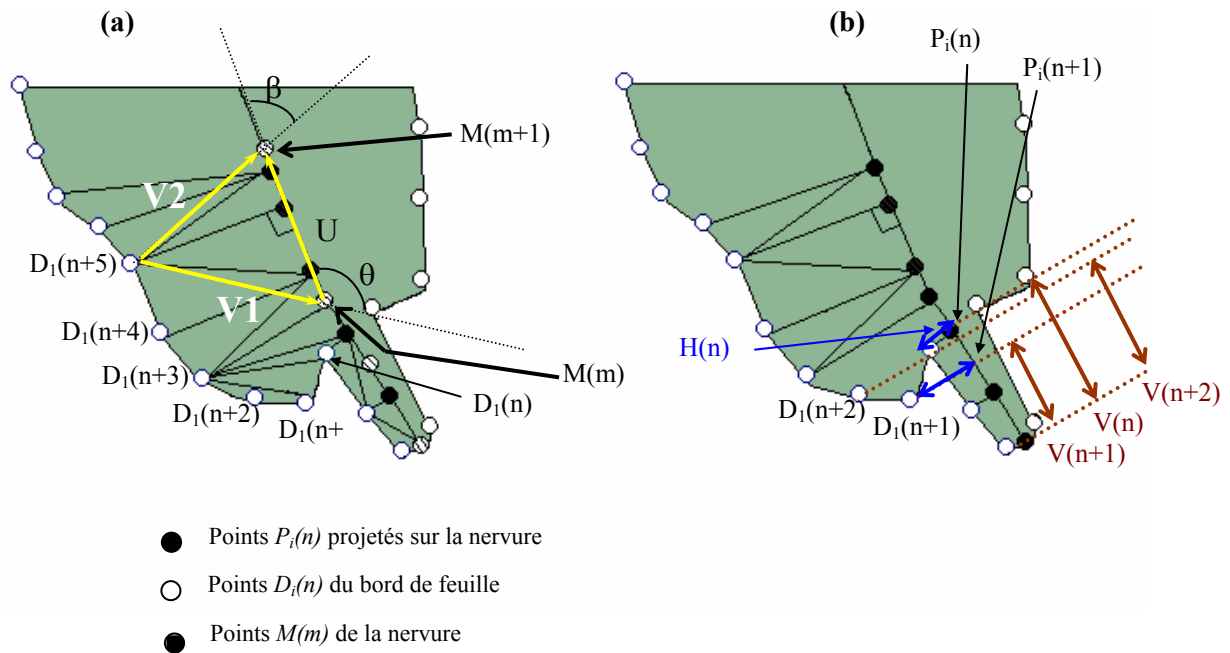


Figure 2.18 : Représentation schématique de la triangulation en début de limbe foliaire.

(a) Représentation des vecteurs issus des points $D_i(n)$ de bord de feuille, de leurs projetés $P_i(n)$ et des points $M(n)$ de la nervure utilisés pour la triangulation des limbes foliaires. (b) Distances $H(n)$ et $V(n)$ utilisées pour déterminer le type de triangulation à appliquer.

A l'opposé de la triangulation standard qui permettait de créer des triangles ayant deux sommets sur une même série de points (nervure ou bord de feuille), la nouvelle triangulation introduit d'autres triangles dont les sommets sont tous sur un même bord de feuille.

Cas des débuts de limbe et des déchirures :

Des tests ont été ajoutés afin de déterminer quand la triangulation standard pouvait être appliquée. Dans le cas contraire, une nouvelle triangulation a été proposée. Ces tests sont basés sur la comparaison entre deux distances calculées sur la feuille (Figure 2.18b) :

$$H(n) = |D_i(n) - P_i(n)| \quad \text{et} \quad V(n) = |P_i(n) - M(0)| \quad \text{Eq. 2.7}$$

Où les $D_i(n)$ sont les points de bord de feuille à projeter, $P_i(n)$ leurs projetés théoriques sur la nervure (cf. 2.2.2.1) et $M(0)$ le point de début de nervure.

La triangulation standard est appliquée quand $V(n)$ est supérieur à $V(n-1)$. Dans le cas contraire, la projection des points $D_i(n)$ de bord de feuille n'est pas possible. Aussi, les triangles sont créés en fonction des résultats des tests sur les distances $H(n)$ présentés dans le Tableau 2.3. Les deux types de triangulation, celle initialement développée sur maïs et celle adaptée au bananier sont présentés en Figure 2.19.

Test sur les distances verticales	Test sur les distances horizontales	Cas particulier de triangulation	Type de projection des points $D_i(n)$
$V(n) > V(n-1)$			Point n Projeté sur $P_i(n)$
$V(n) < V(n-1)$	$H(n) > H(n-1)$	$V(n+x) < V(n)$	Les points compris entre n et (n+x-1) sont projetés sur (n+x)
$V(n) < V(n-1)$	$H(n) < H(n-1)$	$V(n-x) < V(n)$	Les points compris entre (n-x+1) et (n-1) sont projetés sur n
$V(n) > V(n_d)$ ou $V(n) > V(n_g)$			Point n projeté sur $M(m_{\max})$

Tableau 2.3 : Différents tests développés pour remplacer la procédure de projection dans les cas particuliers de triangulation plus adaptée au bananier.

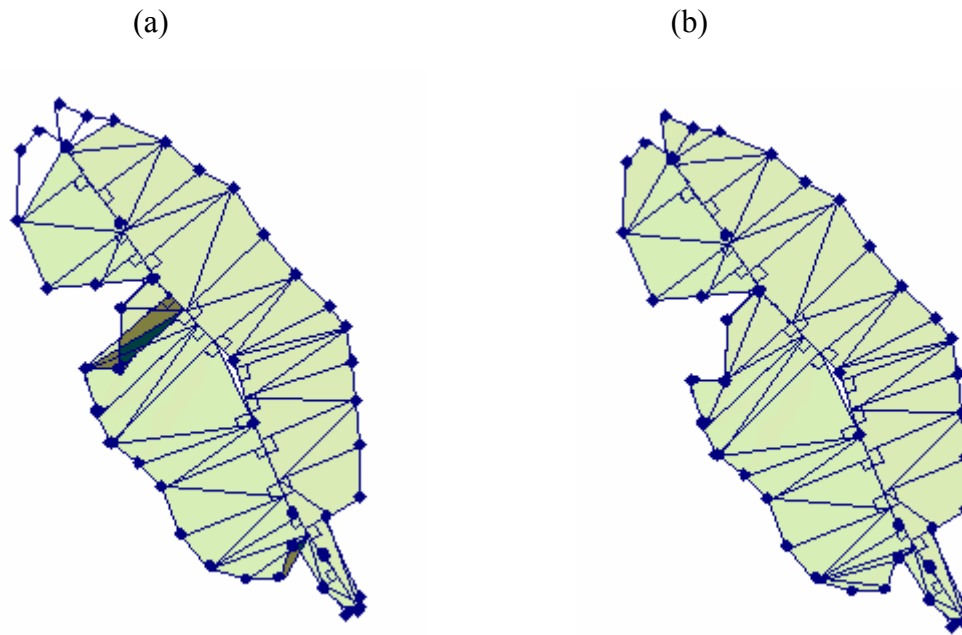


Figure 2.19 : Comparaison des triangulations développées dans DROP et appliquées au bananier. (a) Triangulation initiale présentant des erreurs. (b) Nouvelle triangulation adaptée au bananier.

2.3.5 Calcul des surfaces foliaires

2.3.5.1 Les surfaces foliaires totales

Les écoulements de stemflow au niveau du pseudo-tronc dépendent du LAI (Leaf Area Index) (Sellers et al., 1996), l'indice foliaire étant une mesure du développement foliaire d'un couvert. De plus, le calcul des surfaces foliaires est une mesure classique accessible par échantillonnage au champ comme par maquette 3-D. Afin de comparer les résultats de DROP (simulation des distributions des flux et de l'architecture), obtenus pour une ou plusieurs plantes isolées, avec des mesures au champ ou des résultats de bibliographie, la modélisation des flux de stemflow et de throughfall a été associée à celle des surfaces foliaires. Le modèle calcule désormais la surface des feuilles en sommant sur chaque feuille la surface des triangles qui la composent. Le calcul vectoriel est utilisé pour déterminer chaque surface de triangle en définissant deux vecteurs : le vecteur \vec{AB} associé à la base du triangle, le vecteur \vec{AC} associé à un autre côté du triangle (Figure 2.20). La surface des triangles est calculée à l'aide des normes de ces deux vecteurs et de α l'angle (\vec{AB}, \vec{AC}) en exprimant la hauteur HC et de la base réduite AH par :

$$AH = AC \cos \alpha$$

$$HC = AC \sqrt{(1 - \cos^2 \alpha)}$$

La surface S du triangle est définie par :

$$S = \frac{1}{2} \|\vec{AB}\| \|\vec{AC}\| \sqrt{(1 - \cos^2 \alpha)} \quad \text{Eq. 2.8}$$

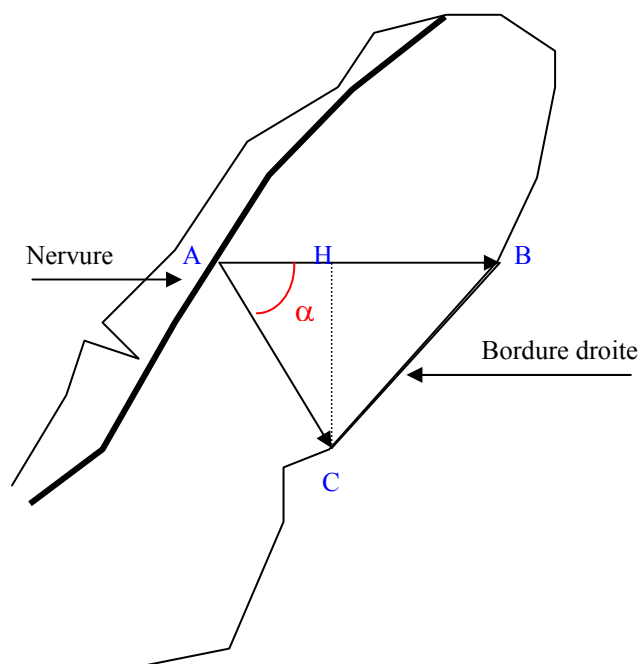


Figure 2.20 : Schéma représentant les vecteurs associés à chaque triangle de feuille pour le calcul des surfaces foliaires.

2.3.5.2 Les surfaces foliaires totales interceptrices

Le calcul des surfaces interceptrices par feuille (surfaces recevant de la pluie primaire ou secondaire non masquées par d'autres feuilles) a été introduit dans le modèle afin de relier la capacité de stockage aux surfaces interceptrices. Ce calcul utilise la discrétisation des surfaces. En effet, la projection verticale des surfaces foliaires au sol par l'emploi de la grille de pixels permet de définir une matrice de répartition des ombres au sol. Cette projection se faisant progressivement du triangle le plus élevé vers le plus bas, les éléments de surface interceptant la pluie sont repérés à l'aide des pixels caractérisés par « ombre(i,j)=1 ». Le calcul de chaque surface élémentaire interceptrice $S'_{i,j}$ se projetant sur un pixel (i,j) est alors effectué à partir du vecteur normal \vec{N} (N_x , N_y , N_z) du triangle auquel elle appartient et de la surface $S_{i,j}$ du pixel :

$$S'_{i,j} = S_{i,j} \frac{|N_z|}{|\vec{N}|} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Aussi, pour chaque feuille de bananier décrite par x triangles, sa surface interceptrice L_w (interceptant la pluie incidente) recevant de la pluie directe a été calculée par le modèle à l'aide de q_n , le nombre de pixels par triangle recevant de la pluie directe, de la surface $S_{i,j}$ du pixel et de N_{zn} , la coordonnée normalisée en z de la pente du triangle :

$$L_w = \sum_{n=1}^x [(q_n \times S_{i,j}) / N_{zn}] \quad \text{Eq. 2.10}$$

Les surfaces foliaires totales interceptrices ont été alors calculées en faisant la somme de toutes les surfaces élémentaires interceptrices sur une même feuille.

2.3.6 Application du modèle à plusieurs plantes

Le modèle ne simulait des écoulements que sur une seule plante, la position de la plante correspondant au centre du repère 3-D de digitalisation. Aussi, les transferts d'eau ne pouvaient se faire que de feuille à feuille ou des feuilles vers le pseudo-tronc jusqu'au sol pour un même bananier. Afin de déterminer les zones à risque de ruissellement ou de forte infiltration sous une bananeraie, la modélisation des flux d'eau à un ensemble de plusieurs bananiers s'avérait nécessaire.

Pour cela, les bases des bananiers devaient être localisés dans un repère fixe de manière à pouvoir attribuer les stemflows. Les étapes de la modélisation à l'échelle de la parcelle de bananiers sont désormais les suivantes :

- L'ensemble des bananiers est assimilé à une seule plante formée de toutes les feuilles de ces bananiers en vue de prendre en compte le masquage des feuilles appartenant ou non à un même bananier.
- Un repère fixe est enregistré dans la parcelle afin de localiser les bananiers.
- Chaque bananier est enregistré dans ce repère fixe et numéroté de manière à attribuer les feuilles aux collets d'où elles partent.
- A chaque bananier est attribué un nombre de feuille et la position de son collet.
- Les bananiers sont reconstitués en triangles foliaires.
- Tous les triangles sont ordonnés selon leur plus bas sommet, du triangle le plus haut au triangle le plus bas.
- Le calcul des interceptions et des transmissions d'eau est effectué à l'aide de la discrétisation de l'espace comme pour le traitement d'une plante isolée.
- Le stemflow de chaque bananier est identifié en fonction du numéro de bananier sur lequel se font les égouttages et écoulements et est attribué au collet de ce bananier.

Ainsi, pour simuler les écoulements sur une maquette 3-D composée de n_{plant} , chaque plante est caractérisée par : son numéro de plante compris entre 0 et n_{plant} , son nombre maximal de feuilles et la position de son stemflow en (i,j) sur la grille de discretisation.

L'affectation des écoulements soit en stemflow, soit en throughfall est facilitée par l'assimilation de l'ensemble des plantes à une seule plante. L'affectation des stemflows à chaque bananier se fait au moyen de tests déterminant si les exutoires approvisionnent directement un stemflow ou du throughfall. Ces tests consistent à évaluer la distance entre les coordonnées en x (puis en y) des pseudo-troncs des bananiers et celles en x (ou en y) des exutoires sur les feuilles. Si cette distance est inférieure à une valeur limite fixée par l'utilisateur en fonction de la résolution désirée et du diamètre moyen des pseudo-troncs, alors le volume d'eau égoutté approvisionne le stemflow du bananier testé. Afin de pouvoir comparer les distributions modélisées à celles mesurées à l'aide des collecteurs, ces valeurs limites l_x et l_y ont été fixées par défaut à :

$$l_x < (X_{box}+5) \text{ et } l_y < (Y_{box}+5)$$

Les paramètres X_{box} et Y_{box} étant les tailles en centimètre de la maille des cartes de sortie du modèle selon l'axe (Ox) et l'axe (Oy) respectivement.

Chapitre 3 Résultats expérimentaux et lois d'interception

3.1 Evaluation de la fiabilité des dispositifs expérimentaux

3.1.1 Introduction

L'évaluation du modèle DROP se fait en comparant à la fois les représentations architecturales de plantes et les cartes des distributions de pluie au sol simulées à celles obtenues par la mesure (photos et mesures de surfaces foliaires, cartes obtenues à l'aide du maillage de collecteurs). Les différences entre la modélisation et les expérimentations peuvent avoir pour origine :

- des erreurs de modélisation liées au formalisme utilisé : elles sont en général dues à une non prise en compte de tous les phénomènes ou à leur mauvaise formalisation.
- des erreurs expérimentales liées à la digitalisation : elles sont directement liées à une mauvaise digitalisation.
- des erreurs expérimentales liées à la simulation de pluie qui ont plusieurs causes : la non homogénéité des nappes produites par le simulateur de pluie, une mauvaise répétabilité des nappes d'eau transmises au sol, la non-verticalité de la pluie produite par le simulateur, un mauvais échantillonnage des distributions et enfin des défauts de mesure liés au splash dans les collecteurs d'eau.

Afin de déterminer les erreurs intrinsèques au modèle, nous avons cherché, dans un premier temps, à évaluer les erreurs liées soit aux dispositifs expérimentaux utilisés, soit à l'opérateur du digitaliseur. Dans un second temps, les données ont été d'abord corrigées pour réduire le poids des erreurs sur la modélisation puis, comparées aux sorties du modèle DROP.

Afin d'évaluer les erreurs liées au dispositif, des mesures répétées de nappes de pluie pour un réglage identique des paramètres du simulateur ont été faites. Les résultats ont permis de quantifier l'homogénéité des nappes, les erreurs de répétabilité et de déterminer l'impact du splash entre collecteurs sur la mesure. L'étude de l'impact des erreurs de digitalisation sur la modélisation des architectures et des écoulements a permis de quantifier les densités de points digitalisés nécessaires pour conserver la fiabilité de la modélisation.

3.1.2 Evaluation de la simulation de la pluie

3.1.2.1 Homogénéité des nappes de pluie

L'homogénéité de la pluie délivrée par le simulateur a été estimée à l'aide du coefficient d'uniformité CU , pour les surfaces de 0.5 m^2 (maillage de 5×5 pots) et de 1.5 m^2 (maillage de 9×9 pots), pour chaque répétition de nappe (cf. 2.1.4).

Le coefficient d'uniformité calculé pour l'ensemble des répétitions de nappes de pluie effectuées sur un maillage de collecteurs de 0.5 m² était de 92.56 (± 0.56) %. Pour un maillage plus large de 1.5 m², il était de 93.85 (± 0.25) %. Le coefficient *CU* étant supérieur à 80%, seuil requis selon les normes relatives aux asperseurs (Salles et al., 2000), l'uniformité de la pluie délivrée par le simulateur est donc satisfaite. Cependant, 7% d'hétérogénéité subsiste : certaines parties de la surface aspergée reçoivent davantage de pluie que d'autres.

3.1.2.2 Répétabilité des nappes de pluie

La répétabilité des nappes délivrées par le simulateur a été évaluée en calculant la matrice de corrélation obtenue pour 7 répétitions d'une pluie de 2 min et 115 mm.h⁻¹ mesurée sur une surface de 0.5 m², soit un maillage de 5×5 pots carrés de 13.6 cm de côté. La variable utilisée pour déterminer la corrélation entre les nappes est la somme des pluies recueillies dans les 25 collecteurs. La matrice est présentée dans le Tableau 3.1.

	Nappe 1	Nappe 2	Nappe 3	Nappe 4	Nappe 5	Nappe 6	Nappe 7
Nappe 1	1	0.98	0.88	0.90	0.94	0.92	0.95
Nappe 2	0.98	1	0.95	0.96	0.98	0.97	0.98
Nappe 3	0.88	0.95	1	0.98	0.97	0.98	0.97
Nappe 4	0.90	0.96	0.98	1	0.97	0.98	0.97
Nappe 5	0.94	0.98	0.97	0.97	1	0.98	0.98
Nappe 6	0.92	0.97	0.98	0.98	0.98	1	0.98
Nappe 7	0.95	0.98	0.97	0.97	0.98	0.98	1

Tableau 3.1 : Matrice des coefficients partiels de corrélation pour 7 répétitions d'une pluie de 115 mm.h⁻¹ sur une surface de 0.5 m² (5×5 pots).

Pour une surface de 0.5 m², la répétabilité des nappes de pluie reste convenable car la comparaison des volumes totaux de pluie reçus dans les boîtes montre des coefficients de corrélation proches de 1 (compris entre 0.88 et 0.98). Bien que les coefficients de corrélation soient très satisfaisants, des erreurs peuvent être commises aussi bien en surestimant qu'en sous-estimant les coefficients de transmission. L'erreur sur l'ensemble d'une nappe varie entre 2% et 12%.

Pour une plus grande surface de 1.5 m² (maillage de 9×9 pots), l'erreur commise pour 4 répétitions d'une même pluie sur cette surface a été calculée pour chaque collecteur composant le maillage. La variabilité des mesures en fonction de la position des collecteurs de pluie est présentée en Figure 3.1 sur l'ensemble de la surface, puis suivant de l'axe (Oy) perpendiculaire au sens de balayage de la buse (Figure 3.2).

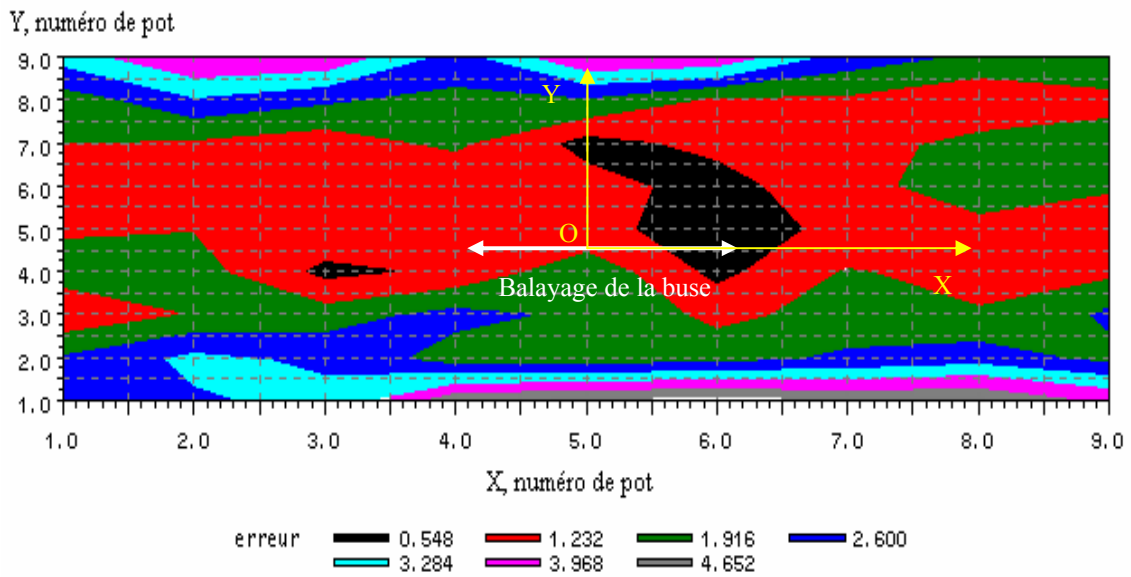


Figure 3.1 : Carte des répartitions des erreurs relatives (en %) commises pour les masses d'eau délivrées par le simulateur sur un maillage de 9x9 pots de 13.6 cm de côté (4 répétitions).

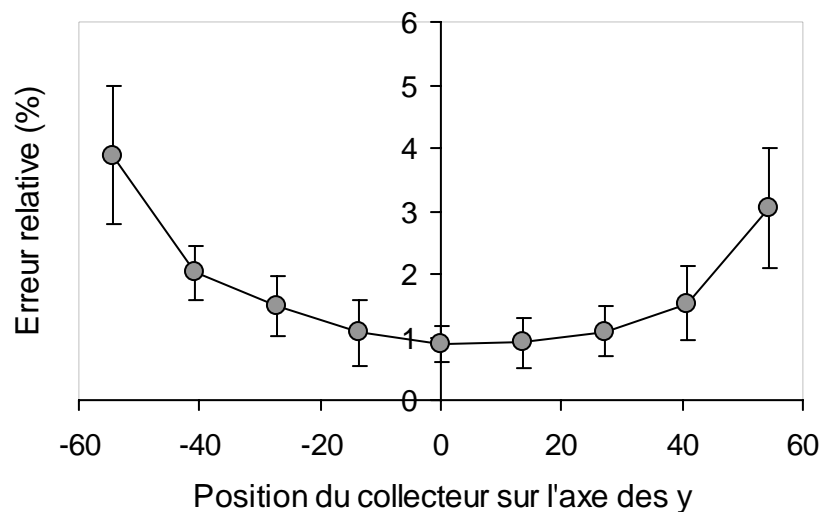


Figure 3.2 : Erreurs relatives commises sur les hauteurs d'eau délivrées pour 4 pluies identiques simulateur de pluie, en fonction de la position du collecteur suivant l'axe (Oy) perpendiculaire au sens de balayage de la buse. Les barres verticales représentent les écarts-types.

La répartition des hauteurs d'eau délivrées dans les collecteurs n'est pas homogène sur l'ensemble de la surface étudiée. En effet, les volumes d'eau reçus par collecteur restent pratiquement constants dans le sens du balayage de la buse du simulateur mais varient plus rapidement perpendiculairement à la buse, selon l'axe (Oy). Pour une surface au sol de 0.5 m² correspondant à une surface de 5x5 pots, les écarts restent inférieurs à 2%. Au-delà de cette zone, ils se dégradent plus rapidement jusqu'à près de 5% à la périphérie d'une surface

de 1.5 m² (Figure 3.2). L'erreur relative commise sur la nappe de 1.5 m² reste constante et faible (de l'ordre de 2%) le long de l'axe (Ox). Cependant, elle augmente avec la distance par rapport à l'axe (Ox) pour atteindre 3.88% (± 1.09) quand la position des pots en y est de 54.4 cm. Cette augmentation suit une loi polynomiale de second ordre en fonction de la distance par rapport à l'axe (Ox) :

$$E = 0.0009y^2 - 0.0071y + 0.7108 \quad (R^2=0.95) \quad \text{Eq. 3.1}$$

Cet ajustement ne concerne que des surfaces correspondant à un maillage de 9×9 pots. Afin de prendre en compte cette hétérogénéité, les coefficients de transmission d'eau de pluie fournis par la mesure pourront être bornés en leur attribuant une incertitude correspondant à l'erreur relative mesurée sur chaque collecteur.

3.1.2.3 Pertes par évaporation et sensibilité des nappes au phénomène de splash

Pertes par évaporation directe

Les mesures de distribution de la pluie par pesée des collecteurs durent en moyenne 45 minutes. Pendant cette durée, l'évaporation de l'eau pour un pluviomètre isolé contenant en moyenne 99.2 g (± 5.1) d'eau a été évaluée à 1.2 g.h⁻¹ (± 0.3), soit une moyenne de 0.05 mm.h⁻¹. Cette valeur introduit une erreur systématique de mesure, E_v , de l'ordre de -1.2%.

En raison de ce faible taux d'évaporation et de la méthode comparative utilisée (rapport de la pluie incidente par la pluie transmise pour le calcul des coefficients de transmission) qui annule l'effet des pertes par évaporation dans les collecteurs, cette évaporation a été considérée comme nulle.

Pertes par splash

Différents matériaux brise-gouttes ont été ajoutés dans des collecteurs afin de limiter les pertes par splash (cf. 2.1.4). Leurs effets ont été évalués en comparant les masses d'eau recueillies dans des collecteurs munis de brise-gouttes avec celle mesurée dans un collecteur seul. Pour cette mesure, la buse a été maintenue en position immobile (angle de balayage nul) et les collecteurs ont été positionnés tour à tour juste à la verticale sous la buse, au centre du maillage. Les résultats sont présentés en Figure 3.3. Les matériaux utilisés sont des mousses sèches (MS) ou humides (MH), des éponges humides (EH), métalliques (EM), ondulées (EOND), un filet vert fin (FVF) et une moustiquaire (MOST). Les chiffres précédant ces codes correspondent aux épaisseurs des mousses et éponges. Le collecteur seule, sans brise-gouttes, est codé E0.

Pour les brise-gouttes de type éponge ondulée (EOND), filet vert fin (FVF) et moustiquaire (MOST), les masses d'eau recueillies sont significativement supérieures à la masse d'eau moyenne recueillie dans le collecteur simple (E0) de 0.84 g (± 0.35), 0.91 g (± 0.28) et 0.65 g (± 0.27) respectivement. Les masses d'eau recueillies dans les collecteurs munis d'autres brise-gouttes (mousses et éponges simples) étaient en moyenne moins importantes que celle recueillie dans le collecteur seul (E0). Un écart de 0.5 à 2.7 g pouvait s'observer. En estimant que les brise-gouttes de type FVF et EOND permettent une réduction maximale des pertes par splash dans un collecteur isolé, les pertes maximales par splash correspondent à 2% d'erreur de mesure. Cependant, lorsque les collecteurs sont côte à côte dans le maillage placé sous une plante, chaque collecteur perd de l'eau par splash mais en reçoit également de ses plus proches voisins.

Les différentes expérimentations effectuées pour estimer la proportion d'eau perdue et reçue par un collecteur donné ne nous ont pas permis de relier ces masses d'eau perdues ou gagnées

par splash aux hauteurs d'eau dans le collecteur et ses voisins, à la position relative des collecteurs s'affectant mutuellement et au diamètre des gouttes incidentes. L'erreur maximale (E_s) de mesure des masses d'eau recueillies par les collecteurs qui est liée au splash entre les collecteurs a donc été fixée à $\pm 2\%$.

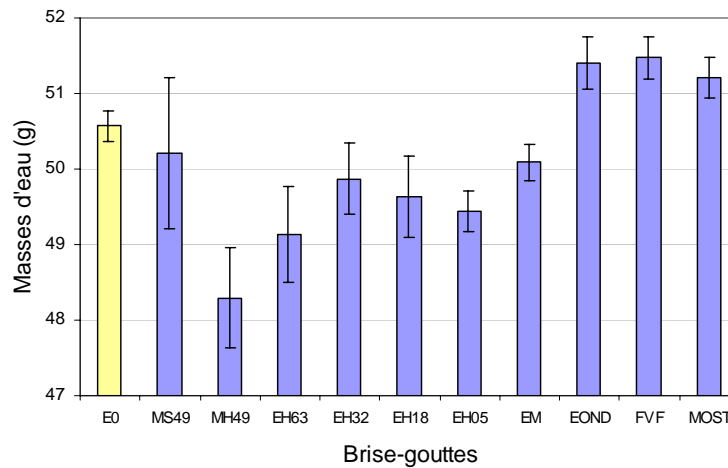


Figure 3.3 : Masses moyennes d'eau recueillies dans un collecteur sans « brise-gouttes » (E0) et muni de brise-gouttes (MSH49, MH49, EH63, EH32, EH18, EH05, EM, EOND, FVF et MOST). Les barres verticales représentent les écarts-types des mesures.

En conséquence, l'erreur totale E de mesure sur les masses d'eau de pluie recueillies dans les collecteurs correspond à la somme des erreurs de répétabilité des nappes E_r , de perte par splash E_s et de perte par évaporation directe E_v , telles que :

$$\pm 2\% \leq E_r \leq \pm 5\% \quad E_s = \pm 2\% \quad E_v \approx 0\%$$

Une surface de collecteurs de 0.5 m^2 correspond à une surface au sol entièrement recouverte par le feuillage d'un petit bananier. A la périphérie de cette surface, l'erreur de répétabilité de la nappe de pluie est de l'ordre de $\pm 5\%$ et est supposée croître au-delà de cette zone (cf. Figure 3.4 et Eq. 3.1). En estimant l'erreur de répétabilité maximale sous le feuillage à 5% , l'erreur totale maximale pour la mesure des masses d'eau est alors estimée pour une surface de collecteurs de 0.5 m^2 à :

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_s^2 + E_v^2} = \sqrt{5^2 + 2^2} \approx 5.4\% \quad \text{Eq. 3.1}$$

Pour des bananiers affectant une plus grande surface de collecteurs, E serait supérieure à 5.4% .

3.1.3 Evaluation de la sensibilité de la digitalisation

3.1.3.1 Effet de la précision du digitaliseur sur la simulation de l'architecture

25 fichiers de digitalisation d'un même bananier B1 ont été créés en introduisant systématiquement dans les données un bruit aléatoire de $\pm 1 \text{ cm}$ correspondant à la précision

du digitaliseur dans nos conditions d'utilisation. A partir de ces fichiers de digitalisation, les surfaces foliaires L_A (m^2) et la distribution des inclinaisons L_i ($^\circ$) des triangles foliaires ont été simulées à l'aide du modèle DROP en utilisant les données standard (sans bruit), puis bruitées (25 simulations). Les résultats de simulation standard (St), de simulations bruitées (No) et de la mesure (Me) sont présentés en Figure 3.4.

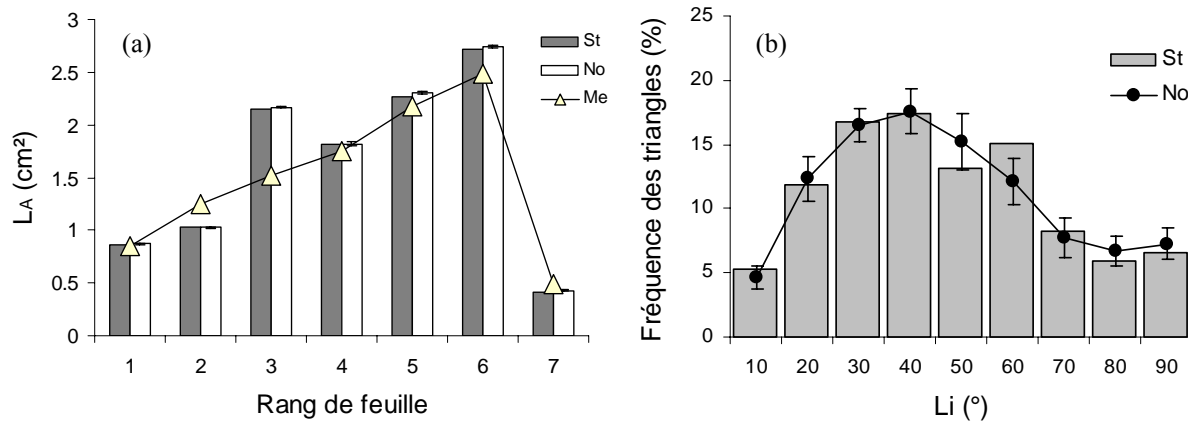


Figure 3.4 : Effet de l'introduction d'un bruit de ± 1 cm dans les coordonnées digitalisées d'un bananier sur la simulation : (a) des surfaces foliaires L_A et (b) des inclinaisons foliaires L_i .

Les surfaces foliaires L_A simulées avec un bruit aléatoire (No) sont peu différentes de celles simulées de façon standard (St) et présentent des écarts-types très faibles (Figure 3.4a). De même, l'introduction du bruit affecte peu la simulation des inclinaisons foliaires L_i (Figure 3.4b), la distribution des inclinaisons des triangles de feuille du bananier étant pratiquement la même pour la simulation standard et les simulations bruitées.

Comme le bruit de ± 1 cm introduit des erreurs peu significatives, que ce soit pour le calcul des surfaces foliaires ou des inclinaisons foliaires, les écarts observés entre la mesure et la simulation ne seraient pas dus à la précision du digitaliseur mais auraient d'autres causes. En comparant les surfaces foliaires simulées et mesurées, on constate que la simulation fournit de bons résultats, excepté pour la feuille de rang 3. En effet, de façon générale, les erreurs de simulation par rapport à la mesure sont inférieures à 10% sauf pour les simulations bruitées des feuilles 2, 6 et 7 qui présente 18.1%, 10.2% et 11.4% d'erreur ainsi que pour la simulation standard des feuilles 2 et 7 qui présentent 18.3% et 16.3% d'erreur. Le maximum d'erreur relative entre la simulation et la mesure est observé pour la feuille 3, que ce soit pour les simulations bruitées ou standards. Elle est pratiquement la même pour les données standards (42.2% d'erreur) et celles bruitées (43.1% d'erreur). Cet écart par rapport à la mesure est probablement dû à une erreur de digitalisation. Ceci a sûrement été le cas également pour la feuille de rang 2 : une erreur de digitalisation a dû être commise pour un point. En ce qui concerne l'erreur de 16.3% commise pour la simulation standard sur la feuille de rang 7, elle s'explique par le manque d'adéquation de la méthode de triangulation à la représentation des surfaces de forme cylindrique. En effet, cette dernière feuille non entièrement développée, se présentait en « cigare ».

3.1.3.2 Effet de la densité de points digitalisés sur la modélisation

Au cours de la digitalisation, les points dont les coordonnées doivent être enregistrées sont choisis par l'opérateur de manière à bien décrire les maxima et minima des ondulations des limbes. Ce protocole de digitalisation permet d'augmenter la probabilité de bien décrire les bassins versants et leurs points d'égouttages. En ce sens, un maximum de points a été enregistré pour décrire les feuilles rendant la digitalisation longue. Aussi, nous avons cherché à réduire le temps de mesure en diminuant si possible le nombre de points à enregistrer tout en conservant une bonne description des plantes. En supposant que la densité de points digitalisés par feuille pouvait affecter la simulation des surfaces et des écoulements, nous avons effectué des simulations d'écoulements de pluie sur trois bananiers B1, B2 et B3 en agissant sur la densité de points digitalisés par feuille.

Les densités de points obtenues pour chaque dégradation sont données par le Tableau 3.2. Pour ces dégradations, les points des gaines n'ont pas été modifiés, seuls les points sur les limbes ont été utilisés. Les données ainsi dégradées ont été utilisées pour simuler la surface foliaire totale L_A de chaque bananier, les inclinaisons des triangles de feuille créés, le nombre de points d'égouttages DP , la surface moyenne des bassins versants WA et de leur inclinaison moyenne WI .

Bananier	Nombre de points digitalisés/plante	Dégradation (%)	Densité (points/100 cm ²)
B1	274	0	2.14
	231	15.69	1.84
	217	20.80	1.71
	161	41.24	1.26
	120	56.20	0.93
	81	70.44	0.57
B2	234	0	2.08
	198	15.38	1.71
	174	25.64	1.58
	128	45.30	1.16
	112	52.14	1.04
	80	65.81	0.86
B3	291	0	2.68
	244	16.15	2.28
	230	20.96	2.11
	162	44.33	1.47
	116	60.14	1.16
	72	75.26	0.71

Tableau 3.2 : Récapitulatif des dégradations appliquées aux données géométriques issues de la digitalisation de 3 bananiers B1, B2 et B3. Seuls les points décrivant les limbes foliaires ont été utilisés.

Simulation des surfaces et des inclinaisons foliaires :

La somme des carrés des écarts (SSE) entre la mesure et la simulation des surfaces foliaires totales (L_A totale) a été calculée en fonction du degré de dégradation appliqué à chaque bananier. Les résultats sont présentés en Figure 3.5. Les surfaces foliaires totales des bananiers B1, B2 et B3, mesurées expérimentalement étaient respectivement de 1.2, 1 et 1.05 m².

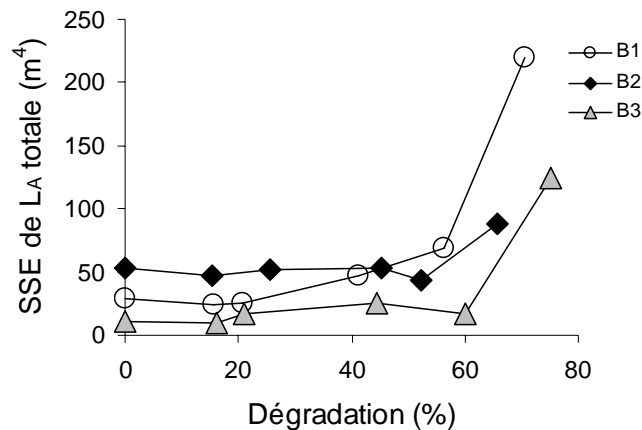


Figure 3.5 : Effet de la dégradation des données géométriques de 3 bananiers B1, B2 et B3 sur la somme des carrés des écarts (SSE) par rapport à la mesure pour la simulation de la surface foliaire totale (L_A totale) par plante.

La simulation des surfaces foliaires totales reste sensiblement la même pour des degrés de dégradation inférieurs à 60% : la somme des carrés des écarts par rapport à la mesure est en moyenne de 38.5, 49.8 et 15.76 m^4 pour B1, B2 et B3 respectivement. Au-delà de 60% de dégradation, les SSE augmentent brusquement de 471.3% pour B1, 76.1% pour B2 et 693.1% pour B3. La densité moyenne de points digitalisés sur l'ensemble d'un bananier est de l'ordre de 1 point par 100 cm^2 pour ce seuil de 60% (Tableau 3.2).

En comparant les données de chaque bananier, on constate que pour le nombre maximum de points digitalisés (0% de dégradation), le bananier B1 était le moins bien décrit. Cependant, l'augmentation de la SSE pour ce bananier (76.1%) est la plus faible en comparaison à celles des bananiers B2 et B3 (471% et 693.1% respectivement). Cet effet moins marqué de la dégradation des données pour le bananier B1 pourrait s'expliquer par le fait qu'une erreur importante de digitalisation ait été commise dans le fichier initial. En effet, pour ce bananier déjà utilisé pour évaluer l'impact de la précision du digitaliseur sur la simulation, la simulation des surfaces foliaires présentait des erreurs importantes liés à la digitalisation (cf. 3.1.3).

Simulation des paramètres importants pour les écoulements

Les écoulements sont caractérisés par des points d'égouttages localisés en bordure de limbe, sur des bassins versants des feuilles. La forme des bassins versants, leur inclinaison moyenne et le nombre de points d'égouttages associés sont fonction des triangles de feuille créés par le modèle. Les fichiers de digitalisation dégradés pour les bananiers B1, B2 et B3 ont été utilisés pour comparer ces paramètres simulés par le modèle DROP.

Aussi, l'effet de la densité de points digitalisés par feuille sur la modélisation a été évalué pour les bananiers B1, B2 et B3 en calculant les erreurs commises pour la simulation du nombre de points d'égouttages DP , de la surface moyenne des bassins versants WA et de leur inclinaison moyenne WI , par rapport à la simulation standard. Les résultats sont présentés en Figure 3.6.

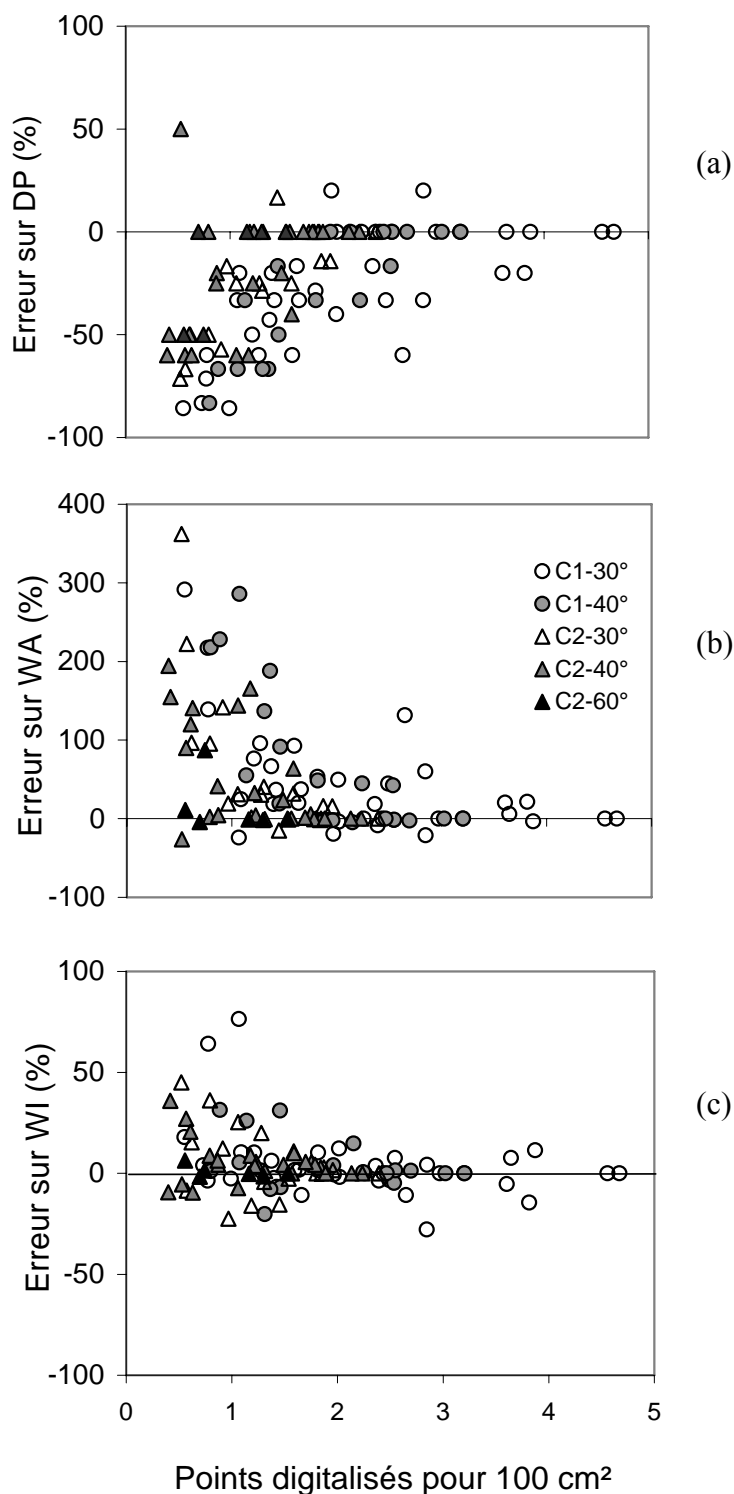


Figure 3.6 : Effet de la densité des points digitalisés sur l'erreur de simulation commise par rapport à la simulation standard sur : (a) le nombre de points d'égouttage DP, (b) la surface moyenne des bassins versants WA et (c) leur inclinaison moyenne WI. Les données sont réparties selon 2 classes de surfaces C1 ($< 0.2 \text{ m}^2$) et C2 ($\geq 0.2 \text{ m}^2$) et 3 classes d'inclinaison moyenne de feuille (30°, 40° et 60°).

Les résultats montrent que plus le nombre de points pour 100 cm² de feuille est réduit, plus *DP* est sous-estimé. Pour une densité inférieure à 1 point par 100 cm² de feuille, l'erreur est voisine de -86% (Figure 3.6a). Cette augmentation de l'erreur commise sur la simulation de *DP* est plus importante, à égale densité, pour les grandes feuilles (C2) et pour des feuilles très inclinées (60°). Cependant, l'erreur devient plus importante pour les petites feuilles quand moins d'un point par 100 cm² de feuille est utilisé. Les erreurs commises sur *DP* sont minimales quand 3 points par 100 cm² de feuille ont été conservés sur des feuilles inférieures à 0.2 m² et quand 2 points par 100 cm² de feuille ont été conservés sur des plus grandes. En réduisant la densité de points digitalisés sur les feuilles, le modèle surestime de plus en plus l'erreur commise sur le calcul de la surface moyenne des bassins versants *WA* : l'erreur est positive en générale et atteint 362% pour moins de 1 point par 100 cm² (Figure 3.6b). La surestimation est plus marquée pour les grandes feuilles (C2) et pour les feuilles très inclinées (à 60°). Tout comme pour *DP*, l'erreur commise sur *WA* est minimale quand 3 points au moins par 100 cm² sont conservés sur les petites feuilles moyennement inclinées et 2 points par 100 cm² sont digitalisés sur les plus grandes feuilles, quelle que soit leur inclinaison. Contrairement au deux paramètres précédents, *WI* semble moins affecté par une dégradation de la densité de points digitalisés sur les feuilles (Figure 3.5c). Une tendance à la surestimation de *WI* s'observe lorsque la densité de points digitalisés est réduite, les erreurs variant entre -27.8% et 76.4%. Moins de points sont nécessaires pour une estimation correcte des inclinaisons des bassins versants. En effet, l'erreur sur *WI* reste minimale quand au moins 2 points par 100 cm² sont utilisés sur les petites feuilles moyennement inclinées et 1 point par 100 cm² sont utilisés sur les plus grandes feuilles. Enfin, l'estimation de *WI* par DROP est plus sensible à la densité de points digitalisés pour de faibles que pour de fortes inclinaisons de feuilles.

3.1.4 Discussion

Les erreurs de répétabilité et d'homogénéité des pluies d'intensité voisine de 115 mm.h⁻¹ délivrées sur 0.5 m² et 1.5 m² restent faibles mais sont suffisantes pour affecter la comparaison des sorties du modèle à la mesure. En effet, les coefficients d'uniformité (*CU*) calculés sous le simulateur étaient voisins de 93% ce qui correspond à une homogénéité excellente (Mathers, 2002). Sous le même type de simulateur de pluie, Salles et ses collègues ont calculé un *CU* de l'ordre de 82% pour un angle de balayage de 78° correspondant à une intensité de pluie de 90 mm.h⁻¹ (Salles et al., 2000). Pour notre étude, afin de nous placer dans des conditions optimales d'homogénéité, plusieurs ajustements de la position de la buse ont été faits de manière à la positionner avec précision au centre du maillage de collecteurs et contrôler son balayage selon l'axe (Ox). Ces réglages pourraient expliquer l'obtention d'un meilleur *CU* de 93%. Cependant, bien que l'homogénéité des nappes soit satisfaite selon les normes en vigueur pour les asperseurs (Salles et al., 2000), les 7% d'erreur sur l'homogénéité indiquent que certaines parties de la surface aspergée reçoivent davantage de pluie que d'autres.

L'étude de la répétabilité des nappes a montré que moins de 5% d'erreur était commise sur une surface de 1.5 m² : l'erreur restait faible (inférieure à 2%) au centre du maillage sur une surface de 0.5 m² et augmentait à la périphérie, en particulier perpendiculairement au plan de déplacement de la buse (axe Oy). Cette mauvaise répétabilité des nappes selon l'axe (Oy) pourrait s'expliquer par une variabilité des diamètres de gouttes émises sur l'ensemble de la surface aspergée. En effet, une variation des *D*₅₀ entre 1.6 et 1.8 mm a été observée sous le simulateur pour une pluie d'intensité de 30 mm.h⁻¹ délivrée sur 1 m² avec une pression

d'arrivée d'eau dans la buse de 0.55 bar (Salles et al., 2000). Cette variabilité des tailles de gouttes générerait une variabilité des énergies cinétiques mesurées pour 1 m² de surface : elles seraient plus fortes à la périphérie de la surface.

De plus, le splash entre les collecteurs remplis d'eau peut affecter la mesure des masses d'eau recueillies, celles-ci étant plus ou moins sous-estimées selon la position des collecteurs par rapport à la buse. En effet, certains auteurs ont montré que les gouttelettes de splash variaient en fonction de l'angle de contact des gouttes au moment de l'impact (Weiss, 1988) et que leur hauteur et distance de projection dépendaient de l'énergie cinétique (Pietravalle et al., 2001) et de la taille (Macdonald et McCartney, 1987) des gouttes incidentes. Compte tenu du type de nappe produite par la buse (jet en éventail avec des diamètres variables) et de la présence de larges diamètres de gouttes provenant de la pluie secondaire, l'effet combiné de la variabilité des gouttes émises et du splash entre les collecteurs serait une source d'erreurs de mesure pour des nappes de pluie supérieures à 0.5 m².

Ces erreurs pourraient affecter le calcul des coefficients de transmission K_t pour les nappes de pluies mesurées. Les coefficients K_t sont déterminés en faisant le rapport de la nappe transmise sous le bananier par celle formée par la pluie incidente au-dessus de ce bananier (cf. 2.2.3). Compte tenu des erreurs de répétabilité de la nappe sous le simulateur, les coefficients K_t associés à des collecteurs non affectés par la présence des bananiers (collecteurs recevant de la pluie incidente) peuvent différer de leur valeur théorique, 1. A partir des valeurs d'erreurs totales mesurées en fonction de la position des collecteurs sur une surface de 1.5 m², les coefficients K_t associés à des collecteurs non affectés par la présence de bananiers et variant entre 0.95 et 1.05 seront corrigés à la valeur 1. Pour des surfaces aspergées plus grandes, cette erreur est supposée augmenter : elle est supposée supérieure à 2% et peut dépasser 5%. En ce sens, lorsque les coefficients K_t associés à des collecteurs non affectés par la présence de bananiers varieront d'égale manière ou de façon plus importante, ils seront également ajustés à la valeur 1. Cet ajustement permettra de faciliter la comparaison modèle/mesure des distributions d'eau de pluie au sol.

L'emploi de brise-gouttes de type éponge ondulée, filet fin et moustiquaire a permis d'augmenter de 2% les quantités d'eau recueillies par collecteur en limitant les pertes par splash. Parallèlement les tests de répétabilité ont montré que 2% d'erreur était commis sur les nappes. Cette erreur de répétabilité pouvant être aussi bien positive que négative, elle ne pourrait être due aux pertes par splash car les pertes par évaporation directes sont annulées par le rapport fait entre les nappes incidente et transmise (cf. 3.1.2.3). Toutefois, l'erreur liée au splash dans les collecteurs a été estimée pour une pluie incidente présentant un D_{50} voisin de 2 mm. Sachant que les égouttages présentent des D_{50} voisins de 6 mm (Choisnard, 2000; Sansoulet, 2002), que la proportion de splash (Ghadiri et Payne, 1988; Huber et al., 1997), les hauteurs et les distances atteintes par les gouttelettes de splash (Macdonald et McCartney, 1987; Ghadiri et Payne, 1988) augmentent avec le diamètre des gouttes incidentes, les distributions de pluie transmises au sol seraient différemment affectées par le splash entre les collecteurs. Compte tenu de la variabilité des hauteurs d'eau dans les collecteurs placés sous les bananiers, les perturbations de la nappe mesurée pouvaient être d'autant plus hétérogènes (Moss et Green, 1987).

L'effet de la précision de la digitalisation sur la modélisation de l'architecture est négligeable, car la simulation des surfaces et des inclinaisons foliaires n'est pas affectée par un bruit de ± 1 cm dans les coordonnées digitalisées d'un bananier. Cependant, le choix des points et leur densité par classe de surface foliaire peuvent affecter cette modélisation. En effet, la simulation des surfaces foliaires est fortement dégradée quand la densité de points digitalisés est inférieure à 1 point par 100 cm² de feuille. La simulation des écoulements

semble encore plus sensible à la précision de la digitalisation : 3 points par 100 cm² de feuille pour les petites feuilles (< 0.2 m²) et 2 points par 100 cm² de feuille pour les plus grandes sont nécessaires pour une bonne représentation des bassins versants et en conséquence, une bonne estimation de la position et du nombre de points d'égouttages. Cette détermination de la densité optimale de points nécessaires est essentielle pour limiter la durée de la digitalisation. Cette densité varie en fonction de la taille des plantes à digitaliser. Une plante de maïs composée de 10 feuilles pouvait être décrite à partir de 200 points digitalisés sur la tige principale et les nervures des feuilles (Drouet, 2003) alors que pour le bananier B3 composé de 6 feuilles, 355 points étaient nécessaires (291 points pour les limbes et 64 pour les gaines et le pseudo-tronc). Pour décrire des plantes de maïs de surface foliaire totale variant entre 0.003 et 0.068 m², 5 à 30 points étaient utilisés (Ruget et al., 1996; Drouet, 2003), ce qui correspond à une densité de digitalisation de 4 à 15 points par 100 cm² de feuille. Une telle précision dans la digitalisation peut être permise pour des plantes de taille moyenne n'imposant pas une trop grande contrainte temporelle dans la digitalisation. Maintenir une telle précision pour des bananiers âgés seulement de 5 mois et de surfaces foliaires voisines de 1 m² implique que 400 à 1500 points sont utilisés pour décrire ces bananiers, sans tenir compte de leurs gaines. Une telle précision augmente considérablement le temps de mesure et semble tout à fait inutile au vu des résultats que nous avons obtenus. Les différences de densité nécessaire pour le maïs et le bananier sont sûrement dues à l'importante largeur des limbes des feuilles de bananier (près de 60 cm pour le bananier contre 10 cm pour le maïs), ce qui induit une densité de points digitalisés plus faible par 100 cm² de feuille.

CONCLUSIONS

- La répétition de nappes de pluie produites par le simulateur induit une erreur de mesure par collecteur croissant en fonction de la position du collecteur sur le maillage. Cette croissance est proportionnelle au carré de la distance du collecteur selon l'axe (Oy) par rapport au centre du maillage.
- Les erreurs de représentation des plantes dues à la digitalisation ne sont pas dues à la précision intrinsèque du digitaliseur mais à plusieurs autres facteurs. Au cours de la mesure des erreurs peuvent apparaître en raison d'une mauvaise manipulation du stylet par l'opérateur, mais également de la non-détection d'une erreur de mesure au cours de la visualisation directe sur l'ordinateur connecté au digitaliseur.
- Pour une bonne simulation des écoulements, il est recommandé de digitaliser les bananiers selon une densité de :
 - 3 points par 100 cm² pour les feuilles de surface inférieure à 0.2 m².
 - 2 points par 100 cm² pour les feuilles de surface supérieure à 0.2 m².

3.2 Lois d'interception

3.2.1 Introduction

Sachant que l'interception de la pluie par un couvert est affectée aussi bien par la structure du couvert (Brandt, 1989; Van Elewijck, 1989a; Hall et Calder, 1993; Huber et al., 1997; Huber et al., 1998; Liu, 1998) que par les caractéristiques de la pluie incidente (Massman, 1983; Calder, 1986; Crockford et Richardson, 1990a; Hormann et al., 1996), l'étude de

l'interception par les feuilles de bananier s'est faite en faisant varier à la fois des caractéristiques des feuilles et celles des pluies incidentes.

Pour notre étude, nous avons retenu trois paramètres caractérisant les surfaces des feuilles : leur inclinaison, leur flexibilité, leur état de surface plus ou moins cireux. Nous avons combiné le paramètre « âge » (Fitt et al., 1992) au paramètre « état cireux », en raison de leur corrélation : les feuilles des jeunes bananiers sont plus cireuses que celles des bananiers adultes. De plus, l'état de surface semblait être pertinent puisque des études précédentes ont montré que quand les feuilles sont recouvertes d'une couche de cire, leur mouillabilité diminue (Juniper et Jeffree, 1983) en raison d'une augmentation de l'angle de contact des gouttes d'impact (Weiss, 1988; Porskamp, 1989; Davis et Evans, 1990).

Pour la modélisation, la pluie incidente, les écoulements et les égouttages ont été supposés verticaux. De plus, les intensités des pluies ont été choisies proches de celles observées en situation réelle et nous avons étudié l'interception pour les deux types de pluie (primaire et secondaire) afin de prendre en compte la modification de la pluie par le couvert. Enfin, comme nous avons choisi de simuler les interceptions pour un risque maximal de lessivage correspondant au régime permanent (à saturation du couvert), nous avons donc travaillé à saturation des surfaces foliaires pour des pluies de plus de 6 min. En conséquence, l'effet des caractéristiques de la pluie sur l'interception de la pluie a été étudié en ne retenant que deux paramètres : le diamètre des gouttes et leur énergie cinétique.

En raison des nervures secondaires plus épaisses près de la nervure centrale des feuilles, la rigidité des feuilles est plus importante au voisinage de ces nervures centrales que près des bords. Les limbes de feuille étant larges (près de 40 cm pour les bananiers adultes), autant de gouttes de pluie peuvent être interceptées près des nervures que près des bords de feuille. Aussi, l'effet de la flexibilité des feuilles a été exprimé au moyen de la variable « position » de l'échantillon prélevé (sur le *bord* et près de la *nervure*). La couche cireuse sur les feuilles de bananier semble plus épaisse pour les feuilles de jeunes bananiers. En conséquence, l'état cireux des surfaces a été exprimé par la variable « âge » du bananier en utilisant deux classes d'âge (4 mois et 10 mois). L'effet de ces variables a été évalué sur la capacité de stockage C , le coefficient de splash K_{spl} et la hauteur de splash H_{spl} en effectuant une Anova à l'aide du logiciel d'analyse statistique SAS (Proc GLM de SAS (SAS Institute Inc., 1987)) pour un seuil de significativité de 10%.

Pour chaque caractéristique de gouttes incidentes, les masses d'eau stockées sur la surface de l'échantillon, celles égouttées (transmises sous l'échantillon) et celles éclaboussées en fines gouttelettes (splash) ont été mesurées pour chaque inclinaison et chaque type de feuille, afin de déterminer le coefficient de transmission K_t , la capacité de stockage C , le coefficient de splash K_{spl} et la hauteur moyenne de splash H_{spl} .

L'apparition du processus de splash, lors de l'impact d'une goutte sur une surface, dépend de la vitesse de chute des gouttes (Mundo et al., 1995). Les vitesses terminales atteintes par les gouttes incidentes de 2 mm induisent systématiquement du splash. Nous nous sommes intéressés à l'apparition du splash pour des gouttes d'égouttages de 6 mm tombant de différentes hauteurs et donc atteignant diverses vitesses au moment de l'impact. Cette étude a permis d'évaluer la hauteur de chute minimale pour qu'il y ait splash, le nombre de Weber (We) associé et le coefficient k indiquant la limite entre le dépôt et le splash des gouttes (cf. 1.2.2). Les variations d'énergie cinétique pour des gouttes d'égouttages étant dues à des hauteurs de chute variables dans le feuillage, la modélisation des interceptions des égouttages

s'est faite en caractérisant l'énergie cinétique des gouttes par h , leur hauteur de chute. Des ajustements statistiques (Procnlm de SAS (SAS Institute Inc., 1987)) ont permis d'établir des équations empiriques non linéaires permettant de simuler les phénomènes d'interception sur n'importe quel triangle de feuille composant un bananier. Ces lois décrivent la capacité de stockage et les pertes par splash pour des triangles de feuille en fonction de leur inclinaison, du diamètre des gouttes incidentes caractérisant les pluies primaire et secondaire, et de la hauteur de chute des gouttes secondaires.

3.2.2 Capacité de stockage

3.2.2.1 Temps de saturation des échantillons de feuille

A cours d'une pluie, le couvert passe d'abord par une phase de mouillage (durant les premières minutes de pluie) pendant laquelle il stocke de l'eau sur la surface de ses organes, puis atteint sa capacité de stockage quand cette pluie est suffisamment longue et intense. Quand le couvert ne peut stocker davantage d'eau, l'eau excédentaire est redirigée en stemflow et en throughfall (Horton, 1919). Ces flux de stemflow et de throughfall sont donc maximaux en régime permanent, quand la saturation du couvert est atteinte. En conséquence, pour étudier les phénomènes d'interception à saturation, nous avons évalué, dans un premier temps, le temps de saturation des échantillons de feuille de bananier, à l'aide de notre dispositif expérimental. Comme la saturation se fait par deux types de gouttes, les gouttes des pluies incidentes (2 mm) et les égouttages (6 mm), et que les grosses gouttes saturent plus facilement le couvert que les petites gouttes (Herwitz, 1987), nous avons évalué le temps maximal de saturation pour des gouttes de 2 mm de diamètre. Les surfaces inclinées stockent moins d'eau que celles placées à l'horizontale (Herwitz, 1987; Armstrong et Mitchell, 1988; Van Elewijck, 1989a) et le stockage est maximal pour des intensités moyennes de pluie (Mohamound et Ewing, 1990; Loustau et al., 1992a). Par conséquent, l'étude s'est faite sur des échantillons de feuille placés à l'horizontale pour une pluie d'intensité moyenne de 15 mm.h⁻¹ et caractérisée par un D₅₀ de 2.3 mm et de 6 mm.

L'état de surface des feuilles interceptrices pouvant affecter le stockage (Huber et al., 1997; Liu, 1998), le temps de saturation a été évalué pour 2 classes d'âge des échantillons de feuilles. La pluie délivrée au-dessus de l'échantillon de feuille provoque une augmentation du poids de l'échantillon qui se stabilise quand la saturation est atteinte (capacité de stockage maximale, C_{max}). Les variations de poids des échantillons ont été enregistrées toutes les minutes. Les résultats sont présentés en Figure 3.7 pour les deux types de feuille.

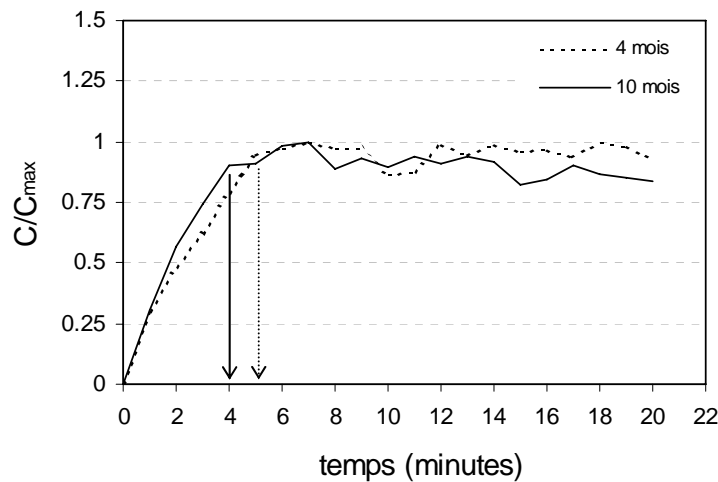


Figure 3.7 : Fonction normalisée de mouillage (C/C_{max}) d'un échantillon de feuille de bananier en fonction de la durée de la pluie, pour des feuilles de 4 mois et des feuilles de 10 mois. Données pour des gouttes de 2.3 mm et une intensité moyenne de pluie de 15 mm.h^{-1} .

Les feuilles plus cireuses semblent atteindre leur capacité de stockage légèrement plus rapidement que celles qui le sont moins. La capacité de stockage est atteinte dès 4 minutes de pluie, pour les échantillons de feuille (10 mois). Pour les échantillons prélevés sur des bananiers de 4 mois, elle est atteinte après 5 minutes de pluie. Des fluctuations importantes des masses d'eau stockées sur les échantillons sont observées après saturation des échantillons de feuille indiquant le détachement, par moment, d'une partie de l'eau préalablement stockée sur leurs surfaces (Herwitz, 1987; Van Elewijck, 1989a).

3.2.2.2 Effets de l'état de surface et de la flexibilité des feuilles sur le stockage

Les effets des caractères « âge » et « position » des échantillon de feuille sur le stockage ont été évalués pour des pluies de $D_{50} = 6 \text{ mm}$. Pour des pluies le $D_{50} = 2.3 \text{ mm}$, seul l'effet plus ou moins cireux donné par le du caractère « âge » a été évalué. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.3. Le seuil de significativité de 10% est précisé.

variable	Valeur	$D_{50} = 6 \text{ mm}$				$D_{50} = 2.3 \text{ mm}$			
		N	C moyen (mm)	Probabilité	Significativité	N	C moyen (mm)	Probabilité	Significativité
Age	4 mois	21	0.15 ± 0.08	0.28	*	15	0.10 ± 0.04	0.2	*
	10 mois	22	0.19 ± 0.1			13	0.13 ± 0.06		
Position	Bord	21	0.14 ± 0.08	0.13	*	15	—	—	—
	Nervure	22	0.19 ± 0.09			13	—		

Tableau 3.3 : Effet de deux états cireux des surfaces des échantillons de feuille (paramètre « âge ») et de leur flexibilité (paramètre « Position ») sur la capacité de stockage C pour des pluie de 6 et 2.3 mm de diamètre médian. N est le nombre d'échantillons utilisés. Le symbole (*) traduit une non significativité des paramètres testés.

Pour des pluies de 6 mm, les échantillons de feuille de jeunes bananiers ont tendance à stocker en moyenne moins d'eau (0.15 ± 0.08 mm) que ceux provenant de bananiers plus âgés (0.19 ± 0.09 mm), bien que cette différence ne soit pas significative ($P > 0.1$).

Cette tendance se retrouve également pour des pluies de 2.3 mm : 0.10 ± 0.04 mm de stockage pour les échantillons de feuille de jeunes bananiers et 0.13 ± 0.06 mm pour ceux provenant de bananiers plus âgés. Pour des pluies de gros diamètres (6 mm), les échantillons prélevés près des nervures tendent à stocker en moyenne davantage d'eau de pluie (0.19 ± 0.08 mm) que ceux prélevés près des bords de feuille (0.14 ± 0.08 mm). Cependant, ces différences ne sont pas significatives ($P > 0.1$).

3.2.2.3 Capacité de stockage en fonction de l'inclinaison des feuilles

La capacité de stockage C a été évaluée pour différentes inclinaisons des échantillons de feuille pour des pluies de 2.3, 3.5 et 6 mm de diamètre médian. Les résultats sont présentés en Figure 3.8.

Le stockage résultant de l'impact des trois diamètres de goutte sur les échantillons de feuille a été mesuré lorsque leurs énergies cinétiques étaient sensiblement les mêmes afin d'évaluer l'effet de la taille des gouttes incidentes. Pour les diamètres de 3.5 et 6 mm, les gouttes atteignaient $215 \mu\text{J}$ (E_{c1}) alors que pour des diamètres de 2.3 mm l'énergie cinétique atteignait 82% de E_{c1} (valeur maximale atteinte pour ce type de gouttes à l'aide du dispositif de mesure).

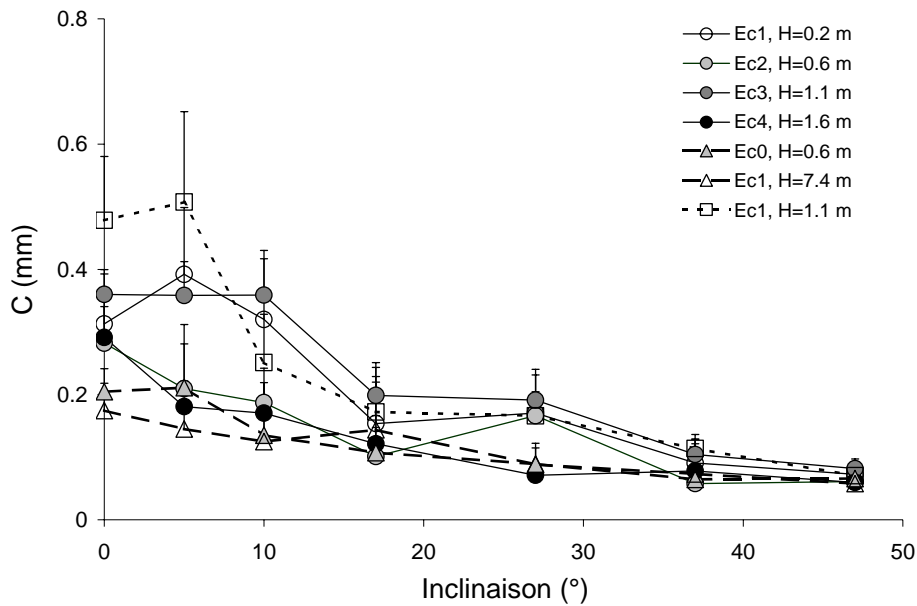


Figure 3.8 : Capacité de stockage des feuilles de bananier recevant des pluies de 2.3 mm (triangles), 3.5 mm (carrés) et 6 mm (cercles) tombant d'une hauteur h . Les énergies cinétiques des gouttes sont de 33.6, 215, 642.3, 1082.6 et 1626 μJ (E_{c0} , E_{c1} , E_{c2} , E_{c3} et E_{c4} respectivement).

Quels que soient les diamètres de gouttes étudiés, la capacité de stockage diminue de façon exponentielle quand l'angle d'inclinaison de feuille augmente. Cette capacité varie peu en fonction du diamètre quand les inclinaisons de feuille sont supérieures à 17° . Le stockage tend à être plus important pour de gros diamètres de gouttes que pour de faibles diamètres. Cependant, parmi les trois tailles de goutte étudiées, la capacité de stockage est maximale

pour les gouttes de pluies de 3.5 mm tombant sur des échantillons horizontaux et de faible inclinaison (5°). En effet, pour des gouttes de 2.3, 3.5 et 6 mm atteignant des énergies cinétiques de l'ordre de 215 μJ , C est égal à 0.18, 0.48 et 0.36 respectivement. De plus, pour des gouttes de pluie de 2.3 et 6 mm tombant de 0.6 m sur des feuilles horizontales, C est égal à 0.2 et 0.28 mm. Et pour des gouttes de pluie de 3.5 et 6 mm tombant de 1.1 m sur des feuilles horizontales, C est égal à 0.48 et 0.36 mm.

Une augmentation de l'énergie cinétique des gouttes de 2.3 mm a peu d'effet sur C car son évolution avec l'inclinaison des échantillons, pour les gouttes de 33.6 μJ (soit 16% de leur énergie cinétique maximale), est pratiquement la même que pour celles de 215 μJ (soit 86% de leur énergie cinétique maximale).

Pour des tailles de gouttes supérieures, le stockage ne semble pas varier avec l'énergie cinétique. En effet, l'évolution de C est la même quelles que soient les inclinaisons des feuilles, pour les gouttes de 6 mm d'énergie cinétique de 215 et 1082.6 μJ d'une part et d'autre part pour les gouttes d'énergie cinétique de 642.3 et 1626 μJ .

3.2.2.4 Discussion

Les feuilles bougent sous l'effet du vent ou pour des intensités de pluie élevées. Aussi, une réduction du stockage s'observe généralement avec le vent (Hormann et al., 1996) ou quand l'intensité de la pluie augmente (Mohamound et Ewing, 1990; Jiménez et Lhomme, 1994). Sous l'impact des gouttes de pluie, les feuilles sont animées d'un mouvement plus ou moins important selon leur flexibilité. De plus, la flexibilité des feuilles joue un rôle dans le stockage car l'impact des gouttes peut être atténué par l'absorption plus ou moins importante de la quantité de mouvement des gouttes (Stedman, 1979). Nous avons observé un faible effet de la flexibilité des feuilles sur la capacité de stockage qui pourrait s'expliquer par une élasticité des feuilles de bananier qui varie peu entre le bord et la nervure. De même, nos résultats n'ont montré aucun effet significatif de l'état cireux des feuilles sur le stockage.

La diminution de la capacité de stockage quand l'angle d'inclinaison des feuilles augmente, confirme le fait que l'angle d'inclinaison des surfaces interceptrices est un facteur important pour l'étude de l'interception (Armstrong et Mitchell, 1988). Le stockage est maximal pour de faibles inclinaisons des échantillons de feuille ($< 10^\circ$).

La capacité de stockage des feuilles de bananier est plus importante pour des gouttes de 3.5 et 6 mm, que pour des gouttes de 2.3 mm. Cette augmentation du stockage avec le diamètre des gouttes incidentes a été également trouvée par Liu (Liu, 1998) pour des couverts de conifères (cyprès et pins). Cependant, à intensité de pluie égale, l'augmentation du diamètre des gouttes incidentes induit une augmentation de l'énergie cinétique des gouttes. Compte tenu d'un moindre stockage observé pour des gouttes de 6 mm par rapport à celles de 3.5 mm, cette augmentation pourrait être limitée à une gamme d'énergie cinétique. En effet, les gros diamètres de gouttes tombant avec de fortes énergies cinétiques peuvent entraîner le détachement de gouttelettes préalablement retenues sur les surfaces d'impact (Herwitz, 1987).

3.2.3 Le splash

3.2.3.1 Limite entre dépôt de gouttes et splash

Des gouttes de 6 mm ont été lâchées de hauteurs de 0.06, 0.08, 0.1, 0.14 et 0.2 m sur des échantillons de feuille horizontaux. Pour chaque hauteur de chute, plusieurs répétitions de lâcher de gouttes étaient faites. Quand cela est possible, le coefficient de splash K_{spl} était mesuré. Le nombre d'Ohnesorge étant fixé pour un diamètre de goutte donné, les énergies

cinétiques Ec , les nombres de Reynolds Re et les coefficients k reliant Oh et Re ont été calculés. Les résultats sont présentés pour chaque hauteur de chute dans le Tableau 3.4.

Hauteur (m)	Ec (μJ)	Oh	Re	We	k	K_{spl}	ΔK_{spl}
0.06	66.1	1.297×10^{-3}	7602.9	97.2	92.05	0	0
0.08	82.5	1.297×10^{-3}	8490.8	121.2	105.7	0	0
0.01	104.5	1.297×10^{-3}	9556	153.5	122.5	0	0
0.14	148	1.297×10^{-3}	11372	217.4	152.3	0.007	0.005
0.2	215	1.297×10^{-3}	13714.6	316.2	192.4	0.076	0.046

Tableau 3.4 : Paramètres K_{spl} mesuré et We , Re , Oh et k calculés pour de gouttes de 6 mm tombant de hauteurs différentes. ΔK_{spl} est l'écart-type des mesures de K_{spl} .

Le splash apparaît pour une hauteur de chute minimale de 0.14 m. Pour cette hauteur, le splash reste très faible dans la mesure ou il représente 0.07% ($\pm 0.05\%$) de la pluie incidente ($K_{spl} = 0.007$). Ce seuil correspond à un nombre de Weber critique de 217.4, ce qui se traduit par une valeur critique de Re de 11372, Oh restant constant (cf. Eq. 1.6). En exprimant Oh en fonction de Re (cf. I.2.2.1), on constate que le splash ne s'effectue que pour des valeurs de k supérieures ou égales à 152.3 ($Oh \geq 152.3 Re^{-1.25}$, Eq. 1.5). Cette valeur est supérieure à celle de 57.7 calculée par Mundo (Mundo et al., 1995) pour des diamètres de goutte compris entre 60 et 150 μm , et peu éloignée de celle de 132.3 trouvée par Ohnesorge (Ohnesorge, 1936), pour des diamètres de gouttes compris entre 0.7 et 4 mm. En conséquence, on peut supposer que la pente de la relation reliant Oh à $Re^{-1.25}$ augmenterait avec la taille des gouttes incidentes.

3.2.3.2 Effets de l'état de surface et de la flexibilité des feuilles sur le splash

Les effets de l'état de surface (âge) et de la flexibilité (position) des feuilles sur le coefficient de splash K_{spl} ont été évalués à l'aide d'une analyse par la méthode des modèles linéaires généraux (Proc GLM de SAS (SAS Institute Inc., 1987)). Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.5. Le seuil de significativité est de 10%.

Variable	Valeur	$D_{50} = 6 \text{ mm}$				$D_{50} = 2.3 \text{ mm}$			
		N	K_{spl} moyen	Probabilité	Significativité	N	K_{spl} moyen	Probabilité	Significativité
Age	4 mois	21	0.22 ± 0.2	0.18	*	15	0.52 ± 0.1	0.98	*
	10 mois	22	0.34 ± 0.3			13	0.52 ± 0.1		
Position	Bord	21	0.24 ± 0.2	0.4	*	15	—	—	—
	Nervure	22	0.32 ± 0.2			13	—		

Tableau 3.5 : Effet ds caractères « âge » et « position » des échantillons de feuille sur le coefficient de splash K_{spl} pour des pluie de 6 et 2.3 mm de diamètre médian. N est le nombre d'échantillons utilisés. Le symbole (*) traduit une non significativité des paramètres testés.

Pour des pluies incidentes de 2.3 mm de diamètre, les feuilles des bananiers adultes ont tendance à produire en moyenne plus de splash ($K_{spl} = 0.34 \pm 0.2$) que les feuilles de jeunes bananiers ($K_{spl} = 0.22 \pm 0.2$). Les échantillons prélevés près des nervures tendent également à produire en moyenne plus de splash ($K_{spl} = 0.32 \pm 0.2$) que ceux prélevés près de bords de

feuille ($K_{spl} = 0.24 \pm 0.2$). Pour des égouttages caractérisés par de plus gros diamètres de gouttes, aucun effet de l'âge et donc, de l'aspect cireux des feuilles n'a été trouvé : le coefficient $K_{spl} = 0.52 \pm 0.1$, quel que soit l'âge des bananiers. Globalement, l'âge des bananiers et la position du prélèvement des échantillons sur le limbe n'ont pas d'effet significatif sur le coefficient de splash ($P > 0.1$). De plus, aucune interaction entre l'état cireux et la flexibilité des feuilles (paramètre « Age×Position ») n'a été établie ($P > 0.1$).

3.2.3.3 Evaluation du splash en fonction de l'inclinaison des échantillons

Le coefficient de splash a été mesuré pour des pluies caractérisée par un diamètre median de 2.3, 3.5 et 6 mm. Différentes inclinaisons de feuilles et caractéristiques des gouttes (diamètre, énergie cinétique et hauteur de chute dans le cas des égouttages) ont été testées (cf. 3.2.2.3) (Figure 3.9).

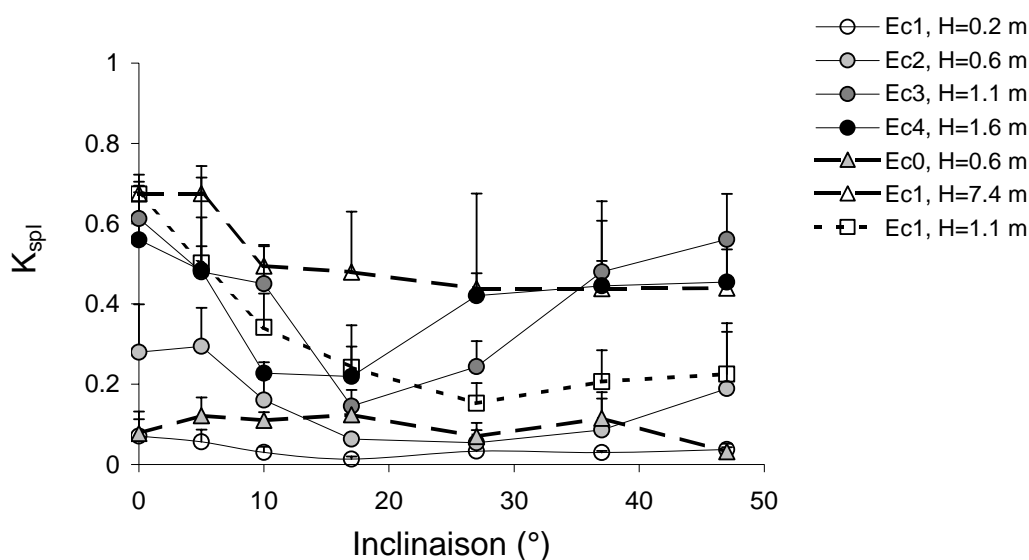


Figure 3.9 : Coefficient de splash K_{spl} des feuilles de bananier recevant des pluies de 2.3 mm (triangles), 3.5 mm (carrés) et 6 mm (cercles) de diamètre, tombant à une hauteur h et pour différentes inclinaisons de feuille. Les énergies cinétiques des gouttes sont de 33.6, 215, 642.3, 1082.6 et 1626 μJ (Ec_0 , Ec_1 , Ec_2 , Ec_3 et Ec_4 respectivement).

Globalement, le coefficient de splash K_{spl} est maximal quand les échantillons de feuille sont horizontaux et il diminue quand l'angle d'inclinaison des feuilles augmente. Cette tendance est particulièrement marquée pour des petites gouttes (2.3 mm). Pour des pluies de 3.5 et 6 mm de diamètre, K_{spl} suit la même tendance jusqu'à un seuil d'inclinaison de 17° des échantillons de feuille. Au-delà de ce seuil, K_{spl} croît avec l'inclinaison. Cette croissance pour des angles de feuille plus importants est plus marquée pour de fortes énergies cinétiques de goutte. Aussi, pour des diamètres de 6 mm atteignant des énergies cinétiques supérieures à 642.3 μJ , les valeurs de K_{spl} à 47° d'inclinaison varient entre ($K_{spl}(17^\circ)+0.2$) et ($K_{spl}(17^\circ)+0.4$).

Pour des gouttes de 2.3 mm atteignant au moment de l'impact une énergie cinétique de 33.6 μJ , le coefficient de splash varie peu avec l'angle des échantillons et est voisin de 0.1. Lorsque ces mêmes gouttes atteignent une énergie voisine de 215 μJ , K_{spl} atteint une valeur

maximale de 0.68 pour 0° et 5° . Puis, il décroît brusquement pour une inclinaison de 10° , puis doucement entre 17° et 47° d'inclinaison pour atteindre un plateau à 0.44.

Toutefois, l'augmentation du splash avec l'énergie cinétique des gouttes semble être limitée car, pour des inclinaisons d'échantillon inférieures à 17° , le splash produit par des gouttes de 6 mm atteignant une énergie cinétique de 1626 μJ est inférieur à celui produit par ces mêmes diamètres de gouttes atteignant une énergie cinétique plus faible de 1082.6 μJ . Pour résumer, à même énergie cinétique, les gouttes de faible diamètre semblent produire davantage de splash que celles de gros diamètre, quelle que soit l'inclinaison de la feuille.

Pour une même hauteur de chute, aucun effet combiné de l'énergie cinétique et du diamètre n'a pu être déterminé. Les gouttes de 3.5 et 6 mm produisent autant de splash lorsqu'elles tombent de 1.1 m, alors que le splash produit par des gouttes de 6 mm est plus important que celui produit par des gouttes de 2.3 mm, pour des hauteurs de chute de 0.6 m. Enfin, la variabilité de la mesure du splash est importante pour les diamètres de 3.5 et 6 mm et augmente avec l'énergie cinétique des gouttes d'impact.

3.2.3.4 Discussion

L'apparition du splash produit par des gouttes gravitaires de 6 mm est tributaire des hauteurs de chute de ces gouttes. En étudiant, en fonction des hauteurs de chute, les grandeurs adimensionnées qui traduisent les forces de pression (pression de Bernoulli) et de cisaillement sur les gouttes, notre étude a montré que le splash des gouttes gravitaires apparaissait pour une hauteur de chute minimale de 0.14 m, ce qui correspond à un nombre de Weber de l'ordre de 217 et un coefficient k de 152.3, reliant les nombres Oh et $Re^{1.25}$. La valeur de We trouvée se rapproche de celle calculée par Rieber et Frohn ($We=200$) (Rieber et Frohn, 1999) tandis que le coefficient k semble croître avec la taille des gouttes avant l'impact puisque, pour des diamètres variant entre de 0.7 et 4 mm, k était de l'ordre de 132.3 (Ohnesorge, 1936) et pour des diamètres compris entre 0.06 et 0.15 mm, il était de 57.7 (Mundo et al., 1995).

Bien qu'aucun effet significatif de la flexibilité et de l'état de surface des feuilles de bananier n'ait été trouvé, les feuilles jeunes plus cireuses et celles plus flexibles ont tendance à produire moins de splash. Ces résultats sont en accord avec ceux de Huber (Huber et al., 1997) pour le splash produit par des feuilles cireuses de Colza et celles à duvet du Tabac. Les résultats sur l'effet de la flexibilité des feuilles sur le splash s'opposent aux résultats de plusieurs études (Stedman, 1979; Herwitz, 1987; Fitt et al., 1992), ce qui laisse penser que la variation de l'état de surface des feuilles de bananiers âgés de 4 et 10 mois n'était pas suffisante pour observer ce même effet. De plus, la flexibilité des barres en aluminium, sur lesquelles ont été posés les échantillons de feuille, a peut-être biaisé l'effet de la flexibilité des deux types d'échantillon utilisés.

La diminution du splash quand l'angle des feuilles de bananiers augmente est en accord avec d'autres études reliant le splash et l'inclinaison des surfaces interceptrices. En effet, que ce soit pour des feuilles (Fitt et al., 1992; Huber et al., 1997) ou des branches (Herwitz, 1987), le splash diminue pour de fortes inclinaisons des surfaces interceptrices. Cette décroissance du splash est plus importante pour les grosses gouttes que pour les gouttes de faibles diamètres (Huber et al., 1997; Geagea et al., 1999). Les masses d'eau éclaboussées à la surface des feuilles sont en effet plus importantes lorsque le splash est produit à partir de gouttes de diamètre important (Huber et al., 1997).

Bien que le splash diminue lorsque l'angle d'inclinaison des feuilles augmente, pour des inclinaisons importantes ($>27^\circ$) et pour des gouttes de gros diamètres (3.5 et 6 mm), on observe une augmentation du splash. Une même augmentation du splash produit par des gouttes de 6.2 et 3.2 mm qui s'écrasaient sur des cibles de sable inclinées à 45° a été observée par Ghadiri et Payne (Ghadiri et Payne, 1988).

La croissance du splash avec l'énergie cinétique des gouttes pour les échantillons de feuille de bananier rejoint les précédentes études faites sur les surfaces de feuille de blé (Geagea et al., 1999) ou sur le sol (Moss et Green, 1987; Van Dijk et al., 2003).

3.2.4 Hauteur maximale du splash

3.2.4.1 Effets de l'état de surface et de la flexibilité des feuilles sur la hauteur maximale du splash

Les hauteurs maximales H_{spl} atteintes par les gouttelettes de splash produites par des gouttes de 2.3, 3.5 et 6 mm de diamètre ont été mesurées pour l'ensemble des inclinaisons de feuille étudiées et l'effet de l'âge des feuilles et de leur flexibilité sur ces hauteurs a été évalué par analyse de variance (Proc GLM de SAS (SAS Institute Inc., 1987)), pour des gouttes incidentes de 6 mm et 2.3 mm. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.6 pour un seuil de significativité de 10%.

variable	Valeur	D ₅₀ = 6 mm				D ₅₀ = 2.3 mm			
		N	H _{spl} moyen (cm)	Probabilité	Significativité	N	H _{spl} moyen (cm)	Probabilité	Significativité
Age	4 mois	21	3.63 ± 3.7	0.37	*	15	3.33 ± 2.3	0.69	*
	10 mois	22	5.19 ± 5.4			13	3.69 ± 2.5		
Position	Bord	21	3.88 ± 4.8	0.61	*	15	–	–	–
	Nervure	22	4.92 ± 4.5			13	–		

Tableau 3.6 : Effet de deux états cireux des surfaces des échantillons de feuille (paramètre « âge ») et de leur flexibilité (paramètre « Position ») sur H_{spl} moyen, la hauteur maximale du splash H_{spl} moyennée sur l'ensemble des inclinaisons de feuille, pour des pluies de 6 et 2.3 mm de diamètre médian. N est le nombre d'échantillons utilisés. Le symbole (*) traduit une non significativité des paramètres testés.

Les hauteurs de splash varient dans le même sens que K_{spl} . Lorsqu'elles sont atteintes par des gouttes incidentes de 6 mm, les feuilles du bananier adulte ont tendance à produire des gouttelettes de splash à des hauteurs plus élevées (5.19 ± 5.4 cm de haut) que celles produites par les feuilles de bananier plus jeunes (3.63 ± 3.7 cm de haut). Les hauteurs maximales de splash atteintes sur les échantillons prélevés près de la nervure sont également légèrement plus élevées (4.92 ± 4.5 cm de haut) que celles produites sur des bords de limbe (3.88 ± 4.8 cm de haut). Pour des gouttes incidentes de 2.3 mm, la même tendance s'observe en ce qui concerne l'effet de l'âge sur les hauteurs moyennes de splash. En effet, les hauteurs de splash atteintes sont de 3.33 ± 2.3 cm pour les échantillons prélevés sur les jeunes feuilles et de 3.69 ± 2.5 cm pour ceux prélevés sur les feuilles de bananier adulte. Cependant, aucun effet significatif de l'âge ($P > 0.1$) et de la position des échantillons sur le limbe ($P > 0.1$) n'a été trouvé.

En comparant les hauteurs maximales atteintes par les gouttelettes de splash produites par les deux diamètres de goutte étudiés, on constate que les feuilles des bananiers âgés de 10 mois produisent du splash à des hauteurs en moyenne légèrement plus élevées que celles des bananiers de 4 mois.

3.2.4.2 Hauteur maximale du splash en fonction de l'inclinaison des échantillons

Les hauteurs maximales atteintes par le splash produites des gouttes incidentes de 2.3, 3.5 et 6 mm de diamètre ont été mesurées pour différentes inclinaisons des échantillons de feuille et pour différentes hauteurs de chute des gouttes, h (Figure 3.10).

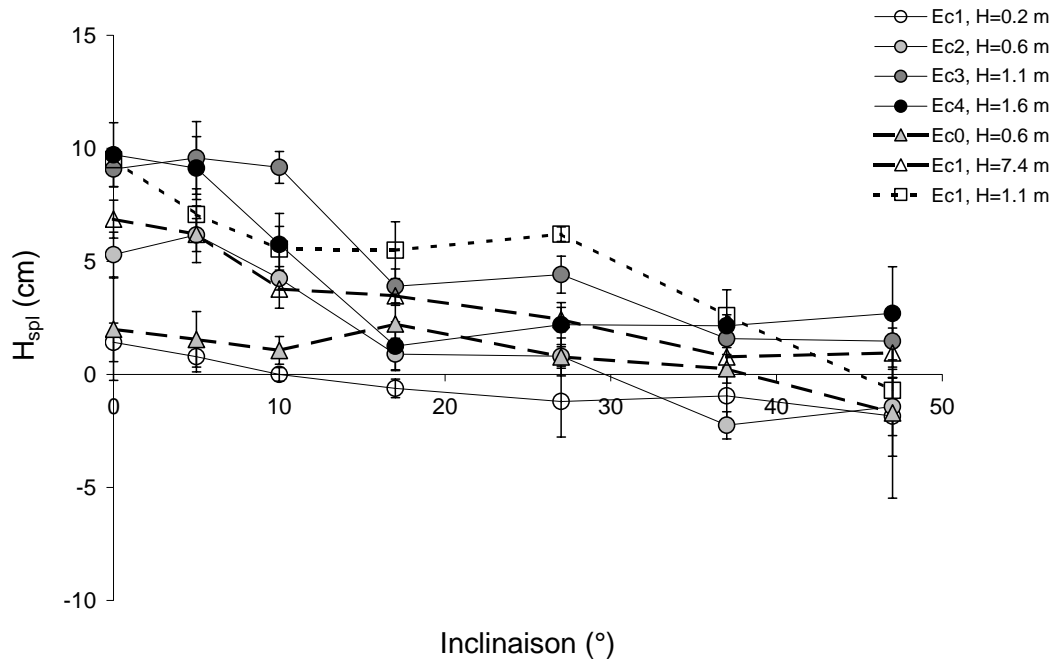


Figure 3.10 : Hauteur maximale atteinte par les gouttelettes de splash produites par des gouttes de 2.3 mm (triangles), 3.5 mm (carrés) et 6 mm (cercles) de diamètre tombant à une hauteur h sur des échantillons de feuille de bananier et selon différentes inclinaisons. Les énergies cinétiques des gouttes sont de 33.6, 215, 642.3, 1082.6 et 1626 μJ (E_{c0} , E_{c1} , E_{c2} , E_{c3} et E_{c4} respectivement).

La hauteur maximale du splash produit pour les trois diamètres de gouttes diminue quand l'angle d'inclinaison des surfaces interceptrices augmente. Lorsque les surfaces interceptrices sont inclinées à plus de 30°, elle devient négative, traduisant que les gouttelettes sont ainsi projetées en dessous du niveau moyen de l'échantillon. Pour de faibles inclinaisons des échantillons (0°, 5° et 17°), on observe peu de variation de H_{spl} . De plus, lorsque les gouttes ont une énergie cinétique faible au moment de l'impact, les hauteurs de splash varient peu.

Pour une même hauteur de chute (lâcher de 0.6 m), les gouttes de 6 mm produisent des splash plus hauts que les gouttes de 2.3 mm quelle que soit l'inclinaison des échantillons. Par contre, pour une hauteur de chute de 1.1 m, les gouttes de 6 mm produisent du splash en moyenne plus haut que les gouttes de 3.5 mm quand les échantillons sont inclinés à moins de 17°. En augmentant l'énergie cinétique des gouttes de 6 mm, la hauteur maximale du splash augmente jusqu'à un certain seuil. Ainsi, les gouttes de 6 mm ayant une énergie cinétique de 1626 μJ produisent des gouttelettes de splash atteignant des hauteurs identiques à celles produites par des gouttes incidentes de 3.5 mm ayant une énergie cinétique de 215 μJ , ceci pour des inclinaisons des échantillons de 0° et 5°. Pour des inclinaisons supérieures, le splash des gouttes de 3.5 mm est plus élevé que celui des gouttes de 6 mm.

3.2.4.3 Discussion

En considérant que les hauteurs de splash augmentent avec l'angle d'éjection des gouttes (Macdonald et McCartney, 1987; Pietravalle et al., 2001), les hauteurs de splash seraient réduites en présence de feuilles flexibles qui absorbent l'énergie cinétique des impacts de gouttes (Stedman, 1979; Fitt et al., 1992; Huber et al., 1998) et en conséquence, limitent celle transmise aux gouttelettes de splash produites. D'autre part, le splash augmente lorsque la mouillabilité des feuilles diminue (Mundo et al., 1995; Huber et al., 1997). Aussi, les hauteurs de splash diminueraient sur des feuilles flexibles ou cireuses. Cependant, nos résultats ne montrent pas d'effet réel de la flexibilité et de l'état cireux des surfaces de feuille de bananier sur les hauteurs de splash. Le peu de variation de la flexibilité des feuilles de bananier et de leur état cireux pourrait expliquer nos résultats. De plus, la tension interne des feuilles pourrait atténuer la différence entre les états cireux des surfaces et masquer l'effet de la cire.

Pour un même diamètre de goutte (2.3 et 6 mm), les hauteurs de splash augmentent avec l'énergie cinétique des gouttes et donc avec leur vitesse. Ce résultat rejoint ceux précédemment obtenus par Pietravalle et ses collègues (Pietravalle et al., 2001). Cependant, à même énergie cinétique, les hauteurs de splash atteintes par des gouttes de faible diamètre (celles de 2.3 mm tombant à 762 m.s^{-1} et de 3.5 mm tombant à 437.5 m.s^{-1}) sont supérieures à celles atteintes par des gouttes de plus gros diamètre (celles de 6 mm tombant à 195 m.s^{-1}). En conséquence, autant le diamètre que la vitesse des gouttes d'impact affectent les hauteurs de splash (Macdonald et McCartney, 1987; Shaw, 1987; Geagea et al., 1999; Saint-Jean et al., 2003). De plus, Macdonald et McCartney (Macdonald et McCartney, 1987) ont montré que pour des gouttelettes de splash de 0.2 mm, les hauteurs de splash étaient inférieures à celles atteintes par des gouttelette de splash de 1 mm lorsque ces gouttes étaient projetées du point d'impact à même vitesse initiale et même angle d'éjection. Cette tendance des plus grosses gouttelettes de splash à atteindre des hauteurs plus importantes a été également trouvée par Saint-Jean et ses collègues (Saint-Jean et al., 2003). Macdonald et McCartney ont également montré un effet plus conséquent de la résistance aérodynamique de l'air sur les petits diamètres que pour les gros diamètres de gouttes (Macdonald et McCartney, 1987). Ceci pourrait expliquer le fait que les gouttes de 3.5 mm (tombant de 1.1 m de haut) et celles de 2.3 mm (tombant de 0.6 m de haut) produisent des gouttelettes de splash atteignant de plus faibles hauteurs que celles de 6 mm. Cependant, nos expérimentations ont montré que cette tendance ne s'observait que pour des inclinaisons des échantillons de feuille de bananier inférieures à 17° .

Les hauteurs atteintes par les gouttelettes de splash résultant des impacts de gouttes sur les échantillons de feuille de bananier restent inférieures en moyenne à 11 cm. Sur le plan épidémiologique, ces valeurs permettent d'émettre l'hypothèse selon laquelle le splash ne pourrait être en lui seul un vecteur de propagation de la Cercosporiose dans le feuillage du bananier. En effet, compte tenu des différences d'altitude entre les feuilles du bananier (supérieurs en général à 20 cm) et des faibles hauteurs de splash (10 cm au plus), on peut difficilement envisager des remontées de gouttelettes de splash dans le couvert. Les hauteurs de splash trouvées restent faibles comparées à celles obtenues pour des gouttes de pluie de 4 à 5 mm s'écrasant sur des cibles liquides de 0.5 mm d'épaisseur contenant des spores de *Pseudocercospora herpotrichoides* et qui atteignaient en majeure partie des hauteurs de l'ordre de 20 cm (Fitt et Lysandrou, 1984). En conséquence, la propagation de certaines maladies du bananier par dispersion des spores serait associée à d'autres facteurs. De plus, les inclinaisons moyennes des triangles foliaires sont comprises entre 30° et 40° (cf. 3.1.3). Aussi, les hauteurs de splash négatives obtenues pour des inclinaisons des échantillons

supérieures à 30° laissent supposer que la majeure partie des gouttelettes de splash atteignent les parties inférieures des bananiers ou le sol.

Les études menées sur le développement de la Cercosporiose du bananier, causée par un champignon *Mycosphaerella fijiensis*, ont montré que la dispersion de la maladie se faisait par ascospores et conidies utilisant le vent et le splash (principalement pour les ascospores) et le lessivage sur le feuillage comme vecteur de propagation (Marin et al., 2003; Coste et al., 2004). La contamination des plantes se faisant principalement par le dépôt des ascospores sur la partie inférieure du cigare (feuille nouvellement formée à l'extrémité du pseudo-tronc pas encore développée) qui est exposée au vent (Marin et al., 2003; Coste et al., 2004), nos résultats sur les hauteurs de splash atteintes confirmeraient le mode de dispersion des champignons : la dispersion se ferait effectivement du cigare vers les basses feuilles, par splash ou écoulement.

3.2.5 Mesure de la proportion d'eau transmise en throughfall

3.2.5.1 Coefficient de transmission d'eau en fonction de l'inclinaison des échantillons

Le coefficient de transmission de la pluie K_t a été calculé comme étant le rapport entre la pluie incidente reçue par l'échantillon de feuille sur la pluie distribuée en égouttage sous cet échantillon. Les résultats sont présentés en Figure 3.11.

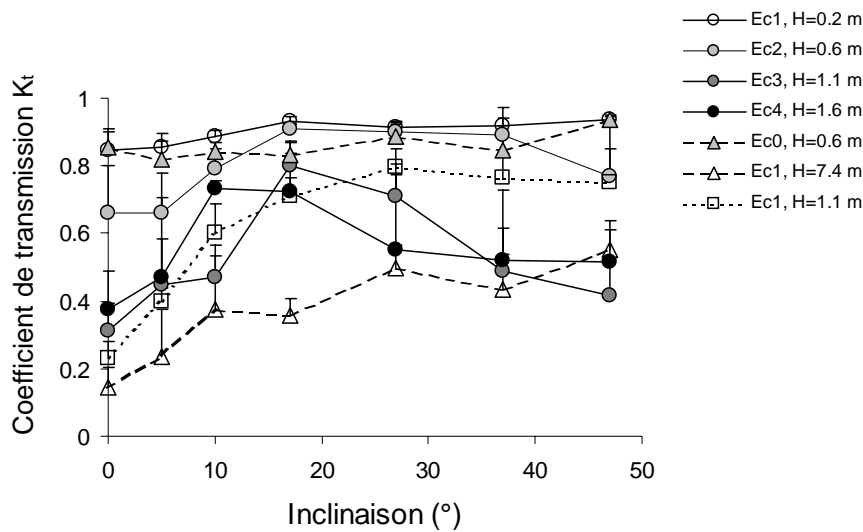


Figure 3.11 : Coefficient de transmission K_t des feuilles de bananier recevant des pluies de 2.3 mm (triangles), 3.5 mm (carrés) et 6 mm (cercles) de diamètre, tombant à une hauteur h et selon différentes inclinaisons de feuille. Les énergies cinétiques des gouttes sont de 33.6, 215, 642.3, 1082.6 et 1626 μJ (Ec0, Ec1, Ec2, Ec3 et Ec4 respectivement).

De façon générale, K_t croît avec l'inclinaison de l'échantillon. Cette croissance est plus importante pour de fortes énergies cinétiques ou de gros diamètres de gouttes. En effet, pour des inclinaisons variant entre 0 et 27°, 3.96% et 247.7% d'augmentation de K_t sont observées pour des gouttes de 2.3 mm atteignant 33.6 μJ (lâcher de 0.6 m) et 215 μJ (lâcher de 7.4 m) alors que 36.56% et 127.87% d'augmentation est observé pour des gouttes de 6 mm de diamètre atteignant 215 μJ et 642.3 μJ . Cependant, l'augmentation de 247.7% mesurée pour des gouttes de 2.3 mm de diamètre ne peut être uniquement liée à une augmentation

d'énergie cinétique dans la mesure où, pour un lâcher de goutte à 7.4 m de haut, l'intensité de pluie de 15 mm.h^{-1} délivrée par le mini simulateur de pluie représentait 1/3 de celle utilisée pour un lâcher à 0.6 m.

Pour une même hauteur de chute, le coefficient de transmission varie peu en fonction du diamètre des gouttes incidentes. Pour des gouttes de pluie de différentes tailles atteignant les échantillons avec une même énergie cinétique, K_t est plus élevé pour les grosses gouttes : il varie de 0.85 à 0.94 pour des gouttes incidentes de 6 mm, de 0.23 à 0.8 pour celles de 3.5 mm et enfin entre 0.14 et 0.55 pour celles de 2.3 mm.

Lorsque l'énergie cinétique des gouttes incidentes de 2.3 mm augmente, K_t diminue. Lorsque ces gouttes atteignent $33.6 \mu\text{J}$, K_t croît de 0.85 (pour des échantillons de feuille à l'horizontale) à 0.94 (pour des échantillons de feuille inclinés à 47°). Alors que lorsqu'ils atteignent près de $215 \mu\text{J}$, K_t croît de 0.14 (pour des échantillons de feuille à l'horizontale) à 0.55 (pour des échantillons de feuille inclinés à 47°). Pour des gouttes de 6 mm de diamètre, cette corrélation négative avec l'énergie cinétique s'atténue pour de plus fortes énergies cinétiques ($1626 \mu\text{J}$), soit dès qu'elles atteignent 14.1 % de leur énergie cinétique maximale (cf. Tableau 2.1). De plus, pour ces gros diamètres, l'augmentation du coefficient de transmission en fonction de l'inclinaison des échantillons n'est pas toujours vérifiée puisque K_t diminue pour des inclinaisons supérieures à 17° et des énergies cinétiques supérieures à $642.3 \mu\text{J}$. Cette diminution est plus marquée pour les énergies cinétiques de $1082.6 \mu\text{J}$ et $1626 \mu\text{J}$ que pour $642.3 \mu\text{J}$. Pour une inclinaison de 17° , on constate toutefois que pour des énergies cinétiques supérieures à $642.3 \mu\text{J}$, K_t varie entre $(K_t - 0.39)$ et $(K_t - 0.16)$.

3.2.5.2 Discussion

Les écoulements sous forme de stemflow et throughfall sont fonction de la pente des surfaces interceptrices (branches et feuilles) (Herwitz, 1987; Van Elewijck, 1989a; Nàvar, 1993). En admettant que l'eau transmise va constituer le stemflow ou le throughfall, les variations de K_t peuvent être analysées à partir des données existantes caractérisant l'un ou l'autre.

Le coefficient de transmission maximal des feuilles de bananier a été mesuré pour des inclinaisons variant entre 17° et 47° . Van Elewijck (Van Elewijck, 1989a) a montré que pour des feuilles de maïs, le stemflow augmentait d'abord pour des inclinaisons de feuille entre 10° et 20° , puis diminuait suivant une fonction puissance négative. Cette diminution étant plus marquée pour de fortes intensités de pluie. Pour une graminée, la Molinie, le stemflow est maximal pour des feuilles inclinées entre 50° et 70° , pour de fortes intensités de pluie, et autour de 50° pour de faibles intensités. Pour des branches isolées d'arbre, le stemflow augmente brusquement entre 5° et 10° d'inclinaison, pour atteindre son maximum à 20° , puis diminue pour des angles supérieurs (Van Elewijck, 1989a). Par contre, l'étude menée sur des branches par Herwitz a montré que le stemflow était maximal quand les branches étaient inclinées à 60° (Herwitz, 1987). Un stemflow maximal a été également obtenu pour des arbustes présentant des branches généralement inclinées à plus de 70° et des feuilles érigées (Nàvar, 1993).

Dans le cas des petits diamètres de gouttes (2.3 mm) de faibles énergies cinétiques, l'évolution des écoulements en fonction des inclinaisons des feuilles de bananier se rapproche davantage de celle obtenue par Van Elewijck pour la Molonie (Van Elewijck, 1989a). Pour de fortes inclinaisons et de gros diamètres de gouttes (3.5 et 6 mm), nos résultats montrent que les écoulements se rapprochent du stemflow mesuré pour des branches isolées d'arbre, diminuant pour les fortes inclinaisons de branche. Nos expérimentations ont

confirmé que pour des fortes inclinaisons, le stemflow et le throughfall diminuaient. En comparant K_t et K_{spl} , on constate que leurs variations sont opposées : le coefficient K_t diminue de 16% à 39% quand le coefficient K_{spl} est augmenté d'une valeur de 0.2 à 0.4 (soit de 20% à 40%). En appliquant ces variations à l'équation de bilan définissant la pluie transmise (cf. 2.3.2), on constate que cette diminution de K_t serait directement liée à la projection par splash des gouttes préalablement stockées sur les feuilles.

Bien que les études antérieures sur des feuilles de maïs ou herbacées aient montré que les écoulements transmis variaient avec l'inclinaison des feuilles et l'intensité de la pluie incidente, elles ne se sont pas intéressées à l'effet de l'énergie cinétique des gouttes sur ces écoulements. Les variations du coefficient de transmission pour les feuilles de bananier montrent que ce paramètre affecte fortement les écoulements et en ce sens, doit être pris en compte pour déterminer aussi bien le stemflow que le throughfall.

3.2.6 Modélisation des lois d'interception

3.2.6.1 Introduction

Pour modéliser la capacité de stockage et le splash, nous avons cherché à établir des lois empiriques pouvant être appliquées directement à chaque triangle de feuille traité par le modèle DROP. Deux lois doivent être utilisées, l'une décrit la capacité de stockage, et l'autre les pertes par splash en fonction de l'inclinaison de la surface interceptrice, du diamètre des gouttes incidentes caractérisant la pluie primaire et secondaire, et la hauteur de chute des gouttes, en particulier pour la pluie secondaire.

Les paramètres des modèles ont été ajustés pour chaque inclinaison θ et chaque diamètre de goutte D , par la procédure Proc NLIN de SAS en utilisant la méthode des moindres carrés de Gauss-Newton (SAS Institute Inc., 1987).

Les modèles décrivant la capacité de stockage C et le coefficient de splash K_{spl} ont été établis pour des diamètres de gouttes de 2.3 et 6 mm caractérisant respectivement les diamètres médians de la pluie incidente et de la pluie secondaire. Les différents paramètres des modèles ont été ajustés en prenant en compte les capacités de stockage et les coefficients de splash mesurés pour des diamètres de 3.5 mm pour différentes inclinaisons des échantillons de feuille et une hauteur de chute.

3.2.6.2 Modélisation de la capacité de stockage

Nous venons de voir que les variations d'énergie cinétique, obtenues en faisant varier les hauteurs de chute des gouttes (2.3 et 6 mm de diamètre), n'affectaient pas la capacité de stockage. La capacité de stockage C était maximale pour des feuilles horizontales et décroissait quand leur inclinaison augmentait. De plus, le stockage était davantage affecté par l'inclinaison des feuilles que par la taille des gouttes. Aussi, pour définir le stockage à saturation des feuilles, nous avons utilisé un modèle additif d'une fonction exponentielle négative et d'une fonction puissance négative. Ces deux modèles sont fonction de

- l'inclinaison θ de l'échantillon de feuille (angle que fait la feuille par rapport à l'horizontale).
- 4 paramètres $\gamma(D)$, $\lambda(D)$, $\alpha(D)$ et $\beta(D)$ dépendant du diamètre médian (D) des gouttes incidentes.

La loi décrivant les variations de la capacité de stockage est donnée par l'équation suivante :

$$C = \left[\gamma(D) \times e^{-\lambda(D) \times \theta^2} \right] + \frac{\alpha(D)}{\beta(D) + \theta^2} \quad \text{Eq. 3.2}$$

L'ajustement des coefficients $\gamma(D)$, $\lambda(D)$, $\alpha(D)$ et $\beta(D)$ pour des gouttes de 2.3, 3.5 et 6 mm donne :

Diamètre mm	γ	λ	α	β	R ²
2.3	0.108	0.00033	6.28	74.58	0.74
3.5	0.11	0.00028	36.74	90.71	0.94
6	0.106	0.00033	37.98	182.2	0.91

Tableau 3.7 : Coefficients γ , λ , α et β déterminant la loi de stockage à saturation des échantillons de feuille, pour les 3 diamètres de gouttes.

Les coefficients $\gamma(D)$, $\lambda(D)$, $\alpha(D)$ et $\beta(D)$ ont été estimés avec une bonne précision ($0.74 \leq R^2 \leq 0.94$). Les coefficients γ et λ varient peu pour les trois diamètres de goutte, par contre α et β varient de façon plus importante. Finalement, la loi exprimant la capacité de stockage dépendra de :

- l'angle θ que fait la feuille par rapport à l'horizontale.
- deux paramètres $\alpha(D)$ et $\beta(D)$ qui sont fonction du diamètre médian des gouttes incidentes.
- deux constantes γ et λ égales à 0.108 et 0.0003.

Les valeurs obtenues pour $\alpha(D)$ et $\beta(D)$ semblent montrer que $\beta(D)$ croît de façon exponentielle avec le diamètre D et que $\alpha(D)$ croît de façon logarithmique avec D en se stabilisant pour des diamètres supérieurs à 3.5 mm.

La loi décrivant le stockage de la pluie incidente, correspondant à des diamètres médians de 2.3 mm, a été choisie de la forme suivante :

$$C = \left[0.108 \times e^{(-0.0003 \times \theta^2)} \right] + \frac{6.28}{74.58 + \theta^2} \quad \text{Eq. 3.3}$$

La loi décrivant le stockage de la pluie secondaire issu de l'égouttage des feuilles de bananier, correspondant à des diamètres médians de 6 mm, est donnée par l'équation suivante :

$$C = \left[0.108 \times e^{(-0.0003 \times \theta^2)} \right] + \frac{37.8}{182.2 + \theta^2} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Afin d'évaluer ce modèle, les données simulées ont alors été comparées à celles mesurées (Figure 3.12).

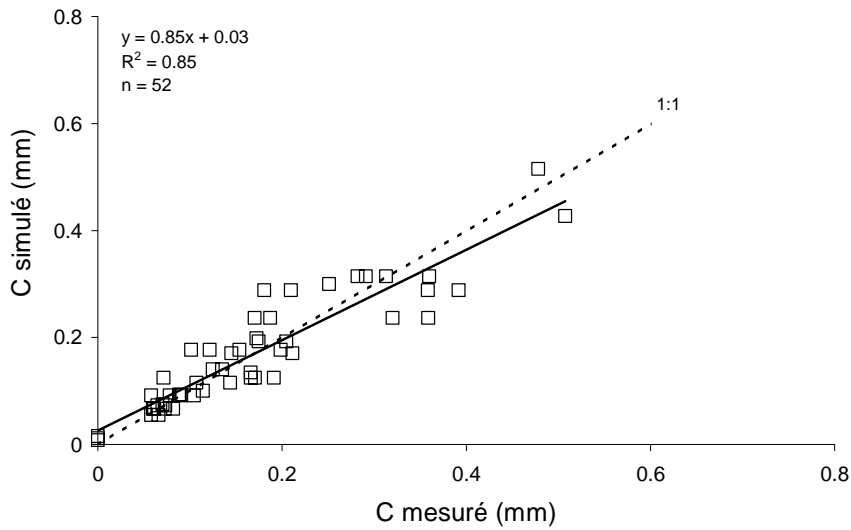


Figure 3.12 : Comparaison entre la capacité de stockage mesurée et simulée pour 52 données regroupant l'ensemble des diamètres (2.3, 3.5 et 6 mm), des inclinaisons d'échantillon de feuille et des énergies cinétiques étudiées. La régression est représentée par le tracé continu et la première bissectrice est en pointillés.

Le modèle composé des équations 3.2 et 3.3 fournit une assez bonne estimation la capacité de stockage C . Cependant, il tend à surestimer légèrement la capacité C pour des valeurs comprises entre 0.2 et 0.3 mm et à la sous-estimer pour celles comprise entre 0.3 et 0.4 mm. Cette première gamme de capacités de stockage correspond aux valeurs obtenues pour une inclinaison de 17° des feuilles. Précédemment, il a été vu que cet angle constituait un seuil pour les trois diamètres étudiés car, à partir de cette inclinaison, la décroissance de C se faisait de façon moins rapide quand l'inclinaison des échantillons augmentait. La gamme de C comprise entre 0.3 et 0.4 mm correspond aux capacités de stockage des gouttes de 6 mm. Pour cette gamme le modèle sous estime légèrement le stockage. Cette gamme de valeurs correspond à des inclinaisons des feuilles inférieures à 10° .

3.2.6.3 Modélisation du splash

Le splash a été évalué à l'aide d'un coefficient de splash K_{spl} exprimant la proportion d'eau de pluie produisant des gouttelettes de splash, terme de perte dans le bilan hydrique de chaque élément foliaire traité par DROP. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient de splash diminuait rapidement avec l'angle d'inclinaison des feuilles pour de faibles angles et que cette décroissance était plus marquée pour de fortes énergies cinétiques et de gros diamètres de goutte. Aussi, la forme des relations trouvées nous ont conduit à exprimer K_{spl} en fonction de θ , D et h , l'angle que fait la feuille par rapport à l'horizontale, le diamètre des gouttes incidentes et la hauteur de chute des gouttes respectivement. La loi décrivant le coefficient de splash K_{spl} est alors donnée par :

Si $h < 0.14$ m et $D=6$ mm : $K_{spl} = 0$ si $h > 0.14$ m et $D=6$ mm

$$\text{Sinon : } K_{spl} = \frac{a(\theta, D)}{1 + e^{\left[-b(\theta, D) \times [h - c(\theta, D)]\right]}} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Le modèle empirique ainsi établi a été évalué en comparant les données simulées à celles mesurées (Figure 3.13). Pour cela, nous n'avons retenu que les données mesurées fiables :

- L'ensemble des données pour un diamètre incident de 2.3 mm.
- Les données pour un diamètre de 3.5 mm excepté pour des inclinaisons supérieures à 27°.
- Celles obtenues pour un diamètre incident de 6 mm, excepté pour des inclinaisons supérieures à 17° et des énergies cinétiques supérieures ou égales à 642.3 μJ .

Les valeurs des paramètres $a(\theta, D)$, $b(\theta, D)$ et $c(\theta, D)$ présentées en Tableau 3.8 ont été déterminés à l'aide des équations suivantes :

$$a(\theta, D) = a_1(D) \cdot e^{[a_2(D) \times \theta]} \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$b(\theta, D) = b_1(D) + \left[b_2(D) \times e^{[-b_3(D) \cdot \theta^2]} \right] \quad \text{Eq. 3.7}$$

$$c(\theta, D) = c_1(D) + \frac{c_2(D)}{1 + e^{[-c_3(D) \times \theta^2]}} \quad \text{Eq. 3.8}$$

Paramètre	Coefficient	D ₅₀ =2.3 mm		D ₅₀ =6 mm	
		valeurs	R ²	valeurs	R ²
a(θ,D)	a ₁	0.686	0.82	0.651	0.999
	a ₂	-0.016		-0.057	
b(θ,D)	b ₁	2.86	0.94	2.666	0.896
	b ₂	6.62		3.427	
	b ₃	0.14		0.005	
c(θ,D)	c ₁	1.31	0.997	0.107	0.917
	c ₂	-1.07		0.934	
	c ₃	-0.002		0.008	

Tableau 3.8 : Coefficients $a_1(D)$, $a_2(D)$, $b_1(D)$, $b_2(D)$, $b_3(D)$, $c_1(D)$, $c_2(D)$ et $c_3(D)$ déterminant les paramètres $a(\theta, D)$, $b(\theta, D)$ et $c(\theta, D)$ des lois du coefficient de splash pour les feuilles de bananiers.

Les valeurs des coefficients $a_1(D)$, $a_2(D)$, $b_1(D)$, $b_2(D)$, $b_3(D)$, $c_1(D)$, $c_2(D)$ et $c_3(D)$ ont été ajustées par régression linéaire. Ainsi, afin de définir le modèle empirique établissant les coefficients de transmission d'eau en fonction de la hauteur de chute des gouttes, de leur diamètre et de l'inclinaison de la surface interceptrice sur laquelle tombent ces gouttes, nous avons exprimé les coefficients par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 a_1(D) &= -0.008D + 0.704 & a_2(D) &= -0.010D + 0.004 \\
 b_1(D) &= -0.005D + 2.956 & b_2(D) &= -0.798D + 8.214 & b_3(D) &= -0.002D + 0.018 \\
 c_1(D) &= -0.309D + 1.958 & c_2(D) &= 0.501D - 2.072 & c_3(D) &= 0.0025D + 0.007
 \end{aligned}$$

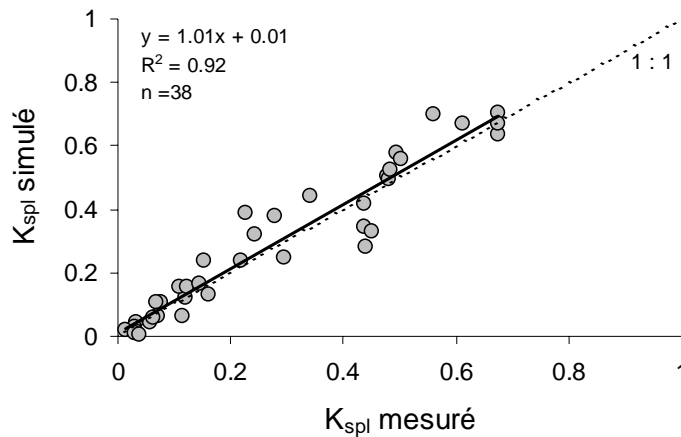


Figure 3.13 : Coefficients de splash mesurés et simulés. La régression est en continu (—) et la première bissectrice en pointillés (---).

Le modèle empirique fournit une bonne estimation de la proportion d'eau de pluie produisant du splash : la pente et l'ordonnée à l'origine sont égales à 1.01 et 0.01 respectivement. On constate toutefois une légère augmentation de la dispersion pour des valeurs de K_{spl} comprises entre 0.3 et 0.7.

3.2.6.4 Modélisation des coefficients de transmission de la pluie

En appliquant les lois de splash et la capacité de stockage au bilan hydrique défini par l'équation 2.1 (cf. 2.3.2), la pluie transmise peut être estimée en utilisant les lois empiriques établies ci-dessus. En prenant comme paramètre d'entrée du modèle la pluie incidente P_{in} (en mm) reçue par un élément de surface, la pluie transmise P_t par cet élément peut alors être estimée par :

$$P_t = P_{in} (1 - K_{spl}) - C - E \quad \text{Eq. 3.9}$$

Où E est considérée comme négligeable au cours de la pluie ($E=0$).

Tout comme pour l'estimation de la fiabilité de la capacité de stockage et du coefficient de splash, nous n'avons retenu que les expérimentations pour lesquelles la mesure était fiable, ce qui correspondait à 38 données. La comparaison de P_t mesuré et simulé montre qu'une bonne estimation est obtenue en utilisant les modèles développés : la pente est de l'ordre de 1.02 et l'ordonnée à l'origine est de 0.08 pour un R^2 de 0.97 (Figure 3.14a).

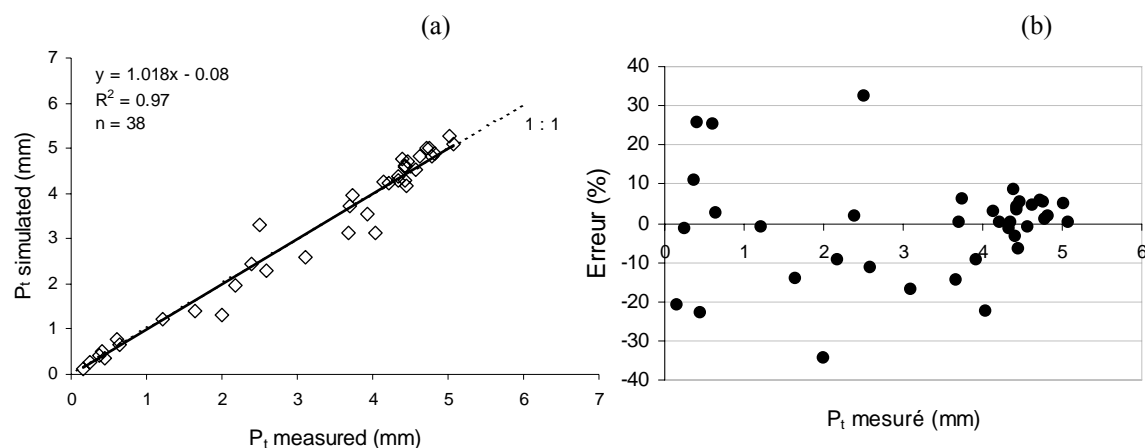


Figure 3.14 : (a) Pluie transmise par une surface élémentaire de feuille de bananier, mesurée et simulée par les modèles empiriques d'interception. La régression est en continu (—) et la première bissectrice en pointillés (---). (b) Répartition des résidus sur l'estimation de P_t .

De façon générale, le modèle surestime légèrement la pluie transmise (la pente est supérieure à 1). Cependant, lorsque les pluies transmises sont comprises entre 1 mm et 4.04 mm, il a tendance à sous-estimer la valeur de P_t . Afin de comprendre cette double variation, nous avons analysé les erreurs du modèle (Figure 3.14b). L'erreur est inférieure à 10% quand P_t est important ($P_t > 4$ mm), avoisine les 25% pour les faibles valeurs de P_t ($P_t < 1$ mm) et varie en général entre -10% et -30% quand P_t est compris entre 1.5 et 4 mm. La sous-estimation du modèle pour cette gamme de P_t correspond en général à de faibles inclinaisons ($\theta < 27^\circ$) et à des énergies cinétiques supérieures ou égales à 215 μJ . Les pluies transmises de plus de 4 mm correspondent à des inclinaisons de feuille de plus de 27° en général. Compte tenu du fait que les inclinaisons moyennes des feuilles sont comprises entre 30° et 40° (cf. 3.1.3), on peut supposer que l'erreur commise par le modèle restera inférieure à 10%. La comparaison des valeurs de P_t , simulées et mesurées, a permis d'estimer l'erreur maximale à 20%, avec une valeur moyenne de 3.7%.

3.2.6.5 Structure algorithmique du modèle proposé

Le modèle traite l'interception à l'échelle du pixel (échelle du millimètre). Aussi, les pixels composant un triangle de feuille, peuvent recevoir de la pluie primaire (quand ils ne sont à l'ombre d'aucune autre feuille) et de la pluie secondaire (quand ils se trouvent sous un point d'égouttage d'une feuille au-dessus). En conséquence, les lois décrivant les pertes par splash et par stockage sur les feuilles seront fonction de la taille des gouttes incidentes sur ces pixels. Nous avons donc choisi de modéliser le splash à l'échelle du pixel afin de prendre en compte son hétérogénéité liée à la taille des gouttes et de modéliser le stockage à l'échelle du triangle.

La modélisation de l'interception par le modèle DROP a été définie en tenant compte de deux types de pluie. Dans le cas d'une pluie primaire (de diamètre médian de l'ordre de 2 mm) supposée saturante, la loi décrite par l'équation 3.9 s'applique. Dans le cas de pluie secondaire (de diamètre médian de l'ordre de 6 mm), le stockage est lié aux impacts des gouttes tombant des exutoires des feuilles au-dessus. En ce sens, le stockage n'atteint pas forcément la capacité de stockage pour ces feuilles masquées. Nous avons donc adopté la méthode suivante pour modéliser les écoulements :

- dans le cas de la pluie primaire, $P_{in} > C$. L'équation 3.9 peut alors s'appliquer.

- dans le cas de la pluie secondaire, il arrive que $P_{in} < C$. Dans ce cas, $P_t = 0$.

Les lois de stockage ayant été déterminées sur une surface voisine de celle des triangles de feuille, nous avons fait le choix de le modéliser à l'échelle du triangle en définissant un test permettant de déterminer la loi du stockage qui doit être appliquée. Ce test est basé sur le calcul du nombre de pixels totaux $npix_{tot}$ composant le triangle en cours de traitement, du nombre de pixels $npix_{pri}$ sur ce triangle recevant de la pluie primaire, et du nombre de pixels $npix_{sec}$ sur ce triangle recevant de la pluie secondaire. Le choix de la loi du stockage à appliquer est donné par :

- Si, $npix_{pri} > npix_{sec}$, alors le triangle est considéré comme recevant de la pluie primaire et C est donné par l'équation 3.3.
- Sinon, le triangle est considéré comme recevant de la pluie secondaire et C est calculé à l'aide de l'équation 3.4.

Pour tout pixel (i,j) d'un élément foliaire positionné à une hauteur quelconque sur la plante, l'estimation quantitative de l'eau incidente sur ce pixel et des pertes par splash et stockage nécessite la connaissance de ce que lui aura éventuellement transmis tout élément foliaire positionné juste à sa verticale. En conséquence une mémoire tampon devait être utilisée. Ainsi, nous avons utilisé 2 réservoirs caractérisés chacun par 2 variables : l'une à l'échelle du pixel, et l'autre à celle du triangle en cours de traitement. Chaque variable a potentiellement la même fonction. Le premier réservoir permet d'affecter une hauteur d'eau reçue par un pixel (i,j), à l'aide de la variable $waterH[i][j]$ ou par le triangle, à l'aide de la variable P_{net} . Cette hauteur d'eau peut être réduite des pertes par splash et par stockage. Le second réservoir permet de déterminer le nombre de pixels au-dessus ayant intercepté de la pluie et qui contribuent à alimenter en eau le pixel (i,j), à l'aide de la variable $intercept[i][j]$, ou le triangle, à l'aide de la variable S_{int} .

L'eau non stockée et non éclaboussée (eau excédentaire) sur un triangle foliaire est dirigée vers son point bas (sommet le plus bas). En conséquence, les réservoirs associés à ce triangle sont attribués à son point bas d'où est transmise la pluie à un autre triangle, soit de la même feuille (cas des flux d'écoulement), soit d'une feuille située en dessous de lui (cas des flux d'égouttages) si ce point bas est un exutoire de la feuille sur laquelle se trouve le triangle en cours de traitement. La modélisation des écoulements se schématise par l'organigramme présenté en Figure 3.15.

Triangle n
Surface, Inclinaison θ

Surfaces élémentaires

Pixel (i,j)
intercept[i][j]
waterH[i][j]
Incrémentation de npixtot
Incrémentation de ombre[i][j]

Réservoirs :
Nombre d'interception S_{int}
Pluie reçue P_{net}
intercept[ie][je]
waterH[ie][je]

Pluie primaire

Pixel (i,j) reçoit de la pluie primaire
Incrémentation de npixpri

Pixel (i,j) reçoit de la pluie secondaire
Incrémentation de npixsec

Loi du splash pour $D_{50} = 2$ mm

Hauteur de chute h
 $h > 0.14$ m

$$K_{spl} = \frac{a(\theta, D)}{1 + e^{[-b(\theta, D) \times [h - c(\theta, D)]]}}$$

Loi du splash pour $D_{50} = 6$ mm

Loi du splash :
 $K_{spl} = 0$

Pluie disponible pour le pixel (i,j)
 $waterH[i][j] = waterH[i][j] \times (1 - K_{spl})$
 $intercept[i][j] = waterH[i][j] = 0$

Mise à jour des réservoirs
 $P_{net} = P_{net} + waterH[i][j]$
 $S_{int} = S_{int} + intercept[i][j]$

Point bas

Pixel (ip,ip)
 $intercept[ip][jp] = intercept[ip][jp] + S_{int}$
 $waterH[ip][jp] = P_{net} + waterH[ip][jp]$
 $P_{net} = waterH[ip][jp] / npixtot$
 $S_{int} = intercept[ip][jp]$
 $intercept[ip][jp] = 0$

$npixpri > npixsec$

Loi du stockage pour $D_{50} = 2$ mm

Loi du stockage pour $D_{50} = 6$ mm

$$C = \left(\left[0.108 \times e^{-0.0003 \times \theta^2} \right] + \frac{\alpha(D)}{\beta(D) + \theta^2} \right)$$

$P_{net} > C$

$P_{net} = waterH[ip][jp] - C$
 $waterH[ip][jp] = 0$

$P_{net} = 0$
 $waterH[ip][jp] = 0$

Exutoire

Pixel (ie,je)
 $intercept[ie][je] = intercept[ie][je] + S_{int}$
 $waterH[ie][je] = water[ie][je] + P_{net}$

Figure 3.15 : Organigramme du modèle d'interception appliqué à chaque triangle discrétisé dans l'espace. Le modèle se décompose en quatre compartiments répartis comme suit : le compartiment « **Triangle** » qui fournit les données d'entrée (surface et inclinaison) du triangle, le compartiment « **Pixel** » qui regroupe l'ensemble des pixels sur lesquels se projette le triangle, le compartiment « **Point bas** » correspondant au pixel sur lequel se projette le sommet le plus bas du triangle (sommet vers lequel se font les écoulements) et le compartiment « **Exutoire** » qui correspond au pixel sur lequel se projette l'exutoire du bassin versant auquel appartient le triangle et duquel sera égouttée l'eau disponible sur ce triangle.

n : le numéro du triangle.

i : le numéro du pixel selon l'axe (Ox) sur lequel se projette l'élément foliaire du triangle n .

j : le numéro du pixel selon l'axe (Oy) sur lequel se projette l'élément foliaire du triangle n .

ip : numéro du pixel selon l'axe (Ox) sur lequel se projette le point bas du triangle n .

jp : numéro du pixel selon l'axe (Oy) sur lequel se projette le point bas du triangle n .

ie : numéro du pixel selon l'axe (Ox) sur lequel se projette l'exutoire vers lequel est transmise l'eau excédentaire interceptée par le triangle n .

je : numéro du pixel selon l'axe (Oy) sur lequel se projette l'exutoire vers lequel est transmise l'eau excédentaire interceptée par le triangle n .

$k_{sp}[i][j]$: loi du coefficient de splash associée à l'élément foliaire du triangle n qui se projette sur le pixel (i,j) .

C : loi du stockage associée au triangle n et qui est appliquée au point d'égouttage du triangle.

$ombre[i][j]$: nombre de couches de feuille se trouvant au dessus du pixel (i,j) .

$waterH[i][j]$: pluie disponible sur le pixel (i,j) .

$intercept[i][j]$: nombre de pixels alimentant par écoulement ou égouttage le pixel (i,j) .

P_{net} : cumul des $waterH[i][j]$ sur l'ensemble du triangle n . Il est attribué à un point bas ou un exutoire, à la fin du traitement du triangle.

S_{int} : cumul des $intercept[i][j]$ sur l'ensemble du triangle n . Il est attribué à un point bas ou un exutoire, à la fin du traitement du triangle n .

3.2.6.6 Discussion

Le modèle établi pour simuler le stockage à saturation du couvert est un modèle additif couplant un modèle exponentiel de degré 2 et un modèle polynomial de degré -2 dépendants tous deux de l'inclinaison et du diamètre des gouttes d'impacts. Celui établi pour estimer les pertes par splash est un modèle beaucoup plus complexe combinant plusieurs modèles exponentiels de degré 1 à 2 et linéaires avec des modèles lognormaux. Ces modèles s'ajustent correctement à nos données expérimentales mais restent limités à certaines caractéristiques de gouttes incidentes et certaines inclinaisons de feuille de bananier. De plus, le modèle d'interception ne rend pas compte des projections rasantes de la pluie transmise observées pour des gouttes de 6 mm atteignant des énergies cinétiques importantes. Ces trajectoires s'observent particulièrement pour des feuilles inclinées à 47° atteintes par des gouttes de 6 mm qui ont une énergie cinétique de 642.3 μJ lors de l'impact. Elles s'observent également pour de plus faibles inclinaisons (supérieurs à 17°) quand ces gouttes tombent de plus haut (1.1 et 1.6 m de haut). Ainsi, pour ces caractéristiques de gouttes et de surfaces de feuille, les erreurs liées aux hypothèses du modèle d'interception seraient augmentées.

Les premières simulations des architectures ont montré que les inclinaisons des feuilles de bananier étaient principalement comprises entre 30° et 40° , le risque d'erreur semble conséquent : près de 16% à 39% des égouttages ne serait pas transmis de façon verticale. Du fait de ces directions des flux transmis, d'autres feuilles ou des collecteurs, qui ne sont pas placés au sol à la verticale sous le point d'égouttages, pourraient intercepter cette eau. Une solution permettant de prendre partiellement en compte ces phénomènes serait de réduire les

quantités d'eau transmise de 16% à 39% pour ces caractéristiques de pluie secondaire et cette gamme d'inclinaison de feuille. Toutefois, de tels phénomènes seraient minimes en présence d'égouttages dont les hauteurs de chute seraient voisines ou inférieures à 0.6 m. En conséquence, le modèle tel qu'il est conçu (simulation d'égouttages verticaux) tendrait à surestimer les égouttages provenant de feuilles érigées (feuilles nouvellement formées). Il serait intéressant en premier lieu, de quantifier le nombre d'égouttages étant associés à des hauteurs de chute de plus de 0.6 m et, dans le cas où ces phénomènes seraient conséquents, de simuler des transmissions non verticales, et afin de réduire les 40% de surestimation du modèle, d'attribuer du stockage dans les gaines des feuilles (Nouvellon, 1999) en cas d'écoulement d'un triangle vers un autre triangle sur une même feuille.

Comme tout modèle empirique, le modèle proposé décrivant les pertes par interception de la pluie ne prend pas en compte tous les phénomènes affectant l'interception. Cependant, l'approche développée à l'échelle du pixel pour la simulation des phénomènes à l'échelle de la plante s'avère être une démarche innovante dans la mesure où les modèles précédemment développés proposaient d'évaluer l'interception globale d'un couvert de structure donnée mais ne traitaient pas la répartition de ces interceptions dans le couvert. En effectuant des tests déterminant si la saturation des éléments de feuille est atteinte et si la pluie atteignant les éléments de feuille est de la pluie incidente ou de l'égouttage, nous proposons une démarche qui se rapproche à la fois de celles développée par le modèle analytique de Gash (Gash, 1979) et celui de Calder (Calder, 1986; Calder, 1996b). En effet, en se référant à Gash, le bilan hydrique se décompose en plusieurs étapes temporelles de mouillage du couvert. Cette décomposition permet d'évaluer l'évaporation pour ces différentes étapes. Pour la période de mouillage du couvert jusqu'à sa saturation, l'équation bilan proposée par Gash permet de déduire l'évaporation directe à partir de la quantité de pluie saturant le couvert et de celle stockée par le couvert au moment de la saturation. Pour notre étude, nous nous sommes intéressés au temps de saturation du couvert en assimilant l'évaporation directe au splash. Le modèle stochastique proposé par Calder porte l'accent sur l'effet des tailles de goutte sur l'interception. Le modèle initial de Calder permettait d'évaluer le nombre moyen de gouttes retenues sur des surfaces élémentaires en utilisant la distribution de probabilité de Poisson. En ce sens, ses travaux ont permis d'étudier et de simuler l'interception à de plus petites échelles. L'approche que nous avons développée en séparant l'interception de la pluie incidente au-dessus du couvert (pluie primaire) de l'interception des égouttages (pluie secondaire) se rapproche de celle de Calder considérant également deux types d'interception, l'une relative à la pluie primaire touchant la partie supérieure du couvert et l'autre, relative à la pluie secondaire tombant de la couche supérieure du couvert.

Notre méthode aborde également un point incontournable pour l'étude des impacts de goutte, celui de l'effet des caractéristiques des surfaces interceptrices sur l'interception de la pluie mais n'a pas pour objectif l'estimation de l'évaporation proprement dite qui peut être estimée par la méthode de Penman-Monteith (Gash et al., 1999). Toutefois, sa simulation pourrait être envisageable dans DROP, en utilisant le formalisme de Rutter modélisant l'aspect l'évaporation à l'aide de variables météorologiques (Rutter et al., 1971).

CONCLUSIONS

La capacité de stockage C des échantillons de feuille de bananier est affectée par le diamètre des gouttes incidentes sur les surfaces interceptrices et l'angle d'inclinaison des échantillons. Les résultats ont montré que :

- Ni la flexibilité des feuilles, ni leur état de surface n'a un effet significatif sur C .
- C est plus importante pour les grosses gouttes.
- C diminue avec l'angle d'inclinaison des échantillons de feuille.
- C est limitée pour de fortes énergies cinétiques de gouttes incidentes.

Le splash varie en fonction de la taille des gouttes incidentes, de la hauteur de chute des gouttes et de l'inclinaison des surfaces interceptrices :

- Ni la flexibilité des feuilles, ni leur état de surface n'a un effet significatif sur le splash.
- Le splash diminue quand l'inclinaison des échantillons de feuille augmente.
- Pour de grosses gouttes incidentes, cette décroissance est plus rapide.
- Le splash diminue avec l'énergie cinétique et donc avec la hauteur de chute des gouttes.

Les hauteurs H_{spl} atteintes par les gouttelettes de splash varient en fonction des énergies cinétiques et donc, des hauteurs de chute des gouttes incidentes, de leur diamètre et de l'inclinaison des surfaces interceptrices :

- Ni la flexibilité des feuilles, ni leur état de surface n'a un effet significatif sur H_{spl} .
- Les hauteurs H_{spl} atteintes par des gouttes incidentes de fort diamètre sont plus élevées que celles atteintes par des gouttes incidentes de faible diamètre.
- H_{spl} diminue avec l'inclinaison des échantillons de feuille.
- H_{spl} augmente avec l'énergie cinétique ou la hauteur de chute des gouttes incidentes mais est limité pour de fortes énergies cinétiques.

Les lois empiriques établies à partir des résultats précédents pour l'estimation des pertes par interception s'ajustent de façon très satisfaisante avec les données expérimentales. Contrairement au stockage, pour des égouttages tombant à plus de 0.6 m et des inclinaisons de feuille supérieures à 17°, les masses d'eau de splash et d'eau transmise en stemflow et en throughfall seraient affectées par des projections rasantes de gouttes préalablement stockées à la surface des feuilles. Pour ces caractéristiques de pluie secondaire, le modèle d'interception qui décrit des écoulements verticaux ne simulerait pas correctement ces processus. La diminution de K_t pour ces inclinaisons, particulièrement pour de gros diamètres de gouttes caractérisant les égouttages, laisse supposer que le modèle pourrait surestimer jusqu'à 40% les égouttages tombant de feuilles inclinées à 40° et de plus de 0.6 m

La surestimation des écoulements pourrait être améliorée par la prise en compte de deux autres types de stockage : celui s'occasionnant dans les gaines de feuilles formant de pseudo-tronc du bananier et celui relatif aux écoulements sur une même feuille.

Chapitre 4 Evaluation du modèle DROP

4.1 Evaluation du modèle architectural

4.1.1 Introduction

La digitalisation 3-D a été communément utilisée pour décrire diverses architectures de plante et d'arbre, telles que celle du maïs (Sinoquet et al., 1991; Ivanov et al., 1995; Drouet et Bonhomme, 1999; Espana et al., 1999a), du noyer (Sinoquet et Rivet, 1997), du trèfle blanc (Rakocevic et al., 2000). Afin d'évaluer la fiabilité des modèles architecturaux utilisant des données géométriques de plante fournies par la digitalisation 3-D, leur capacité à décrire correctement les plantes a été généralement estimée en comparant les surfaces de feuilles simulées à celles mesurées expérimentalement. Une comparaison visuelle des architectures simulée et mesurée pouvait également être utilisée.

Comme le modèle DROP simule des écoulements en se basant sur la description des architectures, nous avons d'abord cherché à évaluer la capacité du modèle DROP-TRI à simuler des architectures de feuilles plus complexes, en utilisant des feuilles de bananier aussi bien entières que déchirées par endroits. L'adéquation de la triangulation développée dans DROP-TRI a été estimée en utilisant 10 bananiers, âgés de 4 à 5 mois et qui ont été digitalisés à l'aide du digitaliseur à ultrasons. Les résultats de simulation des surfaces foliaires L_A , des surfaces interceptrices L_W et des architectures de ces bananiers ont été comparés à ceux obtenus par la mesure pour l'évaluation du modèle architectural.

4.1.2 Capacité de DROP-TRI à décrire les surfaces foliaires du bananier

L'une des premières améliorations du modèle DROP a consisté en l'adaptation de la triangulation au bananier. Ainsi, afin de mieux décrire les formes des feuilles en adaptant la triangulation aux déchirures de limbes, aux bouts de feuille et aux débuts de limbe, de nouveaux algorithmes de calculs ont été développés. Cette première amélioration a permis de mieux reconstituer les surfaces foliaires.

4.1.2.1 Amélioration de la simulation des feuilles

En comparant les deux modes de triangulation développés pour le maïs (Figure 4.1a et 4.1b) et pour le bananier (Figure 4.1c et 4.1d), on constate que l'adaptation de la triangulation au bananier permet une meilleure représentation des formes complexes de feuille, en respectant mieux la description des bouts de feuille et des déchirures.

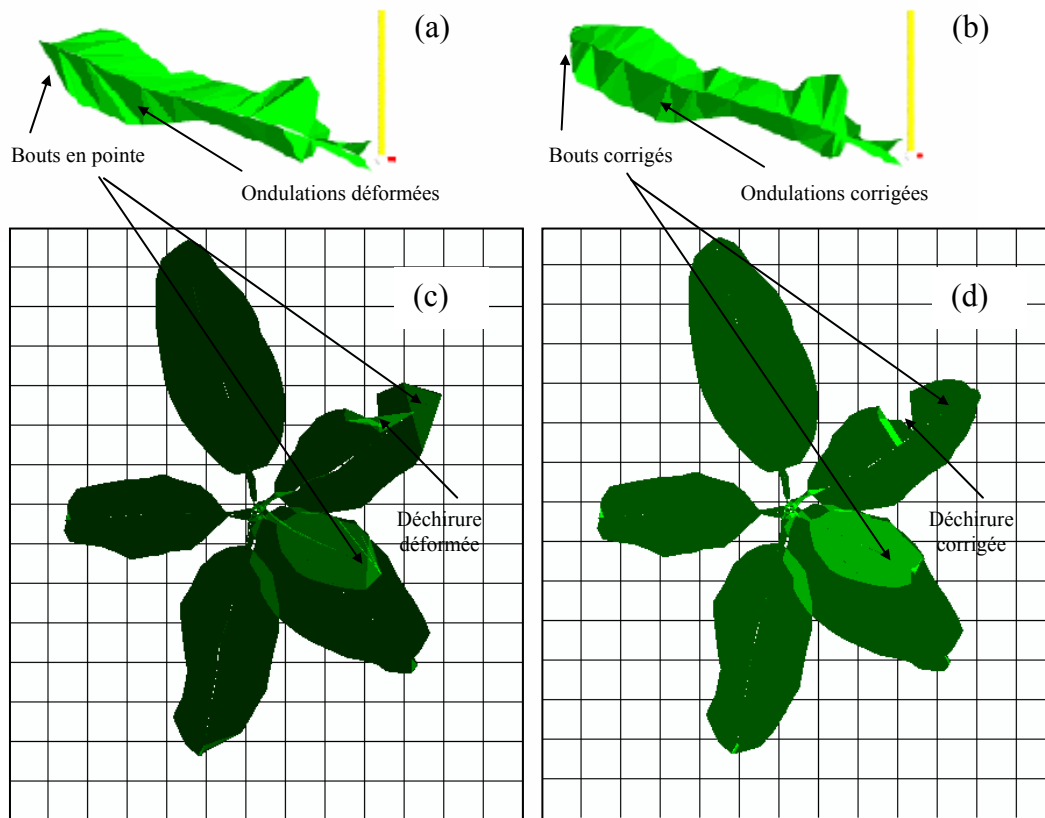


Figure 4.1 : Comparaison entre deux modes de triangulation : triangulation initiale (a) et (c) et triangulation adaptée au bananier (b) et (d). En haut : une feuille de bananier visualisée à l'aide du logiciel POV-Ray. En bas : projection verticale au sol d'un bananier simulé par DROP. L'intensité du vert des feuilles augmente avec le nombre de superposition de surface foliaire.

4.1.2.2 Reconstitution des surfaces foliaires

L'application du modèle DROP-TRI aux 10 bananiers a permis de comparer l'ensemble des surfaces simulées et mesurées. Au total, 76 feuilles ont été utilisées, dont 13 étaient déchirées par endroits. La comparaison modèle/mesure est présentée en Figure 4.2.

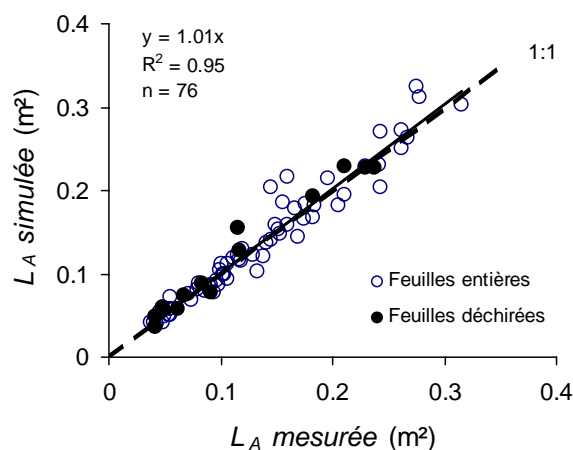


Figure 4.2 : Comparaison des surfaces foliaires simulées (L_A simulée) avec celles mesurées expérimentalement (L_A mesurée) de 76 feuilles de bananier.

La régression entre les surfaces totales L_A , simulées et mesurées, présente une pente de 1.01 et un R^2 de 0.95, traduisant ainsi la bonne capacité du modèle à estimer les surfaces foliaires. On constate que DROP-TRI simule aussi bien les feuilles déchirées qu'entières.

Afin d'évaluer la capacité du modèle à décrire l'architecture complète, un bananier simulé par DROP-TRI à partir de la digitalisation a été visualisé dans son ensemble à l'aide du logiciel POVRAY[®]. Cette visualisation 3-D est comparée à la photo de ce bananier, prise au cours de sa digitalisation (Figure 4.3).

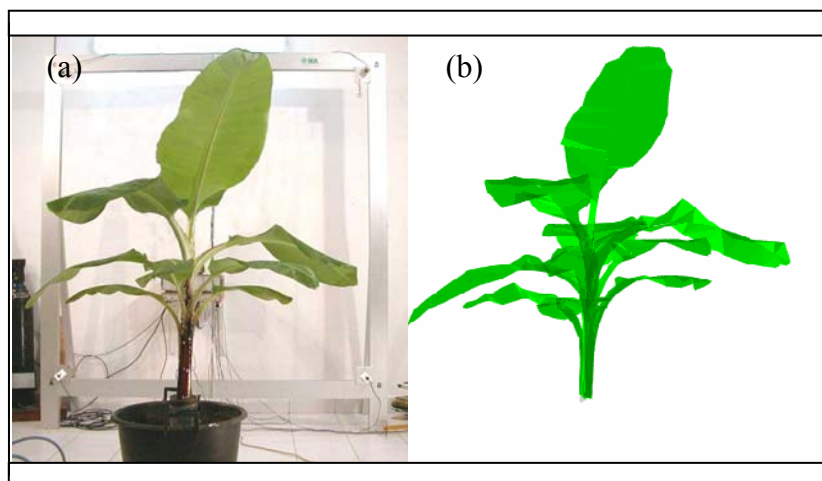


Figure 4.3 : Architecture d'un bananier : (a) photographiée au cours de sa digitalisation et (b) visualisée à l'aide du logiciel POVRAY[®], après triangulation par DROP-TRI.

La comparaison de l'image photo du bananier et de sa visualisation 3-D après triangulation par DROP-TRI, confirme la bonne capacité du modèle à simuler les architectures. Les différences qui subsistent entre les deux images peuvent être liées aux déformations optiques de la photographies qui n'ont pas été corrigées et à une légère différence d'angles de visualisation.

Les résultats de comparaison entre L_W , les surfaces interceptrices, calculées par DROP et celles mesurées expérimentalement sont présentés en Figure 4.4, pour six bananiers âgés de 5 mois.

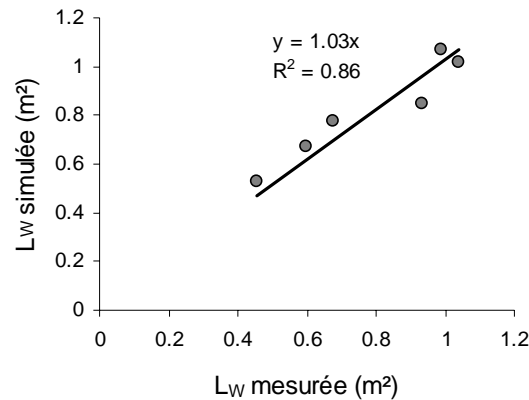


Figure 4.4 : Comparaison des surfaces foliaires interceptant de la pluie directe, simulées par le modèle et mesurées par analyse numérique de photos, à l'aide du logiciel « ImageJ® ».

Une assez bonne relation a été également trouvée entre la simulation et la mesure pour les surfaces humides L_W (pente de 1.03 avec un R^2 de 0.86 de la Figure 4.4). Cependant, les surfaces des bananiers mesurées par traitement d'image correspondent à celles projetées sur un plan horizontal. Elles correspondent au produit des surfaces réelles par le cosinus de l'angle d'inclinaison de ces surfaces et de ce fait, leur sont inférieures. Aussi, nous nous attendions à une sous-estimation plus importante de L_W par la mesure. La pente légèrement supérieure à 1 de la régression entre L_W simulée et L_W mesurée nous amène à conclure que la mesure aurait pu être biaisée par la présence d'aberrations optiques appelées comas, observées sur certaines images de bananier, entraînant la déformation des lignes droites vers les bords de l'image photo et compensant, en conséquence, l'écart de sous-estimation par la mesure.

4.1.3 Discussion

Le modèle DROP simule correctement les surfaces foliaires dans leur ensemble. Compte tenu de la bonne corrélation entre la simulation par DROP et la mesure, traduit par un R^2 de 0.95, la capacité du modèle à simuler la surface foliaire totale reste tout à fait comparable à celle des modèles architecturaux récemment développés. En effet, pour le trèfle ou pêcher dont les feuilles présentaient des formes simples, les modèles développés fournissaient de bons résultats avec une pente voisine de 1 et un R^2 variant entre 0.88 et 0.98 (Rakocevic et al., 2000; Sonohat et al., 2004). Pour les feuilles du maïs présentant des bords de limbe ondulés, le modèle MODICA fournit une très bonne estimation de la longueur des limbes également (Drouet, 2003).

L'originalité de la méthode de triangulation réside dans le fait qu'elle permet une prise en compte des ondulations des limbes foliaires afin de bien décrire les bassins versants vers lesquels l'eau interceptée est dirigée. Une telle précision dans la représentation des feuilles

est nécessaire pour la simulation des sites d'écoulement (Bassette et Bussière, 2005) ce qui n'est pas forcément le cas pour la simulation de l'interception du rayonnement (España et al., 1999b). Toutefois, la méthode développée dans DROP pourrait également être utilisée par des modèles radiatifs utilisant la digitalisation des plantes (Sinoquet et al., 1991; Chelle et Andrieu, 1999).

4.2 Evaluation de DROP-INT pour la simulation des écoulements de pluie

4.2.1 Introduction

Les données architecturales de 14 bananiers, ont été utilisées en entrée du modèle DROP-TRI afin de simuler des écoulements de pluie dans le feuillage jusqu'au sol et fournir les cartographies des distributions d'eau au sol. Deux classes d'âge de bananier ont été utilisées : 10 bananiers (B1 à B10) âgés de 5 mois et 4 bananiers (B'1 à B'4) âgés de 10 mois, tous plantés en pot. Des mesures des redistributions de la pluie au sol ont été faites sous simulateur de pluie, pour 9 des bananiers âgés de 5 mois et ont été utilisées pour évaluer le modèle. Pour les autres plantes, seule la simulation par DROP des cartographies des redistributions au sol est utilisable, les mesures expérimentales n'étant pas satisfaisantes ou pas disponibles.

Au préalable, une étude commune entre le CIRAD et l'INRA sur des bananiers au champ, à trois stades de croissance (stade végétatif, stade avant floraison et stade adulte) a montré que le coefficient de transmission pour le stemflow était proportionnel au LAI et représentait 11.2 fois celui-ci (Cattan et al., 2005). Afin de comparer nos données à ces résultats au champ, les coefficients K_t de transmission de la pluie au sol, obtenus par la mesure et les simulations « sans lois d'interception » et « avec lois d'interception », ont été étudiés en fonction du LAI des bananiers.

4.2.2 Capacité de DROP-INT à simuler les écoulements sous un bananier

4.2.2.1 Comparaison des coefficients de transmission de pluie simulés et mesurés

Les données pluviométriques relatives à la pluie incidente sont répertoriées dans le tableau qui suit :

Bananier	Type de pluie	t (min)	θ (°)	p (bar)	R_g (mm.h ⁻¹)	P_g (mm)
B1	Mesure sous simulateur	5	70	1	134	11.2
B2	Mesure sous simulateur	5	70	1.1	120	10
B3	Mesure sous simulateur	5	70	1.2	134.4	11.2
B4	Mesure sous simulateur	5	70	1.2	130.8	10.9
B5	Mesure sous simulateur	5	70	1.3	131.64	10.97
B6	Mesure sous simulateur	8	120	1.2	79.58	10.61
B7	Mesure sous simulateur	8	120	1.2	76.13	10.15
B8	Mesure sous simulateur	8	120	1.2	78	10.4
B9	Mesure sous simulateur	8	120	1.2	77.25	10.3
B10	Simulation par DROP	8	–	–	75	10
B'1	Simulation par DROP	5	–	–	120	10
B'2	Simulation par DROP	5	–	–	120	10
B'3	Simulation par DROP	5	–	–	120	10
B'4	Simulation par DROP	5	–	–	120	10

Tableau 4.1 : Paramètres pluviométriques utilisés pour simuler, r pour chaque bananier digitalisé, des écoulements de pluie dans le feuillage jusqu'au sol. Les paramètres utilisés sont : le type de pluie, la durée t de la pluie, l'angle θ de balayage de la buse, la pression p d'arrivée d'eau, l'intensité R_g de la pluie incidente et sa hauteur P_g .

Les cartes des distributions de la pluie au sol, sous les 9 bananiers (B1 à B9) âgés de 5 mois ont nécessité l'emploi de 1281 collecteurs, dont 9 étaient des collecteurs de stemflow. Dans un premier temps, des tests de corrélation ont été effectués afin d'évaluer la fiabilité de la modélisation. Pour cela, les deux modélisations des écoulements, la première effectuée avec DROP initial « sans lois d'interception » et la seconde effectuée avec DROP amélioré « avec les lois d'interception », ont été comparées à la mesure. Les coefficients de corrélation de Pearson établis pour l'ensemble des 1281 coefficients de transmission (K_t), ainsi calculés, sont égaux à 0.85 pour la simulation à l'aide de DROP initial et 0.87 pour la simulation à l'aide de DROP amélioré. Ces coefficients de corrélation entre la mesure et la simulation montrent que la modélisation des distributions de pluie sous les bananiers à l'aide du modèle initial et du modèle amélioré par les lois d'interception fournit des résultats corrects.

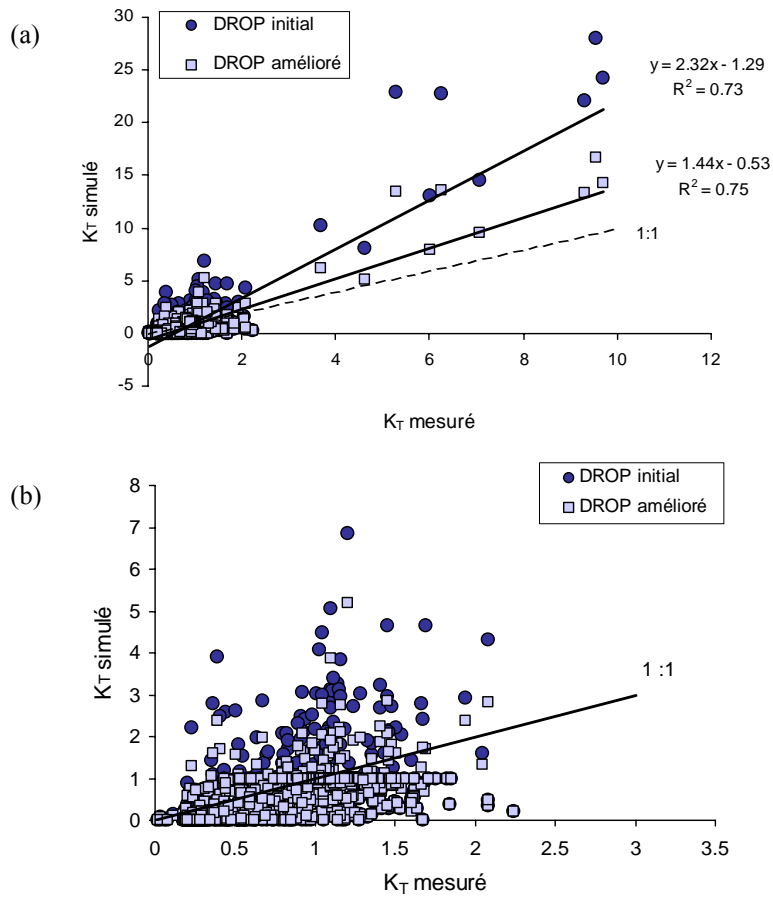


Figure 4.5 : Comparaison des coefficients K_T de transmission de la pluie, simulés par DROP sans les lois d'interception (DROP initial) et avec les lois d'interception (DROP amélioré), et mesuré expérimentalement. (a) Pour l'ensemble des collecteurs. (b) Pour les collecteurs de throughfall uniquement.

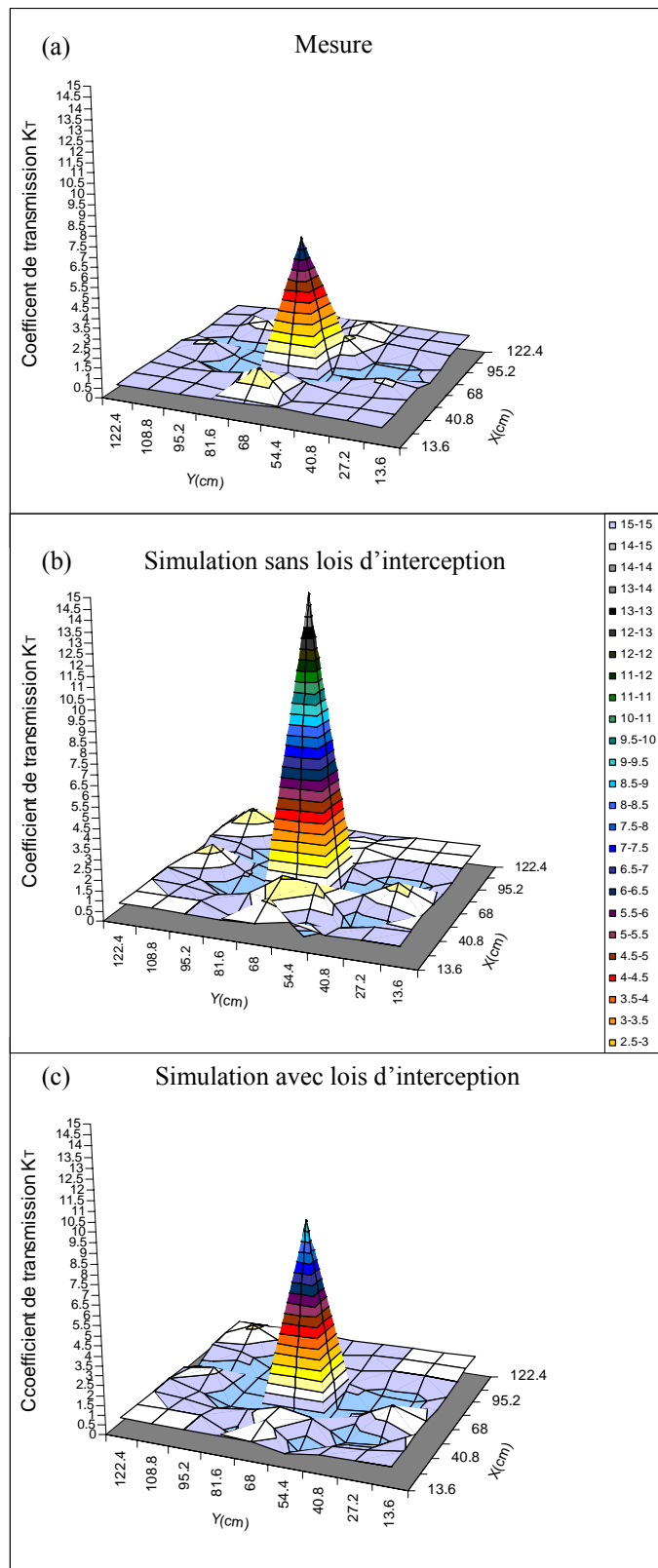


Figure 4.6 : Cartes des distributions des coefficients K_t de transmission de pluie sous un bananier : (a) mesure sous simulateur de pluie et simulations par le modèle DROP, (b) sans et (c) avec prise en compte des phénomènes d'interception.

Les coefficients K_i simulés à l'aide du modèle initial et du modèle amélioré pour l'ensemble des collecteurs de stemflow et de throughfall ont été comparés aux coefficients K_i mesurés (Figure 4.5). Un exemple montrant les répartitions des distributions de la pluie sous un bananier, obtenues par la mesure et par les deux types de simulation, est présenté en Figure 4.6.

Quel que soit le type de modélisation utilisé, on constate que le modèle tend à surestimer le stemflow (Figure 4.5a), mais qu'il peut aussi bien sous-estimer que surestimer le throughfall pour DROP initial et alors qu'il tend davantage à le sous-estimer pour une simulation par DROP amélioré (Figure 4.5b). En utilisant les données brutes fournies par la mesure, les régressions établies pour ces deux comparaisons montrent que la modélisation surestime de manière générale les distributions de pluie au sol (Figure 4.5a et 4.6). Les pics de transmission d'eau au sol sont surestimés de plus de 2 fois dans le cas d'une simulation ne prenant pas en compte les pertes par interception. Les écarts entre la simulation et la mesure sont réduits par la simulation à l'aide du modèle amélioré : les coefficients de transmission n'étant plus surestimés que de 1.4 fois.

En comparant les cartes des redistributions de la pluie sous un bananier, présentées en Figure 4.6, on constate que le modèle simule correctement la localisation des points d'égouttages, excepté pour une zone d'égouttages comprise entre $x = 95.2$ cm et $y = 122.4$ cm. Pour cette zone, la mesure serait affectée par le déplacement des points d'égouttages qui tomberaient dans des collecteurs voisins. Les observations faites au cours de la mesure ont montré que les points de chute de certains égouttages étaient modifiés par le mouvement des feuilles sous l'effet de la pluie.

Le modèle simule un maillage de collecteurs (de forme carrée ou rectangulaire) proches de ceux utilisés dans les expérimentations. La mesure du stemflow nécessite l'emploi d'un collecteur cylindrique permettant d'épouser la forme du pseudo-tronc et faciliter la pose du collecteur. En conséquence, une zone autour du pseudo-tronc, entre le collecteur circulaire de stemflow et les collecteurs carrés de throughfall les plus proches du stemflow, peut être sujette à une perte d'information au cours de la mesure (Figure 4.7).

4.2.2.2 Problèmes des surfaces d'intégration du stemflow

Afin d'estimer cette perte d'informations et permettre une meilleure comparaison modèle/mesure, les coefficients de transmission pour le stemflow estimés par le modèle ont été rapprochés de ceux mesurés en les calculant uniquement sur la section englobant le pseudo-tronc et le collecteur cylindrique de stemflow. Les régressions, obtenues pour l'ensemble des 9 bananiers de 5 mois, entre les coefficients mesurés (K_{tm}) et simulés (K_{ts}) sont les suivantes :

$$\text{Pour DROP initial :} \quad K_{ts} = 2.29 K_{tm} - 1.25 \quad (R^2=0.72) \quad \text{Eq. 4.3}$$

$$\text{Pour DROP amélioré :} \quad K_{ts} = 1.41 K_{tm} - 0.5 \quad (R^2=0.75) \quad \text{Eq. 4.4}$$

En comparant ces équations avec celles des régressions obtenues en section 4.2.2.1, on constate que l'erreur commise en sommant les hauteurs reçues par chaque pixel sur lequel se projette le collecteur de stemflow simulé par DROP est de l'ordre de 3% et affecte peu la simulation. Compte tenu de cette faible erreur, la surestimation des stemflow par le modèle aurait d'autres causes.

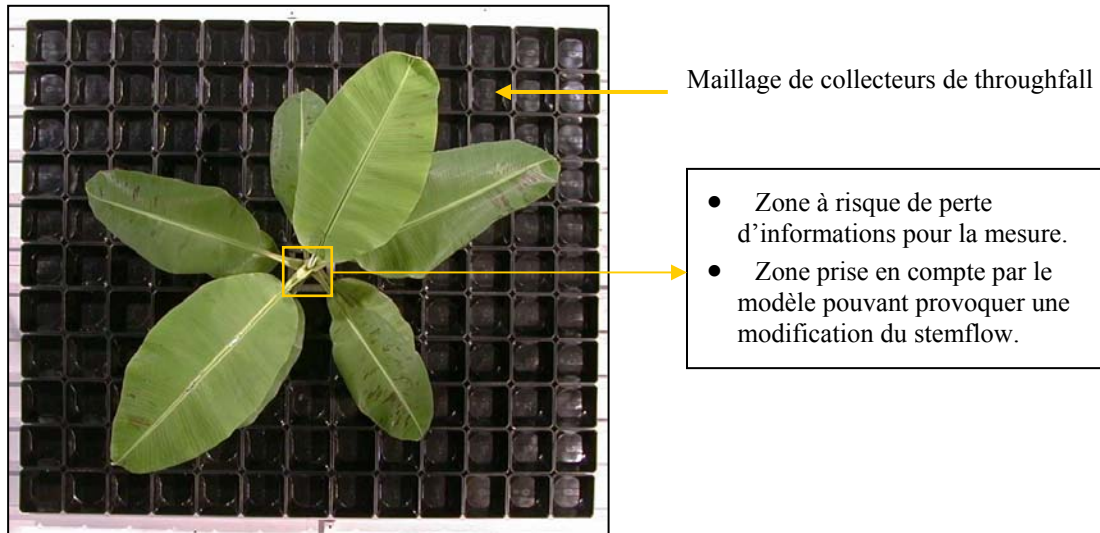


Figure 4.7 : Maillage de pluviomètres utilisés pour la mesure des redistributions de pluie sous un bananier et mise en évidence de la zone pour laquelle la comparaison du stemflow mesuré et simulé est difficile.

4.2.2.3 Evaluation du stemflow en fonction de la pluie incidente et du LAI

Selon Cattani et ses collaborateurs (2005), au champ, le coefficient de transmission de pluie en stemflow (K_{ts}) est égal à 11.2 fois le LAI, pour des bananiers de LAI compris entre 1.8 et 3.25. Dans le but d'établir une relation comparable entre K_{ts} et le LAI, nous avons exprimé les coefficients K_{ts} , mesurés et simulés par DROP initial et DROP amélioré en fonction du LAI des bananiers. Le calcul du LAI a été fait pour une densité normale de plantation au champ attribuant une surface de sol de 5.52 m² (surface plantée au champ de 2.35 m × 2.35 m). Au total, 9 bananiers ont été utilisés pour la mesure et la simulation de stemflow, pour deux intensités de pluie (78 et 130 mm.h⁻¹) et les simulations ont été effectuées pour 5 bananiers supplémentaires en supposant une intensité de 120 mm.h⁻¹. Pour les 9 premiers bananiers, la proportion de pluie redistribuée en stemflow a été calculée et exprimée en pourcentage de P_g , la pluie incidente, pour la densité de plantation au champ (Tableau 4.2).

Banancier	Age (mois)	LAI	R (mm.h ⁻¹)	Mesure	Simulation DROP initial	Simulation DROP amélioré
				Stemflow (%)	Stemflow (%)	Stemflow (%)
B1	5	0.16	134.4	2.40	5.03	3.30
B2	5	0.19	120	2.28	4.52	2.72
B3	5	0.12	134.4	1.29	3.55	2.13
B4	5	0.18	130.8	1.63	2.80	1.75
B5	5	0.24	131.64	3.24	7.63	4.61
B6	5	0.25	79.58	3.80	9.66	5.79
B7	5	0.24	76.13	2.45	7.89	4.71
B8	5	0.26	78	3.60	8.38	4.91
B9	5	0.23	77.25	1.99	7.93	4.65
B10	5	0.31	75	–	6.66	4.42
B'1	10	0.96	120	–	13.84	8.58
B'2	10	0.65	120	–	9.78	6.15
B'3	10	0.79	120	–	9.64	3.28
B'4	10	0.6	120	–	11.22	6.94

Tableau 4.2 : Pourcentage volumique d'eau de pluie incidente (P_g) reçue par le bananier et redistribuée en stemflow en fonction du LAI. Les pourcentages sont calculés pour la mesure, pour DROP initial et pour DROP amélioré (par les lois d'interception). 3 gammes d'intensité de pluie (R) ont été utilisées.

Les pourcentages volumiques d'eau de pluie redistribuée en stemflow présentés en Tableau 4.2, confirment que, par rapport à la mesure, le modèle surestime le stemflow : la surestimation est de plus de 100% pour DROP initial et n'est plus que de 33%, pour DROP amélioré. Le stemflow tend à croître avec le LAI. Il augmenterait donc avec la croissance des plantes.

Pour des bananiers âgés de 5 mois dont le LAI est inférieur à 0.2, le stemflow représente 1.9% (± 0.5) de la pluie incidente pour la mesure, 4% (± 1) pour DROP initial, et 2.5% (± 0.7) pour DROP amélioré. Pour des bananiers âgés de 5 mois dont le LAI est compris entre 0.2 et 0.26, il est estimé à 3% (± 0.8) de la pluie incidente pour la mesure, à 8.3% (± 0.8) pour DROP initial, et à 4.9% (± 0.5) pour DROP amélioré.

Pour des bananiers plus âgés dont le LAI est compris entre 0.6 et 0.96, il est estimé respectivement par DROP initial et par DROP amélioré à 11.1% (± 1.9) et 6.2% (± 2.2) de la pluie incidente. Sachant que le modèle amélioré surestime de 33% la pluie redistribuée en stemflow, sa valeur mesurée devrait être voisine de 4.7%, pour les bananiers de 10 mois plantés en pot.

L'effet de la croissance du bananier sur le stemflow a été évalué par la relation entre le LAI et le stemflow. En séparant les deux classes d'âge de bananiers, on constate que la relation entre le stemflow et le LAI varie avec l'âge des plantes (Figure 4.8a et 4.8b).

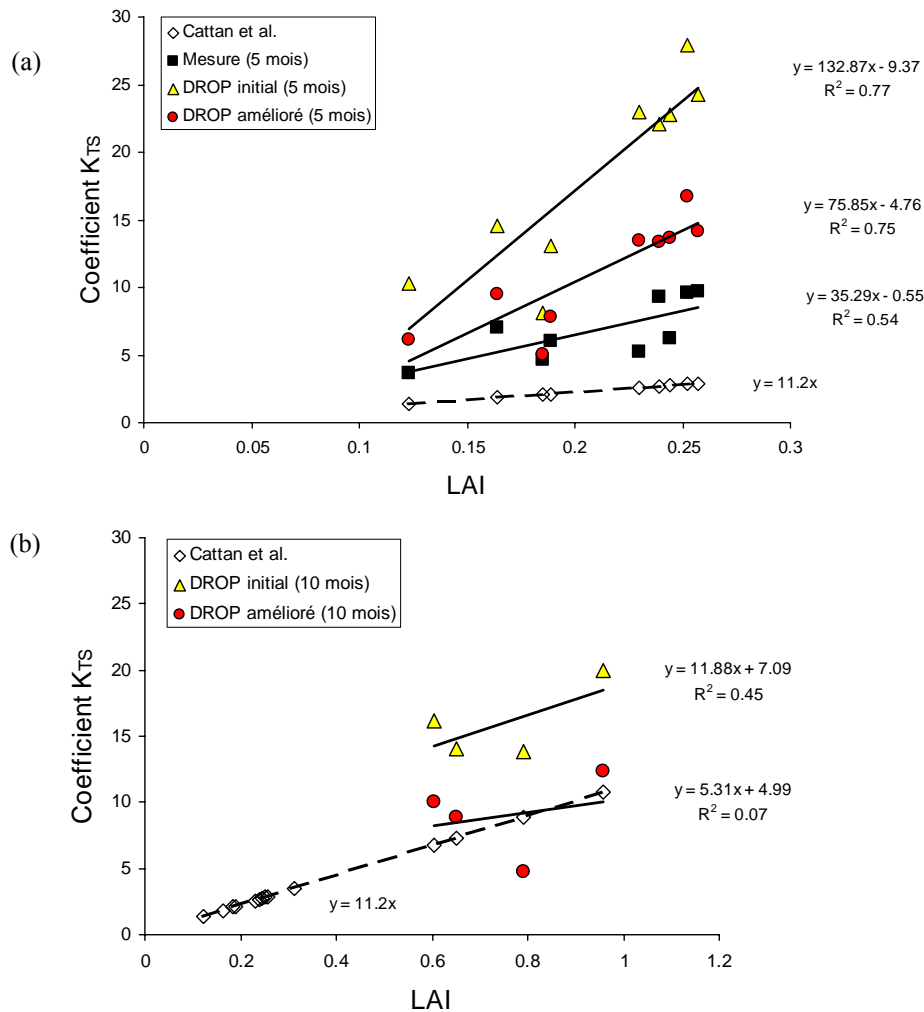


Figure 4.8 : Coefficient de stemflow (K_{ts}) en fonction du LAI, pour des bananiers de 5 mois (a) et de 10 mois (b). Les régressions sont données pour la relation (losanges et pointillés) trouvée par Cattan et ses collaborateurs (2005), pour la mesure (carrés) et pour la simulation par DROP initial et par DROP amélioré.

Pour de jeunes bananiers, le coefficient de stemflow mesuré (K_{ts}) représente plus de 35 fois le LAI, 132,9 fois le LAI, pour la simulation par DROP initial, et 75,85 fois le LAI, pour la simulation par DROP amélioré. Bien que l'introduction des lois d'interception améliore la simulation du stemflow, il reste encore surestimé par le modèle. Cette surestimation laisse envisager que les pertes d'eau par interception seraient sous-estimées par DROP.

Pour les bananiers plus âgés, K_{ts} mesuré représente 11,9 fois le LAI (pour DROP initial) et 5,3 fois le LAI (pour DROP amélioré). Le rapport entre le coefficient K_{ts} et le LAI serait donc plus important pour de jeunes bananiers que pour ceux plus âgés. Donc, les forts coefficients trouvés par rapport à l'étude menée par Cattan et ses collaborateurs (2005) pourraient s'expliquer par le fait que ces auteurs ont travaillé sur des LAI au champ bien supérieurs (de plus de 10 fois) à ceux utilisés pour notre étude.

En comparant les régressions entre le stemflow et le LAI, obtenues pour des bananiers de 5 mois, on constate d'une part, que les meilleurs ajustements sont obtenus pour les simulations ($R^2=0.77$ et $R^2=0.75$) et non pas pour la mesure ($R^2=0.56$). Ce qui traduit le fait que la simulation du stemflow par le modèle soit fortement liée à l'architecture, ce qui est moins évident pour la mesure. Pour des bananiers de 10 mois, les régressions obtenues par la simulation se rapprochent de celle obtenue par Cattan et ses collaborateurs (2005). Toutefois, le faible nombre de bananiers ne suffit pas à établir une relation correcte. La meilleure relation est obtenue pour la simulation par DROP initial. Ceci pourrait être dû à la faible valeur de stemflow pour le bananier de LAI voisin de 0.8, pour lequel l'écart entre la mesure et la simulation est maximal, traduisant ainsi que la modélisation des écoulements par DROP amélioré pourrait présenter des erreurs plus importantes pour ce bananier.

4.2.2.4 Evaluation de l'interception globale de la pluie par les bananiers

L'interception I de la pluie, définie comme la différence entre la pluie brute, P_g (pluie incidente reçue par la plante) et la pluie redistribuée au sol en stemflow et throughfall (Leyton et al., 1967), a été calculée pour la mesure et la modélisation par DROP amélioré. Elle a été exprimée à la fois en millimètre d'eau stockée par les bananiers et en pourcentage de la pluie reçue P_g . Le Tableau 4.3 présente les résultats issus de la mesure (pour 9 bananiers) et de la simulation (pour 10 bananiers). L'interception, exprimée en millimètre de pluie, est calculée pour une surface plantée au champ de $2.35 \text{ m} \times 2.35 \text{ m}$ par bananier.

Bananier	R (mm.h ⁻¹)	P _g (mm)	Mesure		Simulation	
			I (mm)	I (%)	I (mm)	I (%)
B1	134.4	11.2	0.56	5.16	0.48	4.46
B2	120	10	-0.24	-2.53	0.48	5.00
B3	134.4	11.2	0.07	0.63	0.40	3.67
B4	130.8	10.9	0.01	0.05	0.49	4.62
B5	131.64	10.97	0.13	1.26	0.59	5.55
B6	79.58	10.61	0.24	2.38	0.79	7.74
B7	76.13	10.15	-0.05	-0.54	0.65	6.59
B8	78	10.4	0.20	2.02	0.73	7.28
B9	77.25	10.3	0.08	0.85	0.69	6.88
B10	75	10	–	–	0.63	6.46

Tableau 4.3 : Interception (I) mesurée et simulée par DROP amélioré en fonction de la pluie incidente (P_g) pour 10 bananiers (B1 à B10) âgés de 5 mois et deux gammes d'intensité de pluie R .

Etant donné que les végétaux stockent une partie de la pluie incidente sur leurs organes (feuilles, tiges, tronc, fruits), le volume de pluie redistribuée au sol est supposé être inférieur au volume de pluie incidente. Cependant, les données mesurées montrent une interception négative pour les bananiers B2 et B7, traduisant des erreurs de la mesure dues aux limites du dispositif expérimental. Ces erreurs sont liées à la mauvaise répétabilité des nappes de pluie délivrées par le simulateur. En éliminant ces données erronées, on constate que l'interception moyenne mesurée est de 0.19 mm (± 0.2), ce qui correspond à 1.76% (± 1.7) de la pluie incidente, mais peut atteindre 0.56 mm (bananier B1). Les forts écarts-types trouvés confirment la mauvaise la fiabilité des valeurs mesurées. L'interception est toujours positive pour les 9 bananiers âgés de 5 mois. Sa valeur moyenne est de 5.74% (± 1.6) de la pluie incidente, soit 0.60 mm (± 0.15).

Pour la simulation, le pourcentage de pluie interceptée par les bananiers semble croître avec le LAI : il est égal à 4.25% (± 0.5), soit 0.46 mm (± 0.05) pour les LAI inférieurs à 0.2, et à 6.81% (± 0.8), soit 0.69 mm (± 0.08) pour un LAI compris entre 0.2 et 0.3. Pour la mesure, les données ne permettent pas de mettre en évidence une relation significative entre le LAI et l'interception I : l'interception est de 1.95% (± 2.8) pour les LAI inférieurs à 0.2, et de 1.2% (± 1.1) pour un LAI compris entre 0.2 et 0.3.

4.2.3 Discussion

En comparant les résultats de simulation à la mesure, le modèle DROP initial surestimerait de plus de 2.3 fois (soit de plus de 130%) les transmissions d'eau au sol, lorsque les pertes par interception ne sont pas prise en compte (cf. Figure 4.5). Cette surestimation était due aussi bien à une surestimation du throughfall que du stemflow. En introduisant les lois d'interception dans le modèle, les coefficients de transmission de la pluie en stemflow et en throughfall ne seraient plus surestimés que de 40%. Cependant, ces valeurs sont à prendre avec précaution car elles sont données

En dépit de ces différences entre modèle et mesure, le modèle simule correctement les distributions de la pluie sous les bananiers puisqu'un coefficient de corrélation de 0.87 a été trouvé entre la simulation et la mesure des coefficients K_t . Les écarts entre le modèle et la mesure pour l'estimation du stemflow ne seraient pas dus à la différence de surface d'intégration normalement utilisée pour simuler le stemflow : cette différence n'induit qu'une erreur de 3% par rapport au stemflow mesuré.

Les comparaisons des données mesurées et simulées du throughfall restent perturbées par le splash entre collecteurs et par le déplacement des points d'égouttage au cours de la mesure, lié aux mouvements de la plante sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes. De plus, les expérimentations effectuées sur les processus d'égouttage ont montré que pour des inclinaisons de feuille supérieures à 30°, les égouttages issus de hauteur de chute supérieure à 1 m avaient des trajectoires (cf. 3.2.5) non verticales, ce qui entraînerait une réduction du throughfall mesuré pour ces points d'égouttages. Le modèle ne prend pas en compte ce phénomène.

Notre étude a montré que le stemflow représentait 1.9 à 3% de la pluie incidente pour des bananiers âgés de 5 mois et de LAI compris entre 0.1 et 0.3. Pour des bananiers âgés de 10 mois, il représentait 4.7% de la pluie incidente. Ces valeurs sont inférieures à celle de 9%, trouvée par Jiménez et Lhomme (1994). Cette différence peut s'expliquer par la différence de variété des bananiers utilisés et de leurs gammes de LAI : Jiménez et Lhomme ont utilisé des bananiers en parcelle de type « Plantain » de LAI de 2, alors que nous avons travaillé sur des bananiers isolés de type « Grande Naine ». La mesure a également montré qu'une réduction de moitié de l'intensité de la pluie n'avait pas d'effet sur la proportion de pluie incidente redistribuée en stemflow. Cependant, la modification de l'intensité de la pluie produite par le simulateur s'est faite en faisant varier la fréquence de passage de la buse, mais en conservant la DTG. De ce fait, le dispositif expérimental ne permettait pas de faire varier l'intensité de façon normale. De plus, la gamme d'intensités pour laquelle nous avons travaillé étant faible, nous ne pouvons conclure à un effet de l'intensité de la pluie sur le stemflow pour des intensités supérieures à 70 mm.h⁻¹.

Cependant, contrairement aux études faisant varier l'intensité de la pluie, seule la fréquence de passage de la buse du simulateur de pluie et donc le nombre de gouttes délivrées étaient modifiés. La DTG (distribution de taille des gouttes) de la pluie n'étant pas affectée et la gamme d'intensités sur laquelle nous avons travaillé étant faible, il serait hasardeux de

conclure que l'intensité n'a pas d'effet sur le stemflow pour des intensités supérieures à 70 mm.h⁻¹. D'ailleurs, ceci s'opposerait aux résultats de Van Elewijck qui a montré que le stemflow du maïs augmentait avec l'intensité de la pluie (Van Elewijck, 1989b), pour des intensités variant entre 1 et 90 mm.h⁻¹, intensités restant en générale inférieures aux deux intensités utilisées dans nos expérimentations. Pour déterminer l'effet de l'intensité sur le stemflow, il aurait fallu travailler avec un autre type d'asperseur permettant une modification de la taille de gouttes incidentes.

Le pourcentage de pluie redistribuée en stemflow, estimé par nos mesures sur des jeunes bananiers, reste inférieur aux valeurs trouvées par Parkin et Codling pour un couvert de maïs (Parkin et Codling, 1990) et se rapproche de celles trouvées pour un couvert de pommes de terre par Saffigna et ses collaborateurs (1976).

Nos résultats ont également montré que le rapport entre le coefficient K_{ts} et le LAI diminue quand le LAI augmente et que la valeur de 11.2 trouvée par Cattan et ses collaborateurs (2005) n'était pas applicable pour des bananiers de faible LAI. Cependant, pour des bananiers de 10 mois plantés en pot, la simulation par DROP montre que ce rapport se rapproche de celui mesuré au champ (Nouvellon, 1999; Cattan et al., 2005) pour des LAI variant entre 1.5 et 3.3. Nos résultats laissent envisager que la pente de la régression entre le coefficient de stemflow et le LAI varierait avec la croissance de la plante. Cependant, aucune étude au champ sur de jeunes bananiers présentant des LAI voisins de ceux que nous avons utilisés, n'a été faite à ce jour. Les fortes pentes des régressions entre K_{ts} simulé et le LAI, trouvées pour des bananiers âgés de 5 mois, traduisent que le stemflow est plus important pour des jeunes bananiers que pour bananiers plus âgés. Ceci peut s'expliquer par le fait que les feuilles de jeunes bananiers sont peu ondulées et présentent moins de bassins versants. En conséquence, l'eau stockée sur ces feuilles serait peu transmise en égouttages vers les bords de feuille, mais plus facilement dirigée vers le pseudo-tronc, alimentant ainsi le stemflow et limitant le throughfall. De plus, le développement des feuilles de bananier se fait en spirale avec un angle entre feuilles successives avoisinant 150° (Nouvellon, 1999) et le faible nombre de feuilles déjà développées par les jeunes bananiers limite le masquage entre feuille et favorise l'augmentation de la proportion de surface interceptrice. En conséquence, la proportion de stemflow par rapport au LAI serait plus importante pour de jeunes bananiers.

Nos mesures sur des bananiers de 5 mois, ne permettent pas d'établir le pourcentage de pluie intercepté par les bananiers à l'aide de la méthode de soustraction de la pluie brute par la pluie nette proposée par Leyton et ses collaborateurs (Leyton et al., 1967). Ceci est dû à des défauts de répétabilité des nappes de pluie délivrées par le simulateur. Ces erreurs de mesure sont confirmées par l'analyse des résultats obtenus par la mesure et la simulation. En effet, nos simulations ont montré que le modèle pouvait surestimer de 40% (cf. Figure 4.5), les coefficients de transmission de la pluie en stemflow et en throughfall. En considérant que le modèle estime l'interception minimale à 6% de P_g , les transmissions en stemflow et en throughfall représenteraient 94% de P_g . Sachant que les coefficients de transmission K_t , sont surestimés de 40%, le stemflow et le throughfall représenteraient 67% de P_g en réalité. L'interception mesurée représenterait donc 33% de la pluie incidente P_g , ce qui est bien au-delà de la valeur de 2% P_g mesurée (Tableau 4.3). Nous en déduisons que la mesure est biaisée et l'écart entre les coefficients de transmission calculés par le modèle et par la mesure est bien plus faible, impliquant une meilleure réponse du modèle.

Pour des pluies incidentes de l'ordre de 10 mm, Jiménez et Lhomme (1994) ont estimé à 10% (± 4) le pourcentage de pluie interceptée par des bananiers de type « Plantain » et d'un LAI de 2. Cette valeur se rapproche donc de celle de 6.81% (± 0.8) que nous avons trouvée pour des jeunes bananiers. En estimant que l'interception pour nos bananiers de type « Grande

Naine », serait de même ordre de grandeur que celle trouvée par Jiménez et Lhomme (1994), sa valeur maximale correspondant à 14% de P_g , le stemflow et le throughfall représenteraient 86% de P_g , et non 94% trouvés par le modèle. Il ne surestimerait les transmissions, au plus, que de 9.3% et sous-estimerait l'interception I de 57% : I augmenterait avec le LAI en variant en conséquence entre 0.6 et 1.2 mm. Ce qui conduit à une interception moyenne voisine de 1 mm.

CONCLUSIONS

L'amélioration de DROP-TRI a permis d'améliorer la représentation des formes complexes de feuille et de l'architecture des bananiers dans leur ensemble. Désormais, DROP-TRI calcule de façon précise les surfaces foliaires, à partir de la triangulation. Il est également capable de fournir une bonne estimation des surfaces interceptrices.

Le modèle DROP surestimait les coefficients de transmission d'eau de pluie de plus de 130%. Par l'introduction des lois d'interception décrivant les pertes par splash et par stockage, cette surestimation a été réduite à 40%. En dépit de cette surestimation, un bon coefficient de corrélation de 0.87 a été trouvé entre les distributions simulées et mesurées, traduisant la capacité de DROP à simuler correctement les distributions de la pluie sous les bananiers. Certains phénomènes apparaissant au cours de l'interception de la pluie par les feuilles restent encore non pris en compte :

- Le déplacement des points d'égouttages, sous l'effet des fortes énergies cinétiques des gouttes de pluie ou du vent.
- Le départ d'eau préalablement stockée sur les feuilles quand elles sont inclinées à plus de 30°, ceci sous l'effet de forts égouttages tombant de plus de 1m.

Cependant, la surestimation des écoulements par la modélisation n'est pas un résultat définitif puisque la comparaison des distributions simulées de la pluie sous le couvert avec celles mesurées expérimentalement est perturbée par la projection de gouttes de splash entre les collecteurs utilisés pour la mesure sous simulateur de pluie. Aussi, la réponse du modèle pourrait être de meilleure qualité.

Le pourcentage de pluie redistribué en stemflow par des bananiers plantés en pot augmente avec le LAI. Il passe de 1.9% à 4.7% pour des LAI variant entre 0.1 et 1. Cependant, le rapport « K_{ts}/LAI » diminue avec la croissance des bananiers. Pour des bananiers de LAI variant entre 0.1 et 0.3, la relation reliant le coefficient K_{ts} et le LAI est la suivante :

$$K_{ts} = 35.3 \times LAI \quad \text{Eq. 4.5}$$

Pour cette gamme de LAI, notre étude a permis d'estimer l'interception de la pluie à 1 mm en moyenne.

Pour des bananiers de LAI variant entre 0.3 et 1, le coefficient K_{ts}/LAI varie entre 5.3 et 11.9.

Chapitre 5 Applications du modèle DROP

5.1 Localisation des zones d'écoulement préférentiel sous bananier

5.1.1 Introduction

Les premières études de distribution de taille de gouttes sous un couvert végétal ont montré que la DTG (distribution de taille de goutte) suivait une distribution normale (Brandt, 1989) et que les gouttes issues d'égouttages pouvaient être modifiées par le couvert, soit dans le sens d'une augmentation, soit dans le sens d'une diminution de leur diamètre (Brandt, 1989; Hall et Calder, 1993). Comme il a été établi que la distribution de la pluie était affectée par la structure du couvert, l'impact de cette modification sur l'altération du sol en surface a été directement lié au potentiel érosif des gouttes et aux taux de pluie localisés sous le couvert. En effet, les gouttes gravitaires peuvent se concentrer par endroit sous le feuillage (Eschner, 1965; Saffigna et al., 1976) et acquérir un potentiel érosif en fonction de leurs caractéristiques, telles que leur taille et leur hauteur de chute (Moss et Green, 1987; Cerro et al., 1998). Afin de mieux comprendre le processus d'érosion des sols, des études ont permis d'évaluer l'effet de l'énergie cinétique des gouttes, dépendant de ces deux dernières caractéristiques, sur l'érosion (Moss et Green, 1987; Ghadiri et Payne, 1988; Shainberg et al., 1992; Cerro et al., 1998).

Les taux de pluie redistribuée sous le couvert peuvent générer de l'infiltration et donc le lessivage des engrais et pesticides, ce qui réduit l'efficacité des épandages. En effet, il a été démontré que l'infiltration pouvait être particulièrement importante sous le couvert à la périphérie de la couronne foliaire, en raison du stemflow et des égouttages localisés (Eschner, 1965). De même, les fertilisants et les pesticides, apportés dans des cultures de pommes de terre et de maïs, étaient lessivés sous les sillons (Saffigna et al., 1976; Parkin et Codling, 1990).

Aussi, afin d'évaluer les risques maximaux de lessivage ou d'érosion sous bananeraie, nous avons utilisé le modèle DROP pour calculer les énergies cinétiques des gouttes sous le feuillage des 14 bananiers décrits précédemment. Connaissant les diamètres des égouttages sous bananier (Choisnard, 2000; Sansoulet, 2002), les points exutoires pour lesquels sont simulés des égouttages ont été traités afin de déterminer les hauteurs de chute sous le couvert et d'en déduire les énergies cinétiques et les débits générés. Afin de déterminer les énergies cinétiques des gouttes, connaissant leurs hauteurs de chute et leurs diamètres, leurs vitesses ont été calculées par le logiciel « Velocity[®] ». En effet, ce logiciel permet de calculer numériquement la vitesse d'une particule sphérique tombant en chute libre dans l'air (Stockton, 1999). Les débits V_t (l.h^{-1}) associés à chaque égouttage ont été calculés en fonction de la hauteur d'eau P_t (en mm), transmise par le pixel correspondant, la surface du pixel $S_{i,j}$ (en mm^2) et la durée t (en min) de la pluie simulée :

$$V_t = \frac{60 \times P_t \times S_{i,j}}{1 \times 10^6 \times t} \quad \text{Eq. 5.1}$$

En appliquant « Velocity[®] » à des gouttes incidentes de diamètre médian de l'ordre de 2 mm, supposées à leur vitesse terminale, l'énergie cinétique des gouttes de pluie incidente, a été estimée à la valeur de 142 μJ . Des pluies de 5 min (intensités de 120 et 130 mm.h^{-1}) et de 8 min (intensité de 78 mm.h^{-1}) ont été simulées. Elles correspondaient respectivement pour chaque surface élémentaire (pixel) à des débits incidents sur les plantes de $1.9 \cdot 10^{-3}$, $5.4 \cdot 10^{-4}$ et $3 \cdot 10^{-4} \text{ l.h}^{-1}$.

Le modèle fournissant des hauteurs d'eau (H_t) pour chaque point d'égouttages, ces hauteurs ont été converties en nombre de gouttes (n_d) de diamètre D (en mm), en utilisant l'équation suivante :

$$n_d = \frac{H_t \times D^3}{6 \times S_{i,j}} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Connaissant le nombre de gouttes émises par égouttage, les énergies cinétiques Ec_t cumulées (en J) pour chaque égouttage ont été calculées par l'équation suivante :

$$Ec_t = \frac{1}{12} \times \rho \times \pi \times D^3 \times v^2 \times n_d \quad \text{Eq. 5.3}$$

Où la masse volumique ρ de l'eau est exprimée en kg.m^{-3} , le diamètre D des gouttes en m et la vitesse v des gouttes au sol, juste avant l'impact, en m.s^{-1} .

5.1.2 Simulation des énergies cinétiques et des débits sous bananier

Les diamètres médians observés sous bananiers étant voisins généralement de 6 mm (cf. I.1.3) et les égouttages au sol se faisant en des points variables selon la plante en présence, nous avons cherché à mettre en évidence la répartition, par rapport au pseudo-tronc, des énergies cinétiques et des débits d'eau de pluie sous le feuillage. Le modèle DROP-INT calculant une matrice de hauteur d'eau sur chaque pixel (i,j) composant la grille de discrétisation utilisée pour la modélisation des écoulements, ces hauteurs d'eau ont été converties en nombre de goutte.

Le modèle fournissant une bonne description de l'architecture des plantes, les rayons R_{max} des couronnes foliaires ont été calculés à partir des fichiers des coordonnées 3-D des plantes et comparés au LAI des bananiers correspondants (Figure 5.1). Par définition, R_{max} correspond à la distance maximale sur le plan horizontal entre les extrémités des feuilles d'un bananier et son tronc.

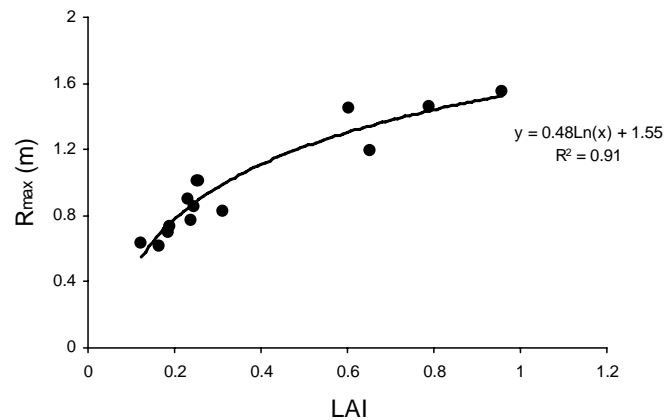


Figure 5.1 : Rayon maximal de la couronne foliaire de 14 bananiers en fonction de leur LAI.

Le rayon maximal R_{max} de la couronne foliaire augmente de façon logarithmique avec le LAI. Cette relation non linéaire est logique puisqu'à l'âge adulte « avant floraison », le bananier continue de développer ses feuilles en accroissant moins la longueur des limbes qu'il ne le fait au cours des premiers mois de croissance. De plus, lorsque la plante croît, l'angle d'inclinaison des nouvelles feuilles par rapport à la verticale augmente, ce qui conduit à une diminution de la pente entre R_{max} et le LAI.

5.1.2.1 Hauteurs de chute des égouttages

Pour l'ensemble des bananiers modélisés, la répartition des hauteurs de chute des égouttages estimées par DROP a été évaluée en fonction du LAI pour l'ensemble des 14 bananiers (Figure 5.2).

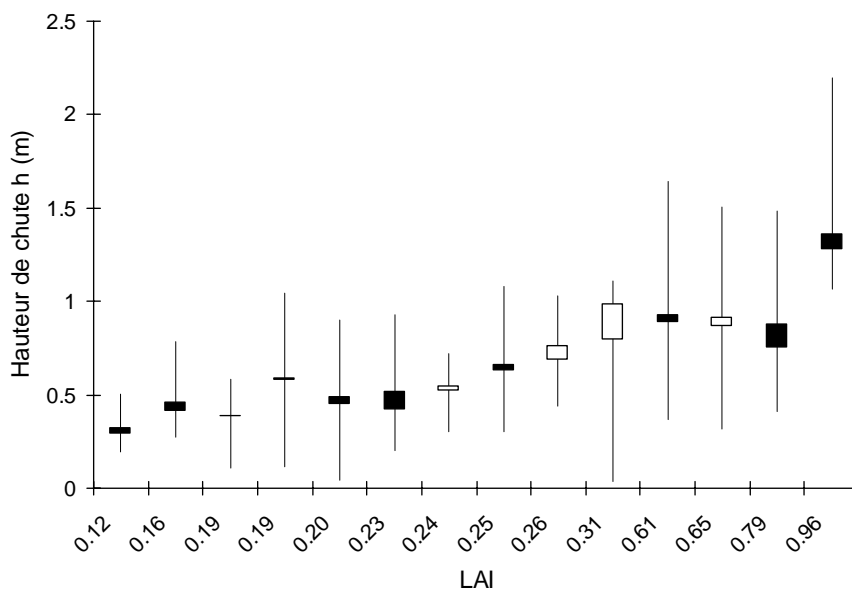


Figure 5.2 : Répartition des hauteurs de chute h des égouttages de chaque bananier en fonction du LAI. Données simulées par DROP pour 14 bananiers. Les barres verticales représentent les maxima et minima des hauteurs d'égouttage. Les rectangles représentent les données entre le premier et le troisième quartile des distributions des hauteurs de chute.

Les hauteurs de chute des gouttes sous le feuillage augmentent proportionnellement avec le LAI, les hauteurs de chute variant de 0.03 à 2.19 m. Les écarts entre maxima et minima de ces hauteurs augmentent également avec le LAI.

5.1.2.2 Augmentation des énergies cinétiques et les débits de pluie pour les égouttages sous la couronne foliaire

Les vitesses des gouttes sont calculées à l'aide de « Velocity® » connaissant les hauteurs de chute des gouttes (celles des égouttages sont calculées par DROP) et leur taille. Pour les gouttes incidentes, les vitesses atteintes sont supposées maximales (les gouttes atteignent leurs vitesses limites). Les énergies cinétiques des gouttes secondaires et les débits générés sous le feuillage sont supérieurs par endroit à ceux de la pluie incidente. Afin d'évaluer ces augmentations, deux rapports ont été établis en fonction de la distance au tronc des égouttages :

- le rapport Ec_t/Ec_g des énergies cinétiques Ec_t issues des égouttages (pluie secondaire) sur les énergies cinétiques Ec_g issues de la pluie incidente (Figure 5.3a).
- Le rapport V_t/V_g des débits V_t générés par les égouttages (pluie secondaire) sur les débits V_g générés par la pluie incidente (Figure 5.3b).

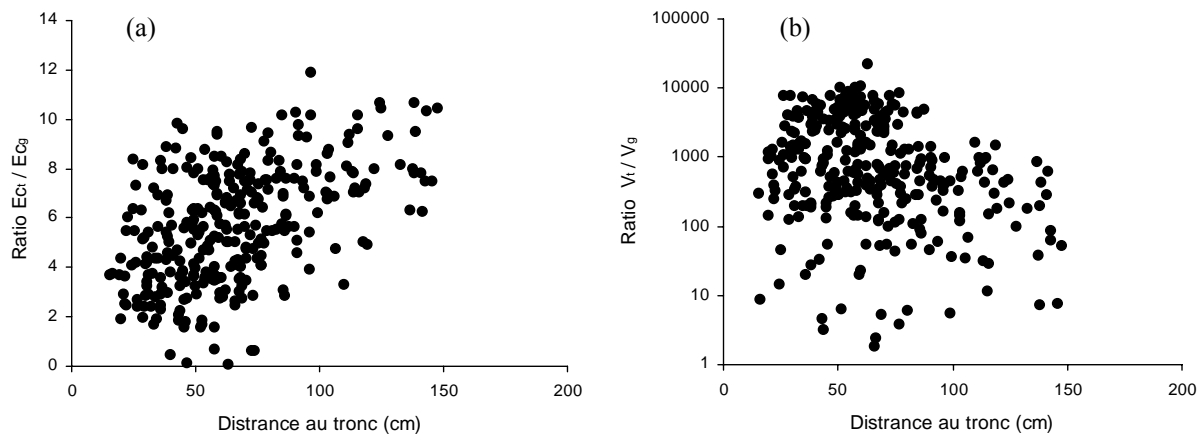


Figure 5.3 : Evolution des rapports entre pluie transmise et pluie incidente en fonction de la distance au tronc pour 14 bananiers. (a) Ec_t/Ec_g : énergies cinétiques des égouttages Ec_t sur énergies cinétiques de la pluie incidente Ec_g . (b) V_t/V_g : débits des égouttages V_t sur débits de la pluie incidente V_g .

Les simulations ont permis d'estimer, pour la plupart des égouttages, une augmentation des énergies cinétique de 1.6 à 12 fois celles de la pluie incidente et une augmentation des débits correspondant à 1.8 à $2.23 \cdot 10^4$ fois ceux de la pluie incidente. Pour des bananiers ayant des rayons de couronne foliaire variant entre 0.7 et 1.5 m, contrairement aux énergies cinétiques des égouttages, plus on s'éloigne du pseudo-tronc, plus les débits des écoulements en égouttage sont faibles.

5.1.2.3 Répartition des énergies cinétiques et des débits de pluie sous la couronne foliaire

Pour vérifier s'il existe une zone précise pour laquelle les égouttages et débits sont maximaux sous la couronne, nous avons établi des classes de distance de 10 cm par rapport au pseudo-tronc et sommé sur ces classes les énergies cinétiques des gouttes et les débits

générés. Des exemples de répartition sont présentés en Figure 5.4, pour deux gammes de LAI (inférieur à 0.2 et supérieur à 0.6) et deux formes de distribution.

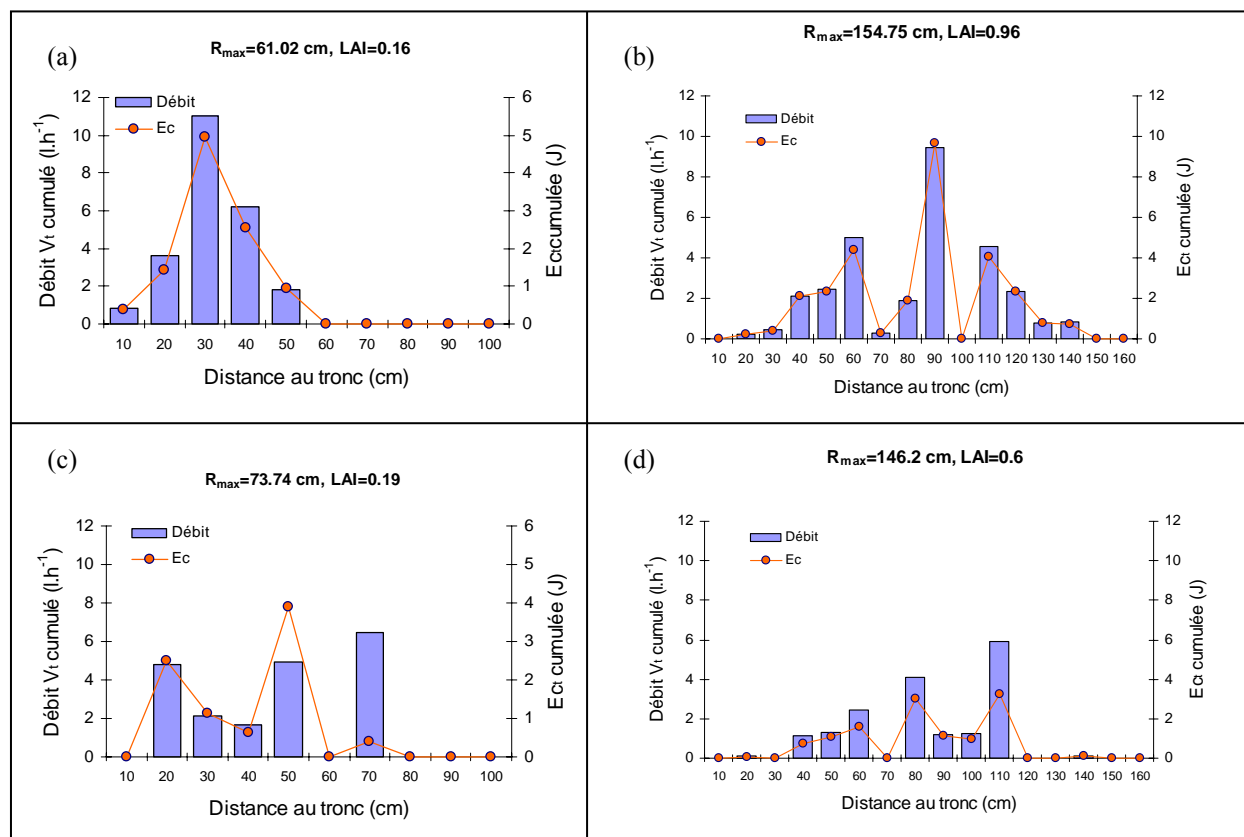


Figure 5.4 : Exemples de répartition des énergies cinétiques (Ec_i) et des débits (V_i) cumulés sur des pas de 10 cm autour du pseudo-tronc. Les données sont issues de la simulation par DROP amélioré. (a) et (c) : $LAI \leq 0.2$. (b) et (d) : $LAI \geq 0.6$. (a) et (b) : maximum de débit correspondant au maximum d'énergie cinétique. (c) et (d) : maximum de débit ne correspondant pas au maximum d'énergie cinétique.

Pour établir une relation entre la répartition des égouttages et le développement du bananier, les bananiers ont été classés par LAI, puis la répartition des énergies cinétiques (Ec_i) et des débits (V_i) cumulés en fonction de leur distance au tronc normalisée par le rayon de la couronne foliaire R_{max} , a été établie (Figure 5.5). Les données sont issues de simulations par DROP amélioré.

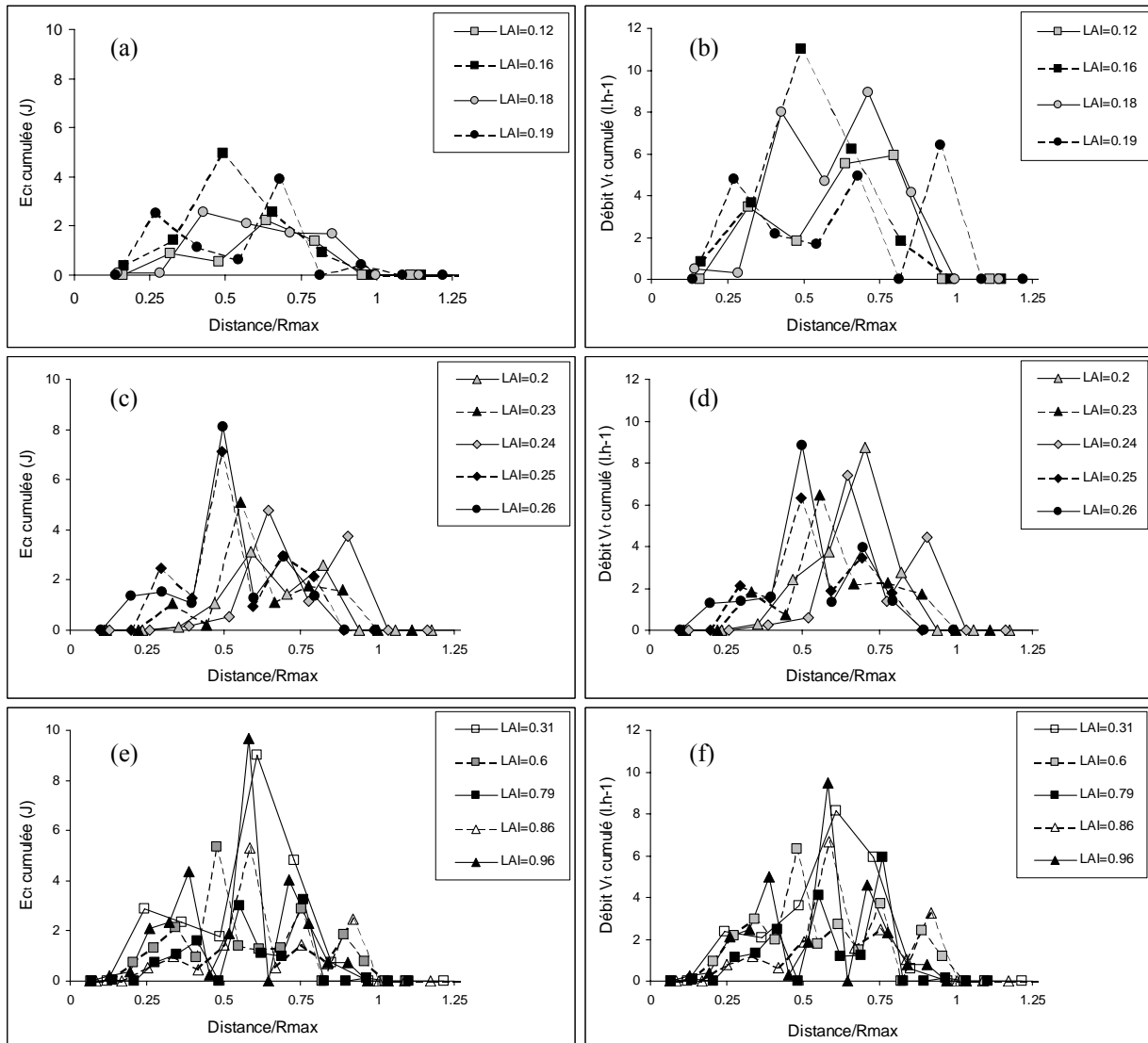


Figure 5.5 : Energies cinétiques Ec_i et débits V_i cumulés sur des couronnes de 10 cm autour du pseudo-tronc, en fonction de la distance au tronc normalisée par R_{max} , le rayon maximal de la couronne foliaire. Les 14 bananiers sont classés selon leur LAI : (a) et (b) pour des LAI inférieurs à 0.2, (c) et (d) pour des LAI compris entre 0.2 et 0.3, puis (e) et (f) pour des LAI supérieurs à 0.3.

Les graphiques montrent la présence d'une zone à forte énergie cinétique entre la moitié et les trois quarts du rayon foliaire, quelle que soit la taille du bananier (Figures 5.5a, 5.5c et 5.5e). Cependant, pour certains bananiers, de fortes énergies cinétiques sont simulées plus près du pseudo-tronc, dans la première moitié de la couronne foliaire (LAI de 0.18 de la Figure 5.5a) ou à la périphérie de la couronne foliaire (LAI de 0.2 et 0.24 de la Figure 5.5c). En comparant les répartitions des énergies cinétiques avec celles des débits sous égouttages, on constate une similitude des formes des courbes traduisant une forte corrélation entre ces

deux paramètres. En effet, pour l'ensemble des bananiers étudiés, les débits sont maximaux (près de 10 l.h^{-1}) également sur une zone située entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ de R_{max} . Toutefois, certains débits importants apparaissent en lisière de la couronne foliaire, laissant supposer qu'ils sont issus d'égouttages à partir de bouts de feuille (LAI de 0.18 de la Figure 5.5b). Ce type d'égouttages est associé à de plus faibles énergies cinétiques (LAI de 0.18 de la Figure 5.5a). Enfin, les énergies cinétiques semblent augmenter avec le LAI, ce qui n'est pas le cas des débits générés sous égouttages.

5.1.3 Discussion

Le throughfall, composé de gouttes de pluie directe et de gouttes issues d'égouttages de diamètres différents (Brandt, 1989), peut avoir un effet important sur l'humidité (Eschner, 1965), l'érosion du sol (Armstrong et Mitchell, 1987; Moss et Green, 1987), l'infiltration ou le ruissellement favorisé par la formation d'une croûte superficielle (Le Bissonais et Singer, 1992). Ces égouttages, tributaires de la structure des couverts (Hall et Calder, 1993) caractérisée par le type des surfaces interceptrices et leurs formes (Armstrong et Mitchell, 1988), les bassins versants présents sur ces surfaces (Bassette et Bussière, 2005) et les hauteurs de chute des égouttages (Brandt, 1989; Hall et Calder, 1993), tombent au sol avec des énergies cinétiques et des débits différents de ceux des gouttes incidentes (Wainwright et al., 1999).

Dans le cas du bananier, les diamètres des égouttages étant trois fois supérieurs à ceux des gouttes incidentes, leurs énergies cinétiques sont en majorité supérieures à celles des gouttes de pluie incidente. Les résultats de simulation des répartitions des égouttages sous les bananiers ont montré que les égouttages généraient à la fois de forts débits et de fortes énergies cinétiques principalement entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ du rayon foliaire. A ces points spécifiques sous le feuillage, la simulation a estimé une multiplication des énergies cinétiques par 3 au moins, et des débits par 1.6 fois au moins. Ces énergies cinétiques correspondent à des égouttages issus des bords des feuilles, à la moitié des limbes. Les hauteurs de ces égouttages et les énergies cinétiques augmentent donc avec l'âge des bananiers. Cependant, la croissance des plantes n'a pas le même effet sur les débits qui dépendent de la capacité des bassins versants et donc de leurs surfaces. Ces débits restent toutefois supérieurs au moins à 1.8 fois ceux issus de la pluie incidente.

Bien que peu d'érosion ait été observé en Guadeloupe sur andosol (Cabidoche, 2001), lorsque les sols présentent des états de surfaces secs, cette érosion peut être favorisée par le ruissellement occasionné sur des parcelles cultivées en pente ou qui sont saturées en eau (Armstrong et Mitchell, 1987; Le Bissonais et Singer, 1992; Khamsouk, 2001). Lorsqu'elles ne ruissellent pas, les accumulations d'eau sous la couronne foliaire augmentent l'infiltration et peuvent donc provoquer des pertes en fertilisants (Godefoy et Dormoy, 1989) et en pesticides. Cette infiltration est d'autant plus rapide que les sols sont secs et riches en argiles gonflantes (Cabidoche, 2001), tels les andosols sur lesquels sont plantées les bananeraies.

Aussi, contrairement à certaines structures de couverts qui limitent les énergies cinétiques et les intensités de la pluie atteignant le sol (Wainwright et al., 1999), l'architecture des bananiers amplifie ponctuellement ces phénomènes et par conséquent, les risques de lessivage et d'infiltration d'intrants.

5.2 Simulation des écoulements sous des bananiers en interaction

5.2.1 Introduction

Pour une plante, l'accès aux ressources minérales, à la lumière et à l'eau est affecté par la présence de plantes environnantes (Mech et Prusinkiewicz, 1996). De façon similaire, une plante n'intercepte pas de la même manière l'eau de pluie lorsqu'elle est isolée et lorsqu'elle est en interaction avec d'autres plantes (Bassette et Bussière, 2004). Nous avons donc cherché à montrer comment les écoulements d'un bananier peuvent être affectés par la présence de bananiers environnants qui masquent certaines de ses feuilles. Pour cela, nous avons simulé les écoulements de pluie sur 4 bananiers B'1, B'2, B'3 et B'4 âgés de 10 mois (cf. 4.2) lorsque chacun était isolé « *sans interactions* » et lorsque leurs feuilles se touchaient « *avec interactions* » (Figure 5.6). Les bananiers étant de petite taille, afin d'obtenir des interactions entre feuilles, généralement observées en bananeraie, les quatre bananiers ont été rapprochés les uns des autres en réduisant l'inter-rang à 1.70 m au lieu des 2.35 m normalement utilisés en bananeraie.

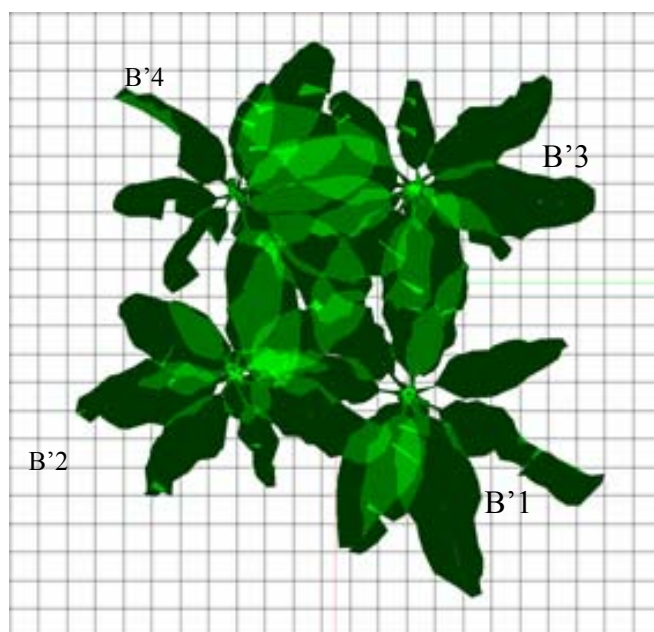


Figure 5.6 : Visualisation des bananiers B'1, B'2, B'3 et B'4 en interaction, à l'aide du modèle DROP, d'après le fichier d'extension « .TIF » fourni en sortie de DROP.

Les modifications entre bananiers isolés et en interaction dans ces deux situations ont été quantifiées par le calcul des surfaces interceptrices et les différences entre les écoulements sur chaque bananier. Ces différences ont été estimées à partir du stemflow, et du nombre de points d'égouttages par bananier, de la répartition de ces points par rapport au pseudo-tronc et enfin de la quantité de pluie interceptée par ces bananiers, en fonction de leur surface interceptrice.

5.2.2 Surfaces interceptrices de bananier, avec et sans interaction d'autres bananiers

Lorsque les bananiers B'1, B'2, B'3 et B'4 sont en interaction, leurs surfaces interceptrices L_W diminuent (Figure 5.7) car, plusieurs surfaces foliaires se masquent entre

elles, limitant les surfaces interceptant la pluie incidente. Le nuage de points sous la 1^{ère} bissectrice représente les feuilles pour lesquelles la présence des bananiers voisins a modifié l'interception.

Les surfaces interceptrices qui représentaient en moyenne 74.7% des surfaces foliaires totales des bananiers sont ramenées à 61.8% par les interactions entre plantes voisines, ce qui représente une réduction de 17.3%.

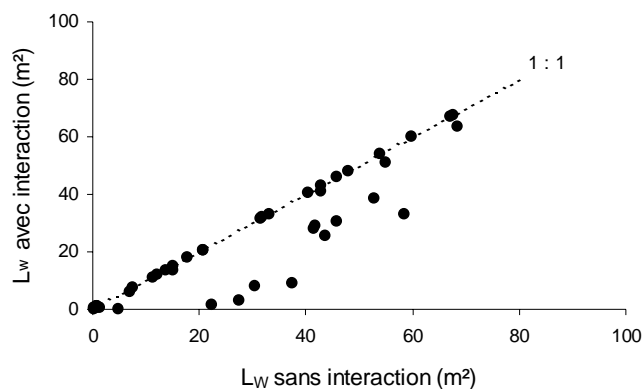


Figure 5.7 : Surfaces interceptrices L_W simulées pour 4 bananiers (B'1, B'2, B'3 et B'4) lorsqu'ils se touchent (avec interactions), en fonction des surfaces interceptrices L_W simulées lorsque ces bananiers ne se touchent pas (sans interaction).

5.2.3 Effets de l'interaction entre bananiers sur les distributions de pluie

Afin d'évaluer l'effet du masquage entre plantes sur les distributions de la pluie au sol, nous avons simulé la répartition de la pluie sous ces bananiers en interactions et isolés (sans interaction). Les modifications des distributions de pluie (le coefficient de stemflow K_{ts} , le nombre d'égouttages N_E et l'interception I en mm), dues aux interactions entre bananiers sont présentées en Tableau 5.1. Les LAI des bananiers sont également précisés.

Plante	Bananiers avec interactions				Bananiers isolés			
	LAI	K_{ts}	DP	I (mm)	LAI	K_{ts}	DP	I (mm)
B'1	1.83	12.36	28	—	0.96	12.36	39	0.30
B'2	1.25	9.31	21	—	0.65	8.85	31	0.22
B'3	1.51	3.7	21	—	0.79	4.72	33	0.31
B'4	1.16	10.26	15	—	0.61	9.99	24	0.24
Toutes			85	0.99			127	

Tableau 5.1 : Effets des interactions entre 4 bananiers (B'1, B'2, B'3 et B'4) sur le coefficient de stemflow K_{ts} , le nombre de points d'égouttage (DP) l'interception I . Les LAI « Bananiers avec interactions » correspondent à un inter-rang de 1.7 m et ceux « Bananiers isolés », à un inter-rang de 2.35 m.

La simulation ne montre pas d'effet marqué des interactions sur les coefficients de stemflow. Cependant, le nombre de points d'égouttages diminue en moyenne de plus de 33%

avec les interactions. L'interception simulée pour les bananiers isolés représente un tiers de celle simulée pour ces mêmes bananiers en interaction.

Les simulations ont fourni les coefficients K_t par collecteur, pour ces 4 bananiers en interaction. Elles montrent que les coefficients K_t simulés par collecteur représentent en moyenne 1.6 fois la pluie incidente, lorsqu'ils sont en zone non protégée par les bananiers. Leurs valeurs maximale et minimale sont respectivement de 3.2 et 1.02 (Figure 5.8).

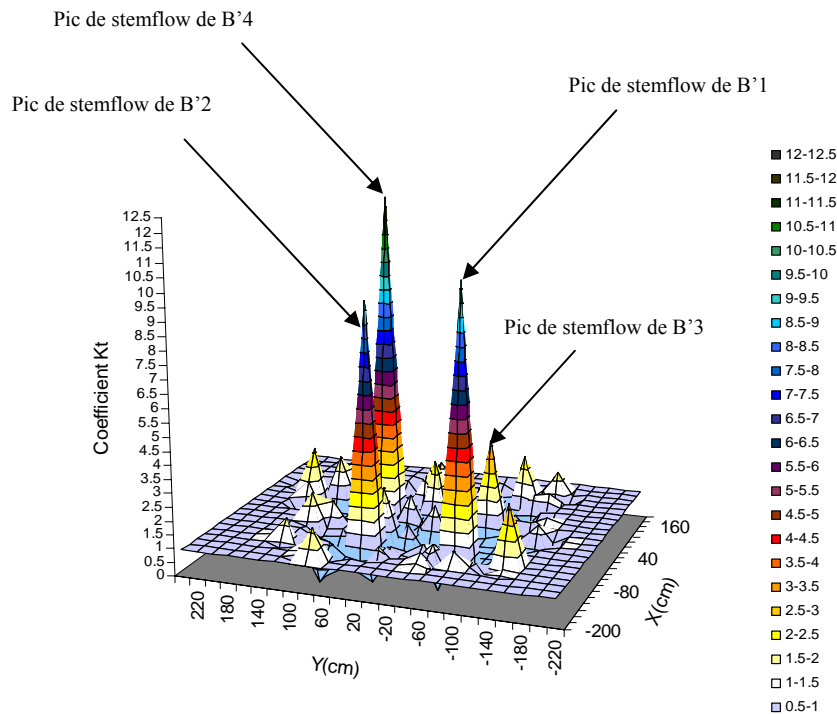


Figure 5.8 : Coefficients K_t sous 4 bananiers (B'1, B'2, B'3 et B'4) en interaction.

5.2.4 Effets des interactions entre bananiers sur les énergies cinétiques et les débits de pluie

En créant une situation d'interactions entre bananiers, les relations entre feuilles sont modifiées, ce qui peut affecter les écoulements sur les plantes, en particulier les égouttages. En conséquence, nous avons évalué l'effet de ces interactions sur la répartition des énergies cinétiques Ec_t et des débits V_t cumulés sur des couronnes successives de pas de 10 cm de large autour des pseudo-troncs. Les moyennes des rapports des énergies cinétiques Ec_t/Ec_g et des débits V_t/V_g , simulés pour les deux situations étudiées et pour chaque égouttage sous ces bananiers, sont présentés en Tableau 5.2.

	Bananiers isolés		Bananiers avec interactions	
	E_{c_t}/E_{c_g}	V_t/V_g	E_{c_t}/E_{c_g}	V_t/V_g
Moyenne	7.44	395.19	7.57	353.00
Ecart-type	1.75	347.20	1.78	333.49
Maximum	11.90	1579.69	11.90	1393.31
Minimum	2.84	2.42	2.84	2.42

Tableau 5.2 : Rapports des énergies cinétiques E_{c_t}/E_{c_g} et des débits V_t/V_g sous les couronnes foliaires de 4 bananiers avec interactions et isolés. E_{c_g} représente les énergies cinétiques des gouttes incidentes et E_{c_t} , celle des gouttes de throughfall.

Comparés aux énergies cinétiques des pluies incidentes et des débits qu'elles engendrent au sol, les énergies cinétiques et les débits sont accrus par endroit sous les couronnes. Pour les deux situations, les maxima et minima sont les mêmes pour E_{c_t}/E_{c_g} ce qui n'est pas le cas pour V_t/V_g . En moyenne, les interactions tendent légèrement à augmenter les énergies cinétiques potentielles des égouttages sous les bananiers (1.7% d'augmentation) et à diminuer leurs débits potentiels de 10.7%. Compte tenu du fait que les débits dépendent des bassins versants présents sur les feuilles, la légère diminution des rapports V_t/V_g est en accord logique avec la diminution de 33% du nombre de points d'égouttages trouvé précédemment. L'augmentation des superpositions foliaires pour les bananiers en interaction réduit l'alimentation des bassins versants et en conséquence, les volumes égouttés. Cependant, bien que certains égouttages devant potentiellement atteindre le sol soient interceptés lorsque les bananiers sont en interaction, leurs énergies cinétiques sont accrues. Ceci serait dû à une réduction du nombre de points d'égouttages situés principalement dans la basse couche du feuillage. L'interception de la pluie par les bananiers entraîne alors une multiplication par 2.8 à 12 des énergies cinétiques des gouttes par 2.4 à 1.6 10^3 des débits générés.

Des exemples de distribution des énergies cinétiques et des débits sous les couronnes foliaires sont présentés en Figure 5.9.

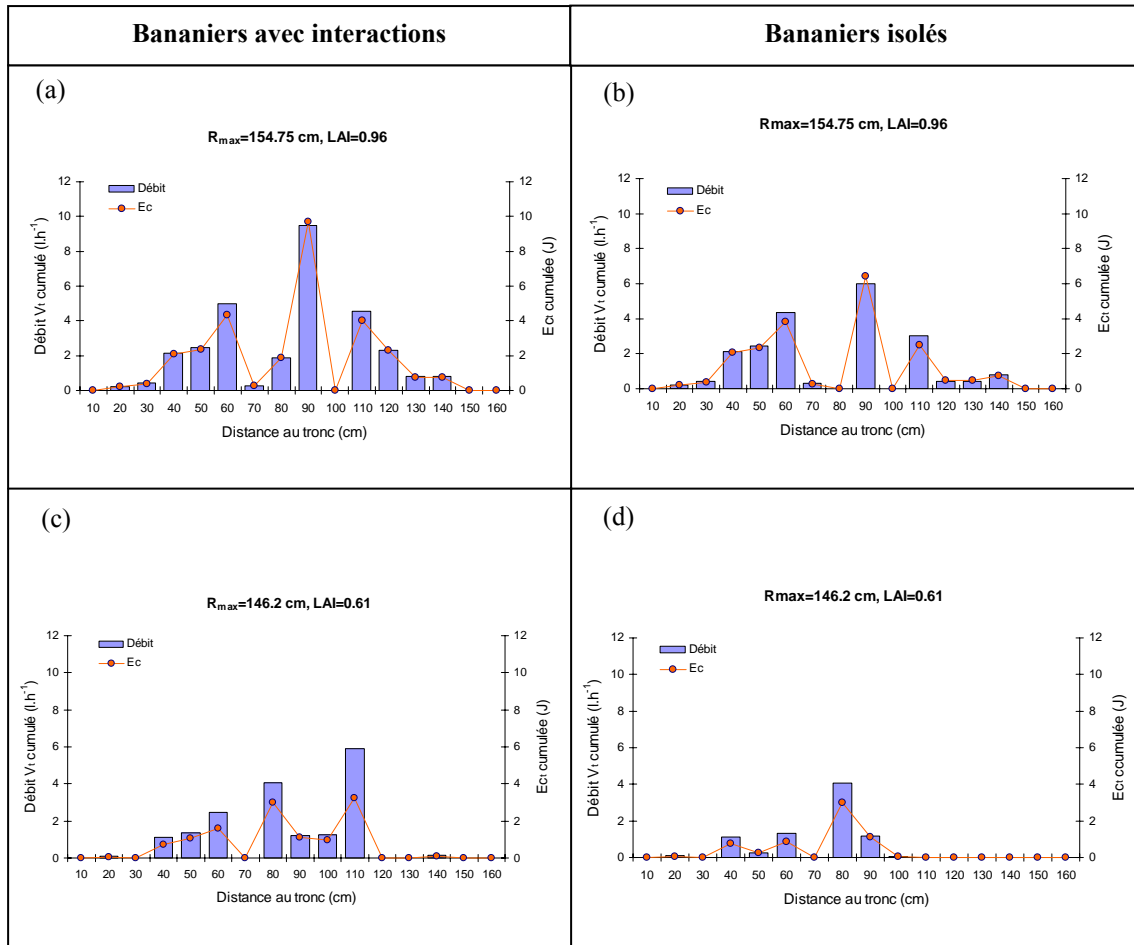


Figure 5.9 : Exemples de simulation des répartitions des énergies cinétiques E_c , et des débits V_n des égouttages sous le feuillage, cumulés sur des couronnes de pas 10 cm autour du pseudo-tronc de chaque bananier. (a) et (c) avec des interactions entre les bananiers, (b) et (d) pour les mêmes bananiers isolés.

Pour les deux exemples proposés (Figure 5.9), les égouttages sous bananiers isolés délivrent plus d'eau sous les couronnes foliaires que lorsqu'ils sont en interaction. Dans le cas du premier bananier (Figure 5.9a et 5.9b), la forme des distributions des énergies cinétiques et des débits, caractérisée par des valeurs maximales entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ du rayon de la couronne foliaire, est conservée. Dans le deuxième cas, on constate que les pics maximaux sont pratiquement annulés par les interactions entre feuilles de bananiers voisins.

Les répartitions des énergies cinétiques et des débits des égouttages, en fonction de R_{max} est présentée en Figure 5.10 pour l'ensemble des 4 bananiers dans les deux situations.

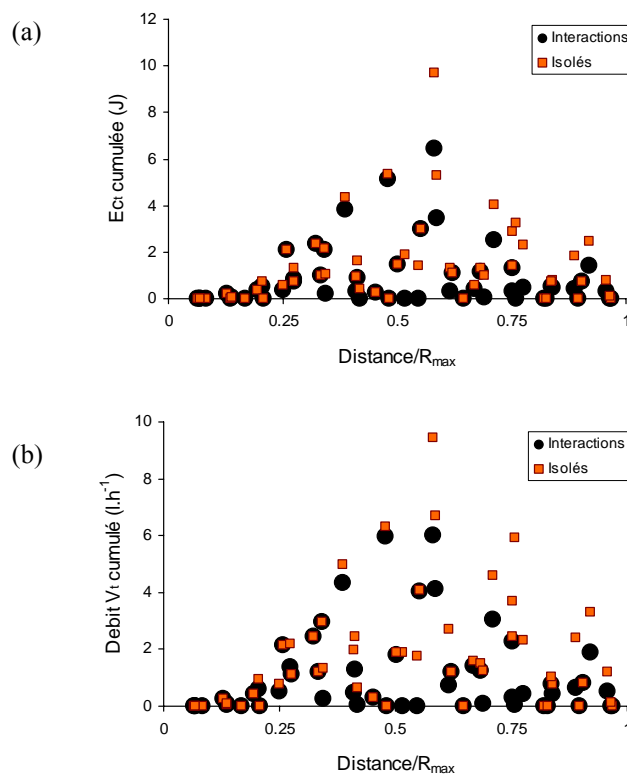


Figure 5.10 : (a) Répartition des énergies cinétiques E_{ci} et (b) des débits V_i cumulés au sol, en fonction de $Distance/R_{max}$, le rapport des distances au tronc sur le rayon maximal de la couronne foliaire, sans interaction et lorsque les bananiers sont isolés.

Les répartitions des énergies cinétiques et les débits sous la couronne foliaire sont pratiquement les mêmes : à moins de $\frac{1}{4}$ de R_{max} , distance proche des pseudo-troncs, E_{ci} et V_i sont très faibles. Au delà de cette distance, les deux variables augmentent, avec des maxima compris entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ de R_{max} .

Les interactions entre bananiers réduisent les énergies cinétiques comme les débits maximaux qui sont cumulés. Cette réduction est sensiblement la même pour E_{ci} et V_i : elle est de 25.6% et 25.8% respectivement. Les écarts entre les valeurs obtenues pour les bananiers en interaction et les bananiers sans interaction sont plus importants au delà des $\frac{3}{4}$ du rayon de la couronne foliaire (Figure 5.10). Ce résultat est logique car, dans cette zone, les présences des feuilles de plantes voisines sont plus marquées.

5.2.5 Comparaison des répartitions des écoulements simulés et mesurés au champ

Des mesures de pluie transmise sous un groupe de 4 bananiers (Bana1, Bana2, Bana3 et Bana4) au champ ont été faites. Les bananiers étaient au stade de floraison, ce qui correspond à un LAI de 3.5, pour une surface plantée de $2.35 \text{ m} \times 2.35 \text{ m}$ par bananier. Le rayon moyen des couronnes foliaires était d'environ 3 m. Cinq mesures, représentant le cumul de pluies journalières, ont été effectuées. Les pluies incidentes étaient de 50.4, 21.7, 10.2, 14.6 et 17.2

mm. Un maillage de 9×9 collecteurs de forme carrée et de 23 cm de côté, a été placé sous les feuilles, entre les bananiers. Des collecteurs de stemflow ont été fixés autour des pseudo-troncs. Les cartographies mesurées sont présentées en Figure 5.11.

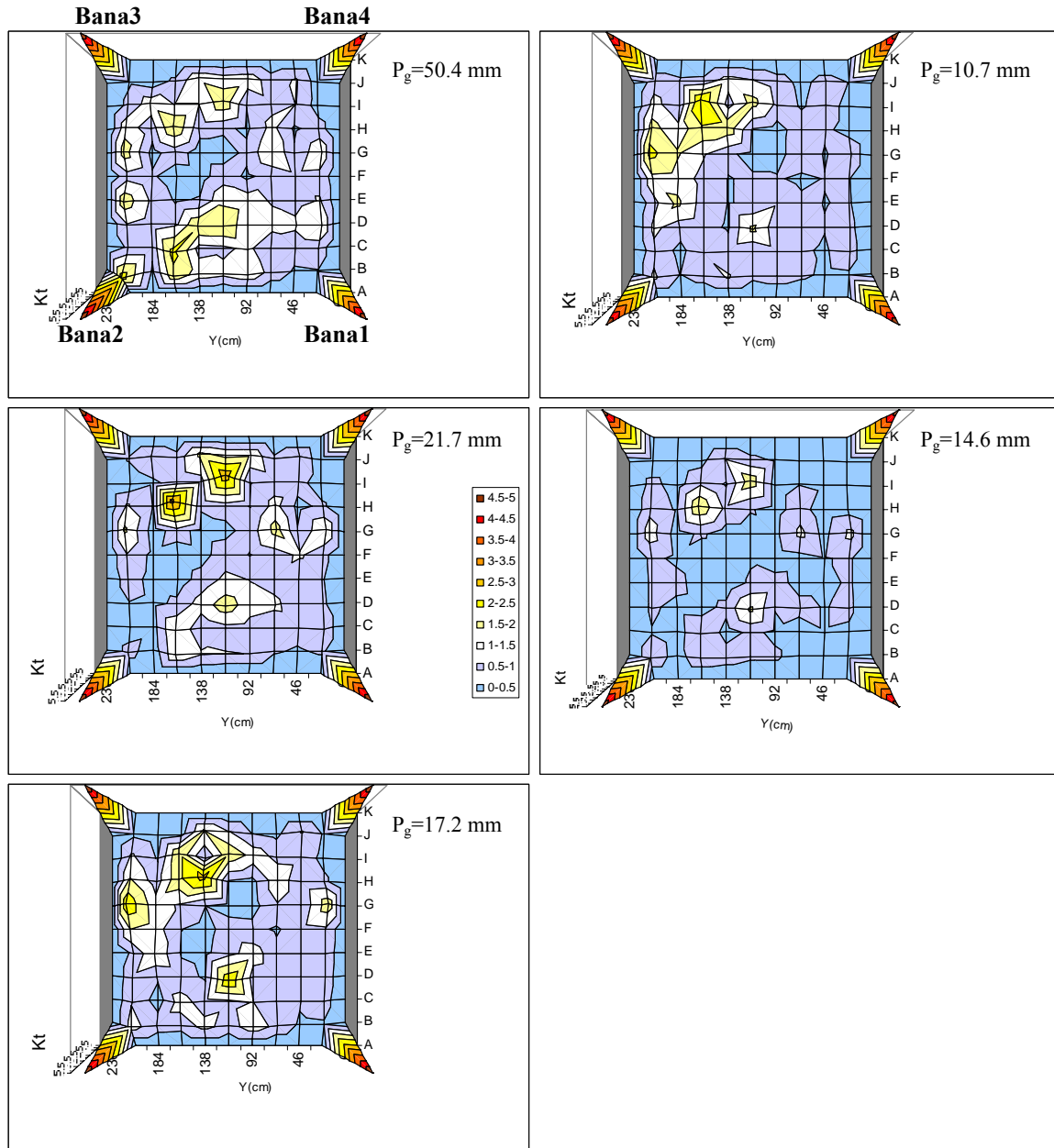


Figure 5.11 : Vue du dessus des cartographies des coefficients K_t sous le feuillage de 4 bananiers au champ, pour 5 pluies incidentes P_g de 50.4, 21.7, 10.2, 14.6 et 17.2 mm. Les pics aux angles représentent le stemflow de chaque bananier.

Les coefficients K_{ts} mesurés sous les 4 bananiers pour les cinq pluies sont présentés dans le Tableau 5.3. Ils variaient entre 7.12 et 22.5, entraînant une variation du rapport K_{ts}/LAI de 2 et 6.4.

P_g (mm)	Bana1		Bana2		Bana3		Bana4	
	K_{ts}	Stemflow (% P_g)	K_{ts}	Stemflow (% P_g)	K_{ts}	Stemflow (% P_g)	K_{ts}	Stemflow (% P_g)
50.4	19.82	16.38	13.12	10.85	22.48	18.58	13.70	11.32
21.7	20.41	16.87	14.45	11.94	20.53	16.97	11.96	9.88
10.2	18.04	14.91	15.57	12.86	19.52	16.13	9.70	8.01
14.6	14.09	11.65	10.06	8.31	10.97	9.07	7.12	5.89
17.2	21.79	18.01	18.26	15.09	21.92	18.12	12.44	10.28
Moyenne	18.83	15.56	14.29	11.81	19.09	15.77	10.98	9.08
Ecart-type	2.97	2.46	3.03	2.50	4.68	3.87	2.60	2.15

Tableau 5.3 : Coefficients de stemflow (K_{ts}) et proportion de pluie redistribuée en stemflow pour les 4 bananiers (Bana1, Bana2, Bana3 et Bana4), en fonction de la pluie incidente P_g .

Les coefficients de throughfall maximaux étaient de 2.25, 3.16, 2.49, 1.92 et 2.68 pour les 5 pluies (Figure 5.11). Ils ne semblent pas varier avec la pluie incidente. Leur ordre de grandeur est proche de celui des coefficients de throughfall mesurés en conditions contrôlées sous bananiers isolés de plus petite taille. Comme les LAI des bananiers au champ sont bien supérieurs à ceux des bananiers utilisés pour nos simulations, le throughfall ne serait pas affecté par le LAI, contrairement au stemflow. Celui-ci représente entre 6.9% et 19.6% de la pluie incidente pour l'ensemble des 4 bananiers au champ, toutes pluies confondues.

Les rapports K_{ts}/LAI trouvés pour ces 4 bananiers sont inférieurs à ceux trouvés par la mesure et par la simulation pour des bananiers plus jeunes (K_{ts}/LAI est égal à 35 pour la mesure et de 75.8 pour la simulation).

Enfin, les zones pour lesquelles les K_t sont maximaux correspondent bien aux zones comprises entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ de R_{max} (Figure 5.11). Toutefois, on constate de légers déplacements des maxima de throughfall qui pourraient être dus aux déplacements de feuilles, sous l'effet du vent.

5.2.5.1 Discussion

En créant une situation de fort recouvrement entre les bananiers B'1, B'2, B'3 et B'4 pour simuler des écoulements de pluie se rapprochant de ceux au champ, le masquage entre feuilles réduit l'ensemble des surfaces foliaires interceptrices de 17.3%. Ceci conduit également à une diminution du nombre de points d'égouttages (DP) de 33%. Cette diminution se traduit en moyenne par une légère augmentation des énergies cinétiques des gouttes et une réduction des débits générés sous la couronne foliaire. Ceci s'explique par le fait que les interactions entre feuilles affectent principalement la partie inférieure du feuillage qui est composée de feuilles planophiles présentant des limbes plus ondulés et en conséquence avec des bassins versants plus importants. Le masquage des feuilles entre elles entraîne donc la disparition des égouttages peu élevés et favorise l'augmentation de leur moyenne sur l'ensemble du feuillage. Cependant, il entraîne également la disparition des points d'égouttages issus de larges bassins versants localisés sur ces basses feuilles. Par conséquent, le débit moyen est diminué pour l'ensemble des 4 bananiers en interaction.

En cumulant sur des pas de 10 cm autour des pseudo-troncs les énergies cinétiques et les débits simulés, on constate que les interactions entre bananiers tendent à les diminuer, confirmant ainsi que la modification de leur distribution bien due à une diminution du

nombre de points d'égouttages, principalement au-delà de la moitié de R_{max} , le rayon de la couronne foliaire.

Toutefois, Ec_t et V_t sont maximaux entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4} R_{max}$ quel que soit le type de simulation (bananiers avec interactions ou isolés). Cette même zone a été retrouvée au champ pour des bananiers de LAI plus élevé. Cette augmentation des égouttages sous la couronne confirme les observations de Armstrong et Mitchell, sous différents types de couvert tels que le maïs, le soja ou l'épicea (Armstrong et Mitchell, 1988).

Nos mesures au champ ont montré que la proportion de pluie incidente redistribuée au sol en égouttage (throughfall) était pratiquement la même pour de forts LAI que pour de faibles LAI de bananiers. La diminution du coefficient reliant le stemflow au LAI, avec l'augmentation du LAI, établie par la simulation, a été également retrouvée au champ : K_{ts} représentait 2 à 6.4 fois le LAI. Ces faibles valeurs pourraient s'expliquer par un volume de stemflow amoindri en raison de la présence de nombreuses déchirures sur les feuilles sujettes au vent, les plus érigées et qui de surcroît, devaient contribuer le plus au stemflow.

Les valeurs de stemflow mesurées au champ pour des bananiers de LAI de 3.5 représentaient 6.9% à 19.6% de la pluie incidente, ce qui est plus important que pour ceux de LAI compris entre 0.6 et 0.96, et bien plus important que pour ceux de LAI compris entre 0.12 et 0.3.

Les études menées sur la modification de la pluie par les plantes ne s'étaient intéressées qu'aux diamètres des gouttes (Moss et Green, 1987; Brandt, 1989), à leurs énergies cinétiques (Brandt, 1988; Wainwright et al., 1999), ou aux volumes transmis en stemflow et en throughfall (Davie et Durocher, 1997; Crockford et Richardson, 2000). Quelques rares études s'étaient intéressées aux répartitions de la pluie sous le couvert (Eschner, 1965; Saffigna et al., 1976; Bussière et al., 2002). Notre étude est à notre connaissance, la première abordant simultanément ces deux aspects.

CONCLUSIONS

Les énergies cinétiques et les débits sont accrus sous le couvert, de façon localisée. L'augmentation de ces caractéristiques de pluie est directement liée aux égouttages.

Les simulations ont montré que sous le feuillage, les énergies cinétiques de la pluie pouvaient être au moins multipliées par 1.6, et les débits par 1.8. Ces écoulements préférentiels se situent généralement entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ du rayon de la couronne foliaire, la mesure ayant confirmé les résultats de simulation. Les zones à risque au champ sont donc présentées en Figure 5.12.

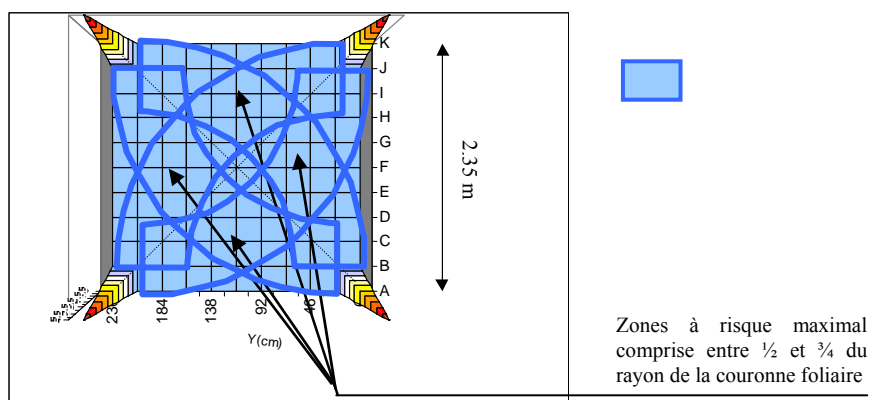


Figure 5.12 : Visualisation des zones à risque pour lesquelles les égouttages sont maximaux.

En zone Caraïbe, l'infiltration à saturation est de l'ordre de 1 mm.h^{-1} pour les vertisols, de 10 à 50 mm.h^{-1} pour les sols bruns et, généralement en système de culture mécanisé et peut dépasser 100 mm.h^{-1} pour les andosols (Perret et Dorel, 1999; Dorel et al., 2000; Cabidoche, 2001). Comme les débits générés par les égouttages sont au moins 1.8 fois supérieurs à ceux de la pluie incidente, il est à craindre que des zones sous la couronne des bananiers soient saturées pour des intensités de pluie dépassant 50 mm.h^{-1} en région bananière de la Basse-Terre, et 5 mm.h^{-1} pour celle de la Grande-Terre.

Conclusions et perspectives

Notre travail avait pour objectif de modéliser les écoulements de la pluie sur les bananiers afin de prédire les zones de flux préférentiels susceptibles de lessiver les intrants utilisés en bananeraie. Pour cela, nous avons étudié les caractéristiques du couvert et des gouttes de pluie qui affectent l'interception de la pluie. Cette étude nous a permis de déterminer des relations décrivant le splash et le stockage au cours de l'interception afin de simuler la répartition des écoulements sur la plante jusqu'au sol.

Nos résultats permettent de compléter les connaissances acquises au champ sur l'évolution du stemflow avec l'indice foliaire de la culture et les traits de la distribution du throughfall. Nous confirmons l'importante relation existant entre l'architecture des plantes et la distribution de la pluie sous celles-ci. Par ailleurs, notre étude a permis d'aborder les phénomènes physiques de stockage et de splash sur les feuilles, à l'échelle des facettes triangulaires de feuille, phénomènes encore peu étudiés en général et pas du tout pour le bananier. Enfin, nos investigations nous procurent des données originales sur les hauteurs de splash dans le couvert, facteur important de dispersion des ascospores et des conidies de la cercosporiose du bananier. De plus, la modélisation de l'eau stockée sur les feuilles que nous avons incluse dans le modèle permet d'envisager de nouveaux champs d'application pour l'étude du mouillage du couvert, autre facteur clef de l'épidémiologie des maladies fongiques.

Les flux de throughfall étant très localisés sous le feuillage et se formant en fonction des pentes et des orientations des surfaces interceptrices dépendent donc des « bassins versants » présents sur les larges feuilles de bananiers. Ces observations ont confirmé la nécessité d'adopter une approche à l'échelle des éléments foliaires afin de bien prendre en compte les hétérogénéités des surfaces de feuilles de bananier. En conséquence, la description correcte des architectures des feuilles était une étape préalable indispensable à la modélisation.

Nous avons donc utilisé un modèle mécaniste, DROP, couplant un modèle architectural 3-D et un modèle d'interception et de redistribution de la pluie. Cependant, n'étant pas conçu initialement pour décrire les formes complexes de feuilles, ce modèle a nécessité l'implémentation d'un formalisme *ad hoc* de description des architectures. De plus, des études de la littérature et des expérimentations préliminaires avaient montré que les couverts interceptant la pluie modifient ses distributions de diamètre et d'énergie cinétique de gouttes. Ces observations nous ont amené à distinguer deux types de pluie : la pluie primaire, pluie incidente sur le couvert et la pluie secondaire, pluie transmise après interception par les feuilles. Aussi, pour chaque type de pluie, les phénomènes locaux d'interception, le stockage, la proportion de splash et d'eau transmise, qui affectent les écoulements ont dû être déterminés. Nous avons donc mis en place une série d'expérimentations afin d'étudier ces

phénomènes qui nous ont permis de développer des modèles empiriques décrivant les lois d'interception à l'échelle des facettes triangulaires de feuille.

Nous avons adapté le modèle, initialement appliqué à des plantes isolées, à la prise en compte de plusieurs plantes afin de simuler les situations d'interaction. Le modèle est maintenant capable de simuler la maille d'hétérogénéité de tous les types de plantation courante (maille carrée, quinconce ou rang double).

Après adaptation des algorithmes de triangulation pour décrire les formes de feuille du bananier, le modèle DROP simulait correctement l'architecture de la plante. Toutefois, sa capacité à décrire les architectures est fortement liée à la qualité des données géométriques enregistrées par digitalisation. Nous avons montré que la précision intrinsèque du digitaliseur était largement suffisante pour nos utilisations. Nous avons évalué l'impact de la densité de digitalisation sur la simulation de l'architecture et des variables pertinentes pour l'interception : un seuil minimal de densité de 2 points digitalisés pour 100 cm² de feuille est requis pour le bananier.

Les expérimentations effectuées sur la modification de la pluie par l'interception ont montré que les phénomènes locaux d'interception variaient en fonction de trois paramètres : le diamètre, l'énergie cinétique des pluies incidentes et l'inclinaison des surfaces interceptrices. En effet, le splash était fonction du diamètre, de la hauteur de chute des gouttes et de l'inclinaison des surfaces, alors que le stockage pouvait être uniquement estimé à partir du diamètre des gouttes et de l'inclinaison des surfaces. Ces deux phénomènes ont été décrits à l'aide de lois analytiques qui permettent un calcul unique dans DROP. Par ailleurs, nous avons pu mettre en évidence un seuil de hauteur de chute en dessous duquel la pluie secondaire ne produisait pas de splash. L'étude des processus locaux d'interception a permis d'acquérir des connaissances sur les hauteurs maximales de splash produites par les feuilles de bananiers interceptant aussi bien la pluie primaire que la pluie secondaire de diverses hauteurs de chute.

Le splash et le stockage diminuent avec l'angle d'inclinaison des surfaces interceptrices. Cependant, pour des inclinaisons de feuilles supérieures à 30°, nous avons recueilli sous forme de splash des égouttages formés de projections d'eau préalablement stockée sur les surfaces. Ce splash pouvait augmenter de 40% les quantités d'eau collectées. Ces phénomènes n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Ils mettent en évidence une dispersion accrue des égouttages pour les fortes inclinaisons de feuilles.

La comparaison de DROP aux données expérimentales obtenues en conditions contrôlées a montré que le modèle surestimait globalement les distributions de pluie au sol. L'implémentation dans DROP des lois locales d'interception a permis d'améliorer la simulation qui surestimait auparavant beaucoup plus les transmissions (plus de 130%). Cependant, en dépit d'une corrélation correcte de la simulation avec la mesure (coefficient de corrélation de 0.87), montrant que les stemflow et principaux points d'égouttages sont bien représentés, le modèle surestime encore de 40% certaines transmissions d'eau au sol. Ce résultat est à relativiser car le dispositif de mesure présentait plusieurs défauts. Du splash entre collecteurs provoquait des redistributions qui affectaient les mesures de pluie transmise. Malgré toutes les précautions prises, le simulateur de pluie ne permettait pas de reproduire des pluies identiques en volume et en uniformité ce qui pouvait affecter les données expérimentales nécessitant deux simulations.

Finalement, cette surestimation met l'accent sur les hypothèses fortes qui ont été adoptées pour la modélisation : la pluie incidente et les égouttages sont supposés verticaux, les feuilles sont statiques sous l'impact des gouttes et il n'y a pas d'effet du vent. En particulier, sous le simulateur de pluie, la pluie est produite à l'aide d'une buse mobile ayant un mouvement

oscillant et les gouttes incidentes peuvent donc avoir des orientations multiples. De plus, compte tenu de notre nécessaire surface de travail, les paramètres de réglage du simulateur ne nous ont pas permis de travailler en dessous d'une intensité de 70 mm.h^{-1} . Sous de telles intensités les feuilles étaient effectivement agitées, entraînant des modifications de bassins versants et des déplacements de points d'égouttages. Les mouvements des feuilles sont aggravés au champ par des vents parfois forts accompagnant les pluies convectives. Ils provoquent des projections de gouttelettes retenues sur les feuilles. Ces projections sont plus marquées pour des feuilles fortement inclinées. Aussi, pour une meilleure simulation des écoulements au sein du feuillage, ces phénomènes nécessiteraient d'être pris en compte dans le modèle.

Plus généralement nous avons montré par la mesure et le modèle que le stemflow augmente avec l'indice foliaire de la culture (LAI). Il représentait 4.7% de la pluie incidente pour des bananiers de LAI inférieur à 0.3, alors qu'il pouvait atteindre 19.6% pour des bananiers adultes d'un LAI de 3.5. Cependant, le rapport entre le coefficient de stemflow et le LAI diminue avec la croissance des bananiers. Cette diminution peut être liée à la réduction de la proportion de surfaces interceptrices car au cours de la croissance de la plante, les nouvelles feuilles se développent de plus en plus au-dessus de feuilles existantes. De même, des déchirures apparaissent principalement sur les feuilles les plus exposées au vent et à la pluie (feuilles récemment développées), et limitent les écoulements acheminés vers le pseudo-tronc. Par contre le coefficient de throughfall maximal ne semble pas varier avec le LAI : il peut atteindre 3 fois la pluie incidente pour de faibles LAI comme pour de forts LAI.

Nos mesures ne nous ont pas permis d'évaluer expérimentalement l'eau stockée sur la plante (interception) car les variations entre nappes simulées ne permettaient de faire un bilan de masse d'eau correct. Cependant, nos résultats de simulation, probablement sous-estimés, ont permis d'estimer l'interception à 1 mm en moyenne.

La simulation des modifications des caractéristiques des gouttes de pluie redistribuée en throughfall a permis d'établir des zones sous le feuillage pour lesquelles les énergies des gouttes de pluie seraient au moins multipliées par un facteur 2.8 et les débits par un facteur 1.8 par rapport à celles de la pluie incidente. Sur les bananiers isolés, comme sur les bananiers en interaction, nous avons déterminé une zone entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ du rayon maximal de la couronne foliaire où les énergies cinétiques et débits étaient maximaux. Nos simulations ont mis en évidence un effet réducteur de la croissance des plantes sur le nombre de points d'égouttages. La croissance favorise la protection du sol, ce qui limiterait le nombre de points d'égouttages plus nombreux pour de jeunes plantes dont les feuilles ne sont pas suffisamment grandes pour être affectées par celles de bananiers voisins.

Nos mesures au champ des distributions de la pluie au sol sous quatre bananiers adultes en interactions ont confirmé la présence de cette zone à risque sous le couvert. La simulation semble donc bien prédire la localisation de ces zones. Cependant, l'application au champ du modèle n'a pas été validée pour les différents stades de croissance des bananiers.

Malgré les défauts évoqués précédemment, le modèle semble être un bon outil pour la prédiction des zones à risque sous le couvert, la notion de risque impliquant une identification des zones de flux maximum. Les mesures sur bananiers isolés ou au champ ont confirmé les localisations identifiées par la simulation. Deux hypothèses avaient été initialement considérées comme fortes dans la conception de DROP : la non prise en compte des processus locaux réels d'interception et la ponctualité de chaque point d'égouttages issue

du caractère rigide du modèle architectural et de l'unicité de trajectoires d'écoulement sur les surfaces. Nos travaux de modélisation ont permis de corriger la première hypothèse introduisant dans le modèle la simulation des splash et stockage sur les surfaces. Nos expérimentations nous ont permis de quantifier l'un des phénomènes à prendre en compte pour lever partiellement la seconde hypothèse. Les résultats obtenus pour le stockage restent encore à valider par des expérimentations adaptées qui pourraient être basées sur une mesure de la lame d'eau stockée par pesée que nous avons déjà expérimentée.

Comme l'objectif de notre travail était la simulation de risques de ruissellement et de lessivage, nous nous sommes placés délibérément dans des situations de saturation du couvert. Cependant, pour d'autres objectifs, il serait intéressant de se placer dans des situations de pluviométrie moindre pour lesquelles la dynamique de mouillage du couvert et sa persistance seraient des paramètres pertinents. Ces variables étudiées par ailleurs sur d'autres couverts permettraient d'utiliser le modèle pour l'étude de pathologies fongiques. Dans ce domaine nos résultats sur les hauteurs de splash apportent des éléments pour une meilleure analyse des modes de contamination des bananiers par les champignons. Cela permettrait d'envisager une approche de l'épidémiologie de la cercosporiose du bananier utilisant davantage les connaissances sur la physique des phénomènes.

En conclusion, notre travail confirme la prépondérance du stemflow comme site de circulation préférentiel de l'eau. Par conséquent, la zone située autour du pseudo-tronc du bananier reste une zone à risque de lessivage et d'infiltration des produits phytosanitaires utilisés en bananeraie. Nous montrons de plus l'existence d'une seconde zone à risque de lessivage sous les couronnes foliaires dont la localisation et l'intensité varient avec le LAI et la taille de l'inter-rang. Pour aboutir à des recommandations à caractère agronomique dans toutes les situations usuelles, une étude plus complète sur la répartition des écoulements en fonction de l'âge des bananiers et du type de plantation (simple rang, double rang et quinconce) est nécessaire. On pourrait alors mettre au point des recommandations d'épandage d'intrants les plus respectueuses possibles de l'environnement. Il est cependant clair, avec nos résultats, que les produits phytosanitaires épandus à la base des pseudo-troncs sont particulièrement sujets au lessivage. D'autre part, les zones d'égouttages sous le feuillage que nous avons déterminées peuvent présenter des risques d'entraînement et d'érosion du fait des fortes énergies cinétiques de goutte transmises dans le cas de bananeraies adultes.

Au vu de ces résultats, les épandages sous la couronne foliaires de pesticides responsables de la contamination des nappes phréatiques et des rivières seraient à proscrire pour ces zones localisées, si aucun système placé sous la couronne foliaire (pour briser les gouttes de pluie issues d'égouttages) et tout autour du pseudo-tronc (pour diviser le stemflow en plusieurs petits flux) n'est appliqué en bananeraie.

Bibliographie

- Armstrong, C.L. et Mitchell, J.K., 1987.** Transformation of Rainfall by Plant Canopy. American Society of Agricultural Engineers, 30(3): 688-696.
- Armstrong, C.L. et Mitchell, J.K., 1988.** Plant canopy characteristics and processes which affect transformation of rainfall properties. Trans. A. S. A. E., 31(5): 1400-1409.
- Asselin de Beauville, C., Petit, R.H., Marion, G. et Lacaux, J.P., 1988.** Evolution of Peaks in the Spectral Distribution of Raindrops from Warm Isolated Maritime Clouds. Journal of the Atmospheric Sciences, 45: 3320-3332.
- Asseline, J. et Valentin, C., 1978.** Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, 15(4): 321-349.
- Aston, A.R., 1979.** Rainfall interception by eight small trees. Journal of Hydrology, 42: 383-396.
- Bassette, C. et Bussière, F., 2004.** Rainfall distribution modelling on a 3-D plant architecture: Application to banana tree. In: C. Godin et al. (Editors), 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models. UMR AMAP/2004, Montpellier, France, pp. 159-163.
- Bassette, C. et Bussière, F., 2005.** 3-D modelling of the banana architecture for simulation of rainfall interception parameters. Agricultural and Forest Meteorology, 129: 95-100.
- Bonhomme, R. et Varlet-Grancher, C., 1978.** Estimation of graminaceous crop geometry by a plant profile including leaf width variations. Photosynthetica, 12: 193-196.
- Brandt, C.J., 1989.** The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. Catena, 16(4-5): 507-524.
- Brandt, J., 1988.** The transformation of rainfall energy by a tropical rain forest canopy in relation to soil erosion. J. Biogeogr., 15: 41-48.
- Bussière, F., Solmon, F. et Fouéré, A., 2002.** Implementation and evaluation of DROP, a model for the simulation of rainfall distribution below plants described in 3D. Agronomie, 22: 93-103.

- Cabidoche, Y.M., 2001.** Les DOM insulaires : des milieux tropicaux contrastés, des climats et des sols variés sur de courtes distances, INRA, URAPC.
- Calder, I.R., 1986.** A stochastic model of rainfall interception. *J. Hydrol.*, 89: 65-71.
- Calder, I.R., 1996a.** Dependence of rainfall interception on drop size .1. Development of the two-layer stochastic model. *Journal of Hydrology*, 185(1-4): 363-378.
- Calder, I.R., 1996b.** Rainfall interception and drop size-development and calibration of the two-layer stochastic interception model. *Tree Physiology*, 16(8): 727-732.
- Cattan, P., Bussière, F. et Nouvellon, A., 2005.** Rainfall partitioning in banana plantations increased the runoff risk on andisols. *Journal of Hydrology*(submitted).
- Cerro, C., Bech, J., Codina, B. et Lorente, J., 1998.** Modeling rain erosivity using disdrometric techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 62(3): 731-735.
- Chambadal, L., 1986.** Formulaire de mathématique. Classes préparatoires nouveaux programmes. 1^{er} cycle universitaire. Dunod Université, Paris, 188 pp.
- Champion, J., 1963.** Le Bananier. Maisonneuve and Larose, Paris, 263 pp.
- Chelle, M. et Andrieu, B., 1999.** Radiative models for architectural modeling. *Agronomie*, 19(3-4): 225-240.
- Choisnard, J., 2000.** Indépendance et augmentation du diamètre des gouttes en certains points d'égouttage sous bananier de la pluie de type tropicale, INRA.
- Chopard, J., 2004.** 3D modeling of water transfers in soil and roots system. In: C. Godin et al. (Editors), 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models. UMR AMAP/2004, Montpellier, France, pp. 154-158.
- Christiansen, J.E., 1942.** Irrigation by sprinkling. *Univ. California Agric. Exp. Station Bulletin*, 670.
- Clift, R., Grace, J.R. et Weber, M.E., 1978.** Bubbles drops and particles. Academic Press, New York USA, 380 pp.
- Coste, D. et al., 2004.** Population genetic structure and dispersal of the fungal pathogen of banana *Mycosphaerella fijiensis*, Malaysia.
- Crockford, R.H. et Richardson, D.P., 1990a.** Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: II Stemflow and factors affecting stemflow in dry sclerophyll eucalypt forest and a *Pinus radiata* plantation. *Hydrol. Process*: 145-155.
- Crockford, R.H. et Richardson, D.P., 1990b.** Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: IV The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation. *Hydrol. Process.*, 4: 169-188.

- Crockford, R.H. et Richardson, D.P., 2000.** Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological processes*, 14: 2903-2920.
- Dauzat, J., 1993.** Simulated plants and radiative transfer simulations. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme et H. Sinoquet (Editors), *Crop structure and light microclimate : characterization and applications*, Paris, pp. 271-278.
- Davie, T.J.A. et Durocher, M.G., 1997.** A model to consider the spatial variability of rainfall partitioning within deciduous canopy .1. Model description. *Hydrological Processes*, 11(11): 1509-1523.
- Davis, H. et Evans, R.L., 1990.** Effect of pathogen spore suspension on wettability of leaves. *Mycol. Res.*, 94(6): 854-856.
- Deardoff, J.W., 1978.** Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, with Inclusion of a Layer of Vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83(c4): 1889-1903.
- Diaz-Ambrona, C.H., Tarquis, A.M. et Minguez, M.I., 1998.** Faba bean canopy modelling with a parametric open L-system: A comparison with the Monsi and Saeki model. *Field Crops Research*, 58(1): 1-13.
- Dorel, M., 2001.** Propriétés physiques des sols volcaniques sous culture bananière. Effets des pratiques culturales. Relation avec l'enracinement., Louvain, 112 pp.
- Dorel, M., Roger-Estrade, J., Manichon, H. et Delvaux, B., 2000.** Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use and Management*, 16: 133-140.
- Drouet, J.L., 2003.** MODICA and MODANCA: modelling the three-dimensional shoot structure of graminaceous crops from two methods of plant description. *Field Crops Research*, 83: 215-222.
- Drouet, J.L. et Bonhomme, R., 1999.** Do variations in local leaf irradiance explain changes to leaf nitrogen within row maize canopies? *Annals of Botany*, 84(1): 61-69.
- Drouet, J.L., Pagès, L. et Serra, V., 2004.** Modelling the relationships between growth and assimilates partitioning from the organ to the whole plant. In: C. Godin et al. (Editors), *4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models*. UMR AMAP/2004, Montpellier, France, pp. 115-119.
- Eschner, A.R., 1965.** Interception and soil moisture distribution. In: F.W. Sopper et H.W. Lull (Editors), *National Science Foundation Advanced Science Seminar. Forest Hydrology*. Pennsylvania State University, University Park Pennsylvania, pp. 191-200.
- Espana, M., Baret, F., Aries, F., Andrieu, B. et Chelle, M., 1999a.** Radiative transfer sensitivity to the accuracy of canopy structure description. The case of a maize canopy. *Agronomie*, 19(3-4): 241-254.

- Espana, M.L. et al., 1999b.** Modeling maize canopy 3D architecture - Application to reflectance simulation. *Ecological Modelling*, 122(1-2): 25-43.
- Finney, H.J., 1984.** The effect of crop covers on rainfall characteristics and splash detachment. *J. Agric. Eng. Res.*, 29: 337-343.
- Fitt, B.D.L., Inman, A.J., Lacey, M.E. et McCartney, H.A., 1992.** Splash dispersal of spores of *Pseudocercospora capsellae* (white leaf spot) from oilseed rape leaves of different inclination flexibility and age. *Z. Pflanzenkr. Pflanzensch.*, 99(3): 234-244.
- Fitt, B.D.L. et Lysandrou, M., 1984.** Studies on mechanisms of splash dispersal of spores using *Pseudocercospora herpotricoides* spores. *Phytopath. Z.*, 111: 323-331.
- Fournier, C. et Andrieu, B., 1998.** A 3D Architectural and Process-based Model of Maize Development. *Annals of Botany*, 81: 233-250.
- Gash, J.H.C., 1979.** An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 105: 43-55.
- Gash, J.H.C. et Morton, A.J., 1978.** An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *J. Hydrol.*, 38: 49-58.
- Gash, J.H.C., Valente, F. et David, J.S., 1999.** Estimates and measurements of evaporation from wet, sparse pine forest in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(2): 149-158.
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Demarez, V., Pinel, V. et Zagolski, F., 1996.** Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies. *Remote Sensing Environment*, 58: 131-156.
- Gautier, H., Mech, R., Prusinkiewicz, P. et Varlet-Grancher, C., 2000.** 3D architectural modelling of aerial photomorphogenesis in white clover (*Trifolium repens* L.) using L-systems. *Annals of Botany*, 85(3): 359-370.
- Geagea, L., Huber, L. et Sache, I., 1999.** Dry-dispersal and rain-splash of brown (*Puccinia recondita* f.sp. *tritici*) and yellow (*P. striiformis*) rust spores from infected wheat leaves exposed to simulated raindrops. *Plant Pathology*, 48(4): 472-482.
- Ghadiri, H. et Payne, D., 1988.** The formation and characteristics of splash following raindrop impact on soil. *J. Soil. Sci.*, 39: 563-575.
- Godefroy, J. et Dormoy, M., 1989.** Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans le complexe "sol-bananière-climat". Application à la programmation de la fumure. IV-Cas des sols bruns à halloysite (fin). *Fruits*, 44: 3-12.
- Godin, C., 1999.** Representing and encoding plant architecture: A review. *Ann. For. Sci.*, 57: 413-438.

- Godin, C., Guedon, Y. et Costes, E., 1999.** Exploration of a plant architecture database with the AMAPmod software illustrated on an apple tree hybrid family. *Agronomie*, 19(3-4): 163-184.
- Grove, G.G., Madden, L.V. et Ellis, M.A., 1985.** Splash dispersal of *Phytophthora cactorum* from infected strawberry fruit. *Phytopathology*, 75: 611-615.
- Hall, L. et Calder, I.R., 1993.** Drop Size Modification by Forest Canopies: Measurements Using a Disdrometer. *Journal of Geophysical Research*, 98(D10): 18,465-18,470.
- Helvey, J.D. et Patric, J.H., 1965.** Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. *Water Resour. Res.*, 1(2): 193-206.
- Herwitz, S.R., 1985.** Interception storage capacity of tropical rainforest canopy trees. *J. Hydrol.*, 77: 237-252.
- Herwitz, S.R., 1987.** Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. *Earth Surf. Process. Landforms.*, 12: 425-432.
- Herwitz, S.R. et Slye, R.E., 1992.** Spatial variability in the interception of inclined rainfall by a tropical rainforest canopy. *Selbyana*, 13: 62-71.
- Herwitz, S.R. et Slye, R.E., 1995.** Three-dimensional modeling of canopy tree interception of wind-driven rainfall. *Journal of Hydrology*, 168: 205-226.
- Hormann, G. et al., 1996.** Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79(3): 131-148.
- Horton, R.E., 1919.** Rainfall interception. *Monthly Weather Review.*, 47(9): 603-623.
- Huber, L., Madden, L.V. et Fitt, B.D.L., 1998.** Rain-splash and spore dispersal : a physical perspective. In: D.G. Jones (Editor), *The Epidemiology of Plant Diseases*. Kluwer Publishers, Dordrecht.
- Huber, L., McCartney, H.A. et Fitt, B.D.L., 1997.** Influence of target characteristics on the amount of water splashed by impacting drops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(2-3): 201-211.
- Ivanov, N., Boissard, P., Chapron, M. et Andrieu, B., 1995.** Computer stereo plotting for 3-D reconstitution of a maize canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75: 85-102.
- Jiménez, O.F. et Lhomme, J.P., 1994.** Rainfall Interception and Radiation Regime in a Plantain Canopy. *Fruits*, 49(2): 133-139.
- Juniper, B.E. et Jeffree, C.E., 1983.** *Plant surfaces*. Edward Arnold, London, 93 pp.

- Khamsouk, B., 2001.** Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille à halloysite). ENSA, Montpellier, 214 pp.
- Le Bissonais, Y. et Singer, M.J., 1992.** Crusting, Runoff, and Erosion Response to Soil Water Content and Successive Rainfalls. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1898-1903.
- Lecompte, F., 2002.** Mise en place de l'architecture racinaire du bananier dans un andosol: effet des contraintes physiques liées au compactage, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 141 pp.
- Lewis, P., 1999.** Three-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the Botanical Plant Modelling System. *Agronomie*, 19(3-4): 185-210.
- Leyton, L., Reynolds, E.R.C. et Thompson, F.B., 1967.** Rainfall interception in forest and moorland. In: W.F. Sopper et H.W. Lull (Editors), *Forest Hydrology*. National Science Foundation Advanced Science Seminar. Pennsylvania State University, University Park Pennsylvania, pp. 163-178.
- Lindenmayer, A., 1968.** Mathematical models for cellular interaction in development, Parts I and II. *Journal of Theoretical Biology*, 18: 280-315.
- Liu, S.G., 1998.** Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida. *Journal of Hydrology*, 207(1-2): 32-41.
- Loustau, D., Berbigier, P. et Granier, A., 1992a.** Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II An application of Gash's analytical model of interception. *J. Hydrol.*, 138: 469-485.
- Loustau, D., Berbigier, P.G.A. et El Hadj Moussa, F., 1992b.** Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *J. Hydrol.*, 138: 449-467.
- Macdonald, O.C. et McCartney, H.A., 1987.** Calculation of splash droplet trajectories. *Agric. For. Meteorol.*, 39: 95-110.
- Madden, L.V., Wilson, L.L.Y.X. et Ellis, M.A., 1992.** Splash dispersal of *Colletotrichum acutatum* and *Phytophthora cactorum* by short-duration simulated rains. *Plant Pathol.*, 41: 427-436.
- Marin, D.H., Romero, R.A., Guzman, M. et Sutton, T., 2003.** Black Sigatoka: An Increasing Threat to Banana Cultivation. *Plant Disease*, 87: 208-222.
- Massman, W.J., 1983.** The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests. *Agric. Meteorol.*, 28: 261-286.

- Mathers, H., 2002.** Nursery Irrigation Management. Part 2: "Efficiency and Water conservation". Buckeye.
- Mech, R. et Prusinkiewicz, P., 1996.** Visual Models of Plants Interacting with their Environment, SIGGRAPH'96. ACM SIGGRAPH, New Orleans, Louisiana, pp. 397-410.
- Mohamound, Y.M. et Ewing, L.K., 1990.** Rainfall interception by corn and soybean residue. *Trans. A. S. A. E.*, 33(2): 507-511.
- Moss, A.J. et Green, T.W., 1987.** Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants. *Aust. J. Soil Res.*, 25: 9-20.
- Moulia, B. et Sinoquet, H., 1993.** Three-dimensional digitizing systems for plant canopy geometrical structure : a review. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme et H. Sinoquet (Editors), *Crop structure and light microclimate*. Science Update. INRA, Paris, pp. 183-194.
- Mundo, C., Sommerfield, M. et Tropea, C., 1995.** Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(2): 151-173.
- Nàvar, J., 1993.** The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *J. Hydrol.*, 145: 175-190.
- Nikinma, E., Hakula, H. et Sievänen, R., 2004.** Modelling tree growth as a competition between sinks using reaction-transport approach in branched architecture. In: C.G.e. al. (Editor), *4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models*. UMR Cirad-Nnrs-Ephe-Inra-Inria-Ird-Université de Montpellier II (AMAP), Montpellier, pp. 216-219.
- Nouvellon, A., 1999.** Redistribution de l'eau de pluie par le bananier: identification et quantification des principaux facteurs de variation, ISTOM.
- Ntahimpera, N., Ellis, M.A., Wilson, L.L. et Madden, L.V., 1998.** Effects of a cover crop on splash dispersal of *Colletotrichum acutatum* conidia. *Phytopathology*, 88(6): 536-543.
- Ohnesorge, W., 1936.** Die Bildung von Tropen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen. *ZAMM*, 16: 355-358.
- Parkin, T.B. et Codling, E.E., 1990.** Rainfall distribution under a corn canopy: implications for managing agrochemicals. *Agron. J.*, 82: 1166-1169.
- Penman, H.L., 1948.** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A.*, 193: 120-145.
- Perret, S. et Dorel, M., 1999.** Relationships between land use, fertility and Andisol behaviour: examples from volcanic islands. *Soil Use and Management*, 15: 144-149.

- Persistence of Vision, P.L., 2004.** Povray: Persistence of Vision (TM) Raytracer. Persistence of Vision Pty. Ltd., Williamstown, Victoria, Australia.
- Pietravalle, S., van den Bosch, F., Welham, S.J., Parker, S.R. et Lovell, D.J., 2001.** Modelling of rain splash trajectories and prediction of rain splash height. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109: 171-185.
- Pommel, B., Sohbi, Y. et Andrieu, B., 2001.** Use of virtual canopies to assess the effect of plot heterogeneity on radiation interception. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110: 55-67.
- Porskamp, H.A.G., 1989.** Effect of leaf type on coverage in spraying-theory and practice. *Aspects of Applied Biology*, 21: 233-234.
- Prunsinkiewicz, P., Hammel, M., Hannan, J. et Mech, R., 1997.** L-Systems : from theory to visual models of plants. In: M. MT (Editor), *Plants to ecosystems. Advances in computational life sciences series.* CSIRO, Melbourne.
- Pruppacher, H.R. et Klett, J.D., 1978.** *Microphysics of Clouds and Precipitation.* D. Riedel Publishing Compagny, Dordrecht, 714 pp.
- Rakocevic, M., Sinoquet, H., Christophe, A. et Varlet-Grancher, C., 2000.** Assessing the Geometric Structure of a White Clover (*Trifolium repens* L.) Canopy using 3-D Digitising. *Annals of Botany*, 86: 519-526.
- Reynolds, K.M., Madden, L.V., Reichard, D.L. et Ellis, M.A., 1987.** Methods for study of raindrop impact on plant surfaces with application to predicting inoculum dispersal by rain. *Phytopathology*, 77: 226-232.
- Rieber, M. et Frohn, A., 1999.** A numerical study on the mechanism of splashing. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20(5): 455- 461.
- Rotz, C.A., Davis, R.J. et Abrams, S.M., 1991.** Influence of Rain and Crop Characteristics on Alfalfa Damage. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 34(4): 1583-1591.
- Rowe, L.K., 1983.** Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand. *J. Hydrol.*, 6: 143-158.
- Ruget, F., Bonhomme, R. et Chartier, M., 1996.** Estimation simple de la surface foliaire de plantes de maïs en croissance. *Agronomie*, 16: 553-562.
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C. et Morton, A.J., 1971.** A predictive model of rainfall interception in forests, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol*, 9: 367-384.
- Rutter, A.J. et Morton, A.J., 1977.** A predictive model of rainfall interception in forests. III Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *J. Appl. Ecol.*, 14: 567-588.

- Rutter, A.J. et Morton, A.J.a.R.P.C., 1975.** A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stand. *J. Appl. Ecol.*, 12: 367-380.
- Saffigna, P.G., Tanner, C.B. et Keeney, D.R., 1976.** Non-uniform infiltration under potato canopies caused by interception, stemflow, and hilling. *Agron. J.*, 68: 337-342.
- Saint-Jean, S., Chelle, M. et Huber, L., 2003.** Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration. *Agricultural and Forest Meteorology*(In Press).
- Salles, C., Andrieux, P., Asseline, J. et Cohard, P., 2000.** Etalonnage de l'intensité et de la microphysique de la pluie produite par un simulateur de pluie. In: V. M. (Editor), *Colloque PNRH 2000. CNRM/PAD Paris, France, Toulouse, France*, pp. 27-31.
- Sansoulet, J., 2002.** Modélisation de l'énergie cinétique de la pluie redistribuée par le bananier, influence de la géométrie des feuilles, pp. 27.
- SAS Institute Inc., 1987.** SAS/STAT™ Guide for Personal Computers, Version 6 Edition, Cary, NC, 1028 pp.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. et Dalcher, A., 1986.** A Simple Biosphere Model (SiB) for Use within General Circulation Models. *Journal of the Atmospheric Science*, 43(6): 505-531.
- Sellers, P.J. et al., 1996.** A Revised Land Surface Parametrization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part 1 : Model Formulation. *Journal of climate*, 9: 676-705.
- Shainberg, I., Levy, G.J., Rengasamy, P. et Frenkel, H., 1992.** Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments. *Soil Science*, 154(2): 113-119.
- Shaw, M.W., 1987.** Assessment of upward movement of rain splash using a fluorescent tracer method and its application to the epidemiology of cereal pathogens. *Plant Pathol.*, 36: 201-213.
- Sinoquet, H., 1993.** Modelling radiative transfer within heterogeneous canopies and intercropping systems. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme et H. Sinoquet (Editors), *Crop Structure and Light Microclimate : Characterization and applications. Science Update. INRA, Versailles, France*, pp. 229-252.
- Sinoquet, H. et Andrieu, B., 1993.** The geometrical structure of plant canopies: characterization and direct measurements methods. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme et H. Sinoquet (Editors), *Crop Structure and Light Microclimate : Characterization and applications. Science Update. INRA, Versailles, France*, pp. 131-158.
- Sinoquet, H., Moulia, B. et Bonhomme, R., 1991.** Estimating the three dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: comparison between three-

- dimensional digitizing and plant profiles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55(3-4): 233-249.
- Sinoquet, H. et Rivet, P., 1997.** Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. *Trees Structure and Function*, 11(5): 265-270.
- Sonohat, G., Sinoquet, H., Kulandaivelu, V., Combes, D. et Lescouret, C., 2004.** Three-dimensional reconstitution of partially 3D digitised peach tree canopies. In: C. Godin et al. (Editors), 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models. UMR Cirad-Nnrs-Ephe-Inra-Inria-Ird-Université de Montpellier II (AMAP), Montpellier, pp. 6-8.
- Stedman, O.J., 1979.** Patterns of unobstructed splash dispersal. *Annals of Applied Biology*, 91: 271-285.
- Stockton, P., 1999.** Velocity.exe: Partical Velocities vs Fall Time. Sensit Company, Portland, ND, USA.
- Teklehaimanot, Z. et Jarvis, P.G., 1991.** Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. *Journal of Applied Ecology*, 28: 603-618.
- Van Dijk, A., Bruijnzeel, L. et Eisma, E., 2003.** A methodology to study rain splash and wash processes under natural rainfall. *Hydrological Processes*, 17: 153-167.
- Van Elewijck, L., 1989a.** Influence of leaf and branch slope on stemflow amount. 16(4-5): 525-533.
- Van Elewijck, L., 1989b.** Stemflow on maize: a stemflow equation and the influence of rainfall intensity on stemflow amount. *Soil Technology*, 2: 41-48.
- Wainwright, J., Parsons, A.J. et Abrahams, A.D., 1999.** Rainfall energy under creosotebush. *Journal of Arid Environments*, 43(2): 111-120.
- Watanabe, T. et Mizutani, K., 1995.** Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80: 195-214.
- Weiss, A., 1988.** Contact angle of water droplets in relation to leaf water potential. *Agric. For. Meteorol.*, 43: 251-259.
- Yang, X., Wilson, L.L., Madden, L.V. et Ellis, M.A., 1990.** Rain splash dispersal of *Colletotrichum acutatum* from infected strawberry fruit. *Phytopathology*, 80: 590-595.

Annexes

Annexe A

Numérisation des coordonnées 3-D des plantes

La position des sommets des triangles de feuille créés par DROP, des exutoires sur les feuilles, déterminant le throughfall, et du stemflow est donnée par conversion des coordonnées 3-D enregistrées au cours de la digitalisation. Le passage des coordonnées analytiques (x,y) à celles discrétisées en (i,j) et vice versa, se fait par conversion analogique ou numérique à l'aide des fonctions « convanapix » et « convpixana » dépendant chacune de trois paramètres et définies comme suit :

Conversion analogique à numérique :

```
int DISTRIBEAU::convanapix(float h, float dimxcm, int dimxpix)
{
  int r;
  r=(int)((dimxpix/dimxcm)*h + dimxpix/2+0.5) ;
  return(r);
}
```

Conversion analogique à numérique :

```
float DISTRIBEAU::convpixana(int r,float dimxcm,int dimxpix)
{
  float g, h;
  g = dimxpix ;
  h=(r-(g/2-0.5))*(dimxcm/g);
  return (h);
}
```

Où h représente les coordonnées en x ou en y, $dimxcm$, la dimension en x ou en y de la maquette informatique et $dimxpix$ le nombre de pixel en ligne ou en colonne sur la grille de discrétisation. Ainsi, « convanapix » retourne une valeur entière correspondant à un numéro de ligne ou de colonne du pixel associé et « convpixana » une coordonnée en x ou en y du pixel associé.

Annexe B

Changement de repère appliqué pour l'enregistrement des données architecturales

Au cours de la digitalisation ultrasonique, des déplacements par rotation et/ou translation de la plante dans le volume de mesure étaient nécessaires pour faciliter l'enregistrement des feuilles masquées par d'autres. Ce problème ne se présentait pas au cours de la digitalisation électromagnétique.

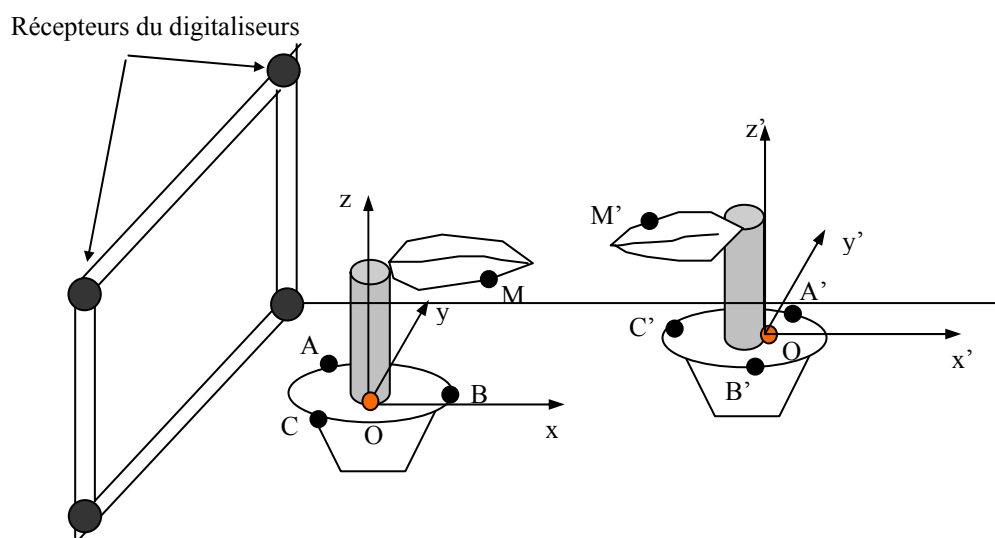


Figure B.1 : Rotation et translation des plantes au cours de la digitalisation électromagnétique.

Le repère de référence, $[O, x, y, z]$ est constitué en choisissant le point O au collet du bananier. Le point O , puis les points A , B et C , localisés sur le pot contenant le bananier, sont digitalisés dans le repère de référence lié au volume de mesure. A chaque déplacement de la plante dans ce volume, les 4 points subissent des translations et/ou des rotations et sont notés O' , A' , B' et C' dans le repère intermédiaire $[O', x', y', z']$ relatif au déplacement. Les points $M'(x', y', z')$ digitalisés sur la plante dans un repère intermédiaire sont replacés dans le repère de référence en calculant leurs coordonnées selon les étapes suivantes :

- Dans le repère de référence :
Soit le point $M(x, y, z)$ et les 4 points fixes $O(0, 0, 0)$, $A(a_1, a_2, a_3)$, $B(b_1, b_2, b_3)$ et $C(c_1, c_2, c_3)$ à la base de la plante. Seuls O , A , B et C sont connus dans le repère de référence.
- Dans le repère intermédiaire :
Le point $M'(x', y', z')$ et les 4 points fixes de $O'(0, 0, 0)$, $A'(a'_1, a'_2, a'_3)$, $B'(b'_1, b'_2, b'_3)$ et $C'(c'_1, c'_2, c'_3)$ ayant subi des translations et/ou rotations sont tous connus dans le repère intermédiaire.

Les coordonnées des points M digitalisés sont calculées en établissant la conservation des produits scalaires pour la conservation des distances et de angles :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OM} \cdot \overrightarrow{OA} &= \overrightarrow{O'M'} \cdot \overrightarrow{O'A'} \\ \overrightarrow{OM} \cdot \overrightarrow{OB} &= \overrightarrow{O'M'} \cdot \overrightarrow{O'B'} \\ \overrightarrow{OM} \cdot \overrightarrow{OC} &= \overrightarrow{O'M'} \cdot \overrightarrow{O'C'}\end{aligned}$$

Soit le système d'équations linéaires :

$$\begin{aligned}a_1x + a_2y + a_3z &= a'_1x' + a'_2y' + a'_3z' \\ b_1x + b_2y + b_3z &= b'_1x' + b'_2y' + b'_3z' \\ c_1x + c_2y + c_3z &= c'_1x' + c'_2y' + c'_3z'\end{aligned}$$

Les points $M'(x', y', z')$ sont ramenés en $M(x, y, z)$ dans le repère de référence en considérant les 4 vecteurs $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ définis comme suit :

$$\begin{array}{cccc} \alpha & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \left\{ \begin{array}{l} a'_1x' + a'_2y' + a'_3z' \\ b'_1x' + b'_2y' + b'_3z' \\ c'_1x' + c'_2y' + c'_3z' \end{array} \right\} & \left\{ \begin{array}{l} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{array} \right\} & \left\{ \begin{array}{l} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{array} \right\} & \left\{ \begin{array}{l} a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{array} \right\} \end{array}$$

Les coordonnées de M sont alors déduits du rapport des déterminants (*Det*) des matrices définies par 3 des 4 vecteurs :

$$x = \frac{Det(\alpha, \beta_2, \beta_3)}{Det(\beta_1, \beta_2, \beta_3)} \quad y = \frac{Det(\beta_1, \alpha, \beta_3)}{Det(\beta_1, \beta_2, \beta_3)} \quad z = \frac{Det(\beta_1, \beta_2, \alpha)}{Det(\beta_1, \beta_2, \beta_3)}$$

L'algorithme introduit dans le modèle DROP utilise une classe « ProdScal() » calculant les déterminants des matrices associées au système d'équations linéaires. Il est le suivant :

```
void D3D::ProduitScal()
{
    float prod[3];

    D[0]=(B[1][1]*C[1][2])-(C[1][1]*B[1][2]);
    D[1]=(B[1][0]*C[1][2])-(C[1][0]*B[1][2]);
    D[2]=(B[1][0]*C[1][1])-(C[1][0]*B[1][1]);
    DELTA=(A[1][0]*D[0])-(A[1][1]*D[1])+(A[1][2]*D[2]);

    // O'M'.O'A'
    prod[0]=(M[num][0]*A[num][0])+(M[num][1]*A[num][1])+(M[num][2]*A[num][2]);
    // O'M'.O'B'
    prod[1]=(M[num][0]*B[num][0])+(M[num][1]*B[num][1])+(M[num][2]*B[num][2]);
    // O'M'.O'C'
    prod[2]=(M[num][0]*C[num][0])+(M[num][1]*C[num][1])+(M[num][2]*C[num][2]);

    M[num][0]=(prod[0]*((B[1][1]*C[1][2])-(B[1][2]*C[1][1])));
    M[num][0]=M[num][0]+(prod[1]*((A[1][2]*C[1][1])-(A[1][1]*C[1][2])));
    M[num][0]=M[num][0]+(prod[2]*((A[1][1]*B[1][2])-(A[1][2]*B[1][1])));
    M[num][0]=trunc(M[num][0]/DELTA);

    M[num][1]=(prod[0]*((C[1][0]*B[1][2])-(C[1][2]*B[1][0])));
```

$$\begin{aligned}M[\text{num}][1] &= M[\text{num}][1] + (\text{prod}[1] * ((A[1][0] * C[1][2]) - (A[1][2] * C[1][0]))); \\M[\text{num}][1] &= M[\text{num}][1] + (\text{prod}[2] * ((A[1][2] * B[1][0]) - (A[1][0] * B[1][2]))); \\M[\text{num}][1] &= \text{trunc}(M[\text{num}][1] / \text{DELTA});\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}M[\text{num}][2] &= (\text{prod}[0] * ((B[1][0] * C[1][1]) - (B[1][1] * C[1][0]))); \\M[\text{num}][2] &= M[\text{num}][2] + (\text{prod}[1] * ((A[1][1] * C[1][0]) - (A[1][0] * C[1][1]))); \\M[\text{num}][2] &= M[\text{num}][2] + (\text{prod}[2] * ((A[1][0] * B[1][1]) - (A[1][1] * B[1][0]))); \\M[\text{num}][2] &= \text{trunc}(M[\text{num}][2] / \text{DELTA});\end{aligned}$$

}

Annexe C

Procédure de lissage des nervures de feuille

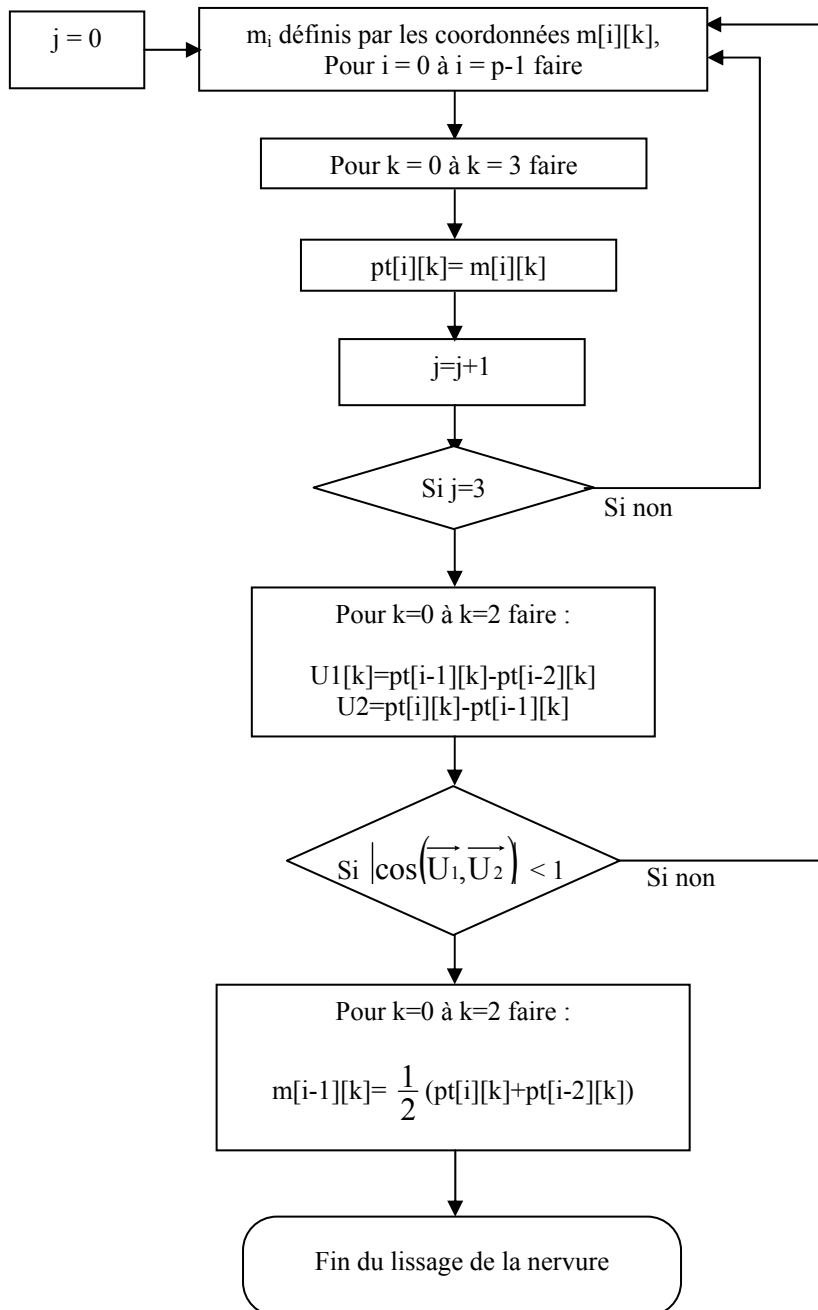


Figure C.1 : Histogramme de fonctionnement de la procédure de lissage des points de la nervure

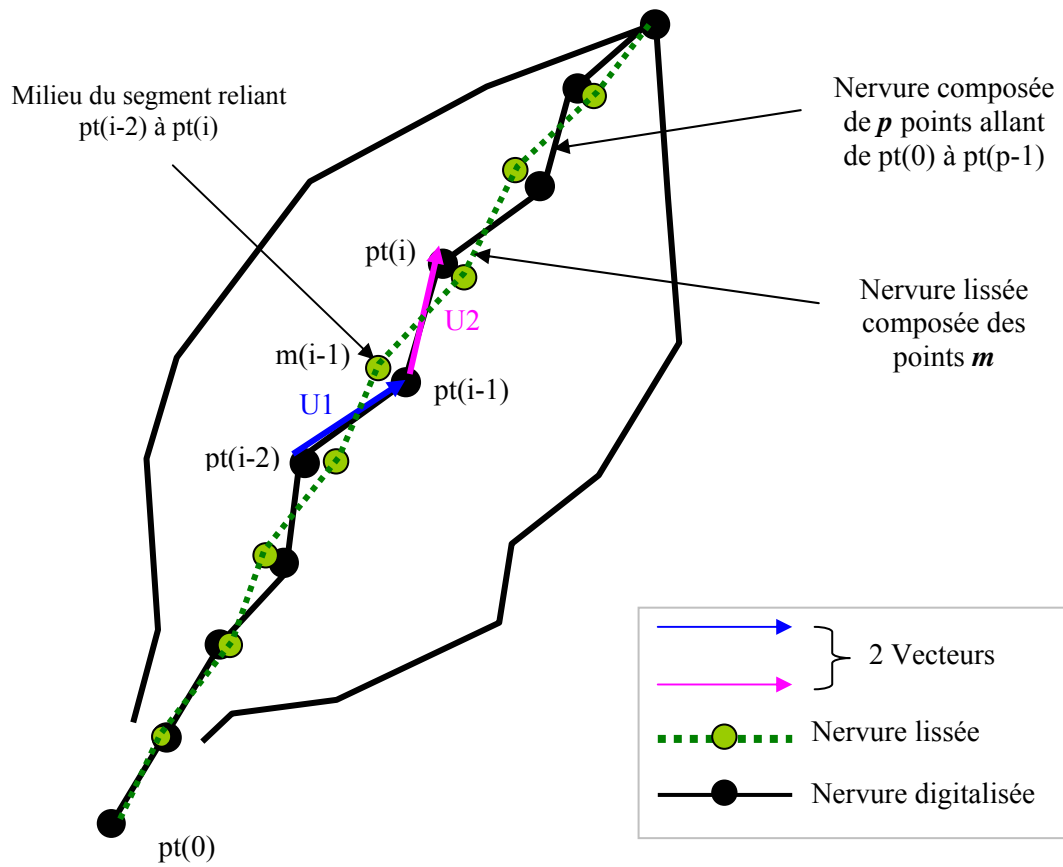


Figure C.2 : Amélioration de la nervure par la procédure de lissage. Les points pt sont digitalisés alors que les points m sont créés à partir de la procédure de lissage.

Annexe des articles

Article 1

3-D modelling of the banana architecture for simulation of rainfall interception parameters
(Published in *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, vol. 129, pp. 95-100).

Article 2

Rainfall distribution modelling on a 3-D plant architecture : Application to banana tree
(Published in the Proceedings of FSPM04, *4th international workshop on Functional-Structural Plant Models*, 2004, pp. 159-163).

Article 3

Rainfall interception on a 3-D plant modelling to assess water heterogeneity below banana
(Submitted to *New Phytologists*).

Article 4

Splash and storage partitioning following raindrop impacts on banana leaves
(To be submitted to *Agricultural and Forest Meteorology*).

3-D modelling of rainfall interception by banana plant: effects of the physical properties of the canopy on water fluxes and drop kinetic energies at the soil surface

ABSTRACT

Rainfall interception by canopies varies according to their structure and the properties of their leaves, stems and trunks (shape, flexibility, wetness and rugosity). In the case of a banana plant, the architecture provides important rainfall redistribution as stemflow (water flux on the stem) and throughfall (water fluxes through the foliage). Industrial banana cropping used high input rates for fertilisation and pest control (nematodes, insects and fungi). In high rainfall conditions, these granules spread to the soil near plant collars or liquid sprayed on the leaves can be leached and carried to surface or ground waters by run-off and infiltration, threatening environment and human health. Thus, it became a major issue to locate and quantify stemflow and throughfall below the plants to limit input leaching and help in the design of environmental-friendly practices.

We used the DROP model that combined plant architecture from digitising and rainfall distribution simulation according to the plant physical properties. This model provided 2-D maps of water distribution below plants. We improved the model triangulation to account for complex banana leaf shapes and developed the simulation of local interception processes and mutual plant interactions. We designed several experiments for: (i) the model validation by comparison of measured and simulated transmission maps under a rainfall simulator, (ii) the model test with actual canopy rainfall distribution measurements in the field, (iii) the development and parameterisation of the local interception model based on leaf splash and storage measurements.

The new triangulation provided precise banana architectural descriptions. Rainfall distribution simulations, improved by the new features, confirmed stemflow predominance. For five months old banana plants, the interception loss that reached on average 1 mm per rainfall event tended to increase with the LAI. The remaining overestimation of some rainfall transmissions could be explained by some underestimation of interception loss. We show that high kinetic energies and rainfall rates appeared in a ring comprised between $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ of the maximum crown radius. In this area, erosion, run-off and input leaching may occur. Finally, the model improvement for the simulation of plant interactions will allow the investigation of varied crop field patterns. The approach developed in the DROP model that used generic formalism will be applied to other plants.

Modélisation 3-D de l'interception de la pluie par le bananier : effets des caractéristiques physiques du couvert sur les flux d'eau et d'énergie cinétique transmis au sol

Résumé

Selon leur structure, la forme, les propriétés (flexibilité, mouillabilité et rugosité) de leurs feuilles, tiges et troncs, les couverts interceptent la pluie de façon différente. Dans le cas du bananier, l'architecture fortement redistributive de la pluie forme des flux d'eau localisés en écoulement le long du pseudo-tronc (stemflow) et sous le feuillage (throughfall). La culture bananière d'exportation a un caractère intensif caractérisé par des épandages importants de fertilisants N, P, K (nitrates, phosphates et potassium) et de produits phytosanitaires contre les nématodes, les insectes et la cercosporiose. En cas de forte pluviométrie, ces intrants, déposés en granulés au pied des bananiers ou pulvérisés aux dessus des bananeraies sous forme d'aérosols, peuvent être entraînés par lessivage et transportés par ruissellement et infiltration vers les cours d'eau et dans les sols, constituant ainsi un risque pour l'environnement et la santé humaine. Afin de limiter le lessivage d'intrants et de proposer des techniques de culture plus respectueuses de l'environnement, il était important d'identifier les zones de flux maximaux sous bananier.

Nous avons utilisé DROP, un modèle combinant un modèle architectural de plante (alimenté par digitalisation) et un modèle de distribution de pluie prenant en compte les propriétés physiques des feuilles et de la pluie qui fournit les cartographies 2-D des distributions d'eau au sol sous les plantes. Il était nécessaire de développer et améliorer le modèle qui n'était pas adapté aux formes complexes des feuilles du bananier et ne simulait ni les phénomènes locaux d'interception, ni les interactions entre plantes. L'adaptation du modèle aux feuilles de bananier a nécessité l'amélioration de la méthode de triangulation utilisée pour la représentation des plantes. Différentes expérimentations ont été conçues pour développer le modèle de simulation des écoulements. Sa validation a été faite en comparant les cartographies simulées et mesurées sous un bananier placé sous un simulateur de pluie. Des mesures de distribution de la pluie en parcelle ont été également utilisées pour tester le modèle appliqué à une parcelle. Enfin, des expérimentations permettant de mesurer les phénomènes d'éclaboussures (splash) et de stockage sur de petites surfaces ont été menées pour développer un modèle d'interception à l'échelle de la feuille.

La nouvelle triangulation procure une description tridimensionnelle précise des architectures de bananiers. Les prédictions des distributions de la pluie sous les bananiers confirmant la prépondérance du stemflow, ont été améliorées par l'introduction de lois d'interception locales. Par épisode pluvieux, les pertes par interception représentent en moyenne 1 mm pour des bananiers âgés de 5 mois et semblent augmenter avec le LAI. La surestimation de certaines transmissions d'eau de pluie au sol laisse supposer que ces pertes par interception sont encore sous-estimées. Les modifications des énergies cinétiques et des débits par les bananiers font apparaître une zone comprise entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ du rayon de la couronne foliaire où il y aura risque d'érosion, de ruissellement et d'entraînement d'intrants. Enfin, l'adaptation du modèle à la simulation de plusieurs plantes en interaction permet d'envisager son application à des situations agronomiques en bananeraie. Cette démarche développée dans DROP pourrait être appliquée à d'autres plantes, du fait du caractère générique des méthodes scientifiques qui lui sont associées.