



Contribution à l'étude de la durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier

Alexandre A. Leca

► To cite this version:

Alexandre A. Leca. Contribution à l'étude de la durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier. Sciences agricoles. Université Blaise Pascal (Clermont Ferrand 2), 2011. Français. NNT: . tel-02805669

HAL Id: tel-02805669

<https://hal.inrae.fr/tel-02805669>

Submitted on 6 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.



Université Blaise Pascal

**ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE LA VIE, SANTÉ,
AGRONOMIE, ENVIRONNEMENT**

N° d'ordre : XXXX

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Spécialité : Physique de l'Environnement

Présentée et soutenue publiquement par

Alexandre LECA

le 13 décembre 2011

Contribution à l'étude de la durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier

Président du jury :

M. Joël VAN BAELEN

Directeur de Recherche CNRS

Rapporteurs :

Mme. Evelyne COSTES

Directeur de Recherche INRA

M. Laurent HUBER

Directeur de Recherche INRA

Examineur :

M. Bernard TIVOLI

Ingénieur de Recherche INRA

Directeur de la thèse :

M. André LACOINTE

Chargé de Recherche INRA

Co-directeur de la thèse :

M. Marc SAUDREAU

Chargé de Recherche INRA

Table des Matières

Définitions, Sigles & Notations.....	15
Introduction	21
Synthèse Bibliographique	31
I. Le pathosystème pommier-tavelure : un enjeu socio-économique.....	33
II. Le pathosystème Pommier-Tavelure : Aspects biologiques et bioclimatiques	37
II.1. Le Pommier.....	37
II.1.a. Taxonomie.....	37
II.1.b. Cycle phénologique du pommier :	38
II.1.c. Architecture de l'arbre	39
II.1.c.i) Pourquoi étudier l'architecture des arbres ?	39
II.1.c.ii) Représenter l'architecture des arbres à l'aide de plantes virtuelles	41
II.2. La Maladie de la Tavelure.....	44
II.3. Le Pathogène, <i>Venturia inaequalis</i> (Cooke) Winter.....	46
II.3.a. Cycles et processus d'infection (Figure B.13)	46
II.3.a.i) Infection primaire.....	49
II.3.a.ii) Infection secondaire.....	52
II.3.b. Résistance génétique à la tavelure	53
II.3.c. Résistance ontogénique du pommier à la tavelure	54
II.4. La Durée d'Humectation.....	55
II.4.a. Lien entre durée d'humectation et infection par <i>Venturia inaequalis</i>	55
II.4.b. Mesure de la durée d'humectation.....	59
II.4.b.ii) Capteurs radiométriques.....	60
II.4.b.iii) Capteurs à mesure de résistance électrique	60
II.4.c. Utiliser les mesures de durée d'humectation	64
II.4.c.i) Variabilité spatiale de la durée d'humectation au sein du couvert	64
II.4.c.ii) Modéliser la durée d'humectation / Prévoir les risques d'épidémie	67
II.4.c.iii) Données d'entrée des modèles et validation	69

Chapitre I – Modélisation de l'évaporation à l'échelle de la goutte (partie 1)	73
Introduction	75
I. METHODOLOGIE & POSTULATS DE DEPART	77
I.1. Principe du calcul de l'évaporation	77
2. Estimation du flux d'évaporation	79
<i>INTRODUCTION</i>	80
<i>MATERIAL AND METHODS</i>	82
1. <i>LWD computation</i>	82
2. <i>Evaporation flux computation – Derivation of the Penman-Monteith equation</i>	82
3. <i>LWD models assessment</i>	85
4. <i>LWD computation and risk of infection</i>	85
<i>RESULTS</i>	86
1. <i>Assessment of LWD computations</i>	86
2. <i>LWD computation and risk of infection</i>	88
<i>DISCUSSION</i>	89
I.3. Estimation de la surface d'échange	93
II. FORME DES GOUTTES	95
II.1. Bases théoriques	95
II.1.a. Tension interfaciale, mouillage, mouillabilité	97
II.1.b. Hydrophobie/hydrophilie et angle de contact	99
II.2. Exploitation dans les modèles	102
II.2.a. Représentation analytique de la goutte	102
II.2.b. Evaluation de l'influence de l'angle de contact sur l'évaporation de la goutte	105
Conclusion du chapitre	107

Chapitre II – Caractérisation de la mouillabilité du support d'évaporation	109
Introduction	111
I. Mesurer les angles de contact	112
I.1. Définition des angles à mesurer	112
I.2. Méthodes expérimentales	113
I.2.a. Mesurer les angles de contact	113
I.2.b. Mise en évidence des angles dynamiques	114
I.3. Mouillabilité et hétérogénéités de surface	116
II. Description du système expérimental	118
II.1. Matériaux à l'étude	118
II.1.a. Matériau de référence : le Parafilm 'M'	118
II.1.b. Mesure de la mouillabilité des supports végétaux	120
II.1.c) Etude de la variabilité ontogénique de la mouillabilité	122
II.1.d. Mesure de la mouillabilité des capteurs de durée d'humectation	126
II.2. Matériel de prise de vues	127
II.3. Dispositif de contrôle des gouttes	129
II.4. Acquisition des images	131
II.5. Analyse des images	132
III. RESULTATS & DISCUSSIONS	135
III.1. Validation de la méthode à l'aide d'un support de référence : le Parafilm "M"	135
III.2. Mouillabilité des capteurs de durée d'humectation	137
III.3. Mesures d'angles de contact sur supports végétaux	140
III.3.a. Variabilité inter-spécifique de la mouillabilité	140
III.3.b. Variabilité inter-variétale de la mouillabilité des feuilles de pommier	143
III.3.c. Variabilité ontogénique de la mouillabilité des feuilles	153
III.3.d. Effet des conditions initiales sur la mesure des angles statiques	156
III.3.d.i) Effet condition initiale ou mise à l'équilibre des gouttes	158
III.3.d.ii) Effet du support	159
III.3.e. Tentative de corrélation entre sensibilité à la tavelure et mouillabilité	160
Conclusion du chapitre	162

Chapitre III – Modélisation de l'évaporation à l'échelle de la goutte (partie 2) 163

Introduction	165
I. Validation du modèle – conditions contrôlées.....	166
I.1. Détermination de l'angle de contact statique	166
I.1.a. Détermination du nombre de Bond pour les gouttes étudiées.....	168
I.2. Première validation du modèle en fonction de la variabilité des paramètres	169
I.2.a. Vitesse du Vent Variable	169
I.2.b. Tentative d'une nouvelle expression de la résistance r_H	174
I.3. Nouvelle validation du modèle après correction des équations	179
I.3.a. Vitesse du vent variable	179
I.3.b. Volume Variable.....	181
I.3.c. Température Variable	183
I.3.d. Humidité Relative Variable.....	185
I.3.e. Rayonnement Variable	188
I.3.f. Bilan et remarques sur la validation du modèle.....	190
II. Analyse de sensibilité.....	192
III. Simulations du modèle en conditions naturelles.....	195
Conclusion du chapitre	198

Chapitre IV – Mesures de durée d'humectation au sein d'un couvert.....199

Introduction	201
I. Matériel et Méthodes	202
I.1. Capteur de durée d'humectation	202
I.1.a. Présentation des capteurs.....	202
I.1.b. Calibration des capteurs.....	204
I.1.c. Conception du support des capteurs.....	204
I.2. Parcelle expérimentale	206
I.3. Données météorologiques.....	210
I.4. Digitalisation.....	212

I.4.a. Exploitation des maquettes d'arbre en 3D.....	214
I.4.b. Le STAR : <i>Silhouette to Total Area Ratio</i>	217
I.5. Manipulations spécifiques d'apport d'eau contrôlé	219
I.6. Exploitation des données.....	220
I.6.a. Durées d'humectation (<i>DH</i>) et variables météorologiques.....	220
I.6.b. Détermination de l'éclairement des capteurs	223
II. Résultats & Discussions.....	225
II.1. Mesures d'humectation en conditions naturelles totales.....	225
II.1.a. Mise en évidence d'une variabilité de la durée d'humectation entre capteurs.....	228
II.1.b. Etude de la variabilité spatiale de la durée d'humectation et de l'éclairement.....	230
II.1.b.i) Comparaisons entre durée d'humectation et coordonnées spatiales des capteurs	230
II.1.b.ii) Calcul des paramètres d'éclairement.....	232
II.1.b.iii) Comparaison avec les mesures d'humectation en conditions naturelles totales ..	236
II.2. Mesures de durée d'humectation en apport d'eau contrôlé.....	241
II.2.a. Etude des durées d'humectation cumulées sur chaque journée	241
II.2.b. Etude dynamique au cours des journées de mesure.....	244
Conclusion du chapitre	252
Discussion Générale.....	253
I. Echelle Microscopique : interactions entre la surface de la feuille et le liquide en contact.....	258
I.1. La variabilité ontogénique de l'état de surface des feuilles et ses implications	258
I.1.a. Sens de variation des médianes des angles de contact	259
I.1.b. Evolution globale de l'hystérésis d'angles de contact	260
I.1.c. Perspectives de vérification des hypothèses liées à la variabilité ontogénique de la mouillabilité	260
I.2. Effet de l'impact des gouttes sur leur forme à l'équilibre	261
I.3. Extension des études de mouillabilité aux fongicides	264
II. Echelle de l'organe : la feuille et la goutte dans leur environnement.....	265

II.1. Régime d'écoulement et expression de la résistance aux transferts convectifs de la couche limite	266
II.1.a. Quelle échelle de longueur?.....	268
II.2. Prévion des risques épidémiques à partir du modèle d'évaporation.....	271
III. Changement d'échelle : de la feuille à l'arbre.....	273
III.1. Pourquoi modéliser à l'échelle de l'arbre?.....	273
III.2. Comment effectuer le changement d'échelle?	274
III.3. Vers des architectures favorisant de courtes durées d'humectation	275
IV. Echelle de l'arbre : variabilité spatiale du microclimat et de la durée d'humectation	276
IV.1. Variabilité des paramètres climatiques au sein du couvert influençant l'évaporation	277
IV.1.a. Variabilité spatiale de la température et de l'humidité relative.....	277
IV.1.b. Validité de la détermination du STAR.....	278
IV.2 . Etude expérimentale de la distribution spatiale du volume d'eau au sein du couvert.....	280
IV.2.a. Cas de la rosée	280
IV.2.b. Cas de la pluie.....	282
IV.3. Modélisation de la distribution spatiale du volume d'eau au sein du couvert	284
IV.3.a. Bases de modélisation existantes	284
IV.3.b. Apport de l'étude des interactions eau/feuille dans la modélisation de l'interception.....	285
IV.3.c. <i>Splashing</i> et dissémination du pathogène	286
Conclusion	287
Bibliographie	293
Liste des figures.....	307
Liste des tableaux.....	315

Annexes.....	319
Annexe 1 – Digitalisation Électromagnétique.....	321
A.1. Principe de la digitalisation électromagnétique de contact.....	321
A.2. Acquisition des données digitalisées	323
A.3. Reconstruction du feuillage.....	324

Définitions & Sigles

3D : Trois Dimensions. Ce sigle sera principalement utilisé dans ce travail pour décrire les représentations virtuelles des arbres étudiés, construites à l'aide d'un logiciel de visualisation en trois dimensions.

Ami : Architecture & Microclimat, équipe de l'unité mixte de recherche PIAF.

Coalescence : réunion de deux fluides de même composition dispersés, comme par exemple deux gouttes d'eau à proximité l'une de l'autre : si les gouttes viennent à gonfler ou à se déplacer l'une vers l'autre, il va se produire une coalescence qui va réunir les deux gouttes en une seule.

Coefficient de corrélation : le coefficient de corrélation décrit la relation existant entre deux variables.

Coefficient de détermination : noté R^2 , il s'agit du carré du coefficient de corrélation, qui évalue la qualité d'alignement d'un ensemble de valeur autour d'une régression linéaire.

Couronne : zone intérieure de l'arbre délimitée par les extrémités du feuillage.

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes.

Degré-jour : unité biologique déterminant par exemple la durée de développement d'un organisme : les degrés-jours nécessaires au développement s'estime en cumulant les températures moyennes journalières. (Par exemple, si un organisme atteint son développement au bout de 250 degrés-jours, il aura atteint son stade développé au bout de 10 jours à 25°C, ou de 20 jours à 12,5°C).

Durée d'humectation LWD / DH : DH en français pour **Durée d'Humectation**. En anglais, on parle de durée d'humectation sur feuille, soit **LWD** pour *Leaf Wetness Duration*. Ce terme sera employé quelque soit le support, même s'il s'agit d'un capteur électronique de durée d'humectation, car la finalité de ce dernier est de rendre compte de la durée d'humectation des feuilles.

Eau, Vapeur d'eau : molécule H_2O . Quand on parle de liquide = eau, quand on parle de gaz = vapeur.

Ecart-type : indicateur de la dispersion des valeurs autour de leur moyenne.

Humidité Relative HR / RH : l'humidité relative (notée RH en anglais pour *Relative Humidity*) est le rapport de la pression de vapeur d'eau dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la température de l'air.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

MEB : Microscope Electronique à Balayage

Microclimat : conditions climatiques restreintes à une zone très petite (l'échelle de définition est propre à l'étude, on peut parler de microclimat pour une ville comme pour un couvert arboré).

Nucléation : la nucléation (ou condensation) d'une goutte d'eau est un phénomène au cours duquel une goutte liquide va se former autour d'un élément solide microscopique dans un volume de gaz, dans des conditions climatiques favorables (forte humidité).

Ontogénie : développement biologique d'une feuille du débourrement au stade adulte.

Pathogène : organisme entraînant le développement d'une maladie sur son hôte.

PIAF : Physique & Physiologie Intégratives de l'Arbre Fruitier & Forestier.

Pression de Vapeur : dans un mélange de vapeur et de liquide, la pression de vapeur est la pression partielle exercée sur ce mélange par les molécules à l'état gazeux.

Pression de Vapeur Saturante : pression de vapeur, lorsque cette dernière est à l'équilibre avec la phase liquide dans le mélange.

STAR : Silhouette to Total Area Ratio, représente la surface éclairée d'un objet par rapport à sa surface totale.

Substrat : un substrat est une base matérielle, un support, sur lequel s'exerce une action. Nous utiliserons ici le terme substrat pour parler du support sur lequel on déposera des gouttelettes d'eau

Variance : la variance est le carré de l'écart-type. Elle est utilisée en statistiques pour déterminer la dispersion des valeurs d'une distribution autour d'une tendance.

Notations

Alphabet Latin :

Notation	Définition	Unité
a, a_{Allen}	Paramètres empiriques	Ø
a_{STAR}	Coefficient de pondération des STAR direct et diffus	Ø
b, b_{Allen}	Paramètres empiriques	Ø
B_o	Nombre de Bond	Ø
C	Flux de chaleur sensible	W.m ⁻²
c_{air}	Concentration de vapeur dans l'air à l'infini	kg.m ⁻³
c, c_{Allen}	Paramètres empiriques	Ø
C_p^{air}	Capacité calorifique de l'air sec	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
c_v	Concentration de vapeur saturante à l'interface liquide-air	kg.m ⁻³
d	Paramètre empirique	Ø
D	Diamètre	m
d_{vap}	Diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air	m ² .s ⁻¹
E	Taux d'évaporation	kg.m ⁻² .s ⁻¹
e_{air}	Pression de vapeur de l'air	Pa
e_{sat}	Pression de vapeur saturante de l'air	Pa
g	Constante gravitationnelle	m.s ⁻²
G_r	Nombre de Grashof	Ø
h	Hauteur maximale d'une goutte	m
H	Humidité relative de l'air	Ø
H_w	Facteur de mouillabilité hémisphérique	Ø
k_{air}	Conductivité thermique de l'air	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
L	Echelle de longueur de la couche limité	m
m	Masse d'eau évaporée	kg
M_{eau}	Masse molaire de l'eau	kg.mol ⁻¹
p	Valeur p (<i>p-value</i>) d'un test statistique	Ø
p_{vap}	Pression de vapeur	Pa
r, R_0	Rayon	m
$R, R_{capteur}$	Résistance électrique	Ω
r_C	Résistance de couche limite en convection forcée	s.m ⁻¹
r_{calc}	Rayon calculé d'un hémisphère	m
r_D	Résistance de couche limite en convection libre	s.m ⁻¹
R_e	Nombre de Reynolds	Ø
R_g	Rayonnement global	W.m ⁻²
R_{GP}	Constante des Gaz Parfaits	J.kg ⁻¹ .mol ⁻¹
r_H	Résistance aérodynamique de couche limite	s.m ⁻¹

r_M	Résistance de couche limite en convection mixte	s.m ⁻¹
R_n	Rayonnement net	W.m ⁻²
r_{obs}	Rayon observé	m
S	Paramètre d'étalement	J.m ⁻²
S_{urf}	Surface d'échange à l'interface liquide-air	m ²
T_{air}	Température de l'air	K
t_{evap}, t_N	Durée totale d'évaporation	s
T_S	Température à la surface d'une goutte	K
U	Vitesse du vent	m.s ⁻¹
v	Vitesse d'une goutte	m.s ⁻¹
V, V_0	Volume (indice 0 : volume initial)	m ³
V_{EX}	Tension d'excitation de circuit	V
V_S	Tension de sortie de circuit	V
W_e	Nombre de Weber	Ø

Alphabet Grec :

Notation	Définition	Unité
α	Seuil de signification statistique	Ø
γ^*	Constante psychrométrique ajustée	Pa.K ⁻¹
γ_{LA}	Tension superficielle à l'interface liquide-air	J.m ⁻²
γ_{SA}	Tension superficielle à l'interface solide-air	J.m ⁻²
γ_{SL}	Tension superficielle à l'interface solide-liquide	J.m ⁻²
Δ	pente de la courbe de saturation	Pa.K ⁻¹
Δt	Variation de durée	s
$\Delta\theta$	Hystérésis d'angle de contact	°
ΔT	Variation de température	K
ΔV	Variation de volume	m ³
θ	Angle de contact	°
θ_a	Angle de contact d'avancée	°
θ_e	Angle de contact à l'équilibre	°
θ_r	Angle de contact de recul	°
κ^{-1}	Echelle de longueur capillaire	m
λ	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	J.kg ⁻¹
ν	Viscosité cinématique de l'air	m ² .s ⁻¹
ρ_{air}	Densité volumique de l'air	kg.m ⁻³
ρ_{eau}	Densité volumique de l'eau	kg.m ⁻³
σ	Tension de surface de l'eau	N.m ⁻¹

Introduction

Pour beaucoup de consommateurs choisissant leurs pommes sur un étal, le meilleur fruit est le plus beau. Derrière ce critère subjectif résident quelques caractéristiques consensuelles : taille, forme, couleurs, absence de taches. Une pomme ne satisfaisant pas un de ces critères sera écartée.

La maladie la plus répandue dans les vergers de pommiers est la tavelure. Cette maladie générée par le champignon *Venturia inaequalis* produit des taches brunes sur les fruits. Si à faible pression de la maladie la santé du verger n'est pas menacée, l'aspect du fruit condamne la pomme qui ne pourra être vendue comme fruit de table.

Si l'on se place du point de vue de l'agriculteur, la tavelure est donc une menace économique, car les lésions qu'elle cause ont un fort impact sur la cosmétique du fruit, et donc sur sa rentabilité commerciale. Il est alors inévitable de traiter les vergers avec des fongicides. Ces produits phytosanitaires sont composés de molécules souvent dangereuses pour l'environnement et parfois toxiques pour l'homme. En conséquence, la société actuelle encourage très vivement une nette réduction de l'usage des pesticides, tout en requérant un haut niveau de qualité des productions fruitières.

Il apparaît indispensable d'orienter la recherche agronomique vers des méthodes de contrôle des maladies respectueuses de l'environnement, tout en maintenant le rendement et la qualité des fruits (Plan *Ecophyto 2018*, 2008). Le pathosystème (le système formé par un végétal et son pathogène) pommier-tavelure constitue une priorité, de par la quantité dramatique de traitements fongicides et leur fort impact écologique. Le XX^{ème} siècle dans son ensemble a vu des études très complètes tant sur le plan biologique de la tavelure que sur les moyens de prévoir, prévenir, et freiner son développement. Cependant, les dégâts causés par cette maladie restent une préoccupation majeure, chaque méthode d'évitement ayant ses défauts : traitements fongicides nocifs pour l'environnement et la santé humaine quand ils sont utilisés en grande quantité, apparition de résistances à ces fongicides les rendant inopérants, contournement des gènes de résistance du pommier par des souches virulentes de l'agent pathogène, limites de précision dans les modèles de prévision des risques de contamination...

Il apparaît donc nécessaire de poursuivre la recherche selon des axes visant à améliorer chaque méthode.

Les méthodes de sélection de variétés résistantes aux maladies basées sur l'utilisation de gènes majeurs sont inévitablement tôt ou tard contournées par l'apparition de nouvelles souches du pathogène. De plus, la mise en place d'itinéraires techniques favorisant la prophylaxie est encore au début de son développement. L'usage de fongicides pour enrayer la tavelure semble donc actuellement indispensable. Mais à l'heure où les risques pour la santé humaine et pour la pérennité des sols sont mis en avant, les surestimations des modèles de prévision des risques de développement de la maladie posent problème. Elles entraînent en effet une utilisation excessive de ces traitements, dont la plupart sont dangereux pour l'environnement. Il faut donc trouver un moyen de réduire leur usage au strict nécessaire, à savoir lorsqu'il s'agit du dernier recours possible pour prévenir le développement de la maladie. Les efforts de recherche se doivent de converger vers cette priorité, qui passe par une meilleure compréhension des liens entre le pathogène et son hôte.

C'est cet axe de recherche visant à étudier **les interactions entre le pommier, la maladie (tavelure) et leur environnement**, que mon travail de thèse se propose de suivre.

Cela nécessite avant tout une identification des acquis actuels de la maladie et de son développement. Une synthèse bibliographique présentera donc le **contexte socio-économique** concernant le pathosystème pommier-tavelure, avant de détailler les **caractéristiques du pommier, de son pathogène *Venturia inaequalis*, et de leurs interactions**.

Cette synthèse bibliographique a montré que le cycle épidémique comporte des phases de sporulation, de dissémination des spores (par le vent et la pluie), et d'infection. Cette dernière phase est quasiment inévitable une fois le pathogène présent sur le verger, et sa sévérité est certes dépendante de la pression du pathogène (quantité de spores présentes), mais elle est aussi directement liée aux conditions climatiques. Comprendre et prévoir l'infection constitue un levier pour prévenir la maladie et ne traiter les vergers qu'en cas de risque réel, c'est pourquoi nous avons centré nos recherches sur cette infection et la caractérisation des risques. L'étude bibliographique a permis de dégager un paramètre clé assurant ou non l'infection : la **durée d'humectation**. Si cette dernière est suffisante à une température donnée, l'infection de l'organe par le

pathogène aura lieu et la maladie se développera. Ainsi **la compréhension et l'estimation de la durée d'humectation apporterait un moyen de savoir dans quelles conditions il y a un risque d'infection, et par conséquent à quels moments clés il faut traiter les vergers.**

Humecter signifie *rendre humide*. La durée d'humectation est donc la durée totale pendant laquelle un organe est recouvert (entièrement ou en partie) d'eau liquide. Se posent alors les questions : comment rendre humide? Et combien de temps cette humectation perdure-t-elle?

Etudier la durée d'humectation nécessite donc un raisonnement en deux temps :

- i) aborder les processus d'apport d'eau;
- ii) aborder les processus impactant le temps que cette eau va mettre pour entièrement évaporer.

On peut donc résumer la durée d'humectation comme suit :

Durée d'Humectation = Durée de l'Apport d'Eau + Durée de l'Évaporation

Dans des conditions de verger, l'humectation des feuilles vient naturellement de la pluie ou de la rosée. Ces phénomènes sont dépendants du climat, et plus précisément des structures des arbres et du microclimat au sein du couvert.

En effet, la pluie ne tombe et la rosée ne se forme que si les conditions climatiques leurs sont propices. Mais à l'intérieur de la couronne d'un arbre, toutes les zones ne recevront pas l'eau et la lumière de la même manière, l'arbre ayant une structure hétérogène induite par la disposition spatiale des organes générant un auto-ombrage plus ou moins prononcé. Dès lors la distribution de l'eau entre les organes de l'arbre est modulée par la structure des arbres, qui forme des obstacles pour la pluie et induit des microclimats plus ou moins propices à la nucléation de la rosée.

Une fois un organe humecté, l'eau va s'évaporer plus ou moins rapidement en fonction de la demande évaporative de l'air liée au microclimat environnant l'organe considéré. **C'est sur cette composante d'évaporation que nous avons centré notre travail,** pour comprendre et quantifier les interactions entre variabilité spatiale intra couvert des durées d'évaporation et variabilité spatiale du microclimat.

Pour rendre compte de ces variabilités, il faut donc considérer l'arbre non pas comme une boîte noire dont le volume est délimité par l'enveloppe de la couronne, mais comme un **espace hétérogène au sein duquel différentes conditions microclimatiques coexistent**.

Pour représenter la variabilité de l'humectation et comprendre ses mécanismes à l'échelle du verger, il faut tout d'abord étudier la variabilité à l'échelle d'un seul arbre. S'impose alors la notion de **structure de l'arbre**. En effet, celle-ci conditionne le microclimat de l'arbre et induit un effet sur la durée d'humectation et par suite sur le développement de la maladie. Si nous parvenons à comprendre et quantifier ce lien entre structure et durée d'humectation, il sera possible de prévoir les risques de maladie. Au cours de cette thèse les structures des arbres ont été caractérisées via l'utilisation de **la digitalisation électromagnétique**. Cette méthode permet de mesurer l'architecture d'une plante et de la restituer sous forme virtuelle en trois dimensions. Ces maquettes informatiques ont permis de quantifier les liens entre éclaircissement intra couvert et durée d'humectation.

Cependant, encore une fois, il nous a été nécessaire d'envisager un changement d'échelle de notre étude, car la compréhension de l'humectation dans l'arbre passe par la compréhension du phénomène d'évaporation sur une feuille. Ainsi, si nous parvenons à modéliser la durée d'humectation sur une feuille, il "suffira" d'intégrer ces résultats sur un arbre entier, puis sur un verger.

Cette réflexion a constitué **la première étape de notre travail : mettre en place un modèle d'évaporation d'une goutte sur une feuille**

Nous présenterons la base de ce **modèle d'estimation de la durée d'évaporation d'un volume d'eau reposant sur un support solide** dans un **premier chapitre**. Ce modèle a pour vocation d'explorer les paramètres influençant le mécanisme physique de l'évaporation, pour déterminer la seconde composante de la durée d'humectation. Avant de tenter d'estimer l'évaporation dans un arbre complet, nous avons tout d'abord étudié le phénomène à l'échelle d'une goutte sur une feuille à l'air libre. Nous verrons que la durée d'évaporation d'une goutte est très sensible à la surface d'échange entre le liquide et l'air. Cette surface est conditionnée par la forme de la goutte, qui dépend elle-même des interactions entre la goutte et son support.

Pour avancer dans nos recherches, il nous a donc fallu introduire la notion de **mouillabilité** et d'**angles de contact**, qui rendent compte des interactions entre un liquide et le substrat solide sur lequel il repose. Ces notions seront présentées dans la suite du chapitre. Nous verrons alors qu'il a été **nécessaire de mesurer la mouillabilité sur les feuilles de pommier pour rendre compte de la surface d'échange**, ces informations étant absentes de la littérature.

Le **deuxième chapitre** de ce travail présentera tout d'abord quelles méthodes existent pour effectuer ces **mesures de mouillabilité**. Les mesures faites au cours de ce travail seront alors exposées et analysées. Tout d'abord, la méthode a été validée sur une surface de référence, le "Parafilm 'M'®", avant d'être effectuée sur différents végétaux et sur des capteurs de durée d'humectation. Une forte variabilité inter-espèces de la mouillabilité a été mise en évidence, ainsi qu'une variabilité non négligeable au sein de la même espèce, mise en évidence grâce à la comparaison des données de mouillabilité de huit cultivars de pommiers différents.

Ces études ont permis de **disposer d'une base de données de mouillabilité sur pommier, qui pourra servir à la prévision de maladies**.

Connaissant la mouillabilité sur pommier et sur capteurs de durée d'humectation, nous avons pu compléter le développement de notre modèle, en y intégrant la modélisation de la forme de la goutte. Nous présenterons la **validation du modèle** dans un **troisième chapitre**. Au cours de cette validation, notre modèle s'est heurté à des erreurs de simulations en conditions de vent très faible. L'analyse de ces erreurs a montré qu'il était nécessaire d'investiguer plus avant le terme convectif dans la modélisation du bilan thermique. Nous présenterons l'amélioration du modèle et sa nouvelle validation. Nous exposerons finalement les possibilités de relier les durées d'évaporation simulées aux risques d'infection par *Venturia inaequalis*.

Toutefois, relier directement l'évaporation d'une goutte sur une feuille à un risque de maladie est un raccourci très fort en raison de la forte variabilité microclimatique au sein de la couronne. De plus, la finalité de ce travail est de tendre vers la modélisation de la durée d'humectation au sein d'un arbre. Pour ce faire, il est nécessaire de relier le microclimat qui pilote l'humectation à la situation des capteurs dans l'arbre. Nous avons

dans cette optique mis en place un **dispositif expérimental au verger visant à mesurer la durée d'humectation au sein de couverts de pommiers**. Ce dispositif, qui a fonctionné pendant trois saisons de végétation, sera présenté dans un **quatrième chapitre**. Les données mesurées, couplées à des paramètres d'éclairement calculés grâce à la digitalisation des arbres, nous ont permis d'évaluer dans quelle mesure le microclimat lumineux au sein du couvert influe sur la durée d'humectation via la phase évaporative.

Ce travail a été effectué à de multiples échelles. Pour être en mesure d'estimer l'évaporation au sein d'un couvert, il nous a fallu étudier le phénomène à l'échelle d'une seule goutte, et aller jusqu'à étudier les interactions microscopiques entre l'eau et son support, pour caractériser la forme de la goutte. Ces différents niveaux d'étude ont permis de mettre en évidence des résultats originaux, mais ils ont également soulevé de nombreuses questions. Celles-ci sont traitées dans une **discussion générale**, qui permettra d'effectuer un bilan et de proposer des perspectives de recherche dans la continuité de ce travail.

Synthèse Bibliographique

I. Le pathosystème pommier-tavelure : un enjeu socio-économique.

L'agriculture représente 1.8% de la force de travail en France, pour 3.8% du PIB (*source : CIA World Factbook*). Elle reste pourtant un secteur clé de nos sociétés. L'alimentation est prioritaire sur toutes les autres nécessités, et l'agriculture irrigue les secteurs secondaires et tertiaires, par le biais de l'industrie agroalimentaire, du commerce, et de la recherche agronomique. Qui dit agriculture dit principalement élevage animalier, culture céréalière, culture légumière, et culture fruitière.



Figure B.1 – Chaîne industrielle de calibrage et colorimétrie de pommes dans un entrepôt de traitement après récolte, pour trier les pommes par qualité de couleur et taille

Le PNNS (Programme National Nutrition Santé) encourage à manger au moins 5 fruits et légumes par jour.

Le fruit le plus consommé en France est la pomme, qui représente également la production fruitière dominante (en 2009 en France, 2050000 tonnes de pommes ont été produites sur 53000 ha, soit 23% de la production fruitière du pays; *source: FAOSTAT, ©OAA Division de la Statistique, 19 avril 2011*). Mais pour assurer cette production tout en répondant à des critères de qualité, les maladies et défauts des fruits sont proscrits

(cf. encadré et Figure B.1) (J.O., 2004). Des améliorations incessantes, fruit du travail de la recherche agronomique (recherche publique) et phytopharmaceutique (recherche et développement au sein de firmes phytopharmaceutiques) ont mené à des pratiques culturales qui apparaissent aujourd'hui discutables. En effet, à l'instar des maladies affectant l'être humain, les maladies des plantes se traitent avec des produits pharmaceutiques. La volonté de rapprocher cette notion de santé est éloquente de par le terme employé pour les produits de traitement des plantes : "produits phytopharmaceutiques". Chronologiquement, le terme employé a d'abord été *herbicide* (pour les "mauvaises herbes") et *pesticide* (pour les bioagresseurs), puis *phytosanitaire* avant le terme *phytopharmaceutique*.

La pression économique et le durcissement des critères de qualité du fruit ont mené à une forte utilisation de produits phytopharmaceutiques.

Avec 1800 spécialités phytosanitaires pour 80 symptômes (source : <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>), le pommier est une des espèces les plus traitées en France. Il existe 290 spécialités dédiées uniquement à la maladie de la tavelure, comme par exemple le NORDOX 75WG, le SYLLIT, ou encore le CUPROCAFFARO (e-phy et Agritox)

La sélection des pommes de table ne tolère pas de maladie pour une qualité dite "Extra" (*Journal officiel règlement CE n° 85/2004*), la surface de taches dues à la tavelure ne doit pas dépasser 0.25 cm² sur le fruit pour entrer dans la "catégorie I", et 1 cm² pour une pomme de "catégorie II" (cf. encadré)

Les pommes font l'objet d'une classification en trois catégories définies ci-après:

i) *Catégorie «Extra»*

Les pommes classées dans cette catégorie doivent être de qualité supérieure. Elles doivent présenter la forme, le calibre et la coloration caractéristiques de la variété (3) et être pourvues d'un pédoncule qui doit être intact. La pulpe doit être indemne de toute détérioration.

Elles ne doivent pas présenter de défauts, à l'exception de très légères altérations superficielles de l'épiderme, à condition qu'elles ne portent pas atteinte à l'aspect général du produit, à sa qualité, à sa conservation et à sa présentation dans l'emballage.

ii) *Catégorie I*

Les pommes classées dans cette catégorie doivent être de bonne qualité. Elles doivent présenter la forme, le calibre et la coloration caractéristiques de la variété (3).

La pulpe doit être indemne de toute détérioration.

Elles peuvent toutefois présenter les légers défauts suivants, à condition que ces défauts ne portent pas atteinte à l'aspect général du produit, à sa qualité, à sa conservation et à sa présentation dans l'emballage:

- un léger défaut de forme,
- un léger défaut de développement,

20.1.2004 FR Journal officiel de l'Union européenne L 13/5

(1) En raison des caractéristiques variétales de la variété Fuji et de ses mutations concernant la maturité à la récolte, la maladie vitreuse radiale est admise à condition qu'elle se limite au faisceau fibro-vasculaire de chaque fruit.

(2) À cet effet, elles doivent présenter une teneur en solubles solides et un degré de fermeté satisfaisants.

(3) Les critères de coloration et de roussissement ainsi qu'une liste non exhaustive des variétés concernées par chaque critère figurent en

appendice à la présente norme.

- un léger défaut de coloration,
- de légers défauts d'épiderme ne devant pas dépasser:
 - 2 cm de long pour les défauts de forme allongée,
 - 1 cm² de surface totale pour les autres défauts, à l'exception de la tavelure (*Venturia inaequalis*), dont la surface totale ne doit pas dépasser 0,25 cm²,
 - 1 cm² de surface totale pour les meurtrissures légères, qui ne doivent pas être décolorées.

Le pédoncule peut faire défaut à condition que la section soit nette et que l'épiderme adjacent ne soit pas détérioré.

iii) *Catégorie II*

Cette catégorie comprend les pommes qui ne peuvent être classées dans les catégories supérieures mais correspondent aux caractéristiques minimales ci-dessus définies (1).

La pulpe ne doit pas présenter de défaut essentiel.

Les défauts suivants sont admis à condition que les fruits gardent leurs caractéristiques essentielles de qualité, de conservation et de présentation:

- défauts de forme, défauts de développement, défauts de coloration,
- défauts de l'épiderme qui ne doivent pas dépasser:
 - 4 cm de long pour les défauts de forme allongée,
 - 2,5 cm² de surface totale pour les autres défauts, à l'exception de la tavelure (*Venturia inaequalis*) dont la surface totale ne doit pas dépasser 1 cm²,
 - 1,5 cm² de surface totale au maximum pour des meurtrissures légères qui peuvent être légèrement décolorées.

Extrait du Journal Officiel de la Communauté Européenne, règlement du 15/01/2004 réglementant la norme Européenne sur la commercialisation des pommes.

Paradoxalement, la tendance actuelle dans les décisions socio-politiques est à la réduction des traitements phytosanitaires, comme en atteste le Grenelle de l'Environnement édicté en France en 2007, dont l'article 31 stipule :

Les objectifs à atteindre sont (...) c) De généraliser des pratiques agricoles durables et productives. L'objectif est, d'une part, de retirer du marché, en tenant compte des substances actives autorisées au niveau européen, les produits phytopharmaceutiques contenant les quarante substances les plus préoccupantes en fonction de leur substituabilité et de leur dangerosité pour l'homme, trente au plus tard en 2009, dix d'ici à la fin 2010, et, d'autre part, de diminuer de 50 % d'ici à 2012 ceux contenant des substances préoccupantes pour lesquels il n'existe pas de produits ni de pratiques de substitution techniquement et économiquement viables. De manière générale, l'objectif est de réduire de moitié les usages des produits phytopharmaceutiques et des biocides en dix ans en accélérant la diffusion de méthodes alternatives, sous réserve de leur mise au point, et en facilitant les procédures d'autorisation de mise sur le marché des préparations naturelles peu préoccupantes. Cette réduction ne doit cependant pas mettre en danger des productions, notamment les cultures dites mineures. Un programme pluriannuel de recherche appliquée et de formation sur l'ensemble de l'agriculture sera lancé au plus tard en 2009, ainsi qu'un état des lieux de la santé des agriculteurs et des salariés agricoles et un programme de surveillance épidémiologique. Une politique nationale visera la réhabilitation des sols agricoles et le développement de la biodiversité domestique, cultivée et naturelle dans les exploitations.

De ce texte de loi a entre autres découlé un appel du ministère français en charge de l'environnement et de l'agriculture à mettre en place un projet, Ecophyto R&D, dont l'objectif était de mettre en commun une force de recherche pour réunir des connaissances et étudier la faisabilité d'itinéraires cultureux économes en intrants. C'est dans le cadre ces travaux qu'a débuté mon travail de recherche, visant à apporter une meilleure compréhension des interactions entre la plante, son pathogène, et leur microclimat.

II. Le pathosystème Pommier-Tavelure : Aspects biologiques et bioclimatiques

II.1. Le Pommier

Le pommier est un arbre fruitier de la famille des *Rosaceae* et du genre *Malus*, mot dont la signification latine décrit à la fois une pomme et le mal ou le malheur, ce qui explique certainement le mythe biblique de la pomme dans la genèse. L'espèce domestique principalement cultivée est *Malus domestica* L. Borkh, "pomme domestique" (Tableau B.1). On l'appelle également *Malus pumila* Mill.

II.1.a. Taxonomie

Domaine	<i>Eukaryota</i>
Sous-domaine	<i>Bikonta</i>
Règne	<i>Plantae</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe	<i>Rosidae</i>
Ordre	<i>Rosales</i>
Famille	<i>Rosaceae</i>
Sous-famille	<i>Maloideae</i>
Genre	<i>Malus</i>
Espèce	<i>Malus domestica</i>

Tableau B.1 – Taxonomie du pommier domestique

L'origine de cette espèce serait la vallée du Tian Shan ("*montagnes célestes*") passant par la Chine, l'Ouzbékistan, le Kazakhstan, le Kirgizstan et le Tadjikistan. Sur ces vallées pousse naturellement l'espèce *Malus sieversii* M.Roem. qui produit des pommes douces

et sucrées, à l'image des pommes de *Malus domestica* (Juniper & Mabberley, 2006; Vavilov, 1992).

Au sein de l'espèce *Malus domestica*, on trouve plusieurs milliers de cultivars (Juniper & Mabberley, 2006), mais seulement une vingtaine sont cultivées en France à des fins commerciales (la centaine d'autres cultivars que l'on peut trouver en France sont des variétés de vergers conservatoires). Le nombre s'agrandit constamment, avec la création de cultivars hybrides, comme par exemple la pomme Ariane (Laurens *et al.*, 2005) ou Jubilé (développée par les pépinières Delbard en 1962).

II.1.b. Cycle phénologique du pommier :

Les stades phénologiques du pommier ont été identifiés par Fleckinger en 1948 selon un code appelé "l'échelle Fleckinger" (Figure B.2). Il est très utile pour estimer les stades de sensibilité aux maladies et par conséquent les stades auxquels des traitements éventuels seront le plus efficaces.

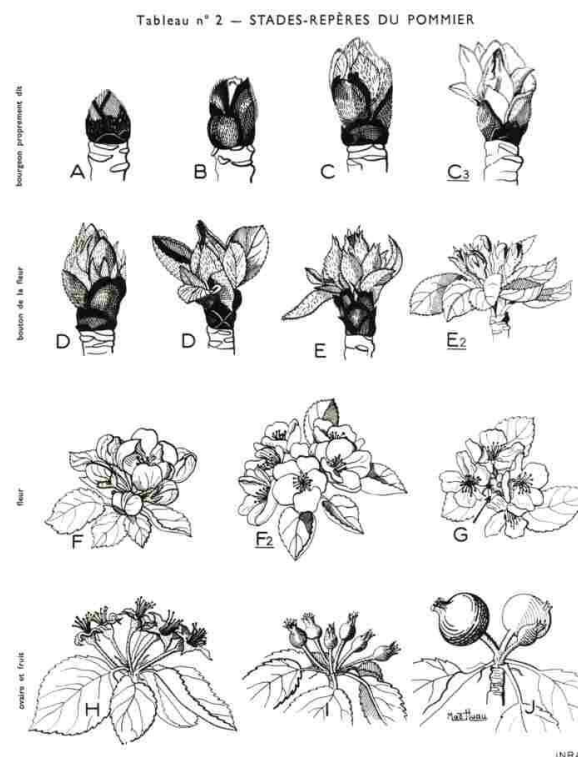


Figure B.2 – cycle phénologique du pommier, in (Fleckinger, 1948)

II.1.c. Architecture de l'arbre

II.1.c.i) Pourquoi étudier l'architecture des arbres ?

A partir de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, notamment en France où la conjoncture au sortir de la seconde guerre mondiale a mené à la création de l'INRA, l'intérêt agronomique de la conduite des arbres a été exploré et documenté (Paratte, 2004). Les agriculteurs avaient besoin d'un rendement suffisant et d'une qualité de fruit optimale. L'agrandissement des surfaces de cultures impliquait une simplification des pratiques culturales, permettant de tailler, récolter, et traiter les arbres le plus simplement possible (Robinson *et al.*, 1991).

La manipulation de la conduite de l'arbre fruitier a alors été vue comme un moyen de réguler la charge fructifère, assurant un rendement et une qualité optimaux. Sachant que le rendement et la croissance des fruits dépendent du transport et de la production des assimilats et que celle-ci est conditionnée par le fonctionnement photosynthétique des feuilles (Jackson, 1980), est apparue la nécessité d'avoir au sein de l'arbre une forte interception et une bonne distribution de la lumière pour favoriser une bonne croissance et une belle qualité de fruits (Ferree *et al.*, 1990). Depuis les années 1970, de nombreux travaux (Lauri, 2007) ont cherché à adapter la conduite des arbres fruitiers en conséquence, et tous les systèmes de plantation cherchent à améliorer et optimiser l'interception globale de la lumière dans la plante, en manipulant son architecture (Willaume *et al.*, 2004) (Figure B.3).

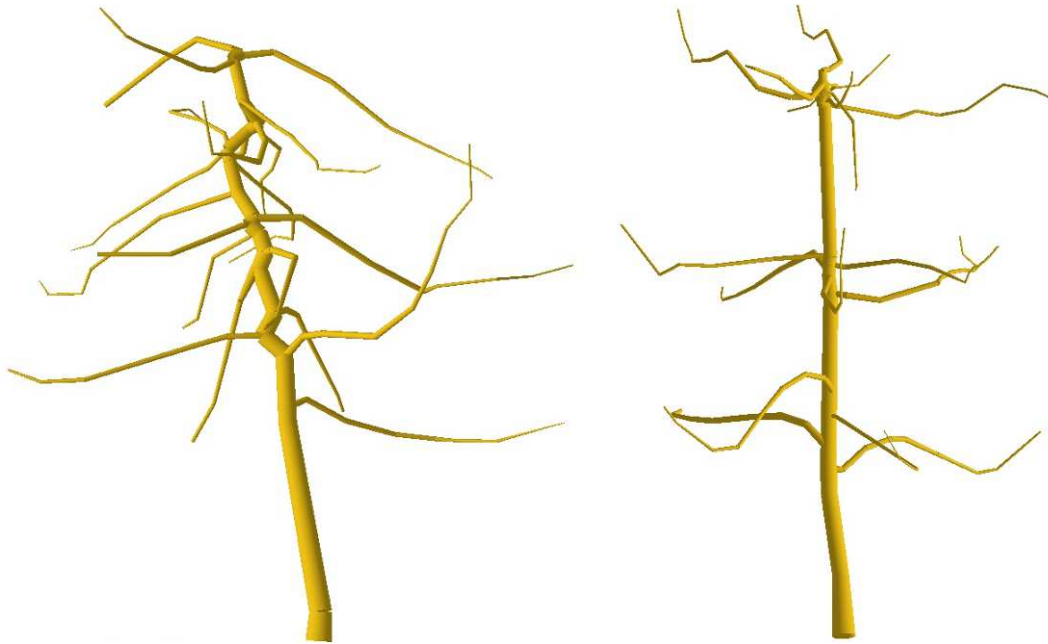


Figure B.3 – Représentations virtuelles des charpentes de pommier en architecture "Centrifuge" (gauche) et "Axe Structuré" (droite)

Les travaux sur le lien entre la conduite architecturale et le microclimat de la couronne ont conduit les chercheurs à s'interroger sur les relations conduite/bioagresseurs. En effet, dans le cas des insectes ravageurs du pommier par exemple, l'habitat est sélectionné par l'insecte en fonction de conditions de température et de densité foliaire bien spécifiques. Ainsi, un contrôle de l'architecture, assurant une modification évidente de la densité foliaire et de la température par action sur l'interception de lumière du couvert, peut limiter la colonisation d'un arbre par les nuisibles (Simon *et al.*, 2007).

De la même manière, le développement de certains champignons phytopathogènes étant conditionné par la température et l'humectation, une modification du microclimat par action sur la conduite de l'arbre induit un effet sur le développement de la maladie (Holb, 2005).

Cette pratique de taille des arbres – en vue de modifier leur microclimat – entre ainsi dans la démarche de protection intégrée des cultures, qui suppose la combinaison de différents outils préventifs et curatifs pour limiter voire supprimer la pression des ravageurs (Brun *et al.*, 2007). Toutefois, il est question de compromis, entre maximisation du rendement et limitation des infestations d'un maximum de bioagresseurs. Suivant les critères retenus pour définir ce compromis, de nombreuses études ont conduit à des conclusions divergentes sur le "mode de conduite idéal"

(Osbert, 2011). Dans le cas de la tavelure, les travaux d'Osbert ont posé les bases de la mise en évidence d'un effet architectural sur le développement de la maladie. Les bases microclimatiques de cet effet restent à préciser, notamment l'impact éventuel de l'éclairement sur d'autres variables microclimatiques déterminant le développement de la maladie.

II.1.c.ii) Représenter l'architecture des arbres à l'aide de plantes virtuelles

Il est possible de représenter informatiquement l'architecture des arbres. On appelle ces représentations des **plantes virtuelles**, dont l'intérêt est de décrire la réponse d'une plante à son environnement. Celle-ci ne peut s'envisager qu'à trois dimensions. En effet une plante fortement limitée en eau ou en lumière aura par exemple de grandes difficultés à croître, si elle survit seulement à cette privation. Des arbres plantés trop près les uns des autres verront leur croissance altérée. Ces exemples montrent l'importance de la localisation dans l'espace des interactions plante-environnement. L'étude du microclimat d'un arbre (interception de la lumière, du vent, température et humidité au sein du couvert) nécessite donc une représentation dans l'espace de sa structure et de son organisation, notamment la localisation, les dimensions (diamètre, longueur, surface), et l'orientation des éléments végétatifs.

S'il existe des méthodes de construction théorique des arbres, à l'aide d'approches mathématiques comme par exemple les L-systems (Lindenmayer, 1968;Prusinkiewicz *et al.*, 2004), **la digitalisation permet par exemple de reconstruire l'architecture d'un arbre réel sous la forme d'une maquette virtuelle en trois dimensions (3D)**. Cette représentation *in-silico* permet notamment de calculer des paramètres liés à l'architecture (éclairement, porosité), mais aussi d'effectuer des expérimentations virtuelles sur l'architecture d'un arbre sans attendre le développement végétatif réel de l'arbre.

Méthodes de digitalisation existantes

Plusieurs méthodes ont été développées au PIAF pour acquérir la structure 3D d'une plante : la **digitalisation de contact**, la **digitalisation photographique**, et le **scanner laser**.

i) Digitalisation de contact

Cette technique consiste à installer un champ électromagnétique autour de la plante à digitaliser. La définition d'un repère géométrique à 3 dimensions dans ce champ permet de "pointer" des points dans l'espace, qui seront intégrés dans une maquette virtuelle de la plante (Figure B.4).

Cette méthode présente l'avantage de décrire la topologie de la plante et d'hiérarchiser les organes, il est ainsi possible de différencier les organes entre eux et de les considérer de manière discrète. Elle est en règle générale non destructive (hormis pour les espèces buissonnantes et très denses ou pour la description des systèmes racinaires) mais la durée de digitalisation est très contraignante, chaque organe devant être digitalisé individuellement. Il s'agit de la seule technique de digitalisation permettant d'acquérir la structure d'un arbre au verger de manière satisfaisante.

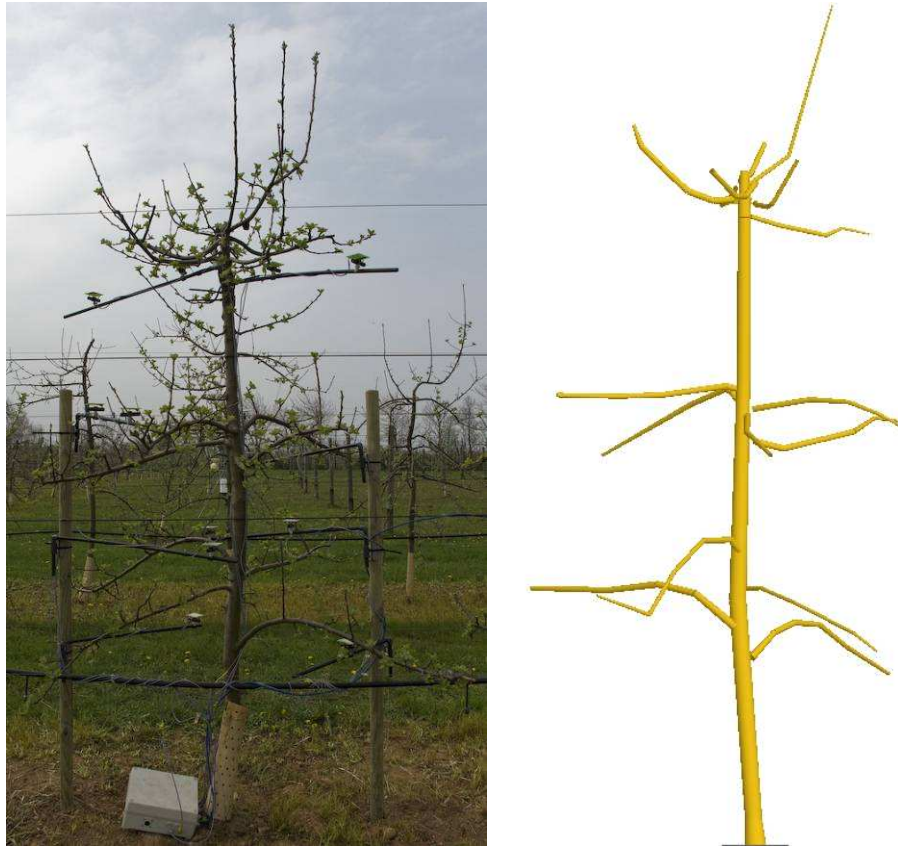


Figure B.4 – Pommier digitalisé au verger (gauche) et représentation virtuelle de sa charpente après digitalisation (droite)

ii) Digitalisation photographique

Cette technique consiste à retrouver à partir d'un ensemble de photographies la structure 3D d'une plante (Phattaralerphong & Sinoquet, 2005). Cette méthode nécessite un grand nombre de photographies pour obtenir une représentation fidèle de la structure, et l'intérieur de la couronne ne pourra être finement représenté (Figure B.5). De plus, cette méthode nécessite de placer un fond de couleur et luminosité uniforme derrière la plante, ce qui la rend particulièrement complexe dans un verger.

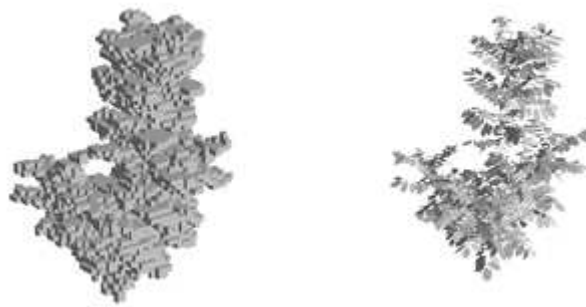


Figure B.5 – Représentation d'un jeune noyer digitalisé par méthode photographique (gauche) et par digitalisation de contact (droite), in (Phattaralerphong & Sinoquet, 2005)

iii) Scanner Laser 3D

Cette technique repose sur le principe de la localisation dans l'espace par visée laser (Chambelland *et al.*, 2007; Hanan *et al.*, 2004). Elle présente dans l'état actuel des problèmes de parasitage de points dans l'espace, et ne permet pas de décrire la topologie de la plante.

II.2. La Maladie de la Tavelure

Maladie du pommier la plus répandue (et par conséquent la plus traitée) au monde, la tavelure est un problème majeur des arboriculteurs. Elle agit principalement sur la qualité du fruit infecté, rendant la pomme impropre à la commercialisation en fruit de table. La maladie agit également sur la taille du fruit, qui sera réduite en cas de forte infection. Elle peut même causer une chute prématurée des fruits et des feuilles, ainsi qu'un faible développement de rosettes à la saison suivante. De nombreuses variétés très répandues, comme par exemple Royal Gala et Golden Delicious, sont particulièrement sensibles à la tavelure (Giraud, 2010).

Un arbre atteint par la tavelure se remarque par des taches d'une couleur brun olivâtre sur les feuilles et les jeunes pousses, puis plus tard sur les fruits (Figure B.6 & Figure B.7).

Le succès de la maladie repose sur la coïncidence entre la maturation des spores vectrices de la maladie et la période où le pommier est sensible aux infections (au stade phénologique C₃).

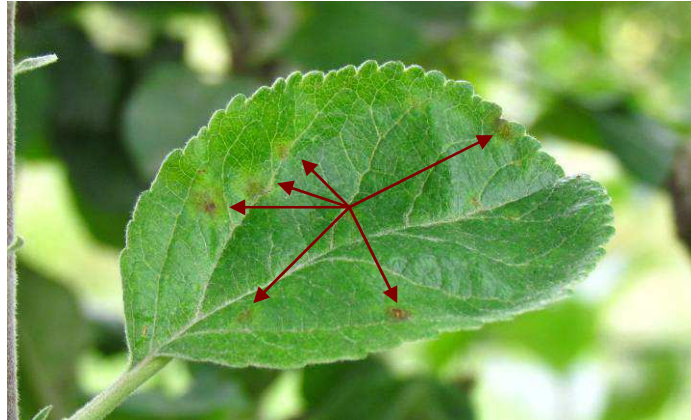


Figure B.6 - Taches de tavelure sur une feuille de pommier Jubilé



Figure B.7 - Taches de tavelure sur une jeune pomme Jubilé

La tavelure du pommier est répandue dans le monde entier, mais sa nuisibilité est plus élevée dans les régions où le printemps et l'été sont frais et humides (Bowen *et al.*, 2011; MacHardy, 1996).

Les traitements contre la tavelure sont coûteux : au Royaume-Uni par exemple, un traitement fongicide revient en moyenne à £300 (environ 500€ en 2011) par hectare, pour une moyenne annuelle de 13 traitements fongicides par pomiculteur (Barbara *et al.*, 2008)

II.3. Le Pathogène, *Venturia inaequalis* (Cooke) Winter.

II.3.a. Cycles et processus d'infection (Figure B.13)

La tavelure est causée par le champignon pathogène *Venturia inaequalis* qui affecte les membres du genre *Malus* (famille des *Rosaceae*, sous-famille des *Maloideae*), à savoir les pommiers, qu'il s'agisse de cultivars (pommiers domestiques) ou de pommiers sauvages (Tableau B.2).

Domaine	<i>Eukaryota</i>
Sous-domaine	<i>Opisthokonta</i>
Règne	<i>Fungi</i>
Embranchement	<i>Ascomycotina</i>
Sous-embranchement	<i>Pezizomycotina</i>
Classe	<i>Loculoascomycetes</i>
Ordre	<i>Pleosporales</i>
Famille	<i>Venturiaceae</i>
Genre	<i>Venturia</i>
Espèce	<i>Venturia inaequalis</i>

Tableau B.2 – Taxonomie de *Venturia inaequalis*

Le cycle biologique du champignon comporte une phase sexuée (forme "parfaite" aussi appelée *téléomorphe*) saprophytique (se nourrissant de matière organique non-vivante dont il induit la minéralisation), et une phase asexuée (forme "imparfaite" aussi appelée *anamorphe*) parasitaire (se nourrissant et se développant en tirant profit d'un organisme hôte vivant).

Forme sexuée : *Venturia inaequalis*. Dans cette forme les pseudothèces (Figure B.8 & Figure B.9) forment à la surface des organes infectés des lésions à croissance amphigène, contenant des asques cylindriques (Figure B.10) qui contiennent 8 ascospores (Figure B.11).

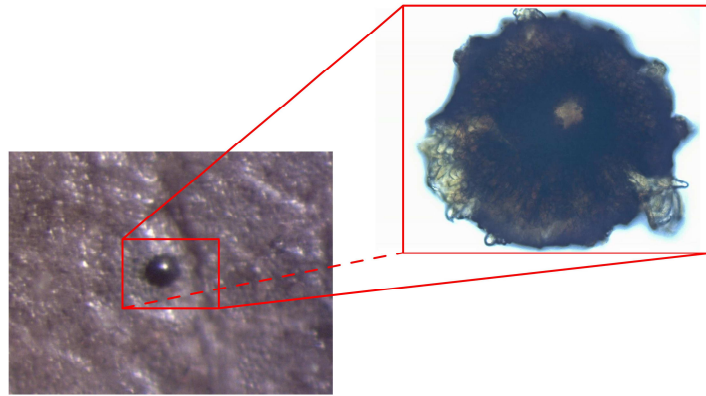


Figure B.8 - Pseudothèce sur une feuille de pommier, observée à la loupe binoculaire (gauche) et au microscope (droite)

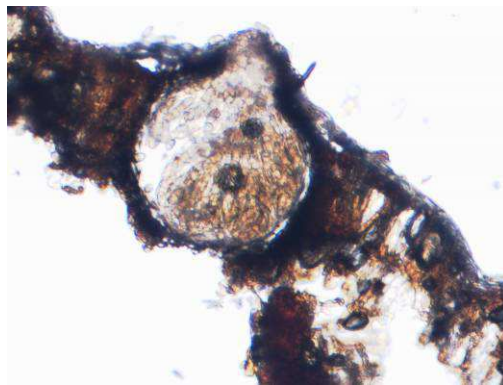


Figure B.9 - Coupe de pseudothèce mûr observée au microscope

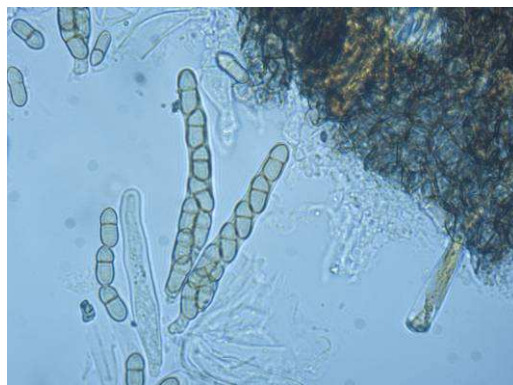


Figure B.10 - Asques cylindriques contenant chacune 8 ascospores observées au microscope



Figure B.11 - Ascospores éjectées de leur asque observées au microscope

Forme asexuée : il s'agit de l'anamorphe de *Venturia inaequalis*, appelé *Spilocaea pomi* Fr. Dans cette forme, le stroma du champignon, sous-cuticulaire, forme des conidiophore qui, produisent des conidies après avoir percé la cuticule (Figure B.12).



Figure B.12 - Conidies (cônes regroupés au centre) observées au microscope

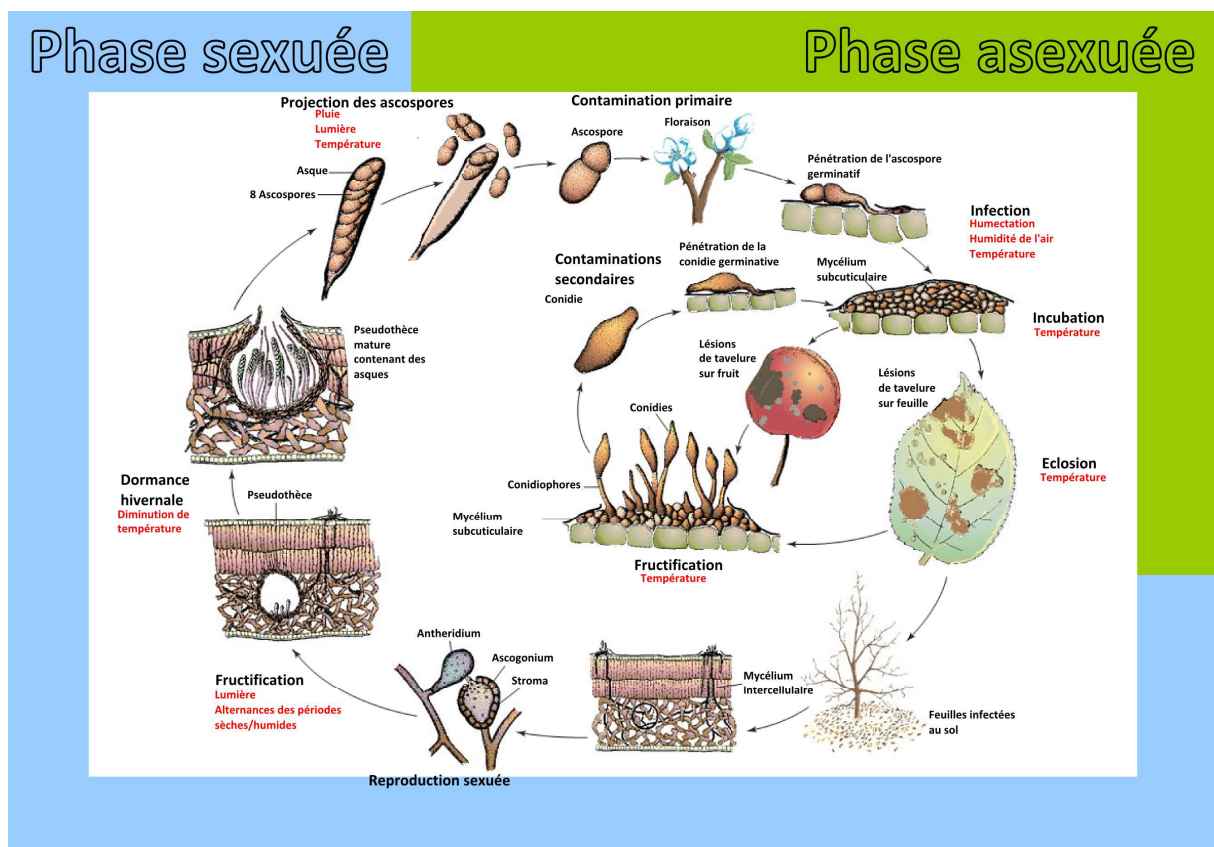


Figure B.13 - Cycle de la tavelure et facteurs climatiques entrant en jeu dans les processus (d'après Agrios, 2005 et Osbert, 2011)

C'est un champignon hémibiotrophe (*i.e.* infectant les tissus vivants d'un organisme et poursuivant son développement sur les tissus morts) dont le mycélium se développe exclusivement entre la cuticule et les cellules de l'épiderme de la feuille ou du fruit (Figure B.13 & Figure B.14)

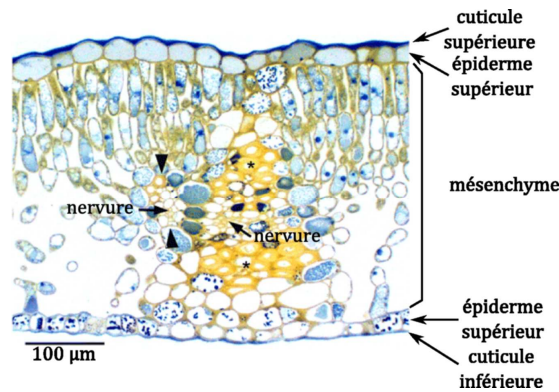


Figure B.14 – Coupe transversale d'une feuille de pommier – d'après (Reidel *et al.*, 2009)

II.3.a.i) Infection primaire

Le pathogène passe l'hiver au sol sur les feuilles mortes lors de la saison précédente, sous la forme de pseudothèces immatures qui entrent en dormance hivernale.

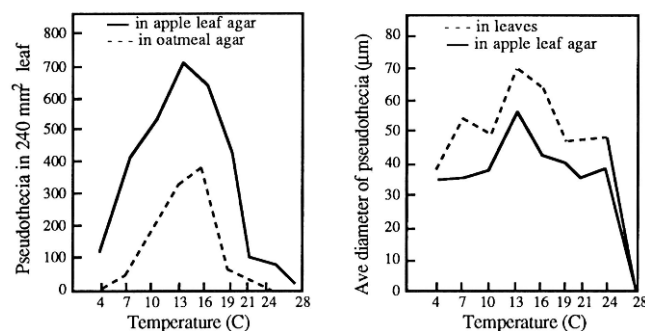


Figure B.15 - Relation entre la température de l'air et la croissance des pseudothèces de *Venturia inaequalis* (gauche : nombre de pseudothèces comptées sur une surface de 240mm²; droite : diamètre moyen des pseudothèces) sur gel d'agarose (pointillé) et feuille de pommier (trait plein) – in (MacHardy, 1996)

Au printemps, la température ambiante augmente et les pseudothèces achèvent leur croissance (Figure B.15). La température, modulée par le climat qui alterne à cette période entre périodes sèches et humides, est propice au développement de l'hôte (Figure B.16). Les ascospores arrivent à maturation parallèlement à celui-ci, de sorte qu'au moment où les pousses fruitières débourrent, les ascospores sont mûres.

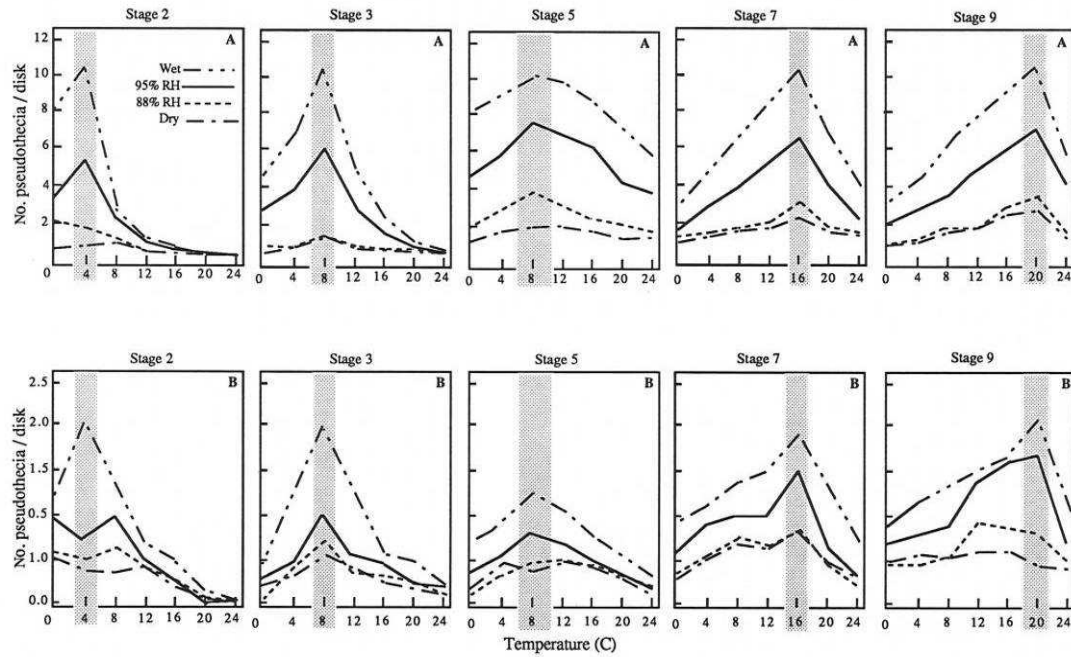


Figure B.16 - Effets couplés de température et d'humidité relative (mouillé, 95%, 88%, sec) sur le développement des pseudothèces après une inoculation de 7 jours au stade 2 (initiation des pseudothèces), stade 3 (formation ascogoniale), stade 5 (dormance), stade 7 (asques à moitié mûres), et stade 9 (formation des ascospores) – in (MacHardy, 1996)

Sporulation

L'humidité agit sur les pseudothèces en les faisant gonfler jusqu'à la libération des asques : la pression hydrostatique à l'intérieur des asques est alors suffisamment forte pour éjecter les ascospores matures. L'humectation nécessaire est conséquente, et il faut un cumul de pluie d'un minimum de 0.2mm.h^{-1} pour gonfler suffisamment les pseudothèces. Cependant, l'intensité de rayonnement lumineux est également nécessaire à la stimulation de la libération d'ascospores, 95 à 99 % de celles-ci sont libérées entre 7h et 18h (le restant quasiment entièrement libéré entre 5h et 7h et entre 18h et 20h) avec un maximum d'éjection variable en fonction de la région (MacHardy, 1996; Osbert, 2011) (Figure B.17). La maturation des ascospores coïncide avec le stade phénologique C3 du pommier, qui est le stade où les organes sont le plus sensibles.

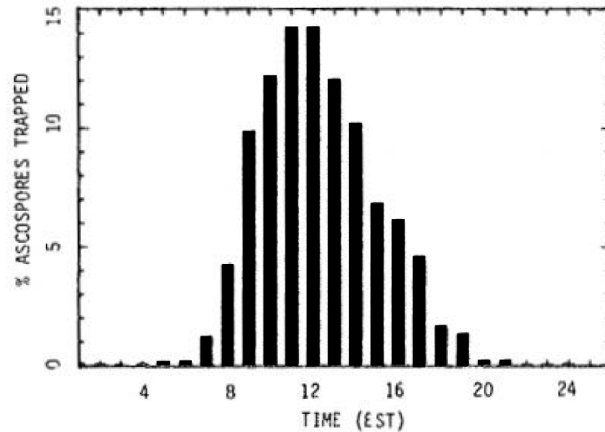


Figure B.17 – Moyenne sur 4 années de mesures du pourcentage d'ascospores capturées par heure de la journée (précision : 1h) – in (MacHardy & Gadoury, 1986)

Dissémination

La dissémination des ascospores se fait alors par dispersion éolienne et par phénomène d'éclaboussement (on emploie souvent le terme anglais pour caractériser l'éclaboussement : *splashing*) (MacHard, 1996).

Infection

Les ascospores déposées sur les organes vont alors attendre d'être dans de l'eau liquide à une température comprise entre 2 et 26°C pour entrer en phase de germination (Figure B.18). En fonction de la température, les conditions d'humectation requises seront variables. Par exemple, à 6°C, l'infection ne pourra avoir lieu qu'après 28h d'humectation continue, à 10°C il ne faudra plus que 14h, entre 18 et 24°C, 9h, et 12h à 26°C.

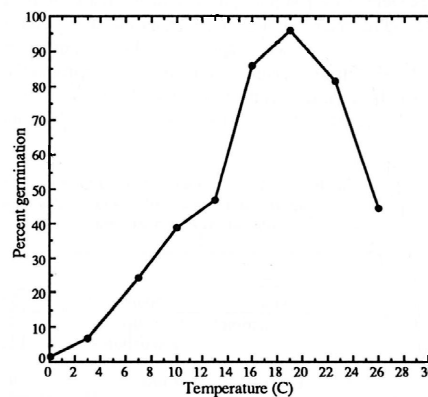


Figure B.18 - Relation entre température et taux de germination des ascospores - d'après (MacHardy, 1996)

II.3.a.ii) Infection secondaire

Sporulation

Le succès de la germination et de l'infection entraîne des lésions à la surface de la feuille sur lesquelles vont se développer des conidiophores qui vont produire dans une limite de 18 jours (au-delà de cette période, les conidies ne sont plus viables), si les conditions de lumière, de température et d'humidité le permettent, des conidies. En effet, sous 60% d'humidité relative, aucune conidie n'est produite. L'humidité optimale de sporulation des conidiophores est ainsi de 90%. S'ajoute à cela un effet de température (non couplé à l'humidité). Le minimum, le maximum et l'optimum de température pour la sporulation sont respectivement 4°C, 26 à 28°C et 16 à 20°C. La lumière n'influence pas la sporulation de manière significative, mais une privation de lumière prolongée a montré une réduction de sporulation de l'ordre de 33% (MacHardy, 1996).

Dissémination

Le vent seul est peu efficace dans la dissémination des conidies produites, mais une pluie est très efficace en termes d'infection. En effet, les gouttes d'eau rebondissent (on parle de phénomène de *splashing*) et ruissellent des feuilles infectées vers les feuilles saines, et la présence d'eau est comme nous l'avons vu très favorable au développement du pathogène. Un couplage du vent et de la pluie favorise alors une dissémination entre les arbres du verger (MacHardy, 1996).

Infection

Le succès de l'infection par les conidies dépend des conditions similaires à celui des ascospores primaires, à la différence qu'une fois germées, les conidies ont une durée de vie bien plus faible et ne survivent que très difficilement à un milieu sec. En effet, à une température comprise entre 10 et 25°C, une humectation d'une durée minimum de 15 minutes suffit à lancer le processus de germination du tube des conidies. Mais si la surface est sèche et n'est pas de nouveau humectée pendant au moins 1h, l'infection est retardée et limitée de manière significative (Schwabe *et al.*, 1984).

L'incubation et la croissance sont alors fonction de la température (Figure B.19 & Figure B.20), de l'humidité relative (Figure B.21), et de la durée d'humectation.

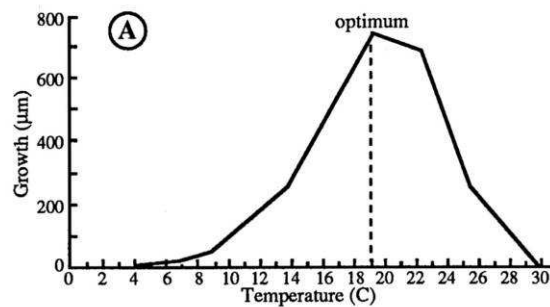


Figure B.19 – Relation entre température d'incubation et croissance des lésions de tavelure sur la face supérieure de feuilles de pommier après inoculation par conidies – in (MacHardy, 1996)

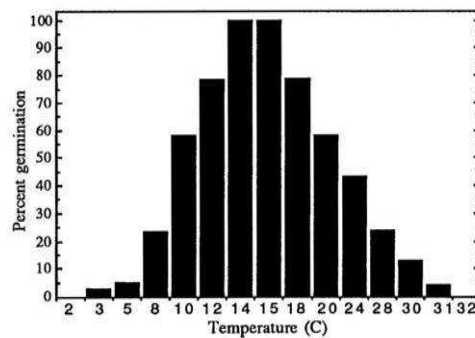


Figure B.20 - Relation entre température et germination des conidies – in (MacHardy, 1996)

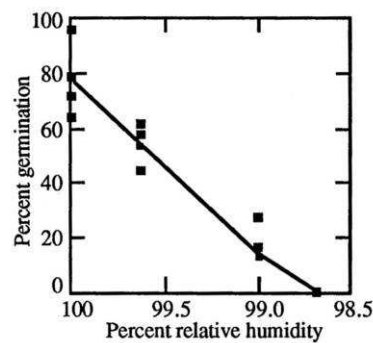


Figure B.21 - Relation entre humidité relative et germination des conidies après une incubation de 24h à 20°C – in (MacHardy, 1996)

II.3.b. Résistance génétique à la tavelure

Un gène de résistance à la tavelure, le gène *Vf* – ou *Riv6* suivant la nouvelle nomenclature (Bus et al., 2011) – a été identifié dès les années 1950 (Bénaouf & Parisi, 2000). C'est le gène de résistance le plus étudié et utilisé chez le pommier (Xu & Korban, 2002). Si des

améliorations notoires ont pu être apportées au niveau de la résistance grâce aux programmes d'amélioration variétale (comme par exemple la pomme Ariane développée par l'INRA), ces variétés résistantes ne constituent pas à elles seules une méthode de lutte durable. En effet, la résistance apportée par ce gène a été rapidement contournée par des souches virulentes de *Venturia inaequalis*. (Didelot *et al.*, 2009; Parisi *et al.*, 2004; Roche *et al.*, 2004)

II.3.c. Résistance ontogénique du pommier à la tavelure

C'est au stade C₃ – qui correspond à la sortie des feuilles (Figure B.2) – que les pousses sont le plus sensibles à la tavelure. Si la sporulation du pathogène coïncide avec cette période, l'infection est maximale (MacHardy pp. 107-110).

Les feuilles développent une résistance ontogénique (*i.e.* liée à l'âge) à la tavelure : plus la feuille est âgée, plus elle va résister aux infections. (Figure B.22). Cependant, la plante n'hérite pas de cette résistance, et les jeunes feuilles des nouvelles pousses ou des pousses de la saison suivante seront plus sensibles. Il paraît donc utile d'examiner les possibles raisons de cette sensibilité, qui sont probablement liées à la physiologie de la feuille qui évolue au cours du temps, notamment l'épaisseur cuticulaire de la feuille et les **propriétés de surface** qui favorisent ou non une évaporation lente (Jones, 1983).

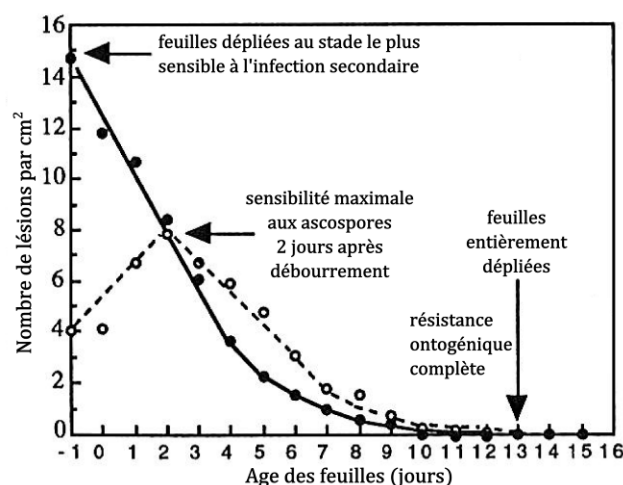


Figure B.22 – Evolution du nombre de lésions dues à la tavelure en fonction de l'âge des feuilles – d'après (MacHardy, 1996)

II.4. La Durée d'Humectation

II.4.a. Lien entre durée d'humectation et infection par *Venturia inaequalis*

Comme nous avons pu voir, le développement du mycélium de *Venturia inaequalis* nécessite la présence d'ascospores dans de l'eau pendant une durée assez longue, autrement dit une durée d'humectation suffisante, pour pénétrer la cuticule et causer l'infection primaire de l'organe (feuille ou fruit). L'infection secondaire repose sur le même principe et les conidies nécessitent une humectation plus longue que les ascospores pour qu'il y ait succès de l'infection. Ce mode d'infection a été mis en évidence dès les années 1920 par les travaux de Keitt & Jones (Keitt, 1927; Keitt & Jones, 1926), qui ont établi qu'une durée minimale d'humectation induisait une infection des organes primaire ou secondaire et que le lien entre durée d'humectation et développement de la maladie est direct et exclusif.

Les recherches se sont en conséquence rapidement tournées vers l'étude de cette durée d'humectation, supposant qu'une bonne estimation de la durée d'humectation permettrait de cibler les périodes propices au développement de la maladie, et ainsi le moment opportun où traiter les arbres (Mills, 1944). Les travaux de Mills dès la fin des années 1930 se sont ainsi portés sur la mise en place de tables déterminant à une température donnée la durée d'humectation nécessaire à l'infection, à partir des mesures de Keitt & Jones. Ces dernières valeurs se sont avérées environ 1.5 fois plus faibles que celles observées par Mills, sans que ces différences soient expliquées pour autant (MacHardy & Gadoury, 1989). La thèse de Lewis en 1943 (Lewis, 1943) a validé ces dernières mesures de Mills lors de nouvelles observations au verger. Ce dernier en a tiré des courbes de risque qui, pour chaque couple des valeurs de température de l'air et de durée d'humectation, établissent un seuil au-dessus duquel un risque d'infection primaire (par ascospores) est présent (Figure B.23). Ces courbes ont été nommées "courbes de Mills" : elles différencient la sévérité du risque d'infection entre léger (*light*), modéré (*moderate*), et grave (*heavy*) (Mills, 1951). Les travaux de Mills montrent en outre qu'à température équivalente, il faut 2/3 des durées d'humectation de ses critères

pour déclencher un risque d'infection secondaire (par conidies). Les nombreuses observations ayant donné lieu à l'établissement de ces courbes en font un outil fiable pour les producteurs, si bien qu'elles demeurent en usage, dans leur forme originale ou dans une forme révisée.

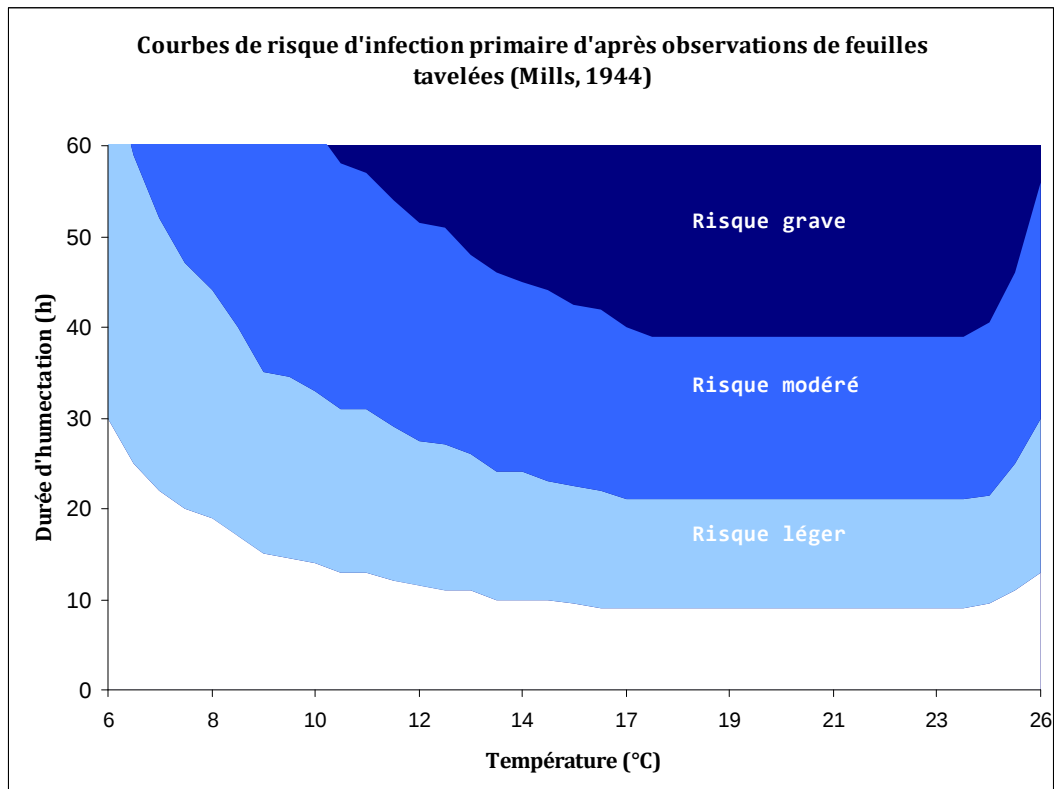


Figure B.23 - Courbe de risque d'infection en fonction de la température et de la durée d'humectation selon les critères de Mills qui déterminent la sévérité du risque

De nombreuses études ont été menées entre les années 1950 et les années 1990 pour valider ou non ces courbes et critères, dans des vergers situés dans différentes régions du monde, ou en laboratoires : Belgique, Angleterre, Italie, Yougoslavie, France, Australie, Suisse, Afrique du Sud.

Parmi toutes ces études, certaines ont montré un certain accord avec les courbes de Mills, mais d'autres ont fait état de différences sur une partie ou la totalité des observations. Certaines se contredisant entre elles (Machardy & Gadoury, 1989), elles révèlent notamment une influence géographique et variétale, sans publier constamment les données recueillies (Tableau B.3).

	Coïncidence avec les critères de risque de Mills (1951)	Localisation
ETUDES EN VERGER	Accord (sans publication des données)	▪ Belgique ▪ France ▪ Italie
	Accord (avec données publiées généralement en accord)	▪ Angleterre ▪ Australie ▪ Belgique ▪ Yougoslavie
	Désaccord (avec publication de données)	▪ Allemagne ▪ France
ETUDES EN LABORATOIRE	Désaccord (avec publication de données)	▪ Afrique du Sud ▪ Belgique ▪ Italie ▪ USA
	Désaccord avec l'assertion que l'infection des conidies est 1.5 fois plus rapide que celles des ascospores (avec publication de données)	<i>idem</i>
ETUDES SPECIFIQUES	Correction des courbes de Mills pour alimenter les modèles d'alerte de risques	▪ Afrique du Sud ▪ Belgique ▪ France ▪ Suisse
	Relation entre température et durée d'humectation pour évaluer le risque d'infection exprimable sous forme de degrés-jours, et donner un indice d'infection	▪ Afrique du Sud ▪ Allemagne

Tableau B.3 Etudes de la validité des courbes de Mills entre 1951 et 1996 d'après (MacHardy, 1996)

Les travaux de MacHardy & Gadoury en 1989 ont fait une synthèse de ces résultats en utilisant à chaque fois un seuil de durée d'humectation et en gardant une forte "marge de sécurité", à savoir soit la moyenne de l'intervalle de temps donné, soit la durée d'humectation minimum. Ils ont également effectué des mesures de spores et de microclimat au verger.

Ces travaux ont mené à une révision des courbes de risques de Mills donnant un coefficient de corrélation de 0.99 entre les équations proposées et les observations. (Tableau B.4)

TABLE 1. Polynomial equations for curves depicted in Figure 1

Curve	Polynomial equation ^a	R value ^b
Mills/a	$y = 89.3749 - 18.0034x + 1.5703x^2 - 0.062x^3 + (9.198E-04)x^4$	0.99
Mills/c	$y = 58.8899 - 11.7951x + 1.0244x^2 - 0.0403x^3 + (5.969E-04)x^4$	0.99
Lab/a	$y = 71.2009 - 14.881x + 1.3252x^2 - 0.0534x^3 + (8.062E-04)x^4$	0.97
Lab/c	$y = 76.5384 - 17.6803x + 1.7201x^2 - 0.0731x^3 + 0.0011x^4$	0.96
Orchard/a	$y = 122.3869 - 28.7786x + 2.6028x^2 - 0.1019x^3 + 0.0015x^4$	0.98
S. Africa/a	$y = 64.7714 - 13.0094x + 1.2163x^2 - 0.0532x^3 + (8.673E-04)x^4$	1.00
S. Africa/c	$y = 60.3741 - 9.8398x + 0.8325x^2 - 0.0352x^3 + (5.782E-04)x^4$	0.99
Mills/a - 3	$y = 86.3749 - 18.0034x + 1.5703x^2 - 0.062x^3 + (9.198E-04)x^4$	0.99

^a y = minimum hours of leaf wetness required for infection; x = mean temperature during wetting interval.

^b Coefficient of simple correlation that describes the relationship between the model's predicted values and the observed data.

Tableau B.4 - Formules analytiques de différentes pour rendre compte des différentes conditions d'infection - in (MacHardy & Gadoury, 1989)

Les indices /a et /c correspondent respectivement à l'infection primaire (ascospores) et à l'infection secondaire (conidies). Les équations des courbes *Mills* correspondent aux équations retranscrites des courbes originales de Mills, les équations *Lab* sont une combinaison des données publiées de risques mesurées en laboratoire, l'équation *Orchard* correspond à des données publiées de risques observés en verger, et les équations *S. Africa* correspondent aux observations de risque en Afrique du Sud publiées par Schwabe (Schwabe *et al.*, 1984). L'équation *Mills/a-3* est un ajustement de la courbe de risques de Mills relative aux ascospores, prenant en compte la décharge journalière de nouvelles ascospores (mesurée au champ en Angleterre en 1984 (Machardy & Gadoury, 1989)), agissant uniquement sur le terme constant du polynôme.

Le problème qui se présente à qui veut estimer le risque d'infection des pommiers par *Venturia inaequalis* est par conséquent d'observer et/ou d'estimer cette durée d'humectation.

Rappelons avant toute chose que :

$$\text{Durée d'Humectation} = \text{Durée de l'Apport d'Eau} + \text{Durée de}$$

La diversité des facteurs qui conditionnent la durée d'humectation d'une feuille est grande : les variables météorologiques causant une formation de pluie ou de rosée mais également ayant une incidence sur l'évaporation, la structure de la plante ayant un effet sur la distribution de l'eau au sein du couvert, et la mouillabilité de ses feuilles, qui conditionnera la forme que prendront les gouttes d'eau.

II.4.b. Mesure de la durée d'humectation

Il est difficile de mesurer efficacement et de manière automatique la durée d'humectation.

Les premières tentatives furent d'estimer la durée d'humectation à partir de données météorologiques, notamment l'humidité relative : en établissant un seuil au-delà duquel on considérerait qu'il y avait humectation (en général, il est considéré qu'au-delà de 90% d'humidité relative l'eau n'évapore pas). Mais l'incertitude de ces méthodes est très grande, rendant les résultats peu satisfaisants (Crowe *et al.*, 1978; Huber, 1992). Face à ces contraintes, des capteurs ont été imaginés, selon trois méthodes principales : la méthode mécanique, la méthode radiométrique, et la méthode électrique.

II.4.b.i) Capteurs mécaniques

Développés par Bazier dès 1955, les premiers capteurs à humectation mécaniques reposent sur un principe de marquage d'un plateau tournant enduit d'un vernis ne pouvant être marqué qu'en présence d'eau. Ainsi, un crayon en contact avec la surface du plateau ne marque que les périodes où le plateau est mouillé. Les contraintes matérielles liées à cet instrument (lessivage du plateau en cas de forte pluie, rosée non détectée) ont cependant rapidement forcé à l'abandon de ces capteurs, au profit d'humectographes, reposant sur le même principe que les hygromètres à cheveux : une fibre animale (cheveu, crin de cheval) est relié à un stylet. Par action de l'humidité, la

fibre va se contracter ou se détendre, et ainsi marquer une différence d'humectation. L'humectographe de type "Bazier", mis au point en 1954, suit ainsi l'étirement d'un buvard, alors que l'humectographe de type "De Wit" se base sur la contraction du chanvre. Cependant, de tels capteurs sont imparfaits sur le plan de la précision, de la sensibilité aux phénomènes d'humectation, et ne sont pas aisément automatisables (Huber, 1992).

II.4.b.ii) Capteurs radiométriques

Ce type de capteurs utilise des rayonnements radar ou β pour détecter l'eau à la surface des végétaux. Cette méthode permet de discriminer efficacement l'eau issue de pluie et la rosée. Ils ont une précision accrue. Cependant, ces méthodes sont matériellement et techniquement lourdes et une utilisation en verger est compliquée (Huber, 1992).

II.4.b.iii) Capteurs à mesure de résistance électrique

La démocratisation des composants électroniques dans les années 1960 a mené au développement de capteurs de durée d'humectation dits à mesure de résistance électrique. Ces capteurs reposent sur le principe du Pont de Wheatstone, qui consiste à mesurer une résistance variable disposée sur un ensemble de résistances. Lorsque le pont est à l'équilibre, le courant est nul à l'intérieur du pont (Figure B.24). La résistance variable sur le capteur est celle d'un circuit "grille" composé de deux peignes de circuit imprimé en cuivre recouvert d'or (pour favoriser la conduction électrique et éviter l'oxydation des circuits) imbriqués l'un dans l'autre sans se toucher. La résistance du circuit est alors infinie. Lorsqu'une goutte d'eau tombe sur le capteur, celle-ci fait contact entre les deux peignes, et fait ainsi diminuer la résistance du circuit en fermant celui-ci (Figure B.25).

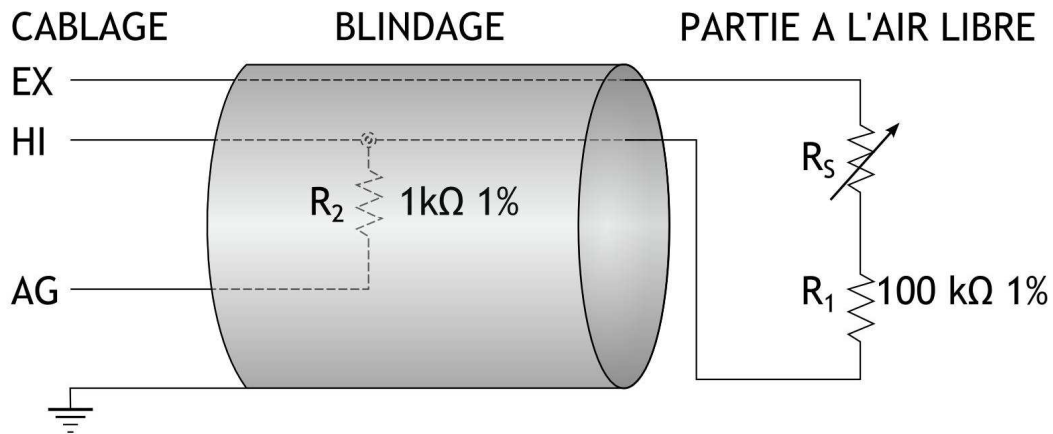


Figure B.24 - Schéma de fonctionnement du demi-pont de Wheatstone des capteurs à mesure de résistance électrique

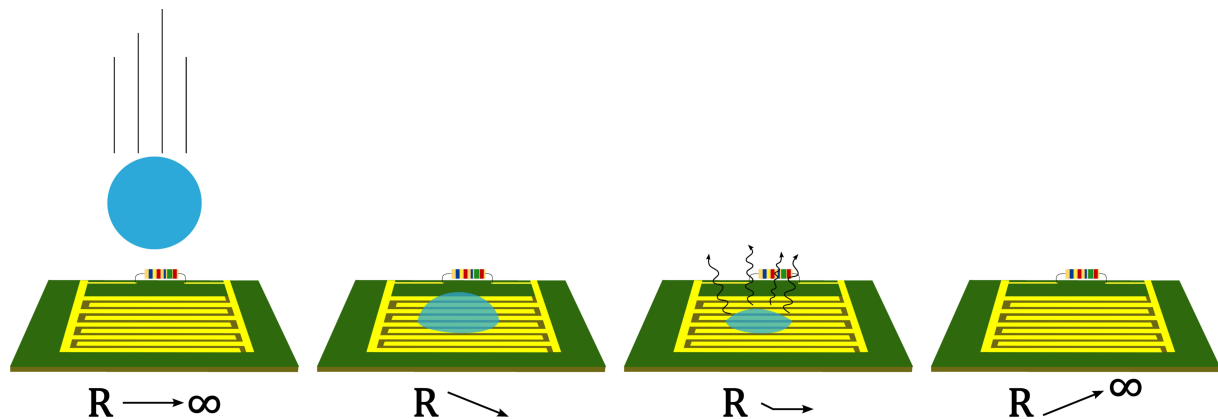


Figure B.25 - Principe de la mesure de l'humectation sur capteur à mesure de résistance électrique

La vitesse d'évaporation de l'eau dépendant fortement des propriétés thermiques du support, il est possible de s'approcher au mieux de celles d'un organe végétal en modifiant le matériau du capteur et les propriétés mouillantes du capteur (Gillespie & Kidd, 1978; Huber & Gillespie, 1992). Il est par exemple recommandé d'appliquer sur le circuit des capteurs à résistance électrique une couche de peinture de latex possédant des propriétés conductrices d'électricité, qui confère au capteur des propriétés thermiques et radiatives proches de celles d'une feuille (Weiss & Hagen, 1983). De plus, Lau a observé visuellement une nucléation de la rosée sur un capteur peint avec du latex très similaire à celle d'une feuille (Lau *et al.*, 2000).

De nombreux capteurs reposent sur ce principe (Figure B.26). Ces capteurs ont été testés et calibrés dans de nombreuses études, en conditions contrôlées et au champ (Miranda *et al.*, 2000; Weiss & Hagen, 1983; Weiss *et al.*, 1988)



Figure B.26 - Capteurs de durée d'humectation à mesure de résistance électrique. a. capteur *Campbell Scientific 237*; b. capteur *Connecting Nature*; c. Capteur *Cimet CE 187A*; d. capteur *Adcon Telemetry A733*.

Le tableau suivant (Tableau B.5), reporté d'après les travaux de synthèse de Huber, présente les différents types de capteurs de durée d'humectation, leurs champs d'applications, ainsi que leurs avantages et inconvénients :

<i>Méthode</i>	<i>Applications</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Allongement de l'élément sensible (humectographie mécanique de type "Bazier")	Systèmes d'avertissement	- Simple d'emploi - Distinction entre pluie et rosée	- Hystérésis - Réglage variable en fonction de l'observateur
Contraction de l'élément sensible (humectographie mécanique de type "DeWitt")	- Epidémiologie - Protection des plantes	- Automatisation aisée - Distinction entre pluie et rosée	- Dérive de la tension à l'état sec - Sensibilité aux humidités élevées
Variation de la résistance électrique directement sur le végétal	- Modélisation de la DH - Peu employé en protection des plantes	- Représentativité à l'échelle de l'organe (feuille, fruit, épi, tige) - Méthode indirecte	- Non commercialisé
Variation de la résistance électrique sur support artificiel	- Protection des plantes - Equipe les stations agroclimatiques	- Adaptation de la forme du capteur à l'organe considéré - Bon marché - Nombreux capteurs commercialisés	- Méthode & mesure indirecte - Représentativité spatiale - Sensibilité aux fortes humidités
Absorption des rayonnements β (méthode de Barthakur)	- Modélisation des durées de rosée et de l'évaporation des gouttes	- Précision - Méthode directe - Méthode de référence	- Coût élevé - Utilisation d'une source de radioactivité β - Sensibilité à la teneur en eau de l'organe

Tableau B.5 - Tableau comparatif des instruments de mesure de durée d'humectation (d'après Huber, 1992)

II.4.c. Utiliser les mesures de durée d'humectation

II.4.c.i) Variabilité spatiale de la durée d'humectation au sein du couvert

L'observation montre que la durée d'humectation au sein d'un couvert dépend fortement non seulement des conditions climatiques, mais également de l'âge de la plante, de la morphologie des feuilles et de leurs positions spécifiques dans le couvert (Sutton *et al.*, 1984).

Une mesure de la durée d'humectation à l'air libre, au ras du sol, et en zone dégagée, donne des résultats équivalents à une mesure au sommet d'un couvert (Figure B.27) (Sentelhas *et al.*, 2004). Cependant, cette corrélation est effectuée à l'air libre et ne rend donc pas compte du microclimat au sein d'une couronne.

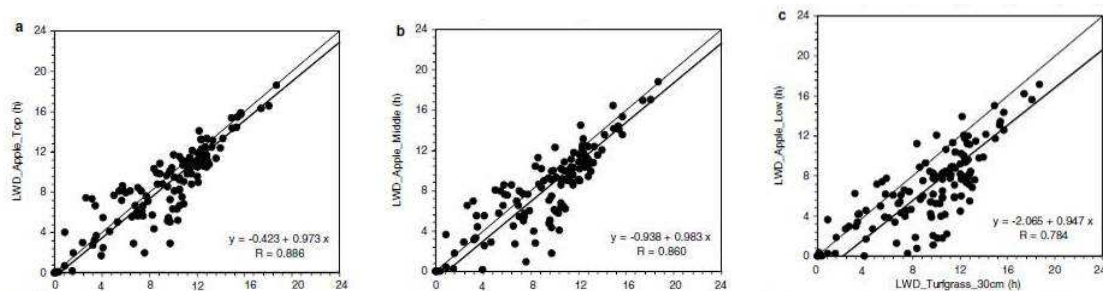


Figure B.27 - Relations entre la durée d'humectation mesurée au niveau du sol, et celle mesurée a) au sommet du couvert; b) à mi hauteur; c) au bas de l'arbre

Une grande partie des études effectuées à l'aide de capteurs de durée d'humectation cherche toutefois à évaluer la variabilité spatiale de la durée d'humectation au sein de la couronne.

Les travaux de Sentelhas sur la variabilité spatiale de la durée d'humectation dans diverses espèces (dont le pommier) ont par exemple vérifié que dans une plantation "adulte", le haut du feuillage est le premier à être humecté, qu'il s'agisse de pluie ou de rosée. On attribue cette particularité au fait que le sommet du feuillage est à l'air libre. La durée d'humectation à mi hauteur de la couronne est proche de celle mesurée à son sommet. En revanche, les parties basses de l'arbre ont une durée d'évaporation plus courte (Tableau B.6) (Sentelhas *et al.*, 2005).

Evènements	Haut	Milieu	Bas
Pluie + Rosée	8.67	8.25	6.78
Rosée seulement	8.32	7.79	6.14
Pluie seulement	9.55	9.38	8.39

Tableau B.6 – Durée d'Humectation (heure) moyenne à 3 hauteurs dans un pommier (Haut = 3.3m; Milieu = 2.1m; Bas = 1.1m) mesurée par Sentelhas (Sentelhas et al 2005)

Penrose et Nicol ont quant à eux disposé des hygromètres, des thermomètres et 28 capteurs de durée d'humectation répartis sur quatre pommiers, chaque capteur ayant une inclinaison et une orientation spatiale propres, de sorte à représenter des feuilles (Penrose & Nicol, 1996). Ces mesures ont confirmé que les conditions propices aux infections par *Venturia inaequalis* ne sont pas homogènes au sein d'un couvert, ce qui explique que les organes ne sont pas tous infectés au même moment.

Une étude globale de la durée d'humectation dans une forêt en milieu tropical, alternant des épisodes extrêmes de sécheresse et d'humidité (Dietz *et al.*, 2007), a mis en évidence un gradient spatial d'humectation lors des épisodes de rosée : si l'humectation est homogène en fin de journée, au cours de 90% des nuits de mesure le sommet du feuillage est humecté alors que l'intérieur du couvert reste sec.

Cette prédominance de l'humectation par la rosée sur le feuillage extérieur des arbres a été confirmée par des mesures sur pommier (Batzner *et al.*, 2008). Dans ce travail, Batzner et Gleason ont disposé 9 capteurs de durée d'humectation à différentes altitudes dans la couronne (1.2m, 2.5m et 3.5m), tous orientés de la même manière (face au nord, inclinés à 45°). Ils ont observé que chaque jour de mesure, le capteur du bas le plus à l'ouest était le plus sec, en dehors des jours de pluie, où tous les capteurs sont humectés, mais pas de la même manière (Figure B.28).

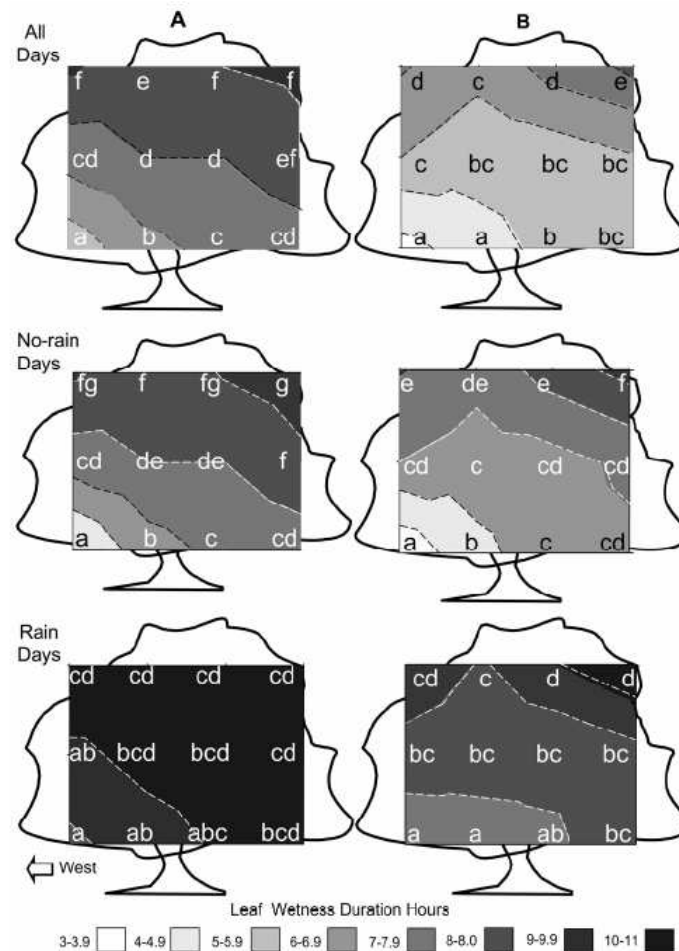


Figure B.28 - Mesure des zones homogènes en durée d'humectation au sein d'une couronne d'arbre pour tous les jours de mesure (haut); les jours secs (milieu); les jours de pluie (bas) – in (Batzer *et al.*, 2008)

Les résultats de ces études ne sont cependant pas entièrement satisfaisants. En effet, il semble évident que les variables microclimatiques et radiatives de l'environnement direct de chaque capteur a une importance particulière, notamment dans le cas de la rosée. Or, si l'orientation et la hauteur des capteurs met en évidence un gradient, ces études ne tiennent pas compte du microclimat et de l'éclairement des zones étudiées.

Les capteurs de durée d'humectation ont également pu servir à déterminer – en plus de la variabilité spatiale de l'humectation et son impact sur la tavelure comme nous avons pu voir – quel évènement d'humectation – pluie ou rosée – est le plus propice à une infection des organes de l'arbre.

Une étude sur le soja a tenté d'évaluer qui de la pluie ou de la rosée était la plus favorable aux infections par des pathogènes fongiques (*Phakopsora pachyrhizi* sur le soja) (Schmitz & Grant, 2009). Ce travail rapporte plusieurs observations :

- (i) L'eau de rosée accumulée au cours d'une nuit est faible (de l'ordre de 0.4 mm) en comparaison de celle d'une pluie, mais son rôle est loin d'être négligeable dans les processus d'infection.
- (ii) Au cours de l'étude, tous les capteurs finissaient par être humectés au cours d'une pluie, alors qu'ils n'étaient jamais tous humectés en même temps lors d'un épisode de rosée.
- (iii) Au vu des conditions d'infection du pathogène étudié les épisodes les plus susceptibles de causer une infection primaire (en atteignant une durée d'humectation de 6h au minimum) sont ceux de pluie, car si ceux de rosée sont plus fréquents, la durée d'humectation est en général insuffisante.

Ce travail conclut que l'utilisation d'un modèle moyen ou les données de seulement peu de capteurs de durée d'humectation, n'est pas valide dans le sens où ces données/estimations ne rendent pas compte d'un état moyen d'humectation mais de données ponctuelles. Ainsi, un modèle moyen de type "grande feuille" (on désigne ainsi un modèle assimilant la plante entière à une unique feuille) est porteur d'erreur trop importante.

II.4.c.ii) Modéliser la durée d'humectation / Prévoir les risques d'épidémie

La prévision d'un événement suppose qu'on le comprenne le mieux possible. Ainsi, les critères de Mills et Laplante (1951) et leurs corrections reposent sur des tentatives de compréhension de l'interaction entre *Venturia inaequalis* et son environnement, en l'occurrence la température et la durée d'humectation.

Les modèles de durée d'humectation sont très peu utilisés en agriculture, notamment parce qu'ils ne répondent en général pas aux critères requis pour l'utilisation large d'un modèle, à savoir : la simplicité, la facilité d'utilisation, l'extrapolation des données, la facilité d'observation des grandeurs, l'adaptabilité à différents lieux et systèmes de culture, et la calibration à l'aide de mesures en conditions contrôlées (Magarey *et al.*, 2005b).

De nombreux travaux cherchent toutefois à établir des modèles de prévision des risques de maladie. Par exemple, le modèle RIMPro (RIM = Relative Infection Measure) (RIMpro (Bio Fruit Advies), 2011) exploite des données météorologiques (température, humidité relative, niveau de précipitations et durée d'humectation) et estime (à l'aide de courbes de Mills adaptées à différentes zones climatiques) les risques d'infection en fonction de la charge potentielle de pathogène. Il propose en conséquence aux agriculteurs des dates de traitements fongicides optimisés.

Hormis le modèle SWEB (pour Surface Wetness Energy Balance, soit Bilan d'Energie de Durée d'Humectation) de Magarey, les modèles de prévision de risque de maladies dont le développement est conditionné par la durée d'humectation ne sont pas basés sur des bilans d'énergie de la quantité d'eau présente sur les organes. En revanche, beaucoup de modèles reposent sur une détermination statistique des risques, suivant des critères empiriques, à l'image des modèles CART et SLD (Kim *et al.*, 2002). Mais la complexité des phénomènes climatiques entrant en jeu dans le déroulement d'une durée d'humectation, tant au niveau de l'apport d'eau que de la durée d'évaporation, limitent très fortement la portabilité de ces modèles, tant au niveau des changements climatiques que des changements géographiques (Kim *et al.*, 2010).

Sur le plan biologique, la plupart de ces modèles estiment les risques d'infection en fonction de degrés-jours, et sont ainsi utilisés principalement pour prévoir le début et la fin de l'éjection des ascospores, sans tenir compte de la quantité d'inoculum présent au verger. La perspective de quantifier la concentration d'ascospores dans un couvert a conduit à un perfectionnement et une miniaturisation des instruments de détection, permettant d'estimer plus finement la distribution des ascospores au sein du couvert. Les travaux de Carisse ont montré que lorsque le nombre d'ascospores éjectées est important, leur concentration dans les gouttes de pluie et leur dépôt sur les feuilles est hétérogène au sein du couvert : les ascospores sont moins concentrées dans la zone supérieure du couvert (Figure B.29), la concentration est plus élevée au centre du couvert que sur les parties périphériques, notamment sur la partie orientée à l'ouest. L'hétérogénéité spatiale de la concentration d'inoculum apparaît comme un paramètre essentiel à la prévision des risques d'infection (Carisse *et al.*, 2007).

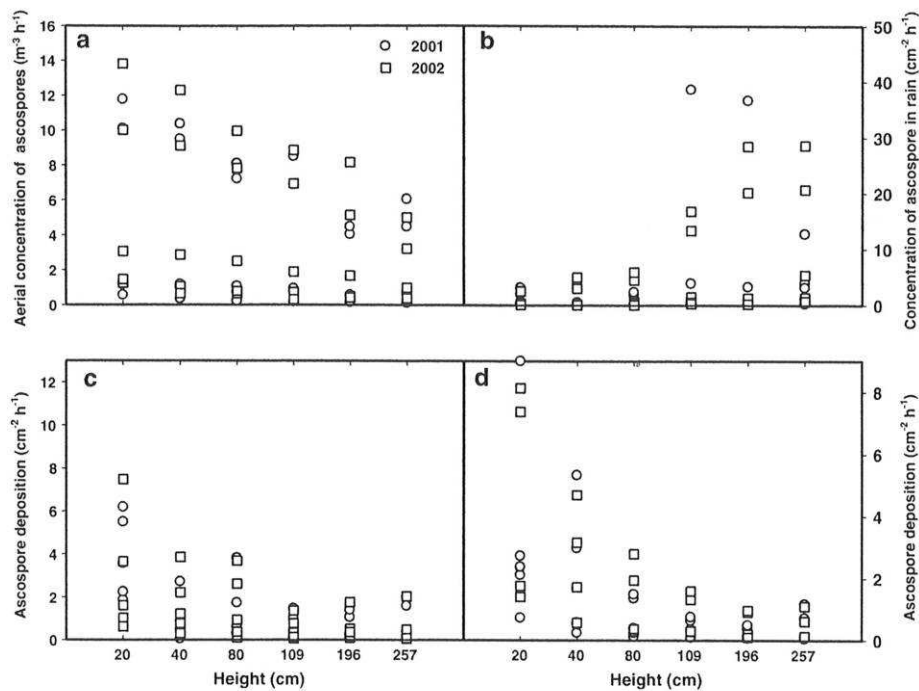


Figure B.29 - Relation entre hauteur du couvert et a) concentration aérienne d'ascospores; b) concentration d'ascospores dans l'eau de pluie; c) et d) ascospores déposées sur la face supérieure (c) et inférieure (d) d'une lame graissée - in (Carisse, 2007)

Mais l'hétérogénéité spatiale, nous l'avons vu, concerne également la durée d'humectation. Or, cette dernière n'est pas ou insuffisamment prise en compte dans les modèles actuels. Il s'agit en règle générale de modèles de type "grande feuille" (*big leaf* en anglais) : on assimile le comportement d'un arbre entier à celui d'une feuille (Magarey *et al.*, 2005b), ou de modèles multicouches : on considère plusieurs couches horizontales représentant diverses hauteurs dans le couvert (Huber, 1988). Ces modèles ne rendent pas compte de la variabilité microclimatique au sein du couvert, ce qui explique leurs limites de précision.

II.4.c.iii) Données d'entrée des modèles et validation

Pour effectuer une estimation, un modèle nécessite des données d'entrée, qui serviront de support à ses calculs.

Un modèle de durée d'humectation, qu'il repose sur des lois fondamentales ou sur des critères empiriques, nécessite en entrée des données relatives au climat.

Ainsi, la **température**, l'**humidité relative**, la **vitesse du vent**, la quantité de **rayonnement** reçu et émis, la **pluviométrie** sont des variables d'entrée majoritairement requises pour estimer la durée d'humectation.

Les modèles de prévision de risque estiment la **durée d'humectation** (par exemple le modèle SWEB) ou la considèrent comme une variable d'entrée (par exemple le modèle RIMPro).

Ainsi **la précision des données apportées au modèle est primordiale pour garantir des simulations pertinentes.**

Mais les données d'entrée servent également à **valider les modèles**. En effet, lorsqu'un modèle est développé, celui-ci nécessite en "fin de parcours" une vérification de ses estimations pour déterminer s'il rend compte de situations réelles de manière satisfaisante, et l'erreur éventuelle commise entre ses simulations et la réalité observée. La validation s'effectue de deux manières possibles : la validation d'un modèle mathématique (empirique), et celle d'un modèle physique (Janas *et al.*, 2010).

Dans le premier cas il est nécessaire de passer par des observations à priori du développement du modèle, celui-ci sera en effet paramétré à partir de données expérimentales. La validation sera alors effectuée à partir d'un autre jeu d'observations pour vérifier que le modèle est capable de restituer différentes conditions (Figure B.30)

Un modèle physique quant à lui sera développé à partir de relations fondamentales et les données d'observation interviendront uniquement lors de la validation, pour s'assurer que les équations rendent bien compte de la réalité (Figure B.31).

Ainsi les stations météorologiques, les capteurs de durée d'humectation, les mesures de distribution de pathogènes et les notations visuelles de tavelure, sont autant d'outils de validation des modèles de prévision de risques d'infection par les maladies fongiques, de l'apport d'eau à l'infection elle-même.

Si les études de comparaison entre observation et modélisation sont rarement entièrement satisfaisantes (Dalla Marta *et al.*, 2007; Dalla Marta *et al.*, 2005; Magarey *et al.*, 2006; Sentelhas *et al.*, 2008; Wichink Kruit *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 1999; Wittich, 1995), Kim, 2002) elles permettent **d'estimer précisément les erreurs commises**, et indiquent les pistes à explorer dans le but d'améliorer la modélisation.

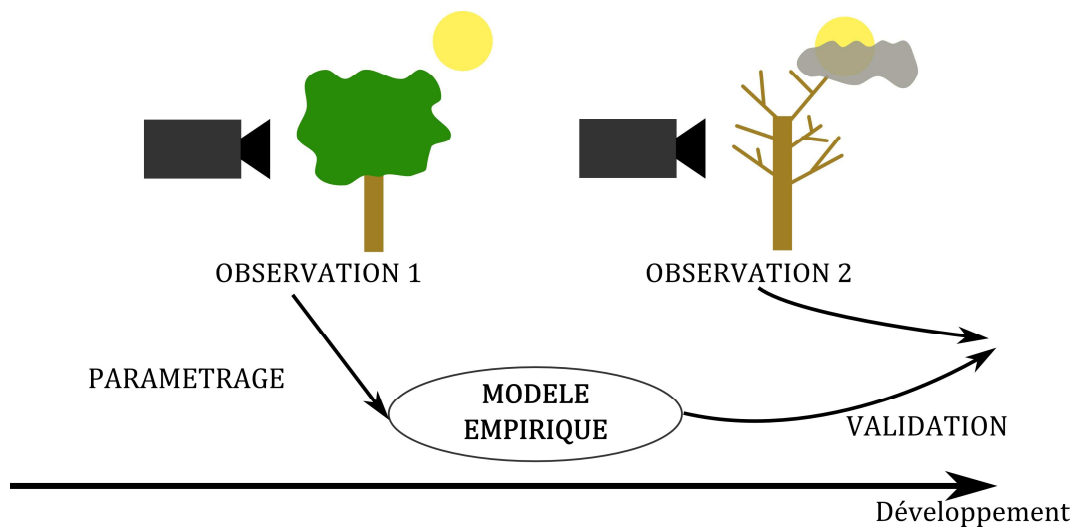


Figure B.30 – Illustration du principe de développement d'un modèle mathématique

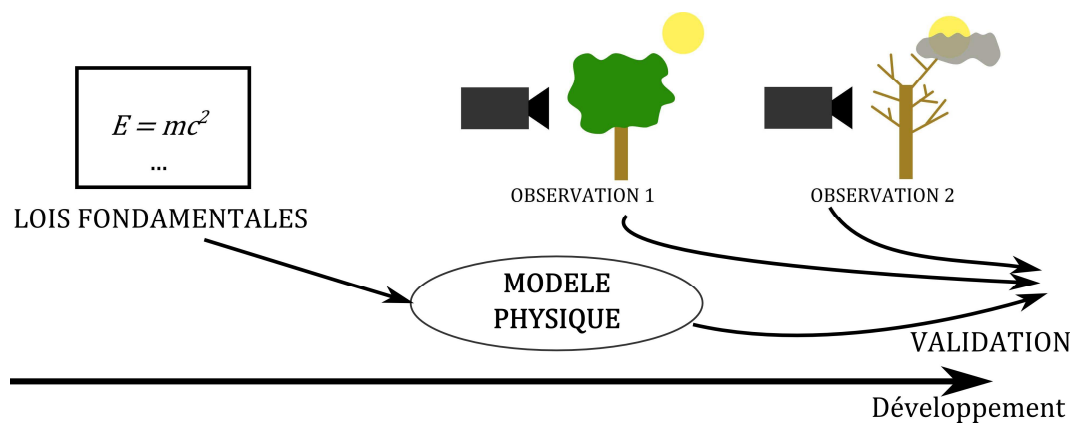


Figure B.31 – Illustration du principe de développement d'un modèle physique

Chapitre I

Modélisation de l'évaporation à l'échelle de la goutte (partie 1)

Introduction

La nécessité de déterminer la durée d'évaporation d'un volume d'eau sur une feuille, dans le but d'estimer la composante évaporative de la durée d'humectation, a motivé le développement d'un modèle d'évaporation de l'eau sur un support solide. Lorsqu'un volume d'eau liquide est laissé à l'air libre, un mouvement de molécules d'eau se produit entre l'air et l'eau liquide. Si l'air n'est pas saturé en vapeur d'eau, il y a un déséquilibre entre la pression de vapeur dans l'air et la pression de vapeur saturante à la surface de l'eau. Les molécules vont alors tendre à rétablir l'équilibre en vaporisant dans l'air. Le volume d'eau va ainsi s'évaporer jusqu'à atteindre la saturation de l'air en vapeur d'eau, ou jusqu'au séchage complet. La connaissance de ce flux de masse liquide vers l'air permet d'évaluer le taux d'évaporation (Figure I.1).

Ce phénomène se produit que l'environnement de la goutte soit illuminé ou dans l'obscurité, qu'il soit chaud ou froid, très sec ou très humide. Mais la vaporisation des molécules d'eau est endothermique : lorsqu'une molécule passe de l'état liquide à l'état gazeux, elle puise de l'énergie thermique et la température de l'eau va diminuer (Figure I.1). Ainsi, tout phénomène agissant sur la température de la goutte et l'agitation des molécules d'eau aura une influence sur la durée d'évaporation :

- (i) la **température de l'air ambiant** va favoriser le chauffage de l'eau;
- (ii) le **vent** modifie la couche limite à la surface de l'eau, ce qui entraîne une modification du mélange air – vapeur à cette interface en renforçant le gradient de pression de vapeur;
- (iii) l'**humidité de l'air** qui caractérise la concentration en vapeur d'eau dans l'air, est directement reliée au taux d'évaporation;
- (iv) l'**intensité du rayonnement** favorise également le chauffage de l'eau.

Il est par conséquent important de connaître ces variables environnementales pour modéliser l'évaporation d'un volume d'eau.

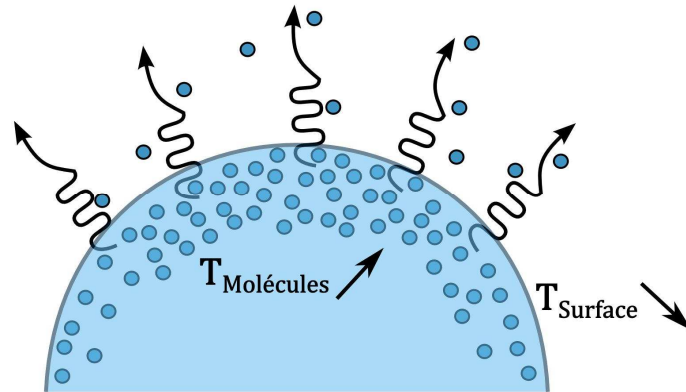


Figure I.1 – schématisation du phénomène d'évaporation : les molécules se déplacent du liquide vers l'air et la réaction endothermique de vaporisation entraîne un refroidissement de la surface

La prise en compte de ces propriétés du phénomène constituent le principe de base de notre modèle estimant la durée d'évaporation d'une goutte sur un solide dans un environnement bien défini qui est présenté dans la partie qui suit.

I. METHODOLOGIE & POSTULATS DE DEPART

Le modèle développé est un modèle simple reposant sur un bilan d'énergie stationnaire. Sa simplicité en fait un outil d'exploration idéal car le temps de calcul d'une simulation est très court.

I.1. Principe du calcul de l'évaporation

Considérons un volume d'eau initial V_0 (m^3) déposé sur un support à l'air libre.

Pendant un intervalle de temps Δt (s), et à un taux d'évaporation donné E ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), on peut déterminer le volume évaporé ΔV comme suit :

$$\Delta V = \frac{ES_{urf}}{\rho_{eau}} \Delta t \quad (\text{I.1})$$

où S_{urf} (m^2) est la surface d'échange de l'interface eau – air, et ρ_{eau} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) la densité volumique de l'eau.

Le taux d'évaporation n'est pas parfaitement homogène sur l'ensemble de la région interfaciale entre une goutte et l'air (Figure I.2) (Hu & Larson, 2002; Saada *et al.*, 2010; Strotos *et al.*, 2008). Rappelons que la vocation de notre modèle est de fournir un outil simple et exploratoire des phénomènes physiques se produisant entre l'eau et son environnement au cours de l'évaporation. Nous avons donc fait l'approximation d'un taux d'évaporation homogène sur l'ensemble de la surface de notre volume d'eau. Cette approximation produit une erreur d'estimation du flux d'évaporation sur la totalité de la surface de la goutte pouvant atteindre 5% (Figure I.3) si la couche limite tend vers zéro, à savoir en conditions d'air calme. Cette hypothèse nous évitera de discrétiser très finement notre goutte, ce qui demanderait des méthodes de calcul lourdes (Figure I.4) (Fletcher, 1991), ne correspondant pas à la finalité de notre modèle. Nous considérerons donc dans la suite des flux d'évaporation moyens à l'ensemble de la surface de notre volume total d'eau (Monteith & Unsworth, 1990).

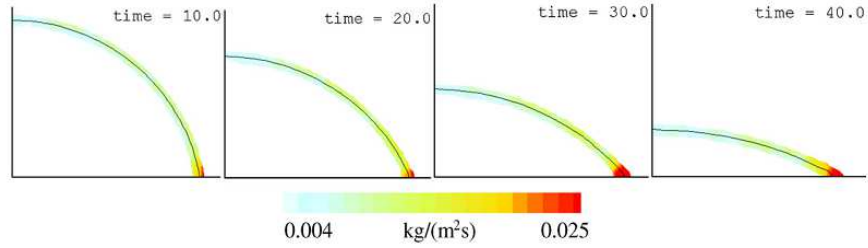


Figure I.2 – Variation de la valeur du taux d'évaporation sur la surface d'une goutte – in (Stroatos *et al.*, 2008)

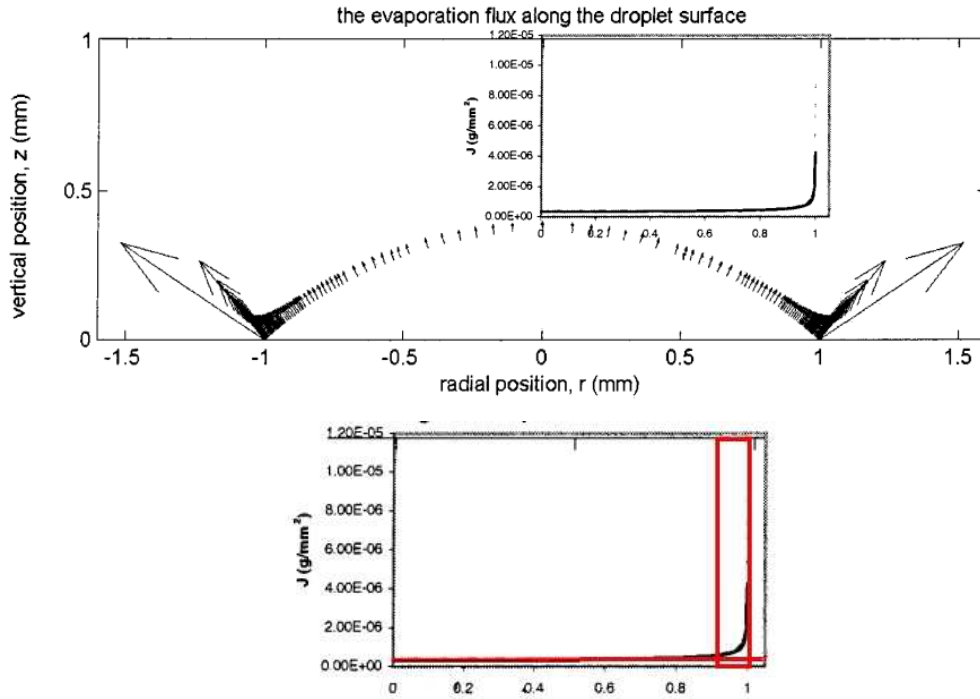


Figure I.3 - Variation du flux d'évaporation à la surface d'une goutte (haut). L'intégration d'un flux constant à la surface de la goutte amène une erreur de l'ordre de 5%, en négligeant la hausse du flux à proximité de la ligne triple : la zone négligée est encadrée en rouge (bas) – d'après (Hu & Larson, 2002)

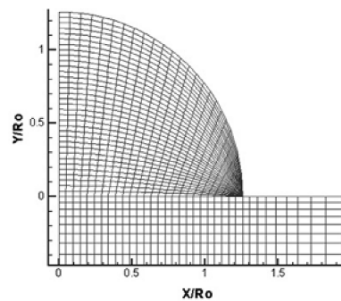


Figure I.4 - Exemple de maillage nécessaire pour représenter finement les variations spatiales du flux d'évaporation à la surface d'échange d'une goutte - in (Stroatos *et al.*, 2008)

A partir de l'équation I.1, il est possible de calculer le volume évaporé ΔV_i à chaque pas de temps Δt_i . L'évaporation est complète lorsque la somme de ces volumes atteint le volume initial : $\sum_{i=1}^N \Delta V_i \geq V_0$. La durée d'évaporation t_{evap} se déduit alors du nombre de calculs effectuée, à savoir : $t_{evap} = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$.

L'équation I.1 illustre bien que les facteurs déterminant la durée d'évaporation sont la surface d'échange eau – air S_{urf} , et le taux d'évaporation E .

2. Estimation du flux d'évaporation

La mise en équation du flux d'évaporation et du bilan énergétique permettant de déterminer la vitesse d'évaporation d'un volume d'eau a été décrite dans une publication scientifique : **Comparison of Penman_Monteith and non-linear energy balance approaches for estimating leaf wetness duration and apple scab infection** (Leca *et al.*, 2011). Elle est restituée dans la suite.

INTRODUCTION

Wetness duration is the main parameter controlling the development of scab, the most dominant apple disease. The time that water remains on leaf or fruit determines spore germination and fungal penetration in host tissues (Schwabe, 1980, 1982, Hartman et al., 1999). The control of apple scab is currently based on intensive fungicide applications, as the great majority of apple cultivars are susceptible to the disease. Warning systems are used in the areas of apple production to detect the climatic risks of infection, and so to be able to optimize fungicide application schedules (MacHardy, 1996). In these forecasting models, the risk of infection is usually expressed by computing giving the wetness duration required to achieve a certain disease severity at a given air temperature (Magarey et al., 2005). Risk assessment is then based upon the measurement of both air temperature and leaf wetness duration (LWD) (Mills and LaPlante, 1951).

Air temperature can easily be measured within orchards contrary to leaf wetness duration (LWD) which is estimated from wetness sensors (Gillespie and Kidd, 1978). However these sensors present some drawbacks. They are costly for many growers, and due to their physical differences from a real leaf they are not representative of real LWD. Despite efforts made to build sensors that mimick leaf wetness properties, leaf shape and orientation (Miranda et al., 2000), precise and realistic estimates of LWD in orchards are far from being achieved.

To overcome these difficulties, the modeling of leaf wetness duration (LWD) from standard weather measurements has been developed in the past 20 years, especially by using physical models based on energy balance equation (Huber and Gillespie, 1992;

Magarey et al., 2006; Monteith and Unsworth, 1990; Sentelhas and Gillespie, 2008; Sentelhas et al., 2006).

For agronomical purposes, LWD models are based on the Penman-Monteith (PM) equation, which simulates the steady-state evaporation of a wet surface (Monteith and Unsworth, 1990). The PM equation gives an insight into the evaporative process but results from a linearization process, introducing errors within the estimate of terms. For soil evaporation estimates (Gavin and Agnew, 2004) or by applying the PM equation on an hourly time scale (Widmoser, 2009), such approximations can lead to significant deviations (up to 40%) in the evaporative term. When the PM equation was introduced, authors already pointed out this fact (Monteith and Unsworth, 1990). Despite this first caution, the PM equation is largely used in agronomy with little regard to its functional boundary.

In this paper we investigated the error in the LWD estimates by using the PM equation instead of solving the exact equation, and highlighted consequences of such error in the prediction of risk of infection by *Venturia inaequalis*, the fungus responsible for apple scab. In a first part, the methodology to estimate LWD and the derivation of the PM equation were briefly recalled. In a second part exact solution and approximate solution provided by PM equation were compared to experimental data on an evaporative single droplet (Leclerc et al., 1985). In a third part, consequences on the estimation of the risk of infection were investigated by using apple scab risk assessment curves (Machardy and Gadoury, 1989).

MATERIAL AND METHODS

1. LWD computation

LWD is the evaporation time of a water droplet or a film of water on a leaf surface. For a given evaporation rate E ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and during a time period Δt (s) the evaporated

volume ΔV can be estimated by:

$$\Delta V = \frac{ES_{urf}}{\rho_{eau}} \Delta t \quad (\text{I.1})$$

where S_{urf} is the water –air surface exchange (m^2) and ρ_{eau} the water density (kg m^{-3}).

Considering an initial volume of water V_0 , and following equation (I.2), at each time

period Δt_i a volume ΔV_i evaporates. LWD is then equal to the time $t_N = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$ reached

when $\sum_{i=1}^N \Delta V_i \geq V_0$.

Thus, a right estimate of LWD is entirely based upon the right estimate of the evaporative rate E .

2. Evaporation flux computation – Derivation of the Penman-Monteith equation

Following Monteith and Unsworth (Monteith and Unsworth, 1990), the evaporation rate

E in the equation (I.1) can be expressed as follows:

$$E = \frac{1}{\lambda} \frac{\rho_{air} C_p^{air}}{\gamma^* r_H} (e_{sat}(T_s) - e_{air}) \quad (\text{I.2})$$

Where λ is the water latent heat of evaporation ($2.454 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$), C_p^{air} is the heat capacity of dry air ($1012 \text{ J.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), γ^* is the modified psychrometric constant (62.31

Pa.K^{-1}), ρ_{air} is the density of air (1.2 kg.m^{-3}), r_H is the aerodynamic resistance (s.m^{-1}) expressed in relationship with Reynolds number R_e , defined as follows:

$$R_e = \frac{2Ur}{\nu} \quad (I.3)$$

$$r_H = \frac{2r\rho_{air}C_p^{air}}{0.54R_e^{0.47}k_{air}} \quad (I.4)$$

where U is the wind speed (m.s^{-1}), ν the air kinematic viscosity ($1.5\text{e}^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$), r the droplet radius (m), k_{air} the air conductivity ($0.262 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), e_{air} is the vapour pressure of the ambient air (Pa), and $e_{sat}(T_s)$ the saturation vapour pressure on the water surface (Pa) at temperature T_s (K). As it is defined here, equation (I.4) does not take into account the heat storage of the droplet which would result in modifying the air density and its heat capacity, which are then supposed to remain constant during the heat transfer. We assessed water temperature is initially equal to air temperature (Byers, 1949).

The problem with equation (I.2) is that E is function of the water surface temperature T_s which is unknown. So T_s must be estimated prior to E .

To obtain T_s one needs to solve an energy balance equation of the water surface taking into account the heat received and lost by radiation (R_n), the heat lost by convection (C) and evaporation (λE) (Monteith and Unsworth, 1990):

$$\lambda E + C = R_n \quad (I.5)$$

where R_n is the net radiation flux (W m^{-2}) and C the sensible heat flux (W m^{-2}).

Adding to equation (I.5) an expression of the convective flux (Monteith and Unsworth, 1990):

$$C = \rho_{air} C_p^{air} (T_s - T_{air}) / r_H \quad (I.6)$$

Where T_{air} is the air temperature (K).

Equation (I.5) writes:

$$\frac{\rho_{air} C_p^{air}}{r_H} (T_s - T_{air}) + \frac{\rho_{air} C_p^{air}}{\gamma^* r_H} (e_{sat}(T_s) - e_{air}) = R_n \quad (I.7)$$

In equation (I.7), $e_{sat}(T_s)$ can be estimated by (Allen et al., 1998):

$$e_{sat}(T_s) = 0.610 \exp \left[\frac{17.27(T_s - 273.2)}{T_s - 36} \right] \quad (I.8)$$

Using expression (I.8) within equation (I.7) leads to a non-linear equation which can not be solved analytically. However such non-linear equation can be easily solved by iterative techniques such as the secant method or Newton method (Press et al., 2007) and a quasi exact solution can be obtained. For this study the Raphson-Newton method was used with a tolerance set to 10^{-8} . In the following solutions of equation (I.7) provided by the Raphson-Newton method are abbreviated as “exact”.

An alternative to iterative methods is to linearize non-linear terms in equation (I.7). In our case $e_{sat}(T_s)$ can be linearized using the saturation curve (Monteith and Unsworth, 1990):

$$e_{sat}(T_s) \approx e_{sat}(T_{air}) - \Delta(T_{air} - T_s) \quad (I.9)$$

where Δ is the slope of the saturation curve (Pa.K⁻¹)

Using Eq. (I.9) in Eq. (I.7) and after some algebra, analytical expressions for water surface temperature T_s and evaporation rate E can be obtained:

$$T_s^{PM} = T_{air} - \frac{1}{\Delta + \gamma^*} (e_{sat}(T_{air}) - e_{air}) + \frac{\gamma^*}{\Delta + \gamma^*} \frac{r_H}{\rho_{air} C_p^{air}} R_n \quad (I.10)$$

$$\lambda E^{PM} = \frac{\rho_{air} C_p^{air}}{r_H} \frac{1}{\Delta + \gamma^*} (e_{sat}(T_{air}) - e_{air}) + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} R_n \quad (I.11)$$

The latter is known as the Penman-Monteith equation.

3. LWD models assessment

Assessment and comparison of LWD models were done using published data of evaporating single droplets on artificial soybean leaves under controlled conditions without radiation (Leclerc et al., 1985) (Table I.1). For each Leclerc case, two LWD values, LWD^{exact} and LWD^{PM} , were computed by solving equation (I.7) with the iterative method and by using the Penman-Monteith equation (I.11) respectively. For all cases, a time step of 1 second was used. Computations were done by assuming that droplets were initially at air temperature and the contact angle was 90°.

4. LWD computation and risk of infection

To compare the risk of infection as estimated from the PM equation vs. an exact solution to eq. (I.2), several LWDs were computed for 13 droplets with radii ranging from 0.5 mm through 3.5 mm which are, according to Brain & Butler (1985), the most commonly observed droplet sizes on leaves. For each droplet size, LWD^{exact} and LWD^{PM} were estimated for constant wind condition (2.7 m.s⁻¹), zero irradiation level (by setting R_n to zero in equation I.7, I.10 and I.11), a contact angle of 90°, and air relative humidity (HR) and air temperature ranging within intervals 0 – 95% and 8-40°C respectively. Starting from 0% and 8°C, HR and air temperature values were incremented by 5% and 0.5°C respectively, leading to 1300 simulated cases for each droplet size.

Drop radius (mm)	Wind speed (m/s)	Air relative humidity (%)	Air Temperature (°C)	Observed LWD (min)	LWD ^{exact} (min)	LWD ^{PM} (min)
2.1	2.79	28.62	22.5	27	27	33
2.25	2.5	20.55	22.5	29	28	34
3.4	3.05	21.82	21.8	54	48	59
3.4	3.05	21.82	21.8	60	48	59
4.5	3.04	27.52	22.5	81	79	95
3.65	2.25	45.59	23.5	82	91	105
3.5	2.55	45.59	23.5	69	81	93
4.4	2.81	20.67	21.5	90	73	90
3.75	4.06	67.15	24.3	106	122	133
3	3.05	67.15	24.3	95	101	110
2.15	2.5	20.55	22.5	44	26	32
1.8	2.8	20.55	22.5	34	19	23
2	2.03	67.15	24.3	63	68	73
2	2.03	67.15	24.3	63	68	73

Table I.1 – Comparison of LWD computaion with observation under controlled conditions (Leclerc et al., 1985)

For each case, values of LWD^{exact} and LWD^{PM} were compared to the LWD^{Mills/c} threshold given by the Mills/c curve describing the “light” risk of infection of a leaf by *V. inaequalis* conidia (MacHardy and Gadoury, 1989): $LWD^{Mills/c} = 58.8899 - 11.7951 T_{air} + 1.0244 T_{air}^2 - 0.0403 T_{air}^3 + 0.0005969 T_{air}^4$. If simulated LWD values are above the Mills/c threshold, a risk of infection exists. Inversely, if simulated LWD values are below the Mills/c threshold, leaf infection will not occur.

RESULTS

1. Assessment of LWD computations

Predicted versus observed drying times for the droplets in the Leclerc study are shown in Table I.1 and Figure I.5. Both approaches show a good agreement with Leclerc’s experiment. However, from a global point of view, the use of the iterative procedure gives a better estimate of the LWD (RMSE = 10.6) than the use of the Penman Monteith equation (RMSE = 14.2). More precisely, LWD^{PM} is slightly larger than the LWD^{exact} and the difference increases with drying time. A direct comparison of LWD^{PM} and LWD^{exact} in Figure I.6 shows a good correlation between both values ($R^2 = 0.99$) and shows that LWD^{PM} is 12% larger than LWD^{exact} whatever the drying time ($LWD^{exact} \approx 0.88 LWD^{PM}$).

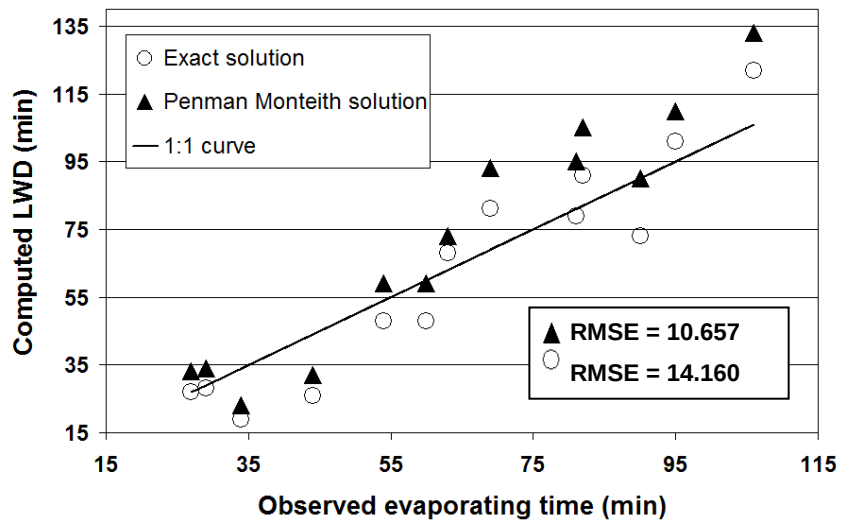


Figure I.5 – LWD computation using exact solution (○) and the Penman-Monteith solution (▲) compared to observed evaporating time (Leclerc et al., 1985)

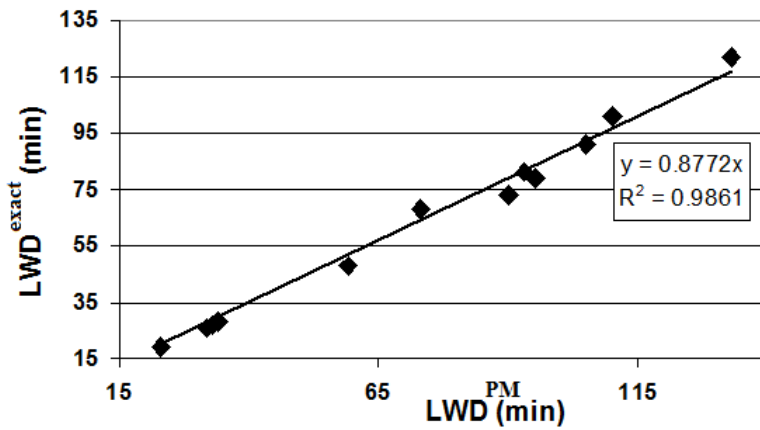


Figure I.6 – Correlation study between the exact and the Penman-Monteith approaches for the droplets reported in Table I.1

2. LWD computation and risk of infection

Differences in risk prediction occurred for various combinations of droplet radius larger than 1.25 millimeters, for relative air humidity above 80% and for an air temperature between 8°C and 29°C (Table 2).

Drop radius (mm)	Differences in risk of infection	Air relative humidity (%)	Air temperature (°C)
0.5	No	0–100%	8–40 °C
0.75	No	0–100%	8–40 °C
1	No	0–100%	8–40 °C
1.25	No	0–100%	8–40 °C
1.5	Yes	≥95%	9.5–23.5 °C
1.75	Yes	≥95%	8–25 °C
2	Yes	≥95%	8–26 °C
2.25	Yes	≥90%	8–26.5 °C
2.5	Yes	≥90%	8–27.5 °C
2.75	Yes	≥90%	8–28 °C
3	Yes	≥85%	8–28.5 °C
3.25	Yes	≥85%	8–29 °C
3.5	Yes	≥80%	8–29 °C

Table I.2 – Risk of infection assessment using Mills curves with computed LWD.

The larger the droplet size, the lower the air humidity and the wider the temperature range for a difference in risk prediction. In cases with a difference in risk prediction, a linear regression analysis between LWD^{exact} and LWD^{PM} (not shown) yielded a quasi-linear relationship ($R^2 = 0.996$) over the full range of conditions: $LWD^{exact} = 0.6993 LWD^{PM}$. This relationship shows a weaker slope (LWD^{PM} is 30% larger than LWD^{exact}) than obtained with the Leclerc data. To highlight such a difference, LWD^{PM} and LWD^{exact} were plotted versus air temperature and compared to the Mills/c curve for 1.5 mm and 3.5 mm droplet radii. This comparison showed that the bias in LWD estimates arising from the PM equation could reach up to 6 hours for the largest droplet size and for the longest drying time simulated.

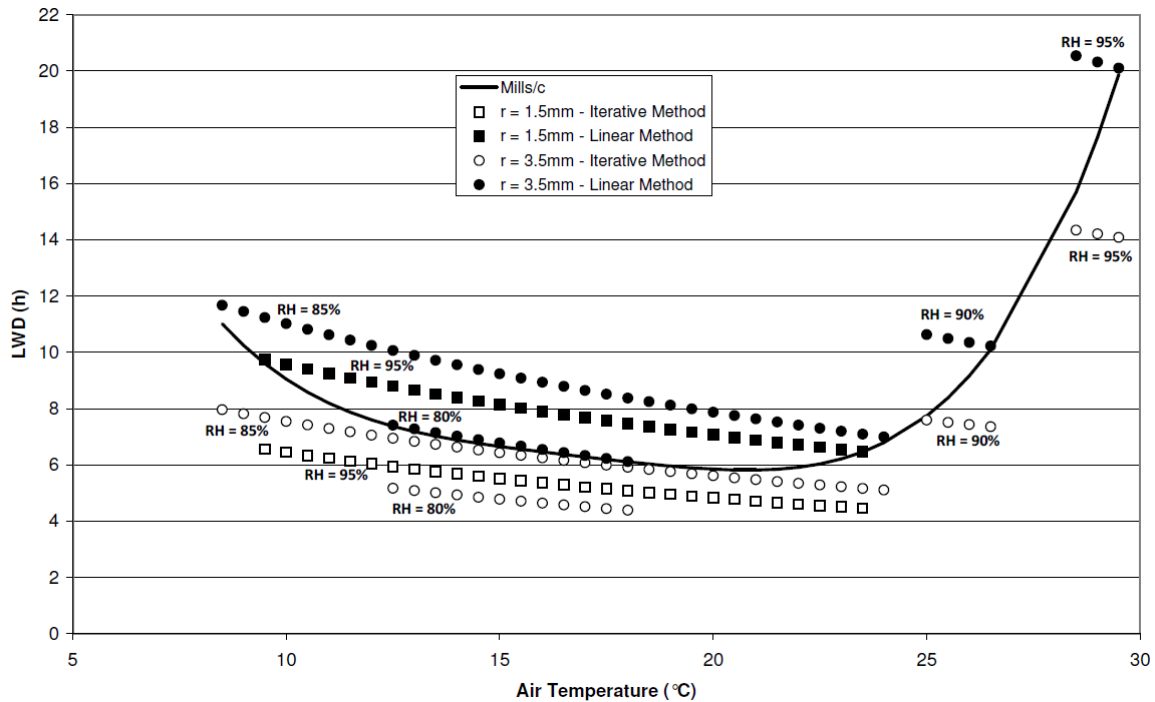


Figure I.7 – Risk assessment comparison between exact (○ / □) and Penman-Monteith (● / ■) modelling approaches and Mills infection risk curve relative to conidia (MacHardy and Gadoury, 1989). Squared dots (□ ■) stand for 1.5mm radius droplets, with a 95% relative humidity value. Circular dots (○ ●) stand for 3.5mm radius droplets with relative humidity values varying from 80% to 95% (corresponding relative humidity values are written next to the dots series).

DISCUSSION

PM equations (Eqs. I.10 and I.11) were primarily introduced by Penman (Penman, 1948) by assuming that the saturation vapour pressure at water surface can be linearly related to air temperature (Eq. I.9). This approximation is only valid for small temperature differences but (i) gives the opportunity to understand physical mechanisms involved in the heat budget of plants and animals (Monteith and Unsworth, 1990), and (ii) provides analytical formulations easy to implement into computer programs. However when used in forecast models, especially when the evaporation is the main driving process, for instance soil evapotranspiration for irrigation scheduling (Gardner & Field, 1983), leaf

transpiration in relation to photosynthesis computation (Sinoquet et al., 2001), leaf temperature for pest development simulation (Pincebourde et al., 2007), or leaf wetness duration (Magarey et al., 2006), such approximation is questionable since errors in term estimates are introduced due to the removing of the non-linearity within the initial equation (Eq. I.7) (Widmoser, 2009). Using the PM equations for single droplets could lead to significant errors on LWD estimates (12% - Figure I.6). In terms of fit accuracy, a comparison to experimental data, without changing parameters' values, showed that a large improvement of simulation results can be achieved by solving the exact equation instead of the PM equation since the RMSE was decreased by 40 % (from 14 to 10 minutes, Figure I.5). Such errors could have large consequences if LWD modeling was used to schedule fungicide spray applications in orchards, especially in situations where LWD is expected to last several hours, for example when RH is high (>85%) and temperature is low or at night time. For instance the risk of infection of a leaf by apple scab conidia (MacHardy and Gadoury, 1989) was overestimated when the Penman equation was solved instead of the exact one (Table I.1 and Figure I.7).

The differences in risk of infection estimation are strong since we set the net radiation parameter R_n to zero, which results in a smaller value of $e_{\text{sat}}(T_s)$, hence a longer estimated LWD. Setting a positive (or negative) radiation would minimize the differences in risk of infection due to the strong impact of radiation on heat exchange which would take over the linearization effect of the evaporative term on the evaporation time. In addition, a net radiation R_n equal to zero simulates the most unfavourable cases to avoid infection, such as a nightly situation, or energy budget on fully shaded leaves deep inside the tree crown.

Thus, setting R_n to 0 is not representative of real orchard conditions but allowed us to show clearly the error committed by the linearization of the Penman Monteith equation

solely and to alert agronomists about the use of Penman Monteith equation based models.

The overestimation of infection risk could be viewed as beneficial to fruit growers since they will protect their crops in any case. However, the resulting overspraying of fungicides is an unfriendly environmental practice, and above all, this is in contradiction with the primary objective of the modeling approach: to provide an efficient and reliable tool for risk assessment.

Moreover, it is obvious that functional responses of a non-linear process and its linearized formulation may be dramatically different (Saltelli et al., 2006). As a consequence parameter calibration or sensitivity analysis of models to input parameters or climatic input variables (Javier et al., 2009; Sentelhas and Gillespie, 2008) based upon PM equations should be analyzed with caution (Saltelli et al., 2006), since non-linearities are removed. Sensitivity analysis of risk assessment based upon LWD computations related to drop diameter, relative humidity and air temperature nicely highlight such differences in model outputs (Figure I.7).

Beyond the LWD computation analyzed in this study, solving accurately a non-linear equation (equation I.7) instead of its linearized form (i.e. PM equations I.10 and I.11) is an important topic when climatic changes and pesticide uses in agriculture and forestry are concerned. Indeed, all climatic change scenarios predict a rise in the global temperature at the Earth's surface for the 21st century in conjunction with an increase of the weather variability characterized by strong and sudden climatic events like severe drought, cold or rainy events (IPCC, 2007). To anticipate, and if possible, to prevent potential outbreaks in agriculture or forestry, the modeling approach is appealing and recent dedicated research works has tended to integrate altogether the physiological and physical processes at many different scales: from the organ (Lacointe & Dones,

2007) to the ecosystem (Kearney et al., 2009; (Watanabe *et al.*, 2004) via the plant (Sinoquet et al., 2001; Chelle, 2005; Pincebourde et al., 2007). In view of the complexity of such systems (non-linear interactions) and the use of such models in agriculture management, minimizing or avoiding errors in modeling is a crucial point. Many authors are still using PM equation in modeling because of the easy analytical formulation of the latent heat by evaporation, However, from our point of view, this approach should now be considered outdated considering the gain in accuracy provided by solving the exact equation, since (i) solving non-linear equations is nowadays trivial by iterative methods, and (ii) such methods are easy to implement.

Ces travaux montrent qu'en se libérant d'une approximation parfaitement évitable (le temps de calcul nécessaire pour les méthodes linéaire et itérative est quasiment identique), il est possible de mieux approcher les résultats cherchés en améliorant la résolution des mêmes équations. Toutefois, les incertitudes sur les observations de durée d'évaporation effectuées par Leclerc ne sont pas connues. Il est donc impossible à ce niveau de déterminer avec quelle précision ces équations rendent compte du phénomène évaporatif.

Par la suite, nous emploierons bien entendu la méthode itérative, pour l'estimation de la température à la surface de la goutte.

I.3. Estimation de la surface d'échange

La surface d'échange joue un rôle important dans l'évaporation. Cela vient de la dépendance à la surface du taux massique d'évaporation. En effet, le flux d'évaporation détermine une perte de masse par unité de temps et par **unité de surface** ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Multiplier ce flux par la surface d'échange de la goutte permet d'obtenir le taux massique de l'évaporation en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$. De même, en convection forcée, la surface est également présente via la résistance aérodynamique r_H de la goutte d'eau, qui rend compte de l'effet des mouvements d'air sur le transfert thermique. Celle-ci évolue en $\sqrt{r}$ et donc en $S_{urf}^{\frac{1}{4}}$ (Figure I.8).

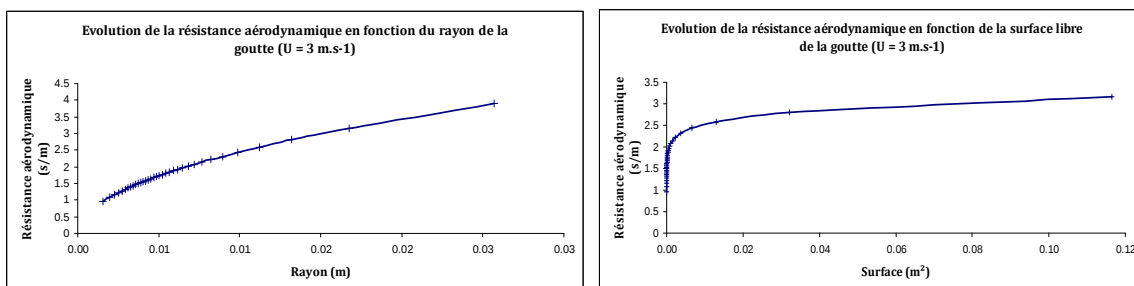


Figure I.8 - Evolution de la résistance aérodynamique en convection forcée en fonction du rayon de contact de la goutte (gauche) et de la surface d'échange de la goutte à l'interface liquide - air (droite)

La valeur de la surface d'échange est très sensible à la forme des gouttes. Ainsi, on ne peut pas la modéliser précisément sans se poser la question suivante : **quel phénomène contrôle la forme des gouttes d'eau? Comment se forment-elles?**

II. FORME DES GOUTTES

II.1. Bases théoriques

Partons d'une observation visuelle. Après une pluie ou une rosée, on remarque que sur une très grande majorité de surfaces, l'eau forme des gouttes, et non des films.

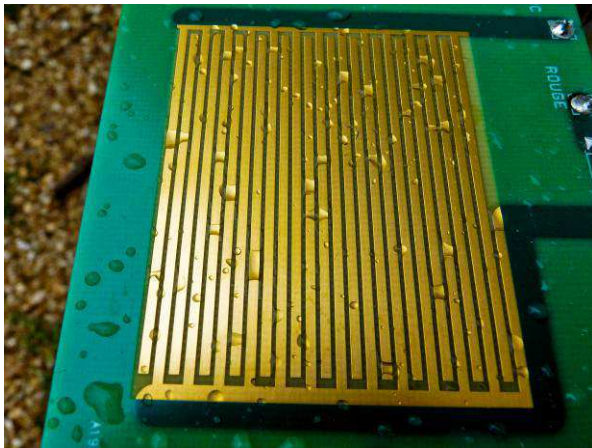
Mais une observation détaillée montre bien que ces gouttes n'ont jamais le même aspect. Lorsqu'il pleut et que l'on regarde par la fenêtre, des gouttes s'accrochent sur les vitres, certaines ruissellent, d'autres non, certaines vont coalescer pour former de grosses gouttes quand d'autres vont demeurer petites et immobiles (Figure I.9). Cette grande variété de morphologies est en fait liée aux interactions entre l'eau et le substrat sur lequel elle repose. Voyons en détail ces phénomènes.



Feuilles de pommier après la pluie



Feuilles d'alchémille après une rosée



Capteur de durée d'humectation après la pluie



Feuille de Parafilm "M" après la pluie

Figure I.9 - Photographies de formes de gouttes sur différents supports

II.1.a. Tension interfaciale, mouillage, mouillabilité

En règle générale dans les études d'interaction entre liquide et substrat, on parlera du mouillage par un liquide, qui sera alors plus ou moins mouillant, ou de la mouillabilité d'un substrat, qui sera donc plus ou moins mouillable.

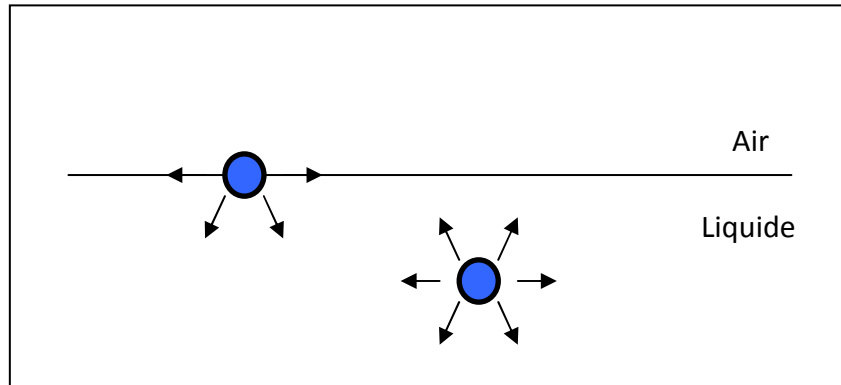


Figure I.10 – A la surface d'un liquide, les molécules qui le constituent perdent la moitié de leurs interactions attractives – d'après (de Gennes, 2005)

Un volume de liquide tend toujours à minimiser sa surface d'échange. C'est parce que l'état énergétique le plus favorable aux molécules constituant un liquide est celui des molécules "plongées" dans ce liquide, et non pas à la surface – où elles perdent la moitié de leurs interactions attractives (Figure I.10) (de Gennes *et al.*, 2005).

En d'autres termes, à un volume donné, la goutte tend à minimiser son énergie potentielle (Berim & Ruckenstein, 2004). C'est par exemple pour cela que le jet d'eau qui coule d'un robinet va se séparer en gouttelettes. Ce phénomène explique également la capillarité, et caractérise l'étalement d'un liquide sur un substrat, qu'il s'agisse d'une vitre ou d'une feuille d'arbre.

L'énergie à fournir pour augmenter la surface du liquide d'une unité est appelée tension superficielle, ou tension interfaciale, et s'exprime donc en J.m^{-2} .

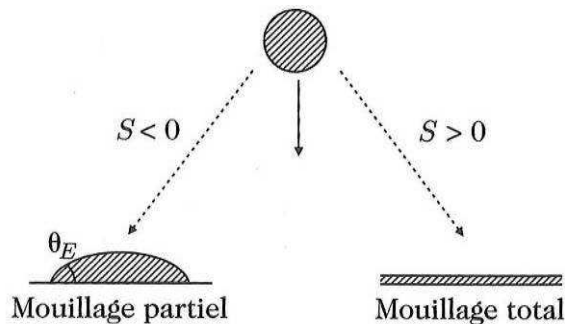


Figure I.11 – Illustration des deux régimes de mouillage possibles sur un substrat solide – in (de Gennes, 2005)

Ainsi, lorsqu'une goutte d'eau entre en contact avec un solide, trois tensions interfaciales vont entrer en jeu entre le solide, l'eau et l'air :

- (i) la tension superficielle à l'interface solide/air γ_{SA} ;
- (ii) la tension superficielle à l'interface solide/liquide γ_{SL} ;
- (iii) la tension superficielle à l'interface liquide/air γ_{LA} .

Aux bords de la goutte ces trois tensions vont s'exercer en compétition. La différence entre les tensions du substrat sec et mouillé permet de définir le paramètre d'étalement noté S qui rendra compte du mouillage du liquide sur le substrat, soit :

$$S = \gamma_{SA} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LA}) \text{ en J.m}^{-2} \quad \text{I.12}$$

Ainsi, si **S est positif**, la tension superficielle à l'interface solide/air l'emporte et la goutte s'étale complètement sur le substrat : on parle de mouillage total.

Si au contraire **S est négatif**, la goutte ne s'étale pas complètement et va s'équilibrer sous la forme d'une calotte sphéroïde : on parle de mouillage partiel (Figure I.11). L'angle formé entre le bord de la goutte et le substrat est appelé angle de Young ou **angle de contact**, noté θ . L'angle de contact est délimité par les tensions interfaciales à la ligne triple (ensemble des points où l'interface est triple : air-liquide-solide, on pourrait également parler des bornes extérieures de la surface de contact entre la goutte et le support) (Figure I.12).

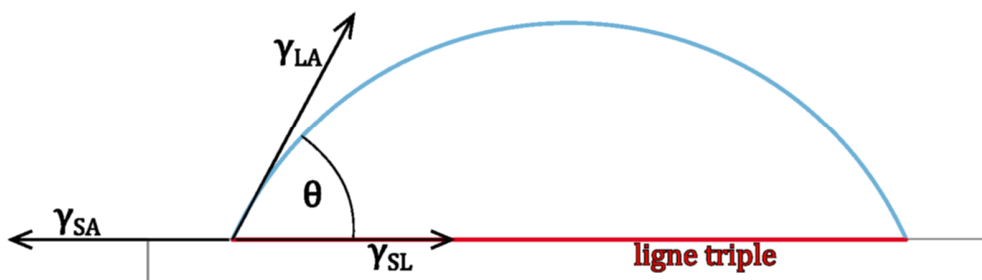


Figure I.12 – Equilibre des tensions interfaciales s'exerçant sur la ligne triple, définissant l'angle de contact

Si l'on projette les vecteurs force de la goutte (uniquement dans le cas où le paramètre d'étalement est négatif) à l'équilibre sur le substrat (qui a donc fini de s'étaler), on

obtient une relation représentant clairement le lien entre les tensions interfaciales et l'angle de contact, qui va déterminer la forme de la goutte sur le substrat étudié (Young, 1805) :

$$\cos(\theta) = \frac{(\gamma_{SA} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LA}} \text{ (équation de Young)} \quad \text{I.13}$$

On peut également écrire l'équation I.13 en fonction du paramètre d'étalement S :

$$S = \gamma_{LA} (\cos(\theta) - 1) \quad \text{I.14}$$

II.1.b. Hydrophobie/hydrophilie et angle de contact

Si à un substrat donné l'étude du mouillage d'un liquide donne la grandeur de son étalement sur ce matériau, l'étude de la mouillabilité du substrat permet de caractériser son caractère hydrophile ou hydrophobe.

Ainsi, un support hydrophile va avoir tendance à minimiser l'écart entre γ_{SA} et $(\gamma_{SL} + \gamma_{LA})$, alors qu'un support hydrophobe aura tendance à augmenter cet écart. La conséquence se répercute sur l'angle de contact. Ainsi, plus le paramètre d'étalement est petit, plus le cosinus de l'angle de contact sera grand :

$$\cos(\theta) = 1 + \frac{S}{\gamma_{LA}} \quad \text{I.15}$$

La connaissance de l'angle de contact nous donnera donc des informations sur l'hydrophobie du substrat (Zisman, 1964).

Selon l'application, on recherche soit un mouillage optimal, soit une grande hydrophobie des matériaux, un indicateur universel de la "qualité" d'hydrophobie n'existe pas. Les matériaux sont alors décrits en fonction de leur hydrophilie/hydrophobie, sous les termes : *superhydrophile* si $\theta < 40^\circ$, *hydrophile* si $\theta < 90^\circ$, *plutôt hydrophobe* si $90^\circ < \theta < 120^\circ$, *hydrophobe* si $120^\circ < \theta < 150^\circ$ (il arrive qu'on ne distingue pas les cas *plutôt hydrophobe* et *hydrophobe*), et *superhydrophobe* si $\theta > 150^\circ$ (Bhushan & Jung, 2008) (Figure I.13).

En termes de mouillabilité, on parlera de *substrat mouillable* si $\theta < 110^\circ$, et de *substrat non mouillable* si $\theta > 110^\circ$ (Aryal & Neuner, 2010).

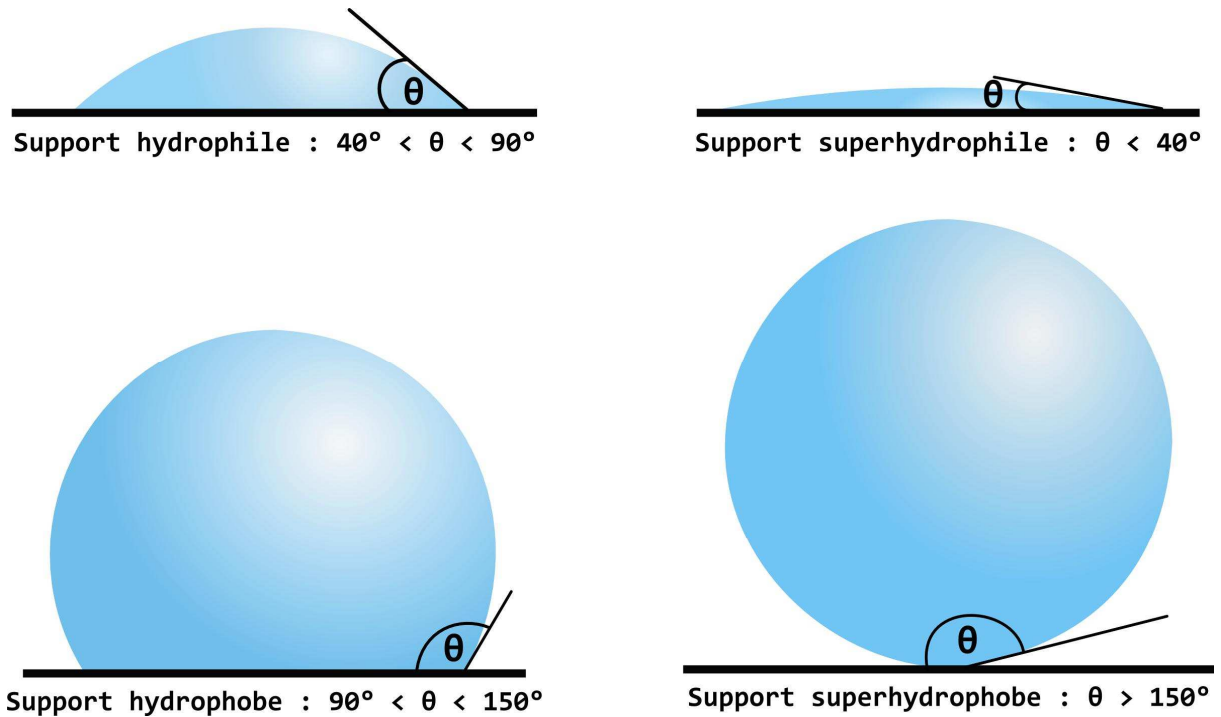


Figure I.13 - Illustration des différents comportements de l'eau selon l'hydrophobie de la surface

Ainsi, la mesure de l'angle de contact nous donne toutes les informations nécessaires relatives au mouillage du substrat.

Nous voyons ainsi qu'il existe une relation étroite entre mouillabilité et forme de la goutte. Toutefois, les exemples précédents concernent des cas théoriques de surfaces parfaitement lisses. Or, dans le cas d'une surface non idéale, sur une surface un minimum hétérogène (impuretés, surface texturée), la goutte ne forme pas une calotte sphérique parfaite (Gondrand, 2006).

D'autre part, la masse d'une goutte peut altérer sa forme. En effet, si le volume d'une goutte est suffisamment grand, la pesanteur a une influence sur la forme de la goutte : celle-ci s'étale et ne peut plus être considérée comme une calotte sphérique. Le rapport des forces de gravité sur les forces de tension est décrit par un nombre adimensionnel appelé Nombre de Bond, et défini comme :

$$B_o = \frac{R_0^2}{\kappa^{-2}} \quad \text{I.16}$$

avec κ^{-1} l'échelle de longueur capillaire, c'est-à-dire la dimension de goutte au-delà de laquelle la gravité devient significative. Elle dépend de la tension superficielle et de la densité du liquide :

$$\kappa^{-2} = \frac{\gamma}{\rho g} \quad \text{I.17}$$

où γ est la tension superficielle du liquide (pour l'eau : 72 mJ.m⁻²), et g la constante gravitationnelle (9.81 m.s⁻²). Ainsi, pour l'eau, $\kappa^{-1} \approx 2.71 \text{ mm}$.

On en tire que si le rayon R_0 de la goutte est supérieur à l'échelle de longueur capillaire ($B_0 > 1$), la gravité va devenir importante pour la goutte et celle-ci va s'étaler, formant une galette liquide. Au contraire, si R_0 est inférieur à cette échelle, la goutte ne sera pas affectée par la gravité et restera assimilable à une calotte sphérique axisymétrique.

II.2. Exploitation dans les modèles

II.2.a. Représentation analytique de la goutte

Dans les études d'évaporation sur support végétal, l'eau est souvent représentée soit sous la forme d'un film, on considère alors uniquement une hauteur d'eau qui évapore (Magarey *et al.*, 2005a), sous la forme d'un cylindre dont la hauteur diminue au fil de l'évaporation, apportant une précision sur le volume d'eau apporté (Leclerc *et al.*, 1985), soit sous la forme d'une sphère ou d'un hémisphère parfaits, ce qui fixe l'angle de contact à 180° ou 90° respectivement. Dans ses travaux sur l'évaporation de gouttes d'eau sur Parafilm "M", Leclerc a développé un modèle assimilant les gouttes à un cylindre afin de modéliser la diminution de la hauteur de la goutte au cours de son évaporation. A partir des conditions d'évaporation données par Leclerc *et al.* (Table I.1), nous avons comparé (en utilisant la méthode itérative) des simulations en modélisant la goutte sous forme de cylindre et d'autres la représentant sous forme d'un hémisphère. Les résultats des simulations ont produit un résultat identique (Figure I.14)

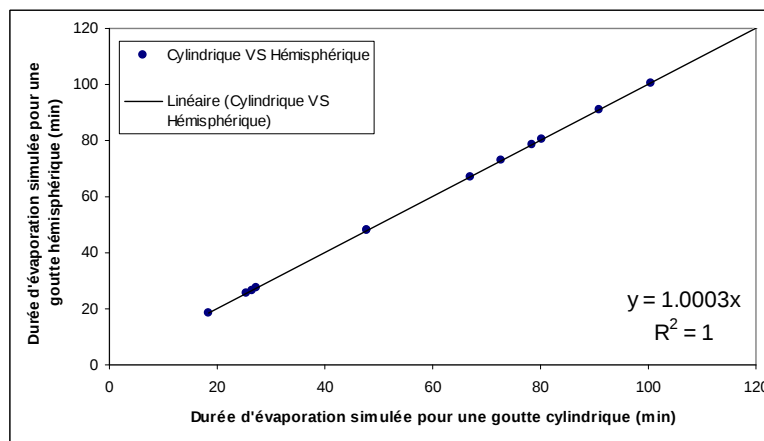


Figure I.14 – Comparaison entre une représentation cylindrique et une représentation hémisphérique de la goutte pour des calculs d'évaporation – d'après les conditions de mesure de (Leclerc *et al.*, 1985)

Cette représentation peut donc sembler convenir pour l'approximation d'un hémisphère parfait (demi-sphère) mais ne pourra rendre compte de la mouillabilité du

support (Brain & Butler, 1985) et de l'impact de cette mouillabilité sur la surface d'échange et donc sur le temps d'évaporation. Pour illustrer ce propos, la montre le résultat de simulations de durée d'évaporation basée sur les conditions expérimentales de Leclerc *et al.* (1985) (Table I.1) où seule la forme de la goutte a été modifiée : forme hémisphérique, goutte bombée ou aplatie, la durée de son évaporation sera très différente (Figure I.15).

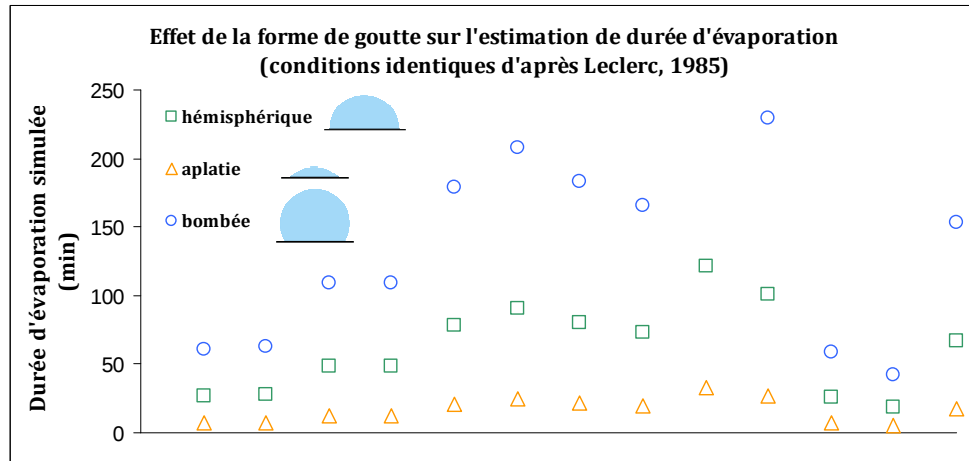


Figure I.15 – Influence de la forme de la goutte sur sa durée d'évaporation suivant les conditions expérimentales de Leclerc *et al.* (1985), (chaque colonne de points correspond à un cas du tableau Table I.1)

Ainsi il nous est apparu pertinent d'approcher au mieux la forme des gouttes réelles qui résultent de l'interaction entre l'eau et son support via une **représentation de type calotte sphérique**. En effet, cette dernière permet d'approcher finement la surface d'échange à l'interface liquide – air pour des gouttes ne subissant pas d'effet gravitaire prédominant (cf. equation I.16).

Le volume de la goutte dans ce formalisme est celui d'une sphère tronquée, comme représenté sur la Figure I.16.

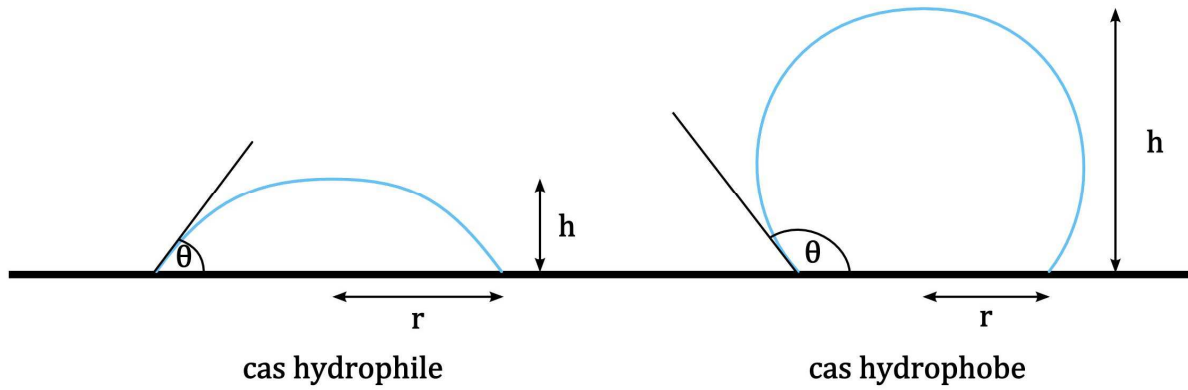


Figure I.16 - Représentation de la forme d'une goutte d'eau sur un support hydrophile (gauche) et hydrophobe (droite)

Dans le cas hydrophile comme dans celui hydrophobe, le volume V de la goutte est décrit par la relation I.18 :

$$V = \frac{\pi}{6} h (3r^2 + h^2) \quad \text{I.18}$$

Les variables de forme que sont la hauteur h , le rayon du disque de contact r , et l'angle de contact θ de la goutte, sont liées entre elles par la relation I.19 :

$$\frac{h}{r} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \text{I.19}$$

Cette représentation permet de définir la surface de contact de nos gouttes en tenant compte de l'angle de contact (Figure I.17). Connaissant ce dernier ainsi que le volume d'eau déposé sur le support, nous sommes en mesure d'estimer la surface d'eau en contact avec l'air.

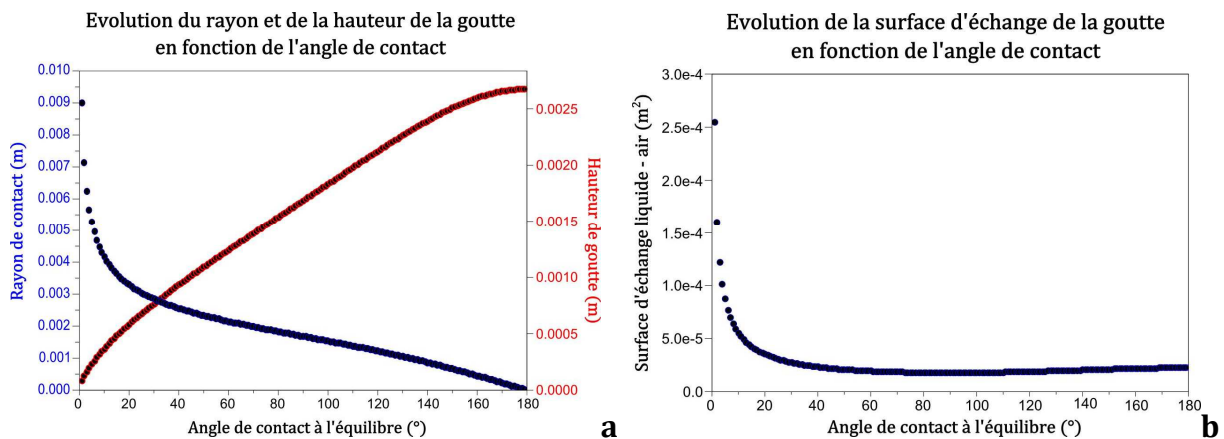


Figure I.17 – Evolution de la géométrie de la goutte en fonction de l'angle de contact qu'elle forme avec son support pour a) le rayon de contact (bleu) et la hauteur maximale (rouge) de la goutte; b) la surface d'échange à l'interface air – liquide de la goutte.

On en déduit la surface S_{urf} à l'aide de sa définition :

$$S_{urf} = \pi(r^2 + h^2) = \pi r^2 \left(1 + \tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad \text{I.20}$$

La surface d'échange eau – air est ainsi définie précisément (Figure I.17), dans les limites de l'hypothèse selon laquelle la goutte est de la forme d'une calotte sphérique parfaitement symétrique.

II.2.b. Evaluation de l'influence de l'angle de contact sur l'évaporation de la goutte

Cette description de la surface d'échange à l'interface goutte – air ambiant ajoute un degré de liberté aux variations de morphologie de goutte et permet ainsi d'évaluer quelle influence a l'angle de contact sur la durée d'évaporation.

La Figure I.15 illustre parfaitement la sensibilité de la durée d'évaporation d'une goutte aux variations de sa forme. Toutefois les variations imposées étaient très fortes, et afin d'illustrer la forte sensibilité de la durée d'évaporation à l'angle de contact, nous avons recalculé les temps d'évaporation des gouttes mesurés par Leclerc *et al.* (1985) en considérant une goutte formant un angle de 85° avec son support au lieu d'une demi-sphère (angle de contact de 90°).

La comparaison des simulations (Figure I.18) montre qu'un écart de seulement 5° ($\approx 5\%$) entre les angles de contact conduit à une différence de l'ordre de 12% dans les résultats. Ceci met bien en évidence l'influence de la morphologie de la goutte sur l'estimation de la durée d'évaporation.

Pour effectuer une représentation réaliste de la forme des gouttes d'eau, qui dépend des interactions eau – feuille pour estimer correctement l'évaporation de l'eau, il va donc nous falloir mesurer les angles de contact de l'eau sur feuilles de pommier. Pour ce faire, il nous faut établir un dispositif de mesure.

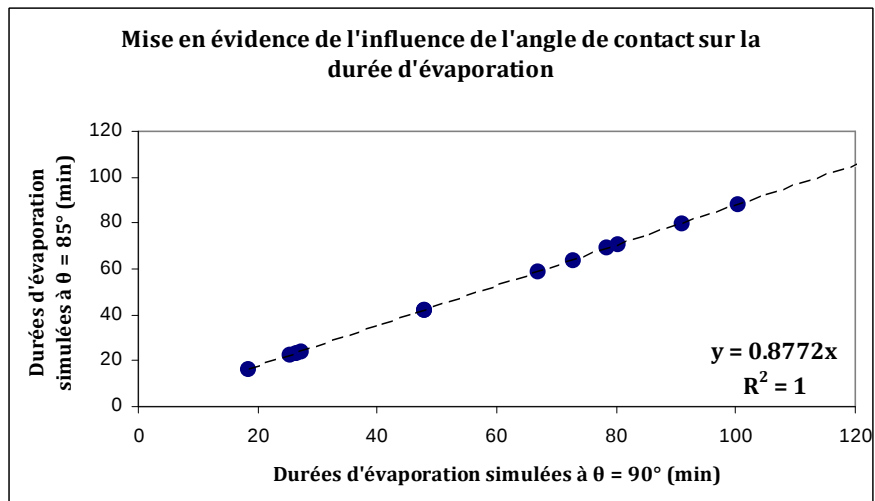


Figure I.18 - Comparaison de calculs d'évaporation pour une goutte hémisphérique (angle de 90°) et une goutte formant un angle de 85° avec le support

Conclusion du chapitre

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié de nombreux aspects relatifs à l'évaporation, dans le but d'établir un modèle d'évaporation de goutte sur une feuille de pommier.

Notre modèle résout un **bilan énergétique entre la goutte et l'air**. Si le support n'a à priori pas d'influence sur cette interface liquide – air, nous avons mis en évidence **l'influence forte de la surface d'échange de la goutte**. Or, celle-ci est conditionnée par l'interaction entre l'eau et le substrat.

La notion de **mouillabilité** a été introduite dans ce travail pour caractériser ces interactions via un paramètre géométrique : **l'angle de contact**. Cet angle, formé à la ligne triple solide – liquide – air entre la goutte et le substrat permet, connaissant le volume de la goutte, de déterminer sa surface d'échange et ainsi d'évaluer la masse d'eau liquide évaporée. L'influence de cet angle sur l'évaporation est forte et une modélisation précise de la morphologie de la goutte est indispensable pour éviter des erreurs relatives à la représentation de la forme de la goutte. La bibliographie ne fournissant pas données relatives à la mouillabilité sur pommier, il a été nécessaire de mesurer les angles de contact de l'eau sur des feuilles au cours de cette thèse. Le chapitre suivant s'attache à décrire les méthodes existantes pour de telles mesures, la mise au point d'un banc expérimental de mesure ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre II

Caractérisation de la mouillabilité du
support d'évaporation

Introduction

Dans le monde végétal, on ne connaît la mouillabilité que de quelques espèces. Il s'agit principalement de "cas extrêmes" comme le lotus qui est superhydrophobe (Bhushan & Jung, 2008; Otten & Herminghaus, 2004). A ce jour, ce type de mesures n'a été réalisé que dans un but physicien (et orienté vers la physique des matériaux, notamment pour produire des nanostructures synthétiques reproduisant la superhydrophobie) avant d'être en lien avec l'agronomie ou la phytopathologie.

Certaines études ont toutefois cherché à mettre en évidence la grande variabilité de mouillabilité entre différentes espèces et variétés végétales sauvages (Aryal & Neuner, 2010; Brewer & Smith, 1997; Brewer *et al.*, 1991), pour relier cela à des propriétés biophysiques expliquant la résistance à certains types de climats. Mais aucune étude ne semble s'être portée sur la mouillabilité des feuilles d'arbres fruitiers.

Pourtant, lorsque le rôle de l'évaporation de l'eau dans les maladies fongiques telles que la tavelure est notoire, connaître les paramètres susceptibles d'avoir une influence sur cette évaporation est primordial, et nous avons vu que la mouillabilité en fait partie, par le biais de l'impact de la forme de la goutte sur son évaporation.

Dans cette optique, et pour paramétrer la forme des gouttes dans notre modèle d'évaporation, il nous a fallu envisager la mise en place d'un dispositif expérimental de mesure des angles de contact sur différents matériaux. Ce chapitre s'attache à décrire le dispositif de mesure mis en place (**prise de vue du profil de goutte**) et les résultats que nous en avons tiré.

I. Mesurer les angles de contact

I.1. Définition des angles à mesurer

Plusieurs gouttes sur la même surface peuvent présenter des profils – caractérisés par leur angle de contact avec le substrat – différents. L'observation montre que plus la surface du matériau est accidentée (rayures, bosses, impuretés), plus la variation de formes de gouttes peut être grande. Dès lors, l'angle de contact à l'équilibre seul – c'est-à-dire l'angle de Young décrit plus haut – ne suffit plus à caractériser la mouillabilité du substrat. Ainsi la relation entre un liquide et son support nécessite la prise en compte de différents angles de contact: les angles de contact dynamiques, et les angles de contact statiques (Decker *et al.*, 1999).

L'angle de contact statique est celui de la goutte à l'équilibre sur la ligne triple.

Les angles de contact dynamiques correspondent aux angles formés sur la ligne triple lorsque celle-ci est en mouvement. Les angles de contact dynamiques sont: l'angle de contact d'avancée, et l'angle de recul.

L'angle d'avancée est défini comme le plus grand angle de contact que peut prendre la goutte du liquide considéré sur le substrat étudié, et l'angle de recul est au contraire le plus petit angle de contact que peut prendre la goutte de ce liquide sur le même substrat. Ils correspondent tous deux à une rupture de l'équilibre des trois tensions interfaciales de la ligne triple.

I.2. Méthodes expérimentales

I.2.a. Mesurer les angles de contact

Il existe plusieurs méthodes plus ou moins directes pour estimer les angles de contact de gouttes d'eau sur un substrat. Certaines permettent uniquement de mesurer les **angles de contact statiques**.

Celles qui sont principalement employées sont :

- 1) La méthode dite de la ***lame de Whilelmy***, mesure la force de tension de mouillage d'une lame plongée dans un liquide dont la tension superficielle est connue (Dann, 1970; Penn & Miller, 1980). Cette méthode est toutefois peu pratique voire inutilisable pour des surfaces dont l'hétérogénéité est irrégulière, comme une feuille d'arbre.
- 2) Il est possible de déterminer avec une grande précision les angles de contacts d'une goutte très aplatie par **interférométrie** : une observation au microscope laisse apparaître des franges d'interférence que l'on assimile à des courbes de niveau pour déterminer le relief de la goutte. Cela nécessite un substrat lisse et réfléchissant à même de produire les franges d'interférence par réflexion (de Gennes *et al.*, 2005).
- 3) On peut également, en connaissant son volume retrouver l'angle de contact d'une calotte sphérique à partir du **diamètre maximal de la goutte** (Magarey *et al.*, 2005a; Quéré *et al.*, 1998) (Figure II.1) :

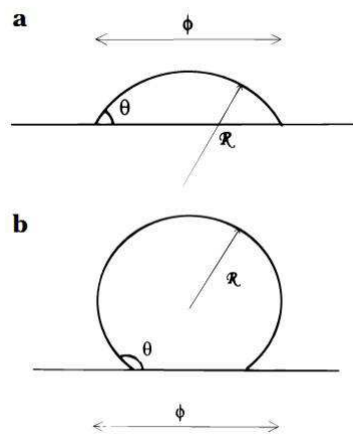


Figure II.1 – Illustration de la méthode d'estimation de l'angle de contact par la mesure du diamètre de contact d'une goutte sur un support a) hydrophile et b) hydrophobe – in (Quéré *et al.*, 1998)

Cette méthode présente des difficultés d'appréciation de la formule à employer si l'angle de contact est proche de 90° , de plus la méthode n'est pas valable pour des grands angles de contact ($>120^\circ$) (Quéré *et al.*, 1998). Elle présente en outre une limite d'usage dans la mesure où, sur une surface hétérogène comme des feuilles de pommier, il serait difficile de mesurer précisément le rayon de contact d'une goutte.

- 4) Enfin il est également possible d'estimer les angles de contacts par **prise de vue de profil**. Cette méthode repose sur un éclairage des gouttes à contre-jour et sur une analyse des clichés obtenus (Adamson & Gast, 1997). Cette méthode présente l'intérêt de permettre de mesurer à la fois les **angles statiques et dynamiques**.

I.2.b. Mise en évidence des angles dynamiques

Elle nécessite une mise en mouvement des gouttes. Au-delà de la méthode de mesure de l'angle à proprement parler, il faut donc se doter d'un dispositif assurant cette mise en mouvement. Deux méthodes sont principalement employées : la **méthode de gonflage/aspiration de la goutte**, et la **méthode du plan incliné** (Ray & Bartell, 1953).

Cette dernière consiste à placer la goutte sur un plan dont on peut régler l'inclinaison. Le but de la manœuvre est d'incliner progressivement le plan, jusqu'à atteindre l'angle de glissement de la goutte, à savoir l'inclinaison à partir de laquelle la goutte va "décrocher"

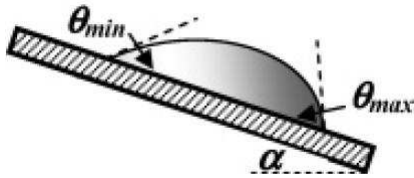


Figure II.2 - Représentation des angles $\theta_{\max}$ (avancée) et $\theta_{\min}$ (recul) sur un plan incliné d'un angle α - in (Krasovitski & Marmur, 2005)

(Quéré *et al.*, 1998). La force de tension solide-liquide γ_{SL} est dans cette situation assimilable à une force de frottement qui maintient la goutte statique sur le plan incliné. Mais le poids de la goutte fait augmenter la force de tension liquide-

air γ_{LA} , ce qui altère la forme de la goutte et finit par causer un déséquilibre : la goutte glisse vers le bas, emportée par les forces γ_{LA} et γ_{SA} . A cet instant, l'angle à l'avant de la goutte est appelé

angle de contact d'avancée (*advancing contact angle*), et celui à l'arrière est appelé angle de contact de recul (*receding contact angle*) (Figure II.2). Mais cette méthode a des limites liées au volume, menant à des erreurs d'estimation pouvant être importantes (Krasovitski & Marmur, 2005).

La seconde méthode, celle du **gonflage/aspiration de la goutte**, s'effectue en disposant une goutte sur le substrat à l'horizontale, et consiste à déplacer la ligne triple de contact en gonflant ou aspirant une goutte à l'aide d'une seringue (Figure II.3) (de Gennes *et al.*, 2005).

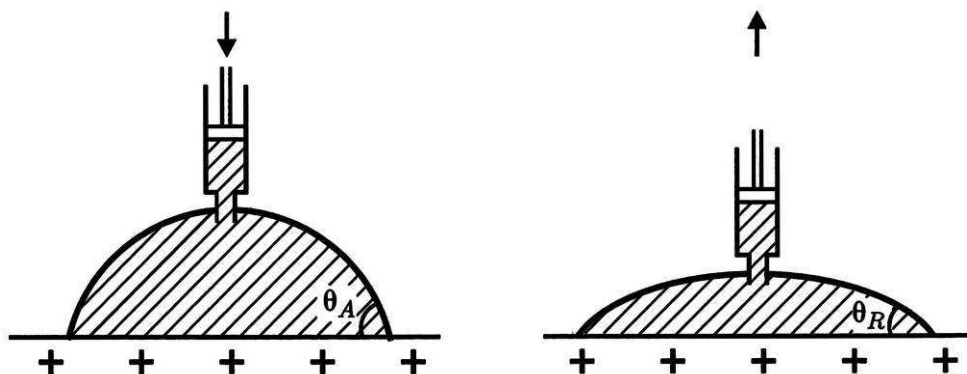


Figure II.3 - Illustration de la méthode de gonflage (gauche) et d'aspiration (droite) d'une goutte - in (de Gennes, 2005)

La goutte va tout d'abord gonfler à surface de contact constante : l'angle de contact va augmenter. Ici, c'est le débit de l'eau apportée qui déséquilibre les forces de tension interfaciales, la tension γ_{LA} augmente et se déplace, jusqu'à prendre l'avantage sur la tension γ_{SL} , et faire avancer la ligne triple à angle de contact constant: il s'agit de l'angle de contact d'avancée θ_a , et une fois atteint c'est donc la surface de contact de la goutte qui va s'étendre.. La méthode d'aspiration est l'inverse : on aspire la goutte à l'aide d'une seringue, son angle de contact va diminuer jusqu'à atteindre l'angle de contact de recul θ_r , et sa surface de contact va alors se contracter : dans ce cas, c'est γ_{SL} qui l'emporte sur γ_{LA} . Nous utiliserons cette méthode de mesure qui semble particulièrement fiable et bien adaptée à l'étude de mouillabilité de surfaces hétérogènes.

I.3. Mouillabilité et hétérogénéités de surface

Une surface hétérogène est une surface non idéale qui présente une grande variabilité de valeurs d'angles de contact à sa surface. On décrit l'hétérogénéité de surface en définissant l'hystérésis (hystérèse) de l'angle de contact. Notée $\Delta\theta$ de l'angle de contact, elle est en fait définie comme l'intervalle de valeurs d'angles compris entre l'angle de recul et l'angle d'avancée : $\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$. (Quéré *et al.*, 1998). Ainsi, tous les angles de contact statiques que peuvent prendre des gouttes d'un même liquide sur un support donné seront toujours compris dans cet intervalle : $\theta_e \in [\theta_r ; \theta_a]$.

Au-dessus d'une taille de $0.5\mu\text{m}$, les irrégularités de surface (rayures, bosses, etc.) engendrent des phénomènes de saut de goutte au gonflage, et par la même une hystérésis d'angle de contact (Oliver *et al.*, 1980). L'hystérésis augmentera ainsi si la taille caractéristique des gouttes est plus grande que celle des aspérités (Dettre & Johnson, 1964) : dans un cas hydrophile, la goutte va avoir tendance à suivre la topographie, ou à s'étaler dans les interstices de la texture du support (Bico *et al.*, 2002). La structure chimique des surfaces peut également introduire une variabilité dans l'hystérésis. De la même manière, si des impuretés recouvrent la surface du substrat, la mouillabilité peut être altérée (Bhushan & Jung, 2008; Burton & Bhushan, 2006).

Dans le cas contraire d'une surface solide idéalement homogène (pas d'irrégularités de surface de dimension supérieure à $0.5\mu\text{m}$), l'angle de contact a une valeur constante, ce qui induit une hystérésis nulle (Pétrissans, 1996).

L'hystérésis est donc une fonction de l'hétérogénéité de la surface du solide, constituée de deux composantes :

- (i) l'hétérogénéité **géométrique** de la surface;
- (ii) l'hétérogénéité **chimique** de la surface *i.e* impuretés et/ou structure moléculaire.

Mais il est difficile, voire impossible, de parvenir à quantifier le lien entre surface hétérogène et hystérésis. Cette corrélation reste donc purement qualitative, mais reste un excellent indicateur de l'état de surface du substrat.

II. Description du système expérimental

Nous venons de voir quelles méthodes existaient pour mesurer les angles de contact statiques et dynamiques sur un substrat solide. La technique la plus adaptée à nos échantillons végétaux semble être la méthode de **prise de vue de profil de goutte**, en mettant en évidence les angles dynamiques par **gonflage ou aspiration des gouttes**. Nous avons donc mis en place un dispositif expérimental en vue d'effectuer ces mesures.

II.1. Matériaux à l'étude

Différents types de matériaux ont été sélectionnés : un matériau de référence dont la mouillabilité est connue pour valider la méthode de mesure, des supports végétaux pour documenter leur mouillabilité, et enfin un capteur de durée d'humectation (cf. Synthèse Bibliographique §II.4.b.iii) pour valider notre modèle d'évaporation de goutte en prenant en compte la forme de celle-ci.

II.1.a. Matériau de référence : le Parafilm 'M'

Par nécessité de valider notre méthode sur un support dont la mouillabilité est connu, nous avons choisi pour notre étude un support de référence : le Parafilm 'M' (Pechiney Plastic Packaging Company, *Chicago, Illinois, USA*) (Figure II.4). Le Parafilm "M" présente la particularité d'être plutôt hydrophobe, et possède une surface relativement lisse, ce qui garantit une mesure facile des angles de contact.

Ce matériau est bien documenté et sa mouillabilité a été mesurée par un grand nombre d'auteurs dans différentes conditions expérimentales (Rulison, 2007; Wang *et al.*, 2009) (Tableau II.1). Il a donc été possible de **valider notre méthode de mesure sur ce matériau** en comparant les valeurs d'angles publiées dans la littérature à nos propres mesures expérimentales.

Notre utilisation du Parafilm 'M' aura été double. En effet, ce matériau a également été employé pour des observations de durées d'évaporation de gouttes d'eau en conditions contrôlées, mais sans mesurer les angles de contact à sa surface (Leclerc *et al.*, 1985; Magarey, *et al.*, 2005a). Les angles de contact mesurés à sa surface nous ont donc permis de valider notre modèle d'évaporation par rapport à ces observations en tenant compte de la morphologie des gouttes (cf. Chapitres I & III).



Figure II.4 - Rouleau de Parafilm "M" et morceau de film découpé

Type d'angle de contact	Valeur (°)
Angle d'Avancée	110 (Birdi & Jeppesen, 1978; Dann, 1970) 111 (Wang <i>et al.</i> , 2009) 107 ± 2 (Dutschk <i>et al.</i> , 2003)
Angle Statique	104 (Magarey <i>et al.</i> , 2005a)
Angle de Recul	94 - 99 (Kamusewitz <i>et al.</i> , 1999)

Tableau II.1 – Valeurs d'angles de contact mesurés sur Parafilm 'M' issues de la littérature

II.1.b. Mesure de la mouillabilité des supports végétaux

Notre plante d'étude étant le pommier, nous avons principalement tourné nos mesures vers cette espèce.

Il existe une grande diversité morphologique au sein du règne végétal. Parmi les feuilles des arbres uniquement, de nombreuses formes, couleurs, aspects de surfaces se distinguent. Les travaux de Brewer et Smith ont montré que les valeurs des angles de contact formés par des gouttes d'eau sur les feuilles étaient très variables entre différentes rosacées subalpines et de montagne (Brewer & Smith, 1997). Ces plantes se développent sous un climat très spécifique, aussi il n'est pas possible de déterminer si cette variabilité est représentative de l'ensemble des plantes.

Dans le cadre de notre travail, nous cherchons à caractériser l'état de surface des feuilles de pommier afin de rendre compte au mieux de leurs propriétés évaporatives en lien avec les risques d'épidémie de tavelure. Ainsi, il est important de savoir s'il existe une variabilité entre espèces et au sein de la même espèce, auquel cas il serait nécessaire de mesurer la mouillabilité des feuilles de chaque variété.

De plus, un arbre est constitué d'un grand nombre de feuilles dont le développement n'est pas simultané. Dès lors, les âges de feuilles, et donc leurs propriétés physiques et physiologiques (comme par exemple la résistance ontogénique à la tavelure présentée au §II.3.c de la Synthèse Bibliographique), évoluent. Il est alors intéressant de déterminer si la mouillabilité évolue avec ces propriétés ontogéniques des feuilles.

Plusieurs travaux sur plantes sauvages explicitent que la mouillabilité peut changer de manière dramatique **au sein d'une même espèce** (Brewer *et al.*, 1991; Aryal & Neuner, 2010). Nous avons par conséquent mesuré les angles de contacts statiques et dynamiques sur plusieurs cultivars de pommier afin d'estimer une éventuelle variabilité intraspécifique (les tests statistiques ont été effectués avec le logiciel R) :

- Jubilé, qui est la variété que nous avons étudiée en verger (cf. expérimentations décrites au Chapitre IV), a par conséquent été le point de départ de notre étude. Jubilé est moyennement sensible à la tavelure;
- Golden Delicious, moyennement sensible à la tavelure;
- Fuji, très sensible à la tavelure;
- Ariane, résistante à la tavelure;
- Belle de Boskoop, peu sensible à la tavelure;
- Royal Gala, très sensible à la tavelure;
- Reine des Reinettes, peu sensible à la tavelure;
- Fille de l'Orient, variété de conservatoire dont on ne connaît pas la sensibilité à la tavelure (Giraud, 2010).

La sensibilité à la tavelure étant variable selon le cultivar considéré, nous avons étudié la relation entre mouillabilité des feuilles et sensibilité à la tavelure, pour voir s'il existait une corrélation entre ces deux paramètres.

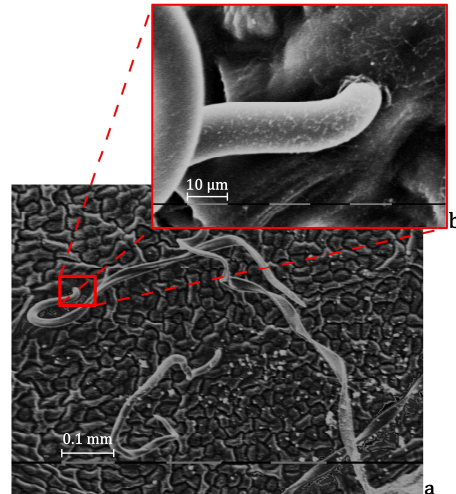
Nous avons également cherché à déterminer s'il existait une variabilité interspécifique entre trois espèces de rosacées fruitières domestiques : le Pommier *Malus domestica*, le Prunier *Prunus domestica italica* (Borkh.) Hegi. (Reine-Claude) et le Pêcher *Prunus persica* (L.) Batsch (RedHaven). Les angles de contact statiques et dynamiques sur ces trois espèces ont été mesurés puis une analyse statistique des différents résultats a été menée (à l'aide du logiciel R).

Dans le but de compléter la comparaison interspécifique, nous avons confronté ces données à des mesures de mouillabilité sur deux plantes de grande culture (blé et colza), sur une légumineuse (féverole), et sur feuille de lotus effectuées par Saint-Jean à l'EGC INRA de Grignon (Versailles, 78) (Saint-Jean, *communication personnelle*).

II.1.c) Etude de la variabilité ontogénique de la mouillabilité

Pour un cultivar donné, la sensibilité à la tavelure est variable au cours du développement des feuilles. Si l'on peut imputer cela à un effet purement biologique, le fort impact de la durée d'humectation laisse à croire qu'il pourrait exister un lien entre structure de la surface et âge de la feuille.

En effet, on peut remarquer par une observation visuelle que la surface d'une feuille jeune est très duveteuse, et devient de moins en moins "poilue" au fil de sa croissance. Nous avons confirmé l'existence de cette texture pubescente (liée à la présence de trichomes sur la surface des feuilles) par des observations au microscope électronique à balayage (microscope Philips SEM 505, Philips/FEI, *Eindhoven, NL*) (Figure II.5). Elle permet à la plante de modifier sa réflectivité (la couleur blanchâtre apportée par les trichomes modifie l'albédo de la surface de la feuille) mais également la couche limite et ainsi la durée d'évaporation de l'eau sur la feuille (Jones, 1983). De plus, l'observation au MEB de feuilles jeunes (âgées de 110 degrés-jours) et adultes (on a estimé le stade adulte de la feuille comme étant supérieur à 500 degrés-jours) a montré une grande différence de structure : les feuilles adultes ne semblent pas posséder de trichomes alors qu'on dénombre une moyenne de 2.5 trichomes par mm² sur feuille jeune (Figure II.6). De plus, la régularité de la surface varie avec l'âge, comme le montre la figure II.7 : l'espace intercellulaire de la cuticule est nettement plus creusé sur une feuille jeune que sur une feuille adulte.

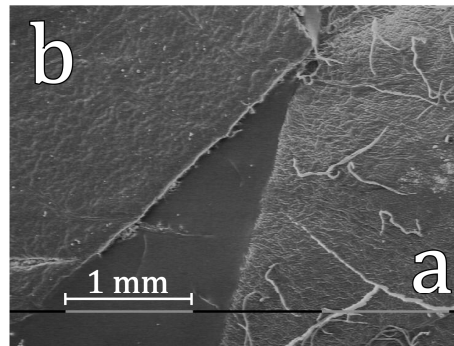


Trichomes à la surface d'une jeune feuille de Golden Delicious

a. Trichomes entiers

b. Point d'insertion du trichome

Figure II.5 - Trichomes observés au MEB

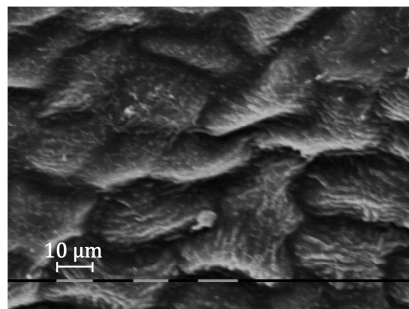


Comparaison de la densité de trichomes sur Golden Delicious

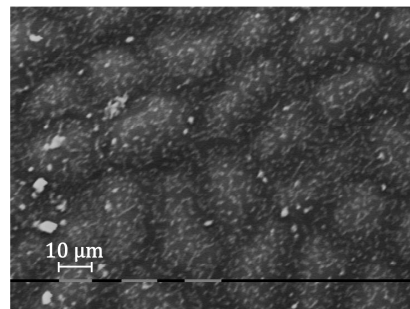
a. feuille jeune (110 degrés-jours)

b. feuille adulte (>500 degrés-jours)

Figure II.6 - Comparaison d'une feuille jeune et feuille adulte



Feuille jeune (110 degrés-jours)



Feuille adulte (>500 degrés-jours)

Clichés MEB de surfaces de feuilles Golden Delicious en conditions d'agrandissement, luminosité et contraste identiques

Figure II.7 - Comparaison de l'état de surface d'une feuille jeune et d'une feuille adulte

Pour mettre en évidence une éventuelle variabilité ontogénique de la mouillabilité des feuilles de pommier, nous avons sélectionné des feuilles à différents stades de croissance, du débourrement au stade adulte de feuilles de variété Golden Delicious (Mehri & Crabbé, 2002).

Ainsi, nous avons suivi trois pousses à partir du débourrement. L'âge des feuilles est compté en degrés-jours au-dessus d'un seuil thermique de 6°C : nous avons considéré que la feuille était à 0 degrés-jours de développement lorsque sa surface était entièrement dépliée. Les feuilles échantillons ont ainsi été prélevées à différents âges pour effectuer les mesures d'angles de contact (Tableau II.2).

Les mesures de mouillabilité sur feuilles jeunes se sont révélées particulièrement contraignantes, pour différentes raisons :

- (i) la faible surface du limbe foliaire ne permet pas d'effectuer beaucoup de mesures sur une même feuille;
- (ii) la feuille ne peut être séchée à l'aide d'un papier absorbant, ce qui arracherait les trichomes et introduirait un biais expérimental, il faut par conséquent laisser sécher la goutte naturellement;
- (iii) les jeunes feuilles se dégradent plus rapidement que le matériel adulte;
- (iv) la forte densité de trichomes complique la détermination des angles de contact (Figure II.8).

Il en résulte que de nombreuses prises de vues se sont avérées inexploitable, notamment pour les angles de contact statiques. N'ayant suivi que trois pousses, notre échantillonnage final a été relativement faible : une à deux feuilles par tranche d'âge seulement.

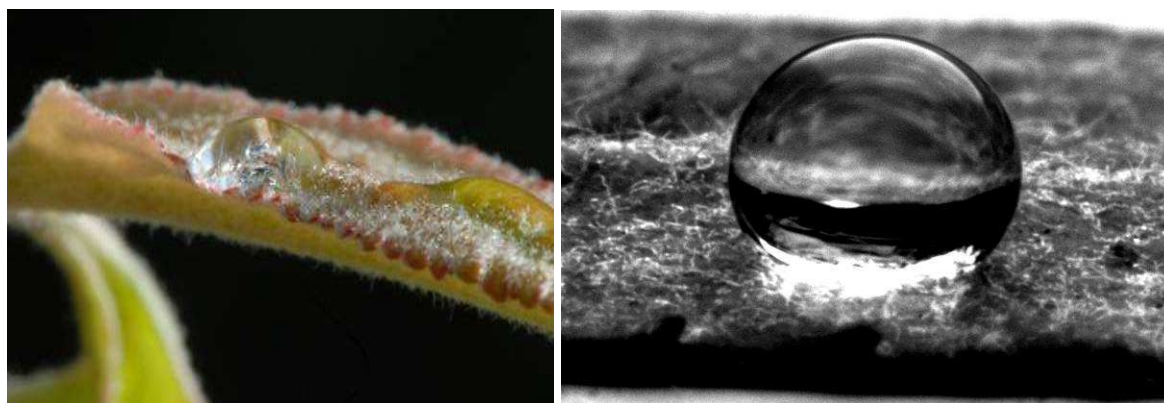


Figure II.8 - Gouttes d'eau sur une feuille très jeune et pubescente sur la pousse (gauche, photo : P. Walser, 2011) et sur le banc de mesures (droite)

Age de la feuille (degrés-jours)	82	108	111
Photo			
Age de la feuille (degrés-jours)	116	236	311
Photo			
Age de la feuille (degrés-jours)	338	352	452
Photo			

**Tableau II.2 - Photographies des feuilles prélevées à différents âges de développement
(exprimés en degrés-jours)**

II.1.d. Mesure de la mouillabilité des capteurs de durée d'humectation

Les capteurs de durée d'humectation disposés au verger (cf. Chapitre IV §I) ne sont pas représentatifs de la surface des feuilles (Figure II.9). L'objectif principal de leur utilisation en agronomie est de mesurer efficacement la durée d'humectation ayant lieu dans le verger pour estimer les risques de maladie. La restitution des propriétés **radiatives** a jusqu'à présent été privilégiée dans le cadre de cette mesure, ainsi certains capteurs sont recouverts d'une couche de peinture rapprochant leurs propriétés radiatives de celle d'une surface végétale. Mais cela est au détriment des propriétés de **mouillabilité** de la surface, qui est plus hydrophile qu'une véritable feuille.

Dès lors, si l'on veut valider notre modèle d'évaporation à l'aide de données mesurées au verger (ce point sera présenté au §III du chapitre III), il nous faudra paramétrer celui-ci non pas avec les angles de contact des feuilles de pommier, mais avec les angles de contact propres aux interactions entre l'eau et la surface des capteurs de durée d'humectation qui fournissent la durée d'évaporation en conditions naturelles.

C'est pourquoi nous avons effectué des analyses de mouillabilité sur ce support en plus des feuilles de pommier.



Figure II.9 - Goutte d'eau sur un capteur de durée d'humectation

II.2. Matériel de prise de vues

Pour obtenir des images optimales en termes d'analyse d'image, il faut un matériel de prise de vues adapté, ainsi qu'un dispositif d'éclairage et de préparation des gouttes.

Nous avons eu à notre disposition une caméra numérique rapide *pco. 1600 camera* (PCO AG, Kelheim, Germany) équipée d'un capteur CCD noir et blanc refroidi de 14 bits, produisant des images à une résolution de 1600*1200 pixels (Figure II.10). Cette caméra dispose d'une mémoire vive interne assurant un enregistrement des images à un débit de 160Mb.s⁻¹. Elle est reliée à un PC par une interface haut débit IEEE1394 "firewire". Ces caractéristiques permettent d'obtenir des images à une résolution permettant une analyse précise, sans perte de données liées à une surcharge de mémoire.



Figure II.10 - Caméra rapide *pco. 1600 camera* (droite) et son alimentation (gauche)

La caméra est montée sur un sabot mobile en un axe (Manfrotto 454), lui-même vissé sur un trépied (Manfrotto 058B) doté de 3 frictions et niveaux à bulle (Manfrotto 229) pour garantir l'horizontalité du dispositif. L'axe du sabot mobile a été placé perpendiculairement à la face d'image, ce qui permet de régler aisément l'éloignement de la caméra aux gouttes.

Les gouttes à photographier sont de petites tailles. Il est donc nécessaire d'utiliser une optique macro.

La caméra a par conséquent été équipée d'un objectif Sigma EX DG Macro 105mm f/2.8, augmenté par deux bagues allonges de 21mm et 31mm, qui permettent de diminuer la distance de mise au point minimum de l'objectif (Figure II.11). La monture de base de cet objectif étant dédiée aux appareils de marque Nikon, il a fallu installer un adaptateur sur la caméra, ce qui prive l'objectif de sa fonction autofocus (mise au point

automatique) et impose une mise au point manuelle. Pour favoriser une profondeur de champ optimale, la focale de l'objectif a été "fermée" à 1/22.



Figure II.11 - Objectif macro 105mm (gauche) et bagues-allonges 21+31mm sur un adaptateur d'optique (droite)

Cela impose soit des durées d'exposition longues, soit un fort éclairage. Le suivi dynamique des gouttelettes implique la nécessité d'une exposition rapide (inférieure à 200ms), il a donc fallu trouver un moyen d'éclairer fortement nos gouttelettes. Pour éviter les reflets, il a été décidé de photographier les gouttes à contre-jour, afin de déterminer au mieux leur silhouette.

Pour ce faire, nous avons utilisé une source halogène Schott KL 1500 LCD à pleine puissance (3300K), sur laquelle nous avons adapté un panneau de rétro-éclairage Fostec PANELite® A23020 (Fostec Fiberoptic Illumination, *McHenry, Illinois, USA*), qui consiste en un assemblage à plat de 40 fibres optiques (Figure II.12). Disposé à l'arrière de la goutte, nous avons été en mesure de compenser la contrainte de la fermeture du diaphragme de l'objectif macro.



Figure II.12 - Source halogène (haut) et panneau de rétro-éclairage (bas)

Si cette méthode d'éclairage s'est avérée très satisfaisante sur des supports translucides comme le Parafilm 'M' ou le verre, les prises de vue sur support végétal ont montré des limites, dans le sens où le contraste entre la feuille et la goutte était insuffisant à l'analyse d'image. Nous avons donc ajouté un cache sur le panneau de rétro-éclairage, qui a pour effet de réduire l'éclairage à une fine bande de lumière. Le cache a été fabriqué avec du papier d'aluminium, matériau choisi pour son opacité et sa malléabilité permettant de modifier simplement la zone obstruée du panneau d'éclairage.

II.3. Dispositif de contrôle des gouttes

Pour les mesures d'angles de contact dynamiques par la **méthode de gonflage/aspiration des gouttes**, deux contraintes se présentaient à nous. Il nous fallait :

- (i) une aiguille de seringue pour gonfler ou aspirer la goutte, d'un diamètre suffisamment petit pour ne pas fausser les mesures de manière significative, par effet de capillarité entre la gouttelette et l'aiguille ;
- (ii) un débit d'eau à la sortie de l'aiguille qui soit constant, pour que notre goutte gonfle ou se fasse aspirer à une vitesse suffisamment rapide pour éviter qu'elle ne se mette à l'équilibre, et suffisamment lente pour qu'une vitesse de 5 images.s⁻¹ sur la caméra nous assure des images nettes.

Le choix d'une aiguille très fine (diamètre 0.3mm, soit 30G), et d'une cuve d'eau sous pression ont permis de résoudre ces problèmes.

On injecte dans un réservoir de l'eau ultra-pure (18.2 $\mu\text{S.cm}^{-1}$). Un système de pompe à pied reliée à la cuve par des capillaires LUER permet de mettre celle-ci sous pression : l'air emplit le reste du réservoir, et l'eau étant incompressible, l'ensemble est sous pression. Un embout LUER à la sortie, relié à notre aiguille, nous permet d'assurer un débit constant à l'eau ultra-pure, sans bulles d'air. Cependant, même à une faible pression, le débit à la sortie de la seringue restait trop important pour nos gouttes. Nous avons donc ajouté une pince de Mohr sur le capillaire entre la cuve et l'aiguille. Le débit est ainsi régulé et contrôlé très simplement (Figure II.13).

Ce dispositif s'est montré très satisfaisant pour les mesures d'angles de contacts d'avancée (gonflage de la goutte), mais la manœuvre pour inverser le processus et provoquer un vide d'air dans la cuve aspirant la goutte s'est avérée longue et fastidieuse. Nous avons donc opté pour une autre méthode pour mesurer les angles de contact de recul : **le vide d'air dans une seringue**.

L'aiguille reliée non plus à la cuve sous pression mais à une seringue vide, on produit un vide dans la seringue, qui entraîne l'aspiration de la goutte lorsque la pince de Mohr est relâchée. Ainsi, la goutte est aspirée à un débit quasi-constant.

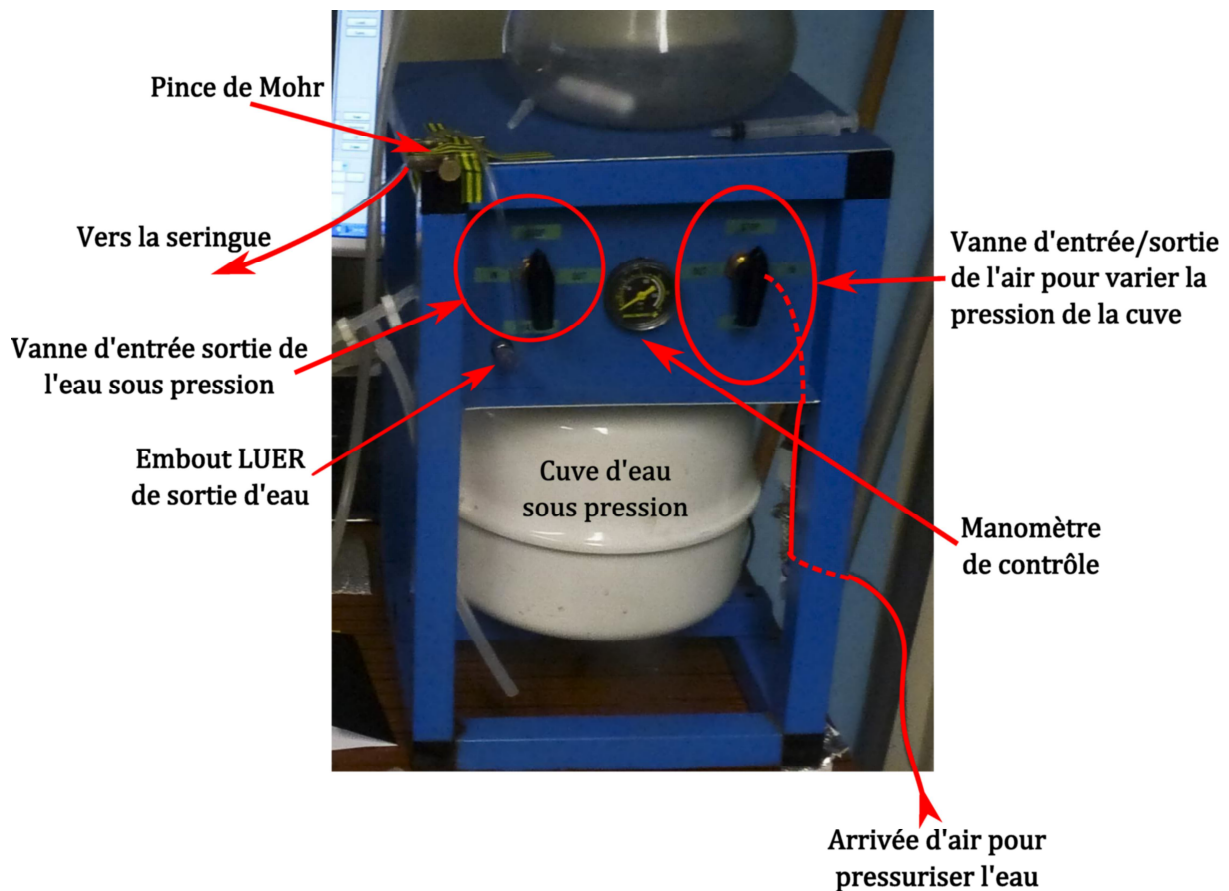


Figure II.13 – Dispositif de contrôle du débit de l'eau

Les matériaux dont la mouillabilité est étudiée sont fixés à l'aide de ruban adhésif double face sur un plateau élévateur à croisillons, évitant ainsi d'avoir à déplacer la seringue pour la mettre en contact avec les gouttes

Les angles de contact statiques étant compris entre l'angle de recul et l'angle d'avancée (Equation II.1), l'amplitude de l'hystérésis est représentative de la variabilité des valeurs d'angle de contact statique.

$$\theta_e \in [\theta_r; \theta_a] \quad \text{II.1}$$

Sachant que l'hétérogénéité de la surface de nos matériaux peut être grande, notamment sur feuilles, nous sommes partis de l'hypothèse que l'hystérésis serait grande, et avons établi deux modes de dépôt de goutte pour mesurer les angles de contact statiques :

- (i) un dépôt de la goutte "à même" le support : la goutte est déposée délicatement, on appellera les angles mesurés par ce procédé "**angles de contact statiques déposés**";
- (ii) un "lâché" de goutte : à une hauteur d'environ 10cm au dessus du support, on parlera alors pour les angles d'"**angles de contact statiques lâchés**".

Ces deux méthodes peuvent être vues comme une approximation de la nucléation de la rosée dans le cas (i), et comme une approximation du comportement d'une goutte de pluie dans le cas (ii).

Pour contrôler le volume des gouttes lors de la mesure des angles de contact statiques, nous avons utilisé des propipettes eppendorf 2-20µL.

II.4. Acquisition des images

La gestion de la caméra s'effectue à l'aide du plug-in *Micromanager* (Vale Lab, 2009) du logiciel libre d'analyse d'image *ImageJ* (Rasband, 2010). *MicroManager* gère le pilotage de la caméra, son exposition et son déclenchement.

Un protocole de traitement de l'image a été établi pour s'affranchir des biais expérimentaux liés à de trop grandes différences dans la manière de photographier. Le dispositif d'éclairage étant constant, la durée d'exposition se doit de l'être également. Elle a ainsi été fixée à 150ms pour les mesure sur parafilm "M", et à 200ms pour les mesures sur feuilles de pommier.

Enfin, les mesures dynamiques d'angles de contact se font à une fréquence de 5.88Hz (une image toutes les 170ms).

II.5. Analyse des images

Une fois les prises de vues effectuées, une sélection des images exploitables pour la mesure des angles de contact dynamiques (avancée et recul) est nécessaire. Cette sélection s'effectue selon les critères théoriques définissant un angle d'avancée, *i.e.* l'angle maximal que prend le point de contact de la ligne triple lorsque la surface de contact de la goutte s'étend au gonflage, et ceux définissant un angle de recul, *i.e.* l'angle minimal que prend le point de contact de la ligne triple lorsque la surface de contact de la goutte se rétracte à l'aspiration (cf. §I.1).

Si les conditions de gonflage ou d'aspiration sont remplies, et que les angles à l'image sont nets, la prise de vue est sélectionnée, et peut être analysée.

Un réglage de la luminosité et du contraste de l'image est à appliquer à toutes les images pour débarrasser l'image des détails pouvant parasiter la mesure d'angle. Ce réglage peut causer une "perte de pixels" en bordure de goutte. Toutefois, cette perte est très majoritairement homogène et n'affecte par conséquent pas l'angle de contact observé. La même fenêtre de réglage de la luminosité et du contraste est appliquée à toutes les images ayant été prises dans des conditions d'éclairage identiques.

Chaque mesure d'angle se fait selon l'hypothèse que le support, donc la ligne de contact entre le support et la goutte, est parfaitement horizontal (vérification expérimentale à l'aide d'une nivelle à bulles). Ainsi, si l'image photographiée présente une inclinaison, il faut la corriger. Cela s'effectue en traçant une droite reliant les deux points de contact entre la goutte et son support, et en mesurant à l'aide de la fonction mesure du logiciel, l'angle d'inclinaison de cette droite. Une rotation d'image de la valeur de cet angle corrige donc l'éventuel défaut d'inclinaison (Figure II.14).

ImageJ dispose d'un outil de mesure d'angle direct: un point de départ fixe le premier côté de l'angle, un second point détermine le bout de l'angle, et un troisième le second côté de l'angle (Figure II.15a).

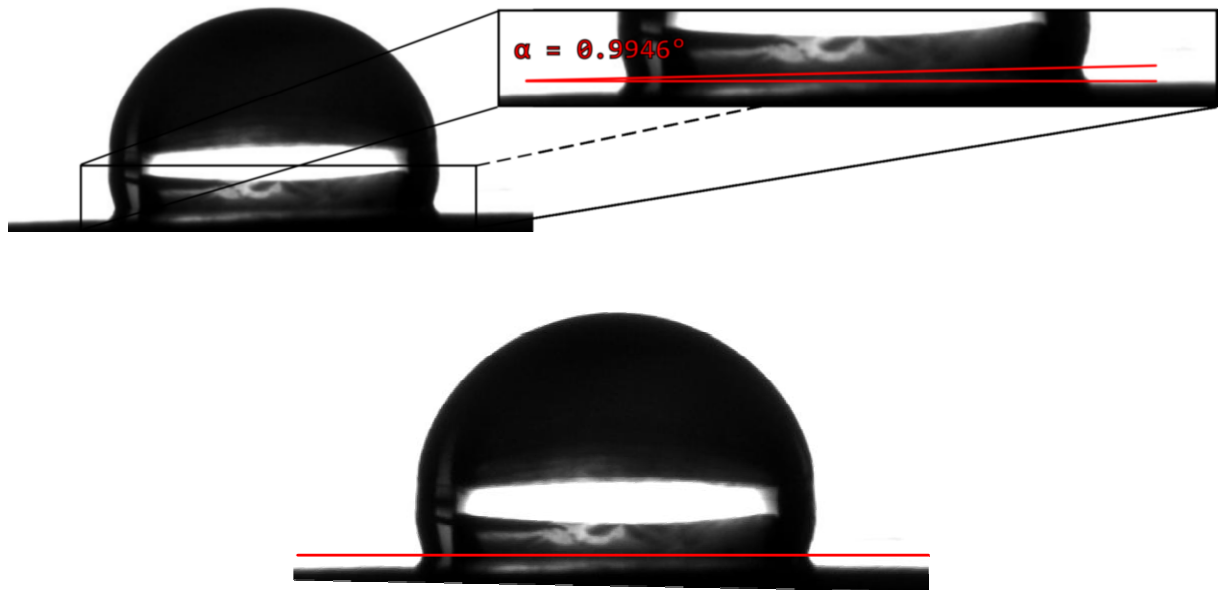


Figure II.14 – Illustration de la correction d'angle d'inclinaison de la goutte; en haut: la goutte présente une inclinaison d'un angle α mesurée grâce aux fonctions du logiciel imagej; en bas: l'image corrigée après rotation de la valeur de l'angle mesuré.

La mesure de l'angle de contact consiste à placer la base de l'outil sur la ligne de contact, et à placer la ligne de mesure de l'angle tangentielllement à la goutte. Pour minimiser l'incertitude liée à la résolution de l'image, on effectue un fort zoom sur l'image et on fait passer au mieux la ligne de mesure de l'angle sur les pixels noirs. La figure II.15b montre un tracé de l'angle mesuré, qui suit au mieux l'inclinaison de la prise de vue.

Cette méthode permet d'avoir une **mesure des angles de contact offrant une précision de l'ordre de 0.5°**, ce qui est négligeable devant l'incertitude de la détermination expérimentale des angles qui est de l'ordre de 5 à 10°.

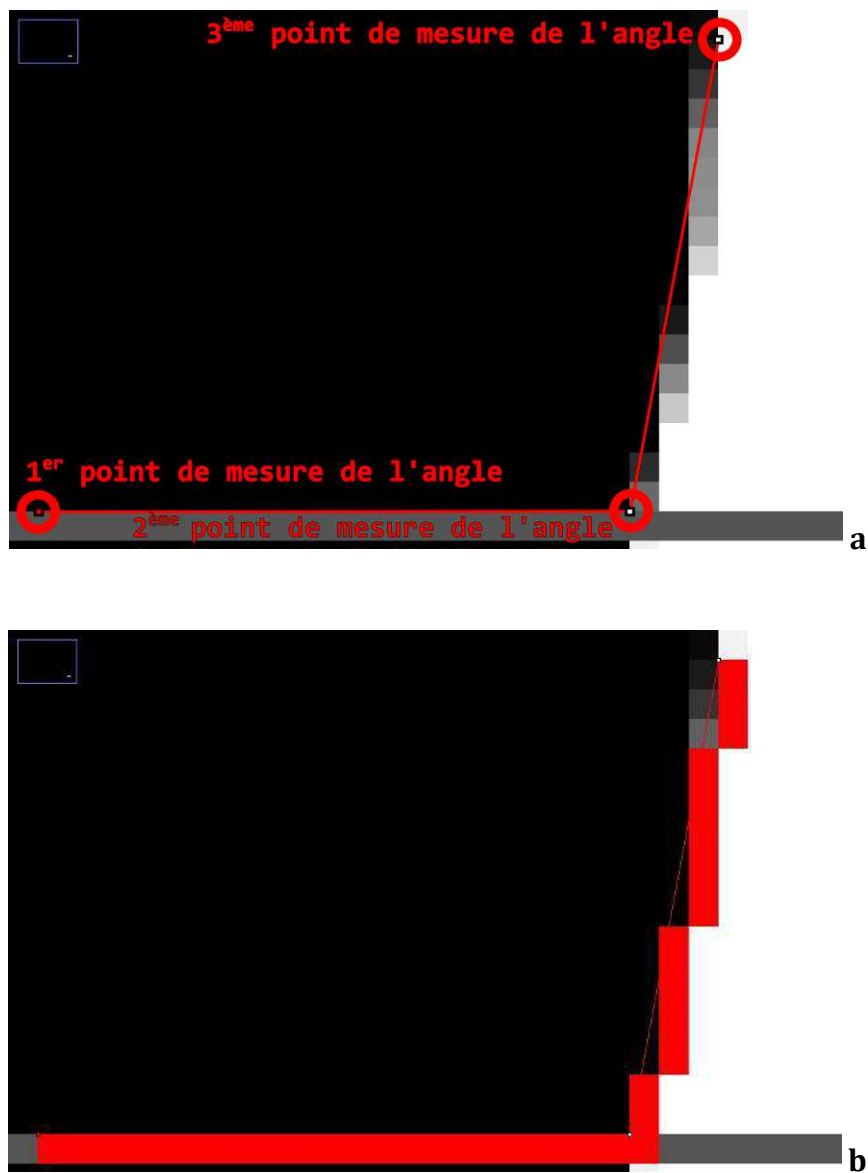


Figure II.15 – a) Détermination de l'angle de contact à l'aide de 3 points de mesure; b) Tracé de l'angle de contact illustrant l'équivalence entre la mesure et les pixels de l'image d'origine

III. RESULTATS & DISCUSSIONS

III.1. Validation de la méthode à l'aide d'un support de référence : le Parafilm "M"

Pour évaluer la taille nécessaire à la représentativité des échantillons, un grand nombre d'angles de contact statiques ont été mesurés dans un premier temps,. Une comparaison entre deux séries de mesures de 560 et 45 angles de contact ont été comparées (Figure II.16). Les indicateurs statistiques des deux populations laissent apparaître qu'un échantillonnage de l'ordre de 45 mesures permet d'obtenir une valeur satisfaisante (Tableau II.3). Cette observation se voit confirmée par une étude de mouillabilité sur végétaux, préconisant 25 mesures d'angles de contact (5 feuilles avec 5 mesures par feuille) par type d'angle et par matériau (Brewer *et al.*, 1991). L'ensemble des échantillons aura par la suite une taille variant entre 25 et 100 angles mesurés, en fonction des difficultés rencontrées dans la mesure des angles (Figure II.17).

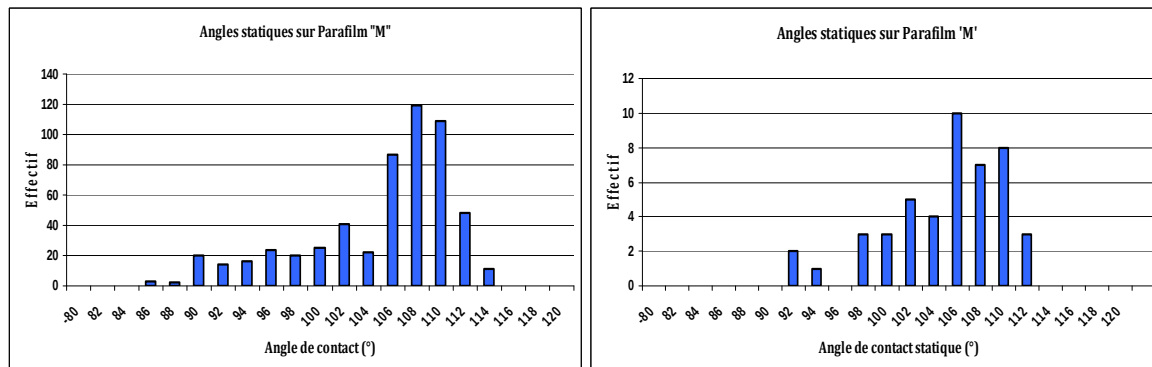


Figure II.16 - Tracés de la dispersion des angles de contact statiques sur Parafilm 'M' pour 560 mesures (gauche) et 45 mesures (droite)

Effectif Total	45	560
Moyenne	104.0	104.1
Médiane	105.3	106.2
Mode	108	108
Ecart-type	4.89	6.16

Tableau II.3 – Indicateurs statistiques (données en °) sur les populations de données pour 45 et 560 angles mesurés

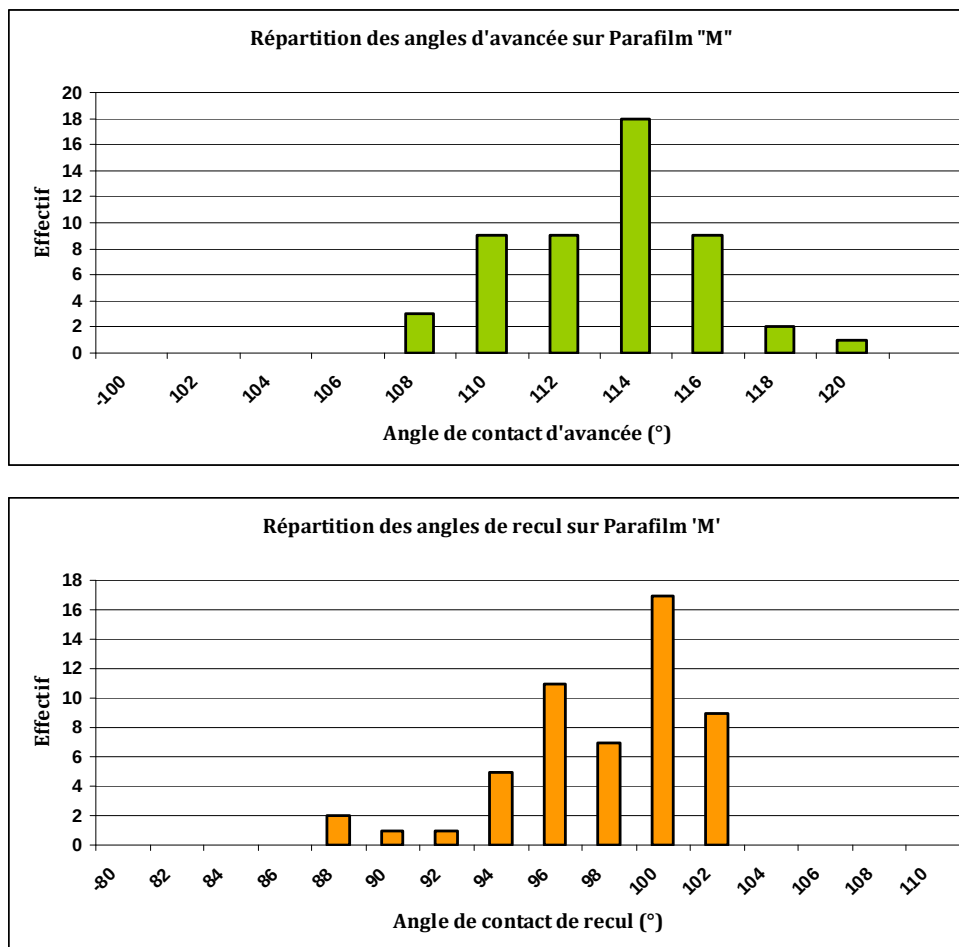


Figure II.17 – Répartition des angles dynamiques d'avancée (haut) et de recul (bas) sur Parafilm 'M' pour 51 et 53 angles mesurés respectivement

Valeur	Angle Statique θ_e	Angle d'Avancée θ_a	Angle de Recul θ_r	Hystérésis $\Delta\theta$
Moyenne	104.1 ± 5.8	112.3 ± 2.6	96.8 ± 3.4	15.2 ± 6.0
Minimum	84.0	107.1	86.0	5.8
Maximum	114.0	118.2	101.3	32.2

Tableau II.4 - Mesures d'angles de contact (exprimés en °) sur Parafilm 'M'

Une confrontation de nos mesures avec des valeurs expérimentales trouvées dans la littérature a permis de valider notre dispositif de mise en place des gouttes et d'analyse des angles de contact (Tableau II.1 & Tableau II.4).

Ce mode opératoire de mesure et d'analyse des angles de contact a donc pu être poursuivi pour étudier la mouillabilité des capteurs de durée d'humectation et des supports végétaux.

III.2. Mouillabilité des capteurs de durée d'humectation

Pour valider notre modèle d'évaporation sur les mesures de durée d'humectation observées au verger, nous avons tout d'abord mesuré les angles de contact sur nos capteurs de durée d'humectation.

La surface de ces capteurs est constituée d'un circuit constitué de franges d'or parallèles sur une plaque d'époxy. Cette couche d'or engendre une hétérogénéité de surface qui a un effet notoire sur la forme des gouttes, particulièrement lors de la mesure des angles d'avancée. En effet, la surface du capteur est plutôt hydrophile mais l'effet de bord des franges du circuit fait augmenter considérablement la valeur de l'angle de contact de la goutte (Figure II.18)

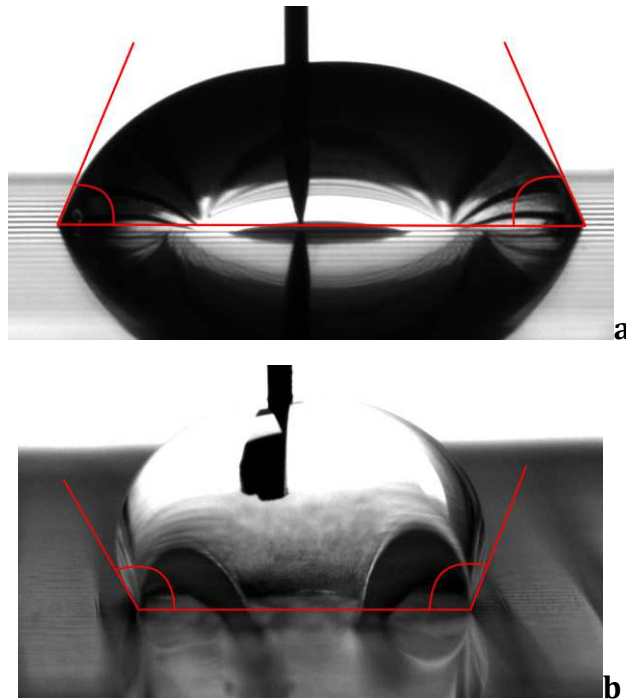


Figure II.18 – Prise de vue a) en travers (objectif perpendiculaire) des franges du circuit; b) dans le sens (objectif parallèle) des franges du circuit – la ligne de contact et les angles de contact sont indiqués en rouge

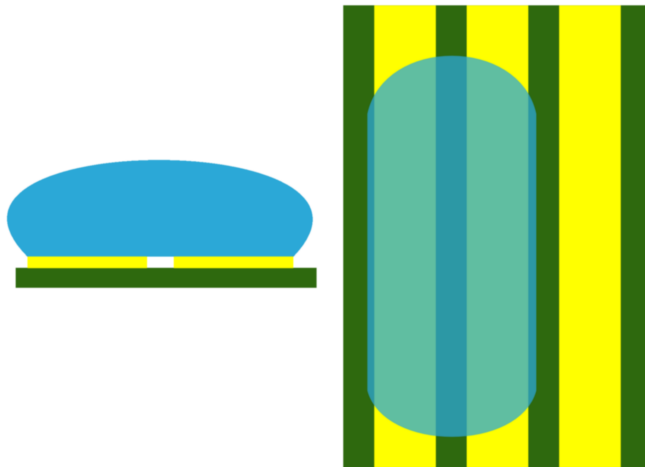


Figure II.19 – Aspect schématisé de la goutte "à cheval" sur les franges du circuit d'un capteur de durée d'humectation : face au circuit (gauche) et de dessus (droite)

En gonflage ou lorsqu'on la dépose, la goutte a tendance à prendre une forme oblongue qui n'est pas celle d'une calotte sphérique (Figure II.19).

Nous avons mesuré les angles dans le sens des franges et en travers des franges (Figure II.18) pour obtenir un ensemble exhaustif des données (Tableau II.5).

Angle Sens	Angle d'avancée	Angle de recul	Angle statique déposé	Angle statique lâché
Sens des franges	114 ± 5.5	15.5 ± 1.8	64.1 ± 3.4	49.7 ± 6.9
Travers	68.8 ± 4.8	13.0 ± 2.5	66.2 ± 7.2	40.8 ± 8.4

Tableau II.5 - Mesure des angles de contact (exprimés en °) sur capteur de durée d'humectation

Nous avons par la suite procédé à des observations de la surface des capteurs à après une pluie (gouttes à l'équilibre), pour vérifier si cette forme particulière de goutte se produit dans la réalité ou s'il s'agit d'un artefact lié au gonflage à la seringue.

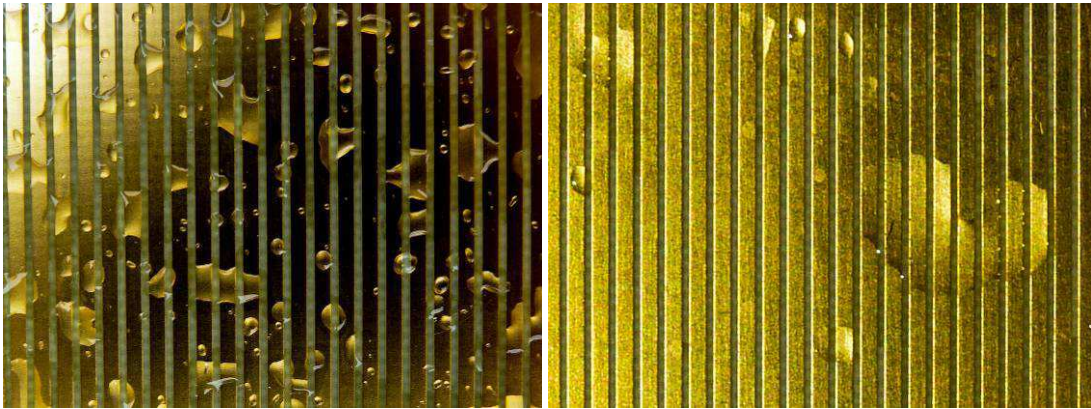


Figure II.20 – Gouttes de pluie sur capteurs de durée d'humectation

On remarque que pendant et après une pluie, l'aspect des gouttes sur les capteurs de durée d'humectation ne subit ces effets d'hétérogénéité du peigne que pour les gouttes les plus grosses, les petites gouttes gardant une forme proche de la calotte sphérique (Figure II.20). Sur les gouttes subissant ces effets, les parties "droites" parallèles aux franges du peigne représentent en moyenne 25% de la ligne triple. Nous considérerons par la suite uniquement les valeurs d'angles de contact mesurés dans la largeur du circuit du capteur de durée d'humectation (Figure II.18a; dernière ligne du Tableau II.5).

III.3. Mesures d'angles de contact sur supports végétaux

III.3.a. Variabilité inter-spécifique de la mouillabilité

La comparaison des valeurs d'angle de contact sur différents matériaux rend compte de la grande variabilité de la mouillabilité, notamment sur les végétaux (Tableau II.6). Les données sur céréale (blé), oléagineuse (colza), légumineuse (féverole) et sur lotus, qui est la plante modèle de la superhydrophobie ont été ajoutées à titre comparatif (les mesures ont été effectuées par Saint-Jean selon un protocole identique à celui décrit plus haut) (Saint-Jean, *communication personnelle*). Il apparaît des similitudes au sein de la même famille des *Rosaceae* à laquelle appartiennent le pommier, le prunier et le pêcher. En effet, en comparaison aux autres plantes, les valeurs des angles de contact et de l'hystérésis sont proches. Toutefois, une étude statistique est nécessaire pour vérifier si au moins une des espèces du groupe Pommier-Prunier-Pêcher a un angle de contact significativement différent des autres (tout test statistique sur les données de mouillabilité du blé, du colza, de la féverole et du lotus est impossible, car nous ne disposons que des moyennes de ces valeurs et non des échantillons complets de mesure).

Type	Parafilm "M"	Pommier	Prunier	Pêcher
Angle d'avancée	112.3 ± 2.6	80.6 ± 6.1	88.5 ± 7.9	76.6 ± 4.5
Angle de recul	96.8 ± 3.4	12.9 ± 4.6	25.3 ± 9.2	21.1 ± 5.4
Hystérésis	15.2 ± 6.0	68.2 ± 10.7	63.2 ± 17.1	55.5 ± 10.0
Angle statique dépôt	106.1 ± 5.0	71.8 ± 7.8	74.2 ± 8.8	67.2 ± 6.4
Angle statique lâché	101.2 ± 6.7	30 ± 7.4	38.4 ± 7.8	41.7 ± 7.4

Type	Blé ¹	Colza ¹	Féverole ¹	Lotus ¹
Angle d'avancée	147.6 ± 5.8	151.2 ± 4.0	74.2 ± 4.3	169.5 ± 2.7
Angle de recul	136.0 ± 13.4	136.9 ± 11.0	43.5 ± 6.2	153.2 ± 2.6
Hystérésis	11.6 ± 19.2	14.3 ± 15.0	30 ± 6.5	9.5 ± 4.5
Angle statique dépôt	141.8 ± 9.6	144 ± 7.5	61.0 ± 2.7	162.4 ± 2.6
Angle statique lâché				

¹ données mesurées par Saint-Jean (*communication personnelle*)

Tableau II.6 - Valeurs des angles de contact (exprimés en °) sur différents matériaux et espèces de végétaux (les précisions sont données par l'écart-type des valeurs, et par la somme des écart-types de l'angle de recul et de l'angle d'avancée pour la précision de l'hystérésis)

Les nuages de point tracés par espèce pour tous les types d'angles de contact (Figure II.21) font état d'une certaine variabilité entre les espèces, mais il est impossible de déterminer visuellement quelle est la signification de cette variabilité. La densité des nuages de points indique que les valeurs ne sont pas distribuées selon une loi normale, et un test des variances montre que le groupe d'échantillons n'est pas homogène en variances. **Nos échantillons ne remplissent donc pas les critères compatibles avec un test paramétrique.**

Ainsi, les tests statistiques à effectuer se doivent d'être des tests non paramétriques. Nous avons dans cette optique choisi d'évaluer entre elles nos données par le biais du **test de Kruskal-Wallis** (Kruskal & Wallis, 1952). Ce test prend pour hypothèse nulle l'égalité entre les médianes évaluées en rangeant les mesures sous forme de rang (on se libère ainsi de la contrainte d'une distribution des valeurs), et s'avère ainsi pertinent pour des échantillons dispersés comme peuvent l'être ceux issus de nos mesures. En fixant le seuil de signification $\alpha = 0.05$ (5%), le test doit donc fournir une probabilité supérieure à 0.05 pour qu'il n'y ait aucune différence significative entre les angles de contact pour les différentes variétés.

Pour tous les types d'angles de contact, l'hypothèse d'homogénéité est rejetée par le test de Kruskal-Wallis au seuil de signification de 5% ($p < 0.05$). Cela implique qu'au **moins**

une des espèces est significativement différente d'au moins une des deux autres en termes d'angles de contact.

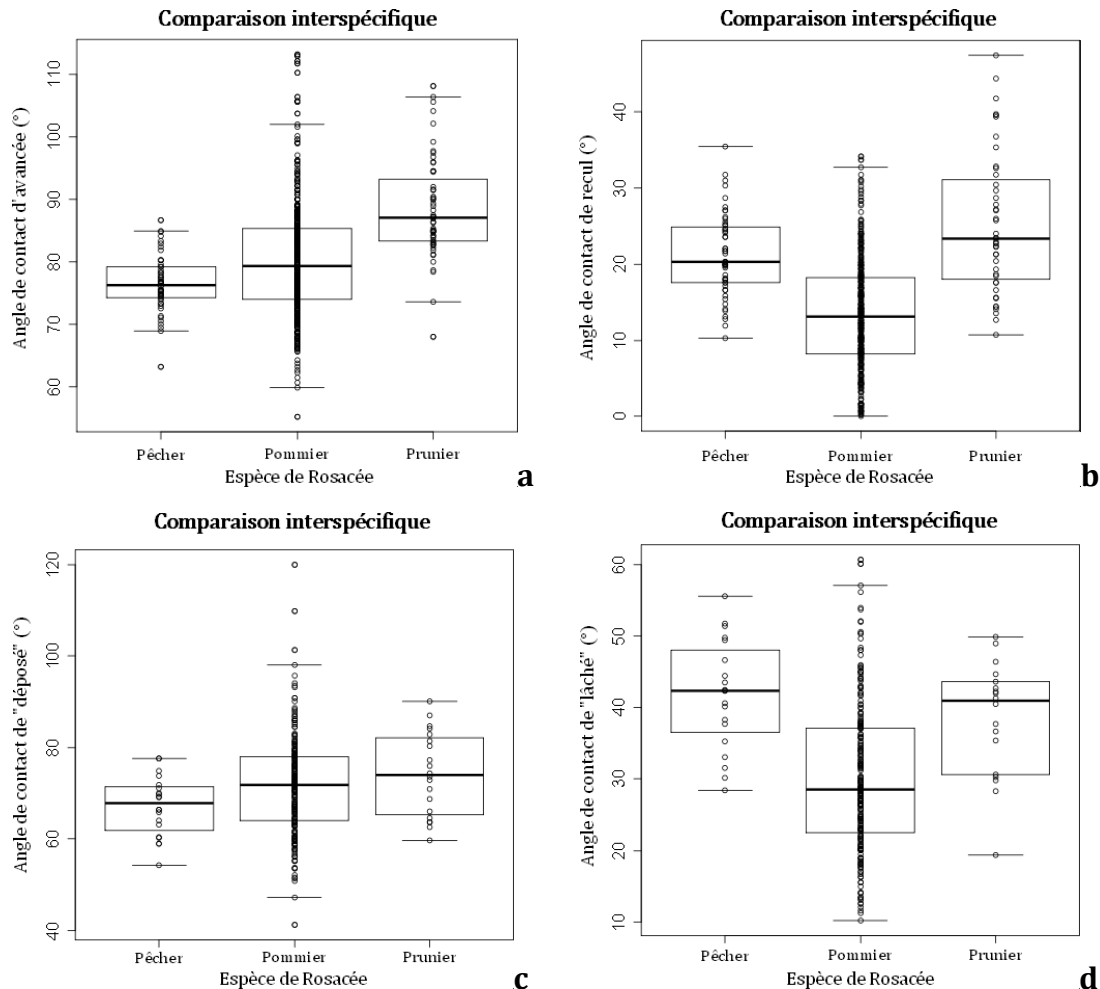


Figure II.21 - Nuages de points avec "boîtes à moustaches" par espèces (Pommier, Prunier, Pêcher) pour les angles : a) d'avancée; b) de recul; c) déposés; d) lâchés

Pour estimer l'homogénéité entre les groupes, un test *post-hoc* est nécessaire. Nous avons choisi d'effectuer un **test de Steel-Dwass** au seuil de signification 0.05 (Siegel & Castellan, 1989). En comparant deux à deux chaque groupe, ce test permet de déterminer quels groupes sont statistiquement homogènes (ou par opposition les groupes significativement différents entre eux).

Le test statistique de Steel-Dwass montre ici des différences significatives entre les différentes espèces pour tous les types d'angles. Cependant, ces différences varient en fonction du type d'angle de contact, ce qui ne permet pas de regrouper des espèces entre elles en termes de mouillabilité (Tableau II.7).

Groupes Statistiquement Homogènes			
Avancée	Recul	Déposé	Lâché
Prunier Pêcher Pommier	Prunier-Pêcher Pommier	Pommier-Prunier-Pêcher	Prunier-Pêcher Pommier

Tableau II.7 - Groupes homogènes entre espèces. Chaque ligne contient des espèces statistiquement homogènes pour le type d'angle de contact considéré

La proximité des valeurs d'hystérésis (Tableau II.6) permet tout au plus de conclure sur l'état très hétérogène des surfaces de fruitiers étudiés.

Il reste à savoir si la mouillabilité inter-variétale de feuilles de pommiers peut-être considérée comme statistiquement homogène, auquel cas une mesure générique de mouillabilité suffirait à alimenter un modèle d'évaporation sur feuille de pommier, quel que soit le cultivar.

III.3.b. Variabilité inter-variétale de la mouillabilité des feuilles de pommier

Les mesures d'angles de contact statiques et dynamiques ont été effectuées sur chaque cultivar de pommier.

Les angles de contact de recul, plus petits donc plus difficiles à déterminer à la prise de vue, ont été mesurés avec une précision de l'ordre de 5° à 10°. En dessous de 5°, et particulièrement sur un support végétal, un angle de contact est particulièrement contraignant à mesurer, notamment à cause de l'ordre de grandeur des hétérogénéités de surface de la feuille (nervures, trichomes, bosses liées aux irrégularités de surface et d'épaisseur) occultant les points de contact entre la goutte et la feuille, et de problèmes de contraste entre l'eau et la feuille (Figure II.22). Dès lors, confrontés à des angles de recul très petits (estimés inférieurs à 5°) sur le cultivar Royal Gala et dans une moindre mesure sur Fille de l'Orient, nous avons pris le parti d'attribuer aux angles de recul estimés très petits une valeur aléatoire (suivant une loi uniforme) comprise entre 0° et 5.

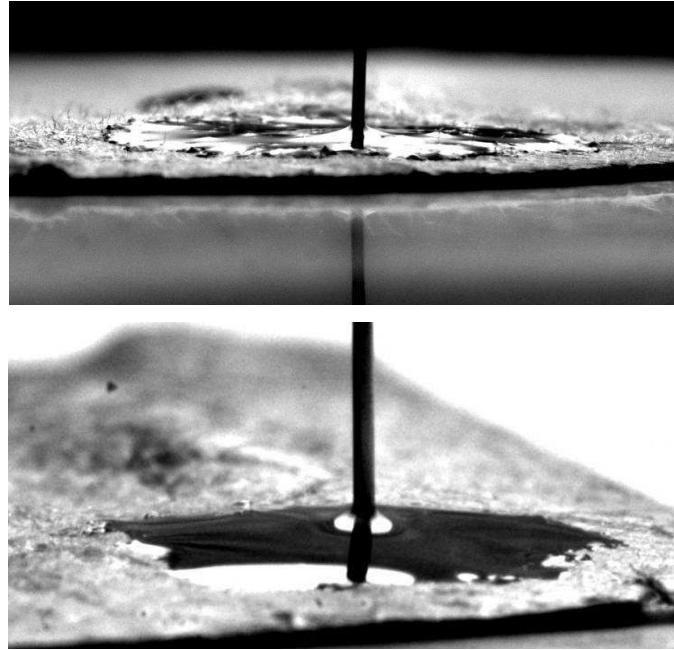


Figure II.22 - goutte d'eau sur feuille de pommier à l'aspiration (mesure de l'angle de recul) sur Royal Gala (haut) et Fille de l'Orient (bas)

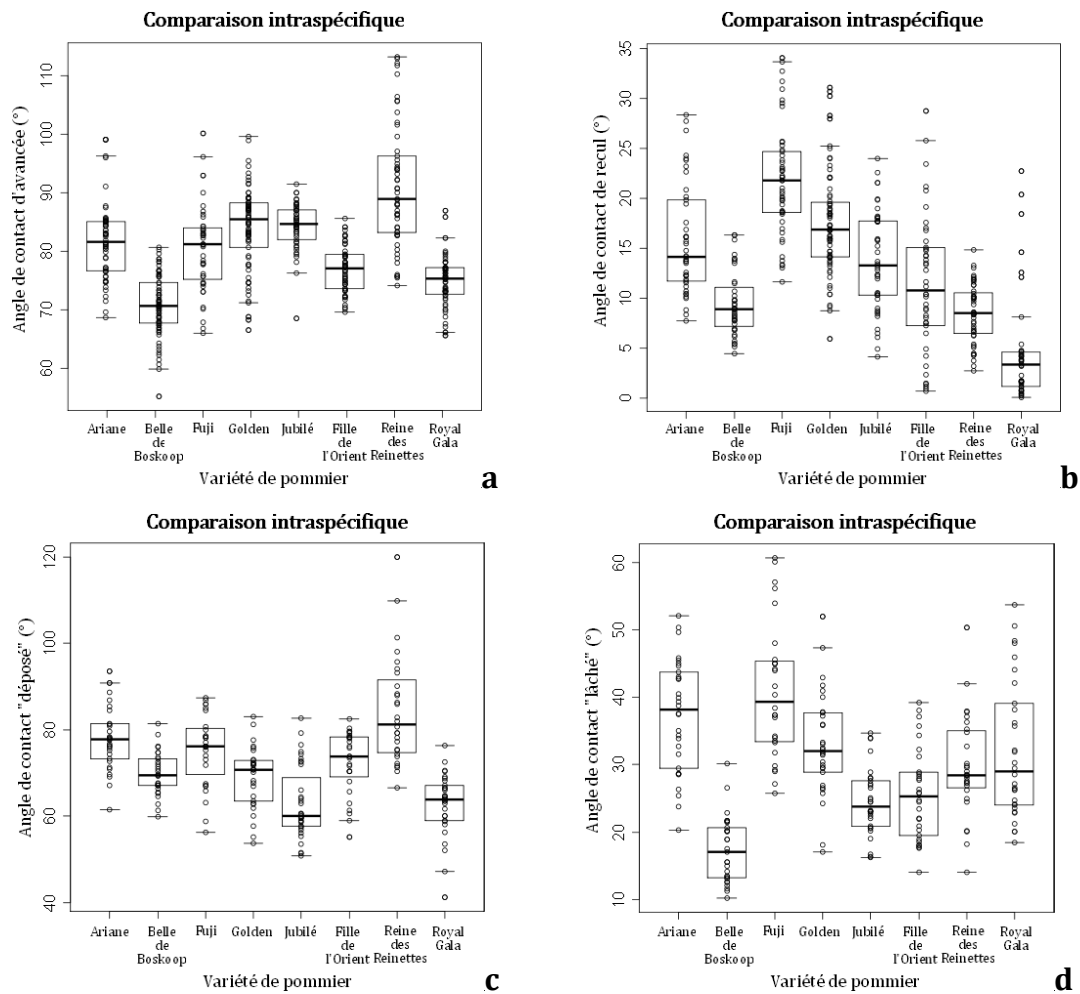
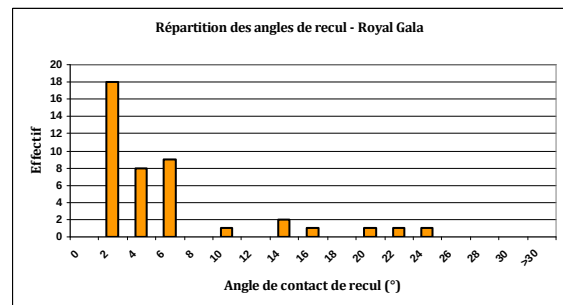
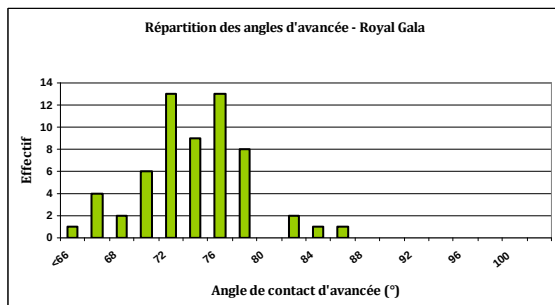
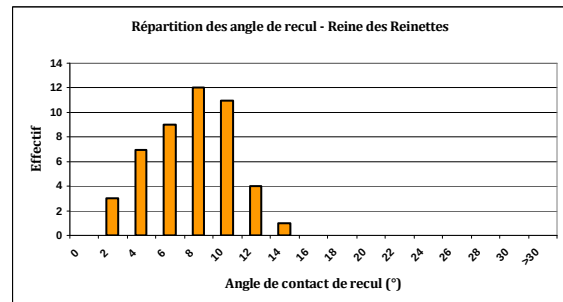
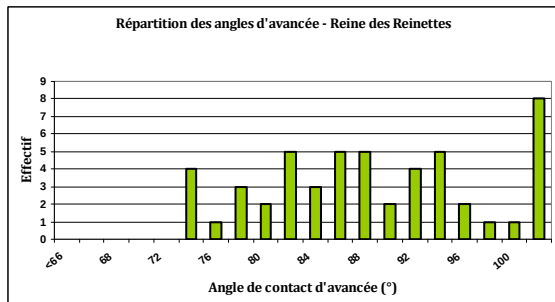
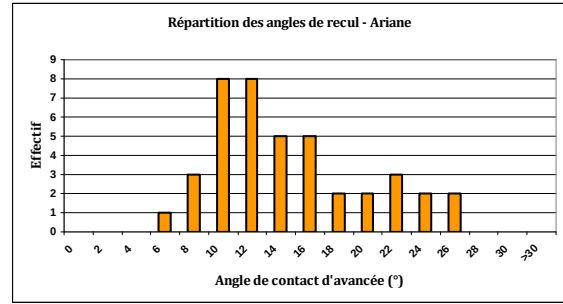
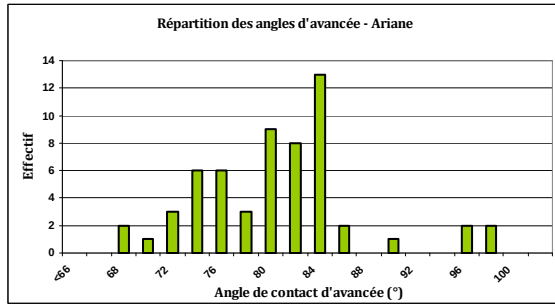
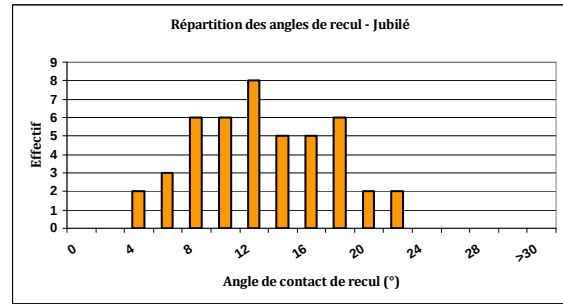
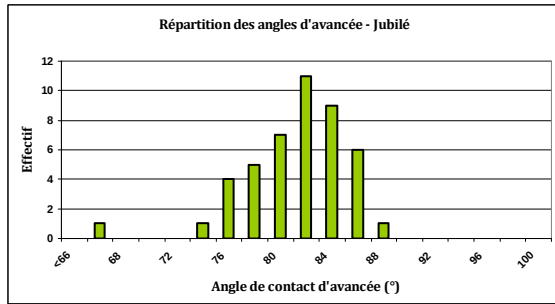


Figure II.23 - Nuages de points avec "boîtes à moustaches" par variété de pommier pour les angles : a) d'avancée; b) de recul; c) déposés; d) lâchés

Les représentations en nuages de points par variété font état de la grande dispersion des valeurs de mouillabilité au sein de l'espèce *Malus Domestica* (Figure II.23).

Il est de plus important de remarquer qu'une fois encore, nos valeurs répétées ne sont pas constamment distribuées selon une loi normale, ce indépendamment de la taille des échantillons (Figure II.24 & Figure II.25). Une analyse statistique nécessite à nouveau un test non paramétrique, sans quoi elle ne serait pas pertinente.



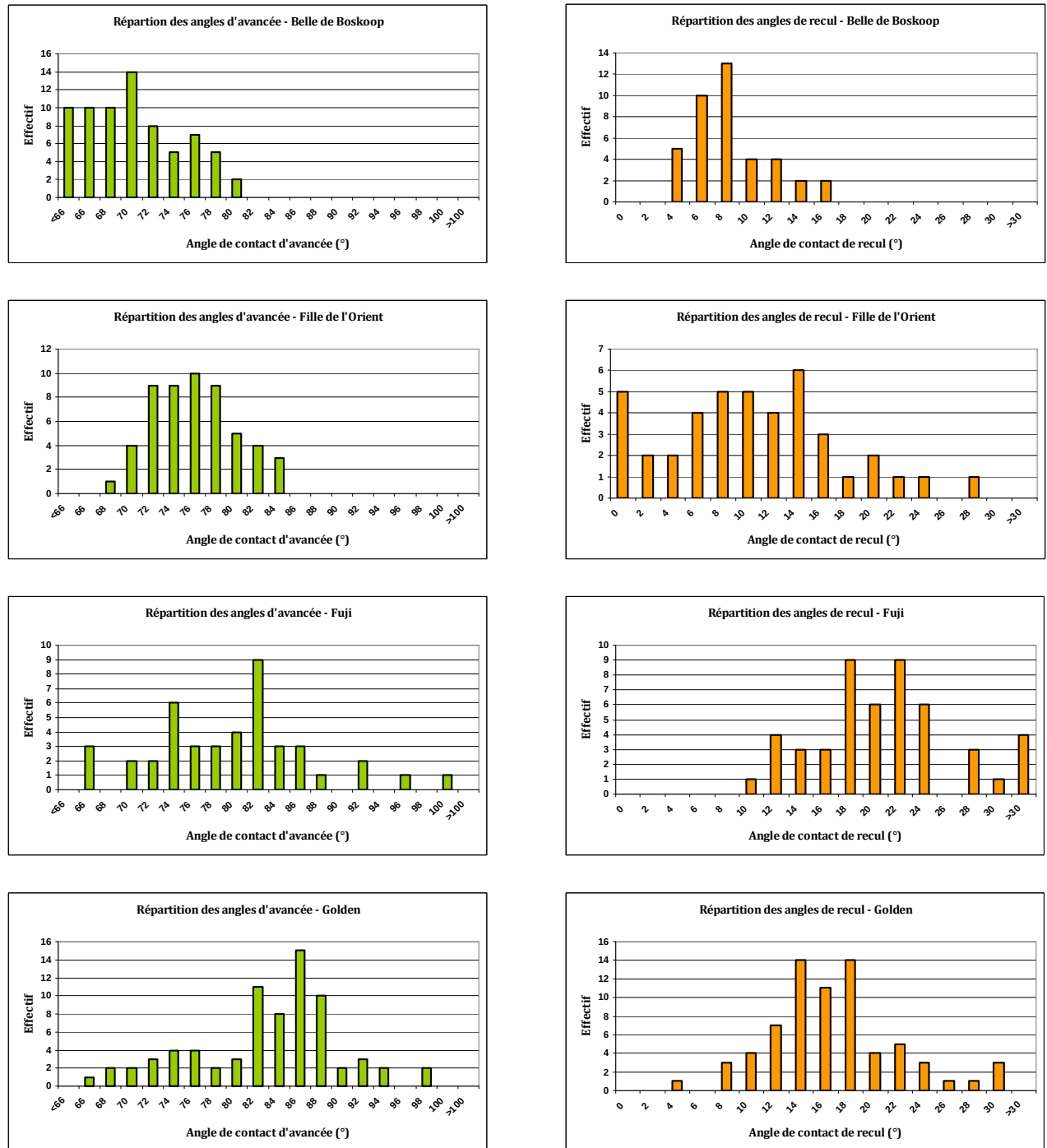
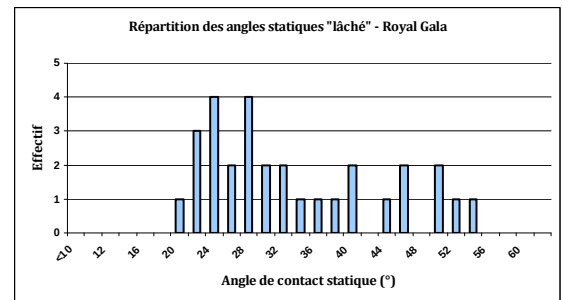
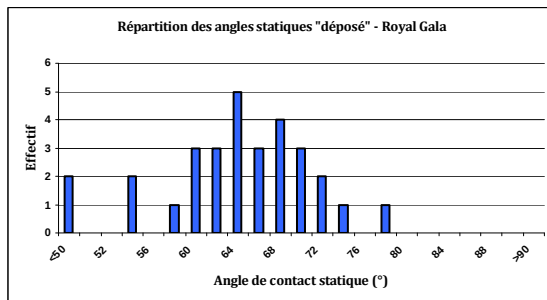
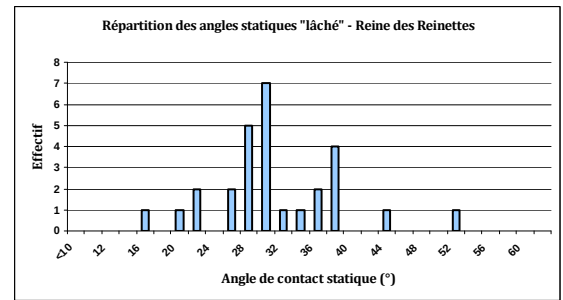
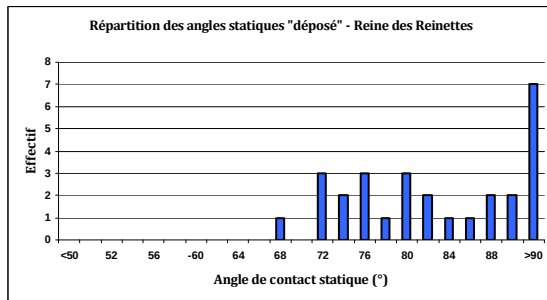
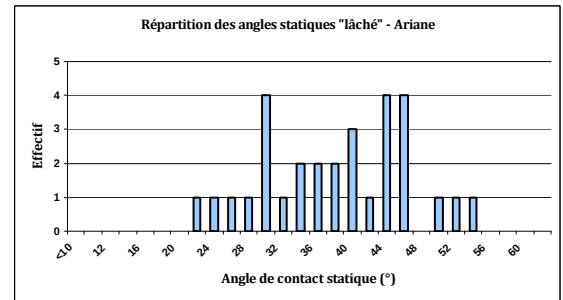
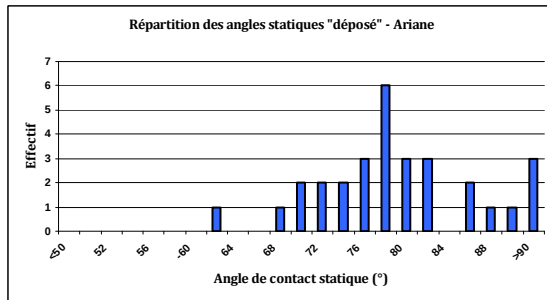
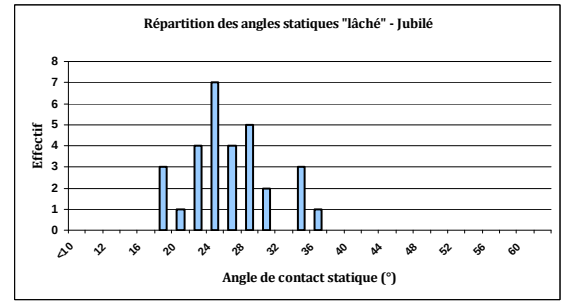
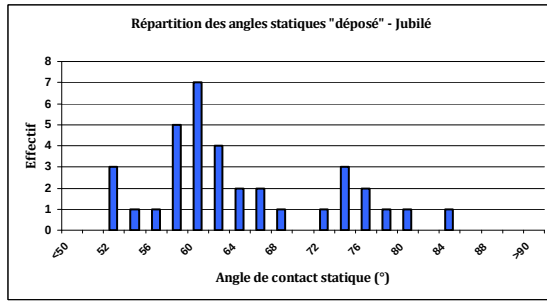


Figure II.24 - Distributions des angles de contact dynamiques d'avancée (gauche) et de recul (droite) pour les 8 variétés de pommiers étudiées



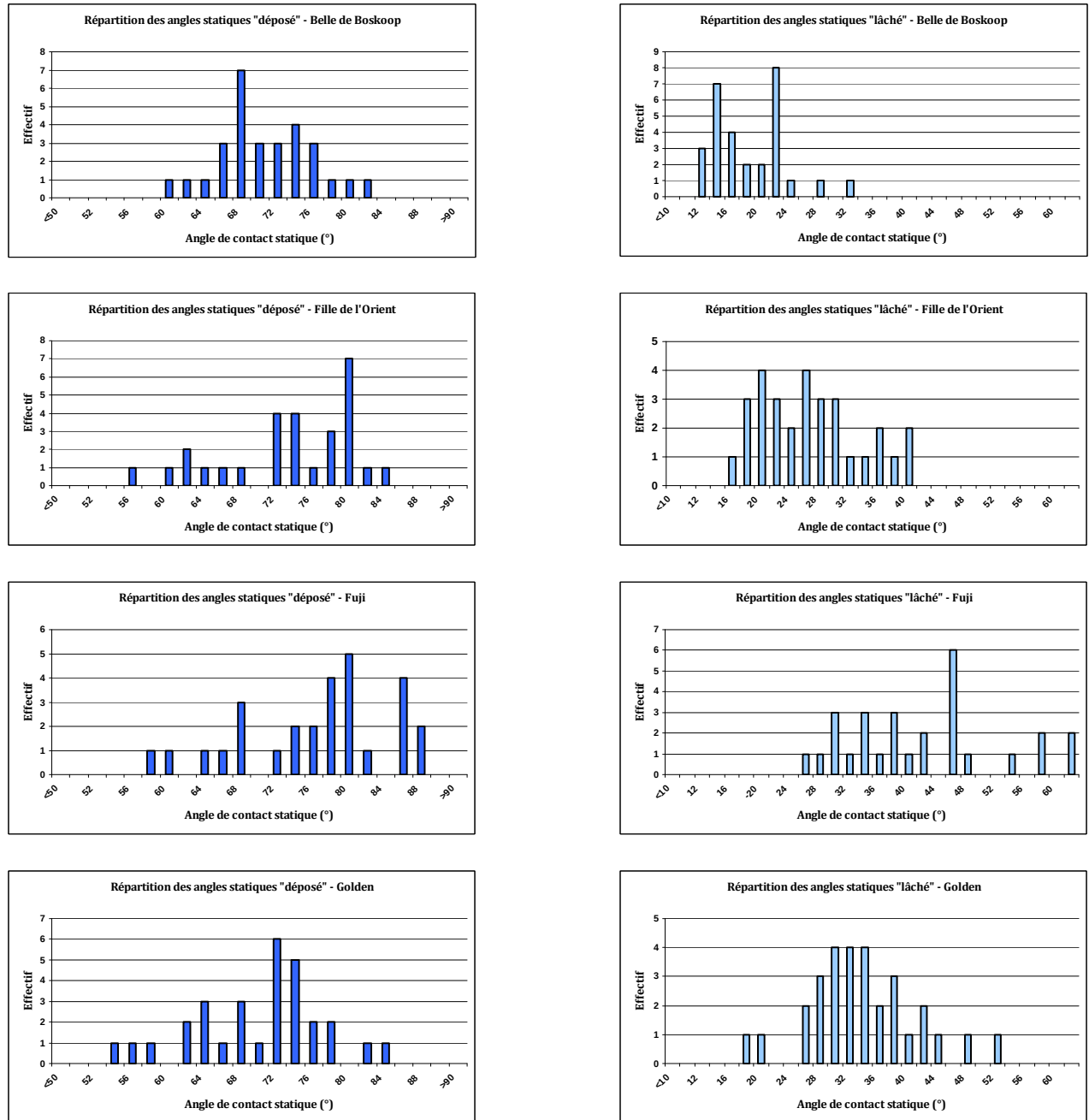


Figure II.25 – Distributions des angles de contact statiques "déposés" (gauche) et "lâchés" (droite) pour les 8 variétés de pommiers étudiées

Pour tous les types d'angles de contact, l'hypothèse d'homogénéité des angles entre les différents cultivars est rejetée par le test de Kruskal-Wallis au seuil $\alpha = 5\%$ ($p \ll 0.05$).

Cela implique qu'**au moins un des cultivars présente des différences significatives avec au moins un autre**. Nous avons de nouveau effectué un test de Steel-Dwass entre les cultivars. Celui-ci permet de déterminer les différences significatives entre les angles de contact des cultivars. Les tableaux II.8 et II.9 rendent compte des groupes homogènes de cultivars pour chaque type d'angle de contact. On peut en déduire que **chaque cultivar possède une mouillabilité propre**.

Groupes Homogènes
Angle d'avancée
Ariane - Fuji - Golden Fille de l'Orient - Royal Gala Jubilé - Golden Belle de Boskoop
Angle de recul
Belle de Boskoop - Fille de l'Orient - Reine des Reinettes Ariane - Fille de l'Orient - Jubilé Fuji Golden Royal Gala

Tableau II.8 - Groupes homogènes entre variétés de pommiers pour les angles de contact dynamiques

Groupes Homogènes
Angle statique déposé
Ariane - Fille de l'Orient - Fuji - Reine des Reinettes Belle de Boskoop - Fuji - Fille de l'Orient Golden - Belle de Boskoop - Fille de l'Orient Royal Gala
Angle statique lâché
Ariane - Golden - Royal Gala Fille de l'Orient - Jubilé - Royal Gala - Reine des Reinettes Fuji Belle de Boskoop Reine des Reinettes

Tableau II.9 - Groupes homogènes entre variétés de pommiers pour les angles de contact statiques

Il ressort de cette analyse la nécessité d'effectuer des mesures de mouillabilité dédiées à chaque cultivar de pommier dont on voudrait estimer la durée d'humectation (Tableau II.10).

Type	Golden Delicious	Jubilé	Fuji	Ariane
Angle d'avancée	84.1 ± 6.9	84.3 ± 4.1	80.6 ± 7.5	81.7 ± 6.4
Angle de recul	17.5 ± 5.2	13.7 ± 5.0	21.8 ± 5.6	15.8 ± 5.5
Hystérésis	66.6 ± 12.1	70.6 ± 9.1	58.8 ± 13.1	65.8 ± 11.9
Angle statique dépôt	69.1 ± 7.1	62.9 ± 8.2	75.3 ± 8.1	78.1 ± 7.3
Angle statique lâché	32.9 ± 7.6	24.5 ± 4.9	40.9 ± 9.9	37.2 ± 8.3
Type	Royal Gala	Belle de Boskoop	Reine des Reinettes	Fille de l'Orient
Angle d'avancée	74.9 ± 4.3	70.8 ± 5.2	91.1 ± 10.6	77.0 ± 4.0
Angle de recul	4.6 ± 3.1	9.4 ± 3.2	8.5 ± 2.9	11.8 ± 6.3
Hystérésis	74.9 ± 7.4	61.4 ± 8.4	82.6 ± 13.5	65.2 ± 10.3
Angle statique dépôt	62.7 ± 7.3	69.8 ± 5.0	84.3 ± 12.4	72.5 ± 7.2
Angle statique lâché	32.1 ± 10.0	17.3 ± 4.8	29.8 ± 7.4	25.6 ± 6.7

Tableau II.10 - Valeurs des angles de contact mesurés (exprimés en °) sur les différents cultivars de pommiers étudiés

Mais une question reste en suspens. Ces différences s'arrêtent-elles au cultivar, où sont-elles variables au sein de la même variété, en fonction du stade de développement de la feuille? En effet, les feuilles de pommier développent une résistance ontogénique à la tavelure (cf. Synthèse Bibliographique §II.3.c), et **l'infection étant tributaire de la durée d'humectation, nous avons cherché une éventuelle corrélation entre développement de la feuille et mouillabilité.**

III.3.c. Variabilité ontogénique de la mouillabilité des feuilles

Les résultats du suivi de la mouillabilité au fil de la croissance des feuilles de Golden Delicious sont consignés dans le Tableau II.11.

Age (degrés-jours)	82	108	111	116	236
Angle d'avancée (°)	74.4 ± 9.2	115.4 ± 9.1	121.0 ± 13.4	82.2 ± 5.4	93.2 ± 12.1
Angle de recul (°)	3.1 ± 1.3	2.0 ± 1.5	3.4 ± 1.8	3.1 ± 1.6	24.1 ± 10.6
Hystérésis (°)	71.3 ± 10.5	113.4 ± 10.6	117.6 ± 15.2	79.1 ± 7.0	69.1 ± 13.5
Angle statique lâché (°)		66.0 ± 14.9	37.3 ± 12.9	24.8 ± 7.6	43.0 ± 8.2
Age (degrés-jours)	311	338	352	452	Adulte (>500)
Angle d'avancée (°)	92.7 ± 4.2	83.7 ± 3.4	78.7 ± 11.3	87.7 ± 4.9	84.1 ± 6.9
Angle de recul (°)	22.6 ± 5.5	5.0 ± 3.0	14.0 ± 5.6	29.9 ± 12.4	17.5 ± 5.2
Hystérésis (°)	70.1 ± 4.7	78.7 ± 6.4	64.7 ± 16.9	57.8 ± 17.3	66.6 ± 12.1
Angle statique lâché (°)	49.4 ± 9.9	26.2 ± 7.3	39.7 ± 8.4	52.2 ± 10.5	30.0 ± 10.0

Tableau II.11 - Valeurs des angles de contact mesurés à différents âges de feuilles de pommier Golden (mesure d'angle de contact statique manquante pour la feuille âgée de 82 degrés-jours)

Un examen qualitatif de la figure II.26 permet de voir que les valeurs des angles de contact ne varient pas de manière monotone en fonction de l'âge des feuilles. Les angles de contact ne semblent donc pas directement corrélés à l'âge des feuilles. Il est néanmoins possible de séparer la dynamique ontogénique en deux parties : l'une de 82 à 116 degrés-jours qui est spécifique à chaque type d'angle de contact, et l'autre de 116 degrés-jours à l'âge adulte qui présente une dynamique commune aux trois types d'angles (Figure II.26). En effet, les médianes évoluent en quatre temps :

- i) augmentation nette de 116 à 236 degrés jours;
- ii) diminution nette entre 311 et 352 degrés-jours;
- iii) augmentation nette jusqu'à 452 degrés-jours;
- iv) diminution jusqu'à l'âge adulte.

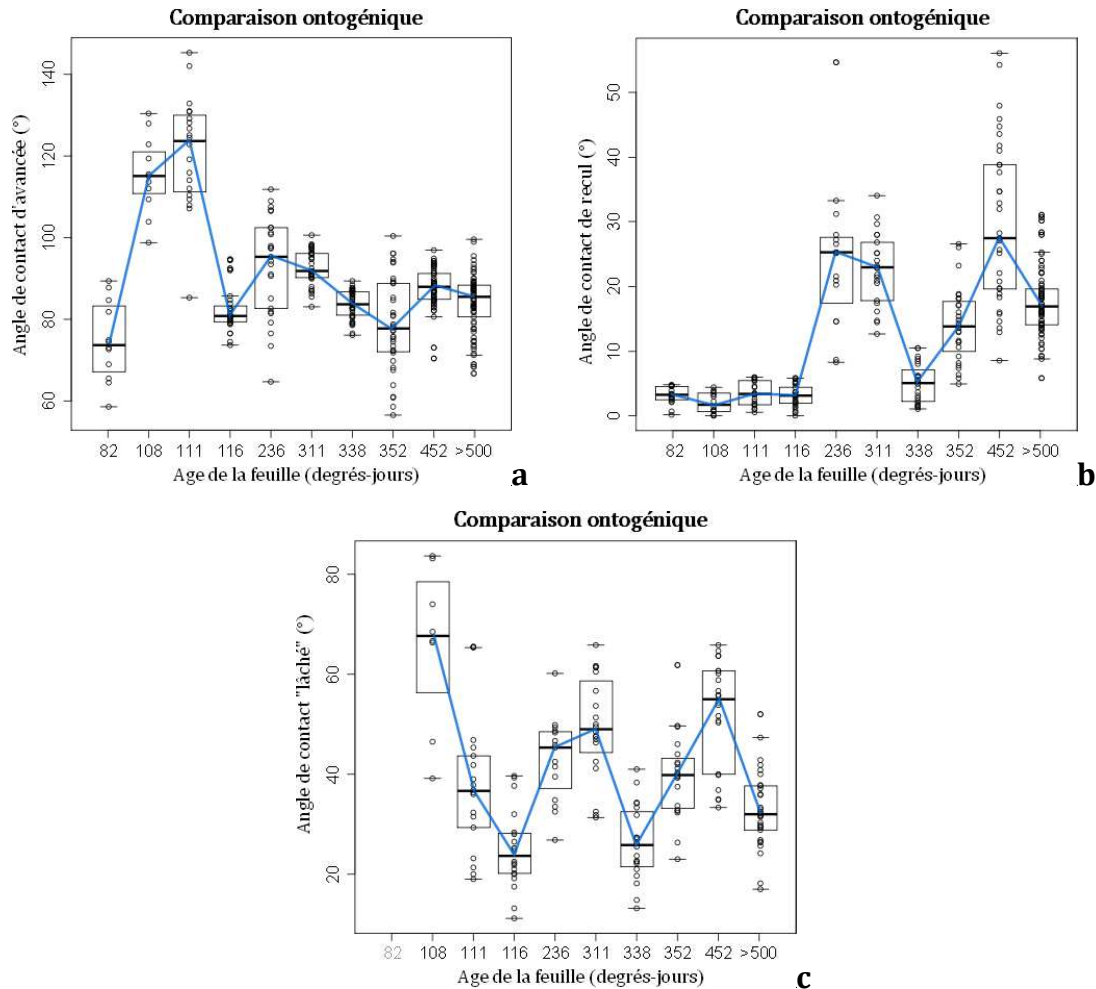


Figure II.26 – Nuages de points avec "boîtes à moustaches" par âge de feuille pour les angles a) d'avancée; b) de recul; c) lâchés – le tracé bleu donne l'évolution des médianes en fonction de l'âge

Il apparaît donc une dynamique ontogénique de mouillabilité. Celle-ci témoigne probablement d'une évolution contrastée de la surface des feuilles et de la densité de trichomes, et elle induit certainement un effet sur la durée d'évaporation de l'eau à la surface des feuilles. Ne disposant plus de matériel végétal nécessaire à l'observation au MEB des feuilles, nous n'avons pas pu déterminer l'état microscopique de la surface des feuilles, et n'avons pas pu suivre l'évaporation sur les feuilles, mais ces expérimentations semblent des perspectives nécessaires à l'établissement d'une caractérisation de la variabilité ontogénique de la mouillabilité des feuilles de pommier.

On remarque de plus une tendance à la diminution de l'hystérésis d'angle de contact (Figure II.27). Celle-ci confirme les observations au MEB à deux stades extrêmes dans la cinétique de développement de la feuille (cf. §II.1.c) qui montrent un espace intercellulaire creux et de nombreux trichomes à la surface de la feuille jeune, et au

contraire une surface lisse et cireuse (Bondada & Oosterhuis, 2002) et sans trichomes sur la feuille adulte : **la surface est moins hétérogène au fur et à mesure qu'elle croît.**

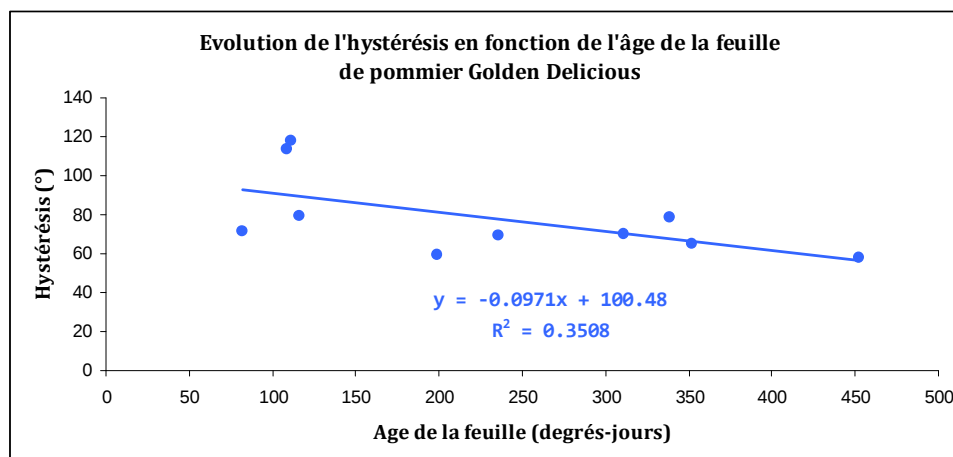


Figure II.27 – Evolution ontogénique de l'hystérésis d'angle de contact mesurée sur feuilles de Golden

Une étude statistique des données permet encore une fois de tirer des conclusions complémentaires sur ces mesures.

Pour tous les types d'angles de contact, l'hypothèse d'homogénéité des angles de contact pour les différents âges de feuilles est rejetée par le test de Kruskal-Wallis au seuil de signification $\alpha = 5\%$. Le test de Steel-Dwass permet de déterminer les différences significatives d'angles de contact entre les différents âges de feuilles (Tableau II.12). Une fois encore ce test a mis en évidence le fait que la variabilité ontogénique de la mouillabilité n'est pas homogène entre les différents types d'angles de contact.

Groupes Homogènes		
Avancée	Recul	Lâché
82-116-338-352->500	82-108-111-116-338	108-111-236-311-452
108-111	236-311-452	111-338->500
236-311	352->500	111-338-352
236-452		111-116
		82

Tableau II.12 - Groupes homogènes d'âges de feuilles de pommier Golden (exprimés en degrés-jours) pour les angles de contact dynamiques et statiques "lâchés"

Les valeurs très dispersées entre 82 degrés-jours et 116 degrés-jours correspondent à des surfaces très pubescentes de feuilles très tendres. Les difficultés de mesure sur ces feuilles sont peut-être à l'origine de cette dispersion. Notre étude étant centrée sur la variabilité ontogénique de la mouillabilité des feuilles, nous avons uniquement suivi l'âge des feuilles et négligé un éventuel effet de la position des feuilles sur la mouillabilité. En effet, selon la position d'une feuille jeune sur sa pousse et la variabilité microclimatique qui en découle (notamment l'ombrage), il n'est pas à exclure que la surface puisse différer pour un même âge de feuille. Pour vérifier cela, il faudrait alors multiplier les mesures sur différentes feuilles du même âge, en variant les provenances sur la pousse et au sein de l'arbre.

III.3.d. Effet des conditions initiales sur la mesure des angles statiques

Quelque soit le support, la forme d'une goutte déposée à même le substrat ou lâchée d'une hauteur d'environ 10cm est différente : les gouttes lâchées présentent un angle de contact statique inférieur aux gouttes déposées. Cette différence semble de plus modulée par le support considéré puisqu'elle est peu remarquable sur le Parafilm "M", bien qu'elle puisse être très grande sur les autres matériaux (Tableau II.13 & Figure II.28). Ces observations liées à la fois au type de dépôt et au type de support peuvent être expliquées simplement par une analyse plus précise des conditions expérimentales.

Support	Angle déposé (°)	Angle lâché (°)
Parafilm 'M'	106.1	101.2
Capteur LWD	65.6	44.4
Ariane	78.1	37.2
Belle de Boskoop	69.8	17.3
Fille de l'Orient	72.5	25.6
Fuji	75.3	40.9
Golden Delicious	69.1	32.9
Jubilé	64.8	24.5
Reine des Reinettes	84.3	29.8
Royal Gala	62.7	32.1
Reine Claude	74.2	38.4
Redhaven	67.2	41.7

Tableau II.13 - Valeurs des angles de contact statiques sur différents matériaux, en fonction de la manière dont on pose la goutte

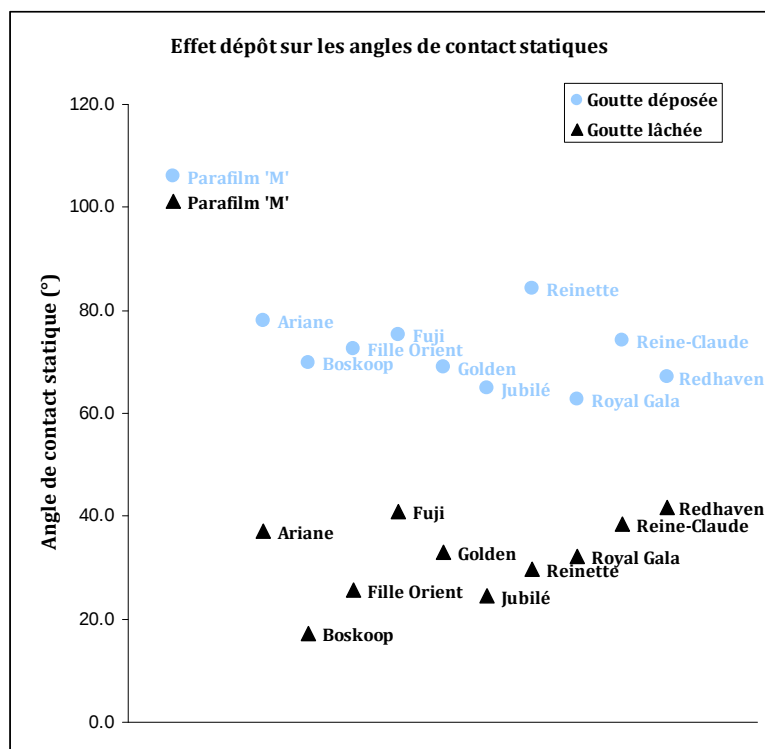


Figure II.28 - Mise en évidence de la différence entre les angles statiques lâchés et les angles statiques déposés

III.3.d.i) Effet condition initiale ou mise à l'équilibre des gouttes

La principale différence entre les deux types de dépôt est liée à la hauteur initiale des gouttes et donc à leur vitesse lors de l'impact avec le support. L'importance de cette vitesse d'impact vis-à-vis de la mise en équilibre d'une goutte dont le moteur principal est la tension de surface, peut être estimée par le nombre adimensionnel de Weber We qui compare l'inertie d'une goutte à la tension de surface :

$$We = \frac{\rho_{eau} D v^2}{\sigma} \quad \text{II.2}$$

où ρ_{eau} est la densité volumique de l'eau ($\approx 1000 \text{ kg.m}^{-3}$), D le diamètre de la goutte (m), v la vitesse de la goutte à l'impact (m.s^{-1}), et σ la tension de surface de l'eau ($7.3 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$ à 20°C).

Le nombre de Weber rend compte de l'étalement potentiel d'une goutte sur une surface. En dessous de $We = 10$, la goutte ne va pas s'écraser à l'impact, si au contraire le nombre de Weber est supérieur à cette valeur, la goutte va s'étaler avant de prendre sa forme d'équilibre (Wang, Lin, Hung & Lin, 2009). En effet, si l'énergie cinétique de la goutte est largement plus grande que la tension de surface, la goutte va être grandement déformée. Mais une fois le transfert d'énergie effectué, ce sont les tensions de surface qui vont entrer en jeu, et la goutte va se mettre à l'équilibre, tel que nous l'avons décrit au chapitre précédent.

Ainsi, le nombre de Weber pour une goutte déposée sur le support (on suppose sa hauteur initiale à 1mm de hauteur) est de l'ordre de 0.4, contre un nombre de Weber de 45 pour une goutte lâchée à 11cm de hauteur. Les figures II.29.a et II.29.b montrent la différence dans le dépôt d'eau sur une feuille de Jubilé (durée d'exposition/acquisition des images 1 ms).

L'angle de contact à l'équilibre d'une goutte déposée sur le support est toujours supérieur à celui d'une goutte lâchée, car lors de l'étalement brusque de la goutte, celle-ci atteint une valeur proche de l'angle de contact de recul. Un angle d'équilibre proche de l'angle de recul sera donc atteint. En revanche, lorsque la goutte est déposée très près du support, la manœuvre s'apparente à un gonflage de la goutte, la surface de contact va grandir doucement, et l'angle de contact prendra une valeur proche de l'angle d'avancée, parfois jusqu'à atteindre ce dernier.

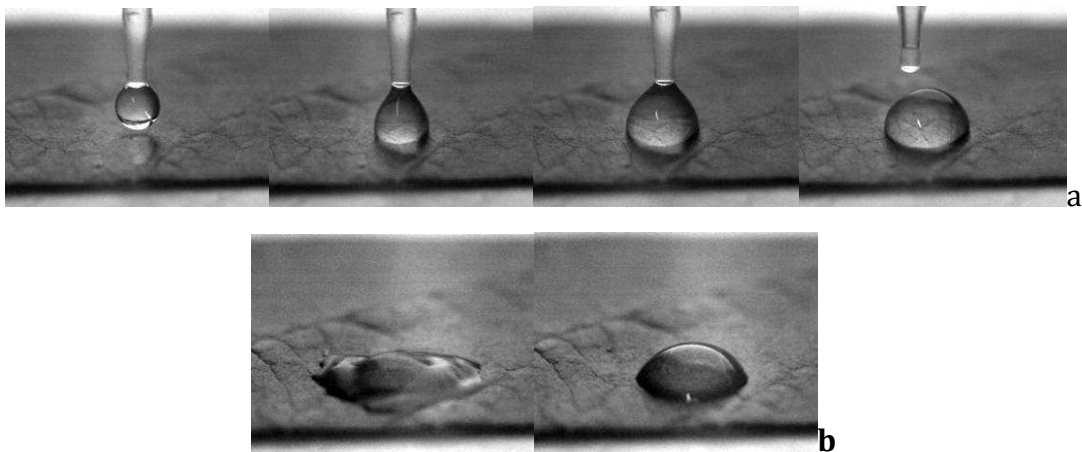


Figure II.29 - Photographies haute vitesse (1000 images/s) de gouttes se posant sur une feuille :
a) en déposant la goutte sur la feuille;
b) en lâchant la goutte d'une hauteur de 11 cm

III.3.d.ii) Effet du support

La compréhension des mécanismes mis en jeu lors de la mise à l'équilibre des gouttes permet également de relier la variabilité observée entre les supports à leurs hystérésis. En effet les angles observés sont proches des angles de recul et d'avancée. Or, plus l'hystérésis du support est grande, plus l'écart entre ces deux angles est important. Ainsi sur Parafilm 'M' celle-ci est de l'ordre de 15° conduisant à une sensibilité de l'angle statique aux conditions de dépôt de goutte faible ($\sim 5^\circ$). A contrario dans le cas des pommiers les valeurs d'hystérésis étant plus importante (de 58° à 83°), la condition de dépôt induit une variabilité forte (de 20° à plus de 50°).

On discutera par la suite de la possibilité d'exploiter ces données dans le modèle pour représenter des gouttes présentes sur la feuille après une rosée, auquel cas nous utiliserions les valeurs mesurées pour des gouttes déposées sur l'échantillon de feuille, et après une pluie, où nous prendrions les valeurs d'angles mesurées sur les gouttes lâchées.

III.3.e. Tentative de corrélation entre sensibilité à la tavelure et mouillabilité

Nous avons cherché l'existence d'une éventuelle corrélation entre mouillabilité et sensibilité à la tavelure, en classant les 7 cultivars dont nous connaissons la sensibilité (Figure II.30).

L'étude de la monotonie de corrélation des valeurs d'angles en fonction de la sensibilité, exprimée par le coefficient de Spearman ρ permet d'évaluer les éventuelles corrélations entre les angles de contact et la sensibilité à la tavelure (Tableau II.14).

Celle-ci prend par ailleurs des valeurs très différentes entre les deux variétés très sensibles et les deux variétés peu sensibles. On peut donc supposer que si la mouillabilité des feuilles a un effet sur la durée d'évaporation, **elle ne constitue pas un indicateur de la sensibilité de l'arbre à la tavelure**, outre un éventuel effet sur les gouttes de rosée, qu'il serait possible de clarifier en observant la structure des différentes feuilles au MEB.

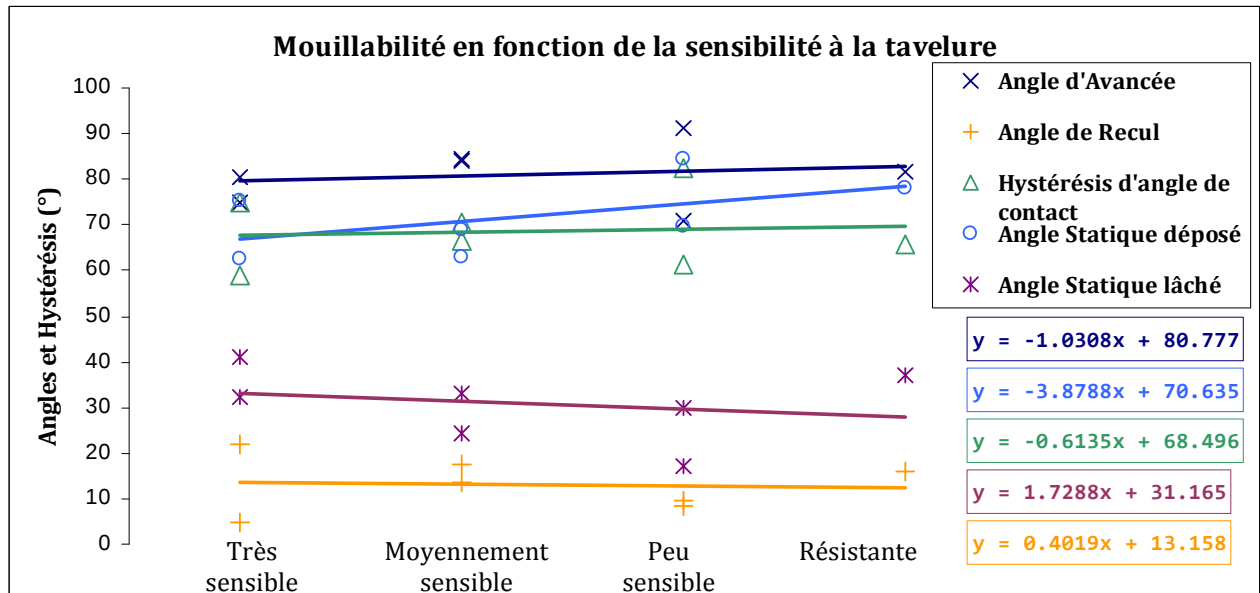


Figure II.30 - Comparaison des angles de contacts et des hystérésis à la sensibilité à la tavelure des pommiers étudiés

Type d'angle de contact	Angle d'avancée	Angle de recul	Hystérésis	Angle "déposé"	Angle "lâché"
ρ	0.2203	-0.0918	0.0184	0.6241	-0.257
p	0.5895	0.8221	0.9641	0.1263	0.529

Tableau II.14 - Coefficients de corrélation de Spearman et p -value de la relation entre angles de contact et sensibilité à la tavelure par type d'angle

Conclusion du chapitre

Cette série de mesures expérimentales a apporté de nombreux résultats et un grand nombre de données. Certaines hypothèses testées ont été écartées :

- (i) l'existence d'une corrélation linéaire entre mouillabilité et sensibilité;
- (ii) l'existence d'une corrélation linéaire entre mouillabilité et âge des feuilles;
- (iii) une homogénéité de mouillabilité entre différentes espèces fruitières.

La variabilité intra-spécifique de la mouillabilité sur feuilles de pommiers a en revanche été mise en évidence. Cela implique une mesure de mouillabilité sur chaque cultivar dont on veut simuler la durée d'évaporation. Il s'agit d'une mesure contraignante, mais nécessaire pour estimer avec une meilleure précision l'évaporation d'une goutte sur une feuille du pommier considéré.

La variabilité ontogénique de la mouillabilité sur feuilles de pommier Golden semble commune aux différents types d'angles de contact à partir de 116 degrés-jours. Son évolution n'est pas monotone, et le lien avec l'état de la surface et la durée d'évaporation reste à déterminer en complétant nos mesures de mouillabilité par des observations de la surface des feuilles au MEB et par des suivis (expérimentaux ou calculés) de durées d'évaporation.

Nous avons également mesuré la mouillabilité de nos capteurs de durée d'humectation, ce qui nous permettra dans le chapitre suivant de valider notre modèle en conditions naturelles, tout en tenant compte d'une mouillabilité réaliste.

Ces résultats ont également permis de mettre en évidence un effet non négligeable des conditions de dépôt sur la forme prise par les gouttes d'eau à l'équilibre, suggérant des différences pouvant être importantes entre gouttes de pluie et gouttes de rosée. L'effet de la mouillabilité sur la sensibilité à la tavelure de la variété est quant à lui en dehors des angles de contact statiques "déposés", effet à déterminer à l'aide d'un suivi expérimental à envisager dans le futur.

Chapitre III

Modélisation de l'évaporation à l'échelle de la goutte (partie 2)

Introduction

La variabilité des formes de goutte observées sur feuilles de pommiers (chapitre II), nous a conduit à intégrer ce paramètre dans la modélisation de l'évaporation des gouttes via la prise en compte de l'angle de contact statique. La prise en compte de l'angle à l'équilibre entre les gouttes et leurs supports ayant été décrite au chapitre I (équations I.18 à I.20), ce chapitre s'attache principalement à décrire la validation du modèle obtenu.

Cette modélisation a été validée par comparaison avec des données d'évaporation observées sur Parafilm 'M' en conditions contrôlées (Magarey *et al.*, 2005a) dont le détail a été mis à notre disposition (Magarey, *communication personnelle*) et avec des mesures sur capteur de durée d'humectation en conditions naturelles au verger (le dispositif expérimental sera décrit au chapitre IV). Ces étapes de validation du modèle ont mis en évidence une très bonne restitution de la dépendance de la durée d'humectation vis-à-vis du volume d'eau initial et des variables climatiques. Toutefois il est apparu qu'en situation de vent faible (vitesse inférieure à 0.2 m.s^{-1}) l'expression du coefficient de transfert convectif r_H n'était pas adaptée. Une modification a donc été proposée.

I. Validation du modèle – conditions contrôlées

Notre modèle reposant sur des lois physiques, sa validation passe par une comparaison avec des durées d'évaporation expérimentales observées en conditions contrôlées sur un support dont on peut connaître la mouillabilité. Nous avons eu à notre disposition les mesures détaillées de Magarey sur Parafilm 'M' effectuées entre 2001 et 2005 et dont une partie des résultats a été publiée en 2005 (Magarey *et al.*, 2005a, Magarey, *communication personnelle*).

Ces données présentent l'avantage d'avoir couvert pour le volume d'eau, la température de l'air, l'humidité relative, le vent et le rayonnement, un ensemble de valeurs représentatives de la réalité. Mais la précision des mesures n'est pas connue et certains points expérimentaux semblent parfois aberrants. Ceux-ci seront indiqués en caractères rouges dans les tableaux III.3, III.4, III.5, III.6, III.7 et III.8. Ne disposant pas des informations nécessaires pour estimer l'erreur de mesure commise, nous avons considéré ces données expérimentales telles quelles, et évalué l'erreur de simulation en supposant que toutes les mesures étaient correctes.

Dans les observations de Magarey *et al.* (2005) (Magarey *et al.*, 2005a, Magarey, *communication personnelle*), la forme des gouttes à l'équilibre, *i.e.* leur angle de contact et la formation ou non d'une calotte sphérique, n'est pas spécifiée. Il nous a donc fallu retrouver ces informations à partir des données fournies.

I.1. Détermination de l'angle de contact statique

Les travaux de Magarey sur l'évaporation (Magarey *et al.*, 2005a; Magarey (2001-2005), *communication personnelle*), tiennent compte de la mouillabilité des gouttes sur Parafilm "M", en établissant un facteur de mouillabilité hémisphérique H_w défini dans l'équation III.1 comme le rapport du rayon calculé d'un hémisphère de volume équivalent à la goutte déposée r_{calc} , sur le rayon de contact liquide-solide observé expérimentalement r_{obs} (cf. chapitre II §I.2.a.).

$$H_w = \frac{r_{calc}}{r_{obs}} \quad \text{III.1}$$

Ainsi un support hydrophobe induisant une goutte parfaitement hémisphérique aura un facteur H_w tendant vers 1, alors qu'un support créant un mouillage total aura un facteur H_w proche de 0 (Magarey *et al.*, 2005a).

Pour des gouttes d'eau pure sur Parafilm 'M', Magarey a ainsi déterminé un H_w **égal à 1.14**.

A partir de la donnée H_w , et des relations liant rayon de contact, hauteur, angle de contact et volume d'une goutte formant une calotte sphérique (relations décrites au chapitre I par les équations I.18 & I.19), il est possible de retrouver les angles de contact réels pour chaque cas mesuré par Magarey (Tableau III.1).

Volume (L)	r_{calc} (m)	r_{obs} (m)	h (m)	θ_e calculé (°)
1.00E-06	6.204E-04	5.442E-04	8.780E-04	104.1
2.00E-06	7.816E-04	6.856E-04	1.100E-03	103.4
3.00E-06	8.947E-04	7.848E-04	1.262E-03	103.7
4.00E-06	9.847E-04	8.638E-04	1.392E-03	104.0
5.00E-06	1.061E-03	9.305E-04	1.496E-03	103.7
1.00E-05	1.337E-03	1.172E-03	1.883E-03	103.6
2.00E-05	1.684E-03	1.477E-03	2.381E-03	104.0
2.50E-05	1.814E-03	1.591E-03	2.559E-03	103.7
4.00E-05	2.122E-03	1.861E-03	2.992E-03	103.7
5.00E-05	2.285E-03	2.005E-03	3.229E-03	103.9

Tableau III.1 - Calcul des angles de contact à partir du rayon observé – d'après données Magarey (Magarey, *communication personnelle*)

Ces valeurs sont en accord avec les données bibliographiques et nos mesures sur Parafilm 'M' présentées au §II.1.a du chapitre II (Tableau II.2). Une angle de 104° a donc été utilisé pour tous les calculs de validation du modèle d'évaporation.

I.1.a. Détermination du nombre de Bond pour les gouttes étudiées

Il est tout d'abord nécessaire de vérifier qu'il est pertinent de comparer ces deux approches : la taille des gouttes assure-t-elle une forme de calotte sphérique, ou induit-elle un écrasement gravitaire des gouttes? Nous avons pour vérifier cela calculé le nombre des Bond pour des gouttes d'eau de volumes utilisés par Magarey.

Pour ce faire, le rayon $r_{calc} = \left[\frac{3V}{2\pi} \right]^{\frac{1}{3}}$ est calculé connaissant le volume V . Sachant que pour le Parafilm 'M', $H_w = 1.14$, on tire r_{obs} de l'équation III.1, pour lequel on évalue le nombre de Bond B_o défini au chapitre I (équation I.16).

Volume (L)	r_{calc} (m)	r_{obs} (m)	B_o
1.00E-06	6.204E-04	5.442E-04	0.0403
2.00E-06	7.816E-04	6.856E-04	0.0639
3.00E-06	8.947E-04	7.848E-04	0.0838
4.00E-06	9.847E-04	8.638E-04	0.1015
5.00E-06	1.061E-03	9.305E-04	0.1177
1.00E-05	1.337E-03	1.172E-03	0.1869
2.00E-05	1.684E-03	1.477E-03	0.2967
2.50E-05	1.814E-03	1.591E-03	0.3443
4.00E-05	2.122E-03	1.861E-03	0.4709
5.00E-05	2.285E-03	2.005E-03	0.5465

Tableau III.2 - Calcul du nombre de Bond pour les différents volumes de gouttes considérées déposées sur Parafilm 'M'

Pour tous les volumes étudiés, la condition $B_o < 1$ est toujours vérifiée (Tableau III.2). Il est ainsi parfaitement possible comparer notre modèle représentant les gouttes sous la forme de calottes sphériques, avec les données de Magarey représentant la mouillabilité à l'aide d'un rapport de rayons.

I.2. Première validation du modèle en fonction de la variabilité des paramètres

Magarey a mesuré des durées d'humectation en faisant varier à tour de rôle les différents paramètres entrant dans les équations du bilan énergétique : la **vitesse du vent**, le **volume de la goutte**, la **température** ambiante, l'**humidité relative**, et le **rayonnement**. Grâce à ces mesures, il est donc possible d'évaluer la fiabilité du modèle en fonction de chacune de ces variables indépendamment.

Les durées d'évaporation simulées avec ces valeurs pour variables d'entrée ont été comparées aux durées observées. La fiabilité a été évaluée à partir d'indicateurs statistiques : pente de la régression linéaire, coefficient de détermination R^2 , erreur type, et biais (écart des moyennes).

I.2.a. Vitesse du Vent Variable

L'influence du vent sur l'évaporation des gouttes a été mise en évidence en fixant la température ambiante à environ 25°C, l'humidité relative à 43%, sans rayonnement, et le volume des gouttes à 5µL. La vitesse de vent varie de 0.025m.s⁻¹ à 5m.s⁻¹. L'influence du vent sur la durée d'évaporation est non négligeable d'après les résultats d'observations (Tableau III.3 & Figure III.1).

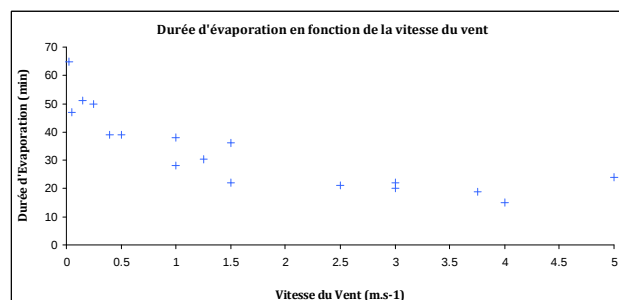


Figure III.1 - Durée d'évaporation observée pour différentes vitesses de vent - d'après Magarey, communication personnelle

Nos simulations sont en accord avec les observations pour une vitesse du vent allant de 0.25m.s⁻¹ à 5m.s⁻¹. Pour des valeurs inférieures cependant, l'écart est très important : **le modèle surestime largement la durée d'évaporation** (Tableau III.3 & tracé bleu sur la figure III.2).

Volume (L)	Vitesse du Vent (m.s ⁻¹)	Tair (°C)	Humidité Relative (%)	Rayonnement Net (W.m ⁻²)	Durée d'Evaporation Observée (min)	Durée d'Evaporation Simulée (min)
5.00E-06	0.025	24.8	43	0	65	194.25
5.00E-06	0.05	24.8	43	0	47	140.25
5.00E-06	0.15	25.3	43	0	51	82.63
5.00E-06	0.25	25.3	43	0	50	65.00
5.00E-06	0.4	25.3	43	0	39	52.12
5.00E-06	0.5	25.3	43	0	39	46.93
5.00E-06	1	25.3	43	0	28	33.88
5.00E-06	1	24.8	43	0	38	34.32
5.00E-06	1.25	24.8	43	0	30.5	30.90
5.00E-06	1.5	25.3	43	0	22	28.02
5.00E-06	1.5	24.8	43	0	36	28.37
5.00E-06	2.5	25.3	43	0	21	22.03
5.00E-06	3	25.3	43	0	22	20.23
5.00E-06	3	24.8	43	0	20	20.48
5.00E-06	3.75	24.8	43	0	19	18.45
5.00E-06	4	24.8	43	0	15	17.90
5.00E-06	5	25.3	43	0	24	15.92
R ²	0.7346					
Erreur Type	39.9139					
Biais	16.78					

Tableau III.3 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à vitesse du vent variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

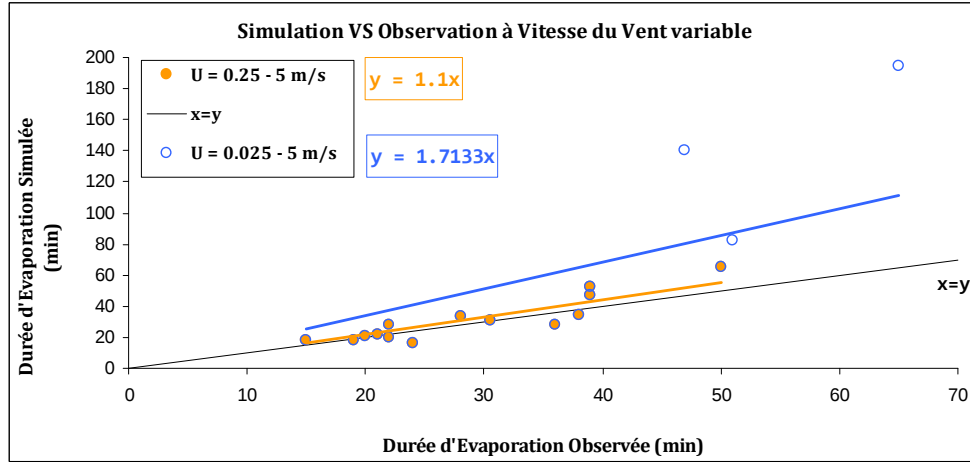


Figure III.2 – Comparaison entre évaporation observée et simulée pour la vitesse du vent variable sur l'ensemble des valeurs mesurées par Magarey

Si l'on exclut de l'étude les vitesses de vent inférieures ou égales à 0.25 m.s^{-1} , l'accord entre simulation et observations est toutefois bien meilleur (tracé orange sur la Figure III.2). Le problème de notre modèle provient donc de la restitution du phénomène d'évaporation par vent faible.

Dans les équations du bilan énergétique résolu par notre modèle, le vent intervient uniquement dans le terme convectif via la résistance de couche limite r_H (définie au chapitre I par l'équation I.4). En effet, la vitesse du vent est présente dans la définition du nombre de Reynolds R_e qui varie proportionnellement avec celle-ci. Il est par suite inclus dans r_H , évoluant en $\frac{1}{R_e^{0.47}}$. Ainsi, si la vitesse du vent s'approche de zéro, r_H va

augmenter considérablement (Figure III.3). Le flux d'évaporation étant lui-même inversement proportionnel à r_H , on aura pour chaque pas de temps une masse très faible d'eau évaporée, ce qui induira des durées d'évaporation très importantes :

$$R_e \propto U \Leftrightarrow r_H \propto \frac{1}{R_e^{0.47}} \Leftrightarrow E \propto \frac{1}{r_H} \text{ d'où } E \propto U^{0.47}$$

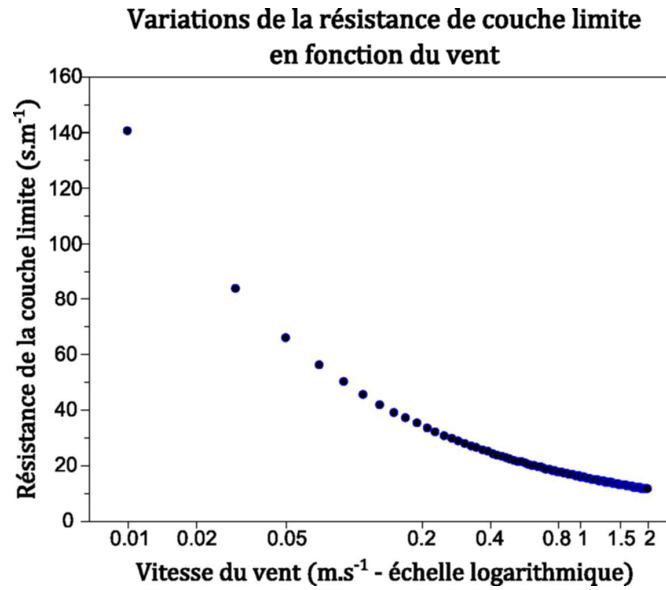


Figure III.3 – Evolution de la résistance de couche limite dans sa représentation issue de l'équation I.4 en fonction de la vitesse du vent (les valeurs sous l'axe des abscisses correspondent à la vitesse du vent, mais l'échelle est logarithmique)

Ce constat nous a mené à nous interroger sur la relation liant r_H à U : les fortes erreurs de simulation provenant uniquement des situations en vent faible, **n'aurions nous pas ignoré un processus essentiel dans ces conditions de vitesses de vent faibles?**

L'expression de r_H employée ici est estimée uniquement en convection forcée (*i.e.* lorsque l'évaporation est pilotée par le vent incident). Les études d'évaporation relatives à des problématiques agronomiques (Butler, 1986; Butler, 1990; Leclerc *et al.*, 1985) ne comportent pas de données en convection mixte (*i.e.* lorsque le vent incident et le gradient de concentration en vapeur d'eau dans la couche limite pilotent de concert l'évaporation) ou en convection libre (*i.e.* lorsque l'évaporation est uniquement pilotée par le gradient de concentration en vapeur d'eau). Ces phénomènes sont pourtant observables dans la nature, **lorsque le vent est particulièrement faible**. Le gradient de vapeur d'eau devient alors le moteur du processus évaporatif qui ne se produit que par diffusion (Figure I.1). Ainsi, les problèmes de calcul à vent faible de notre modèle sont sans doute liés à la résolution du modèle qui ne tient compte que de la convection forcée, *i.e.* pour un vent suffisamment fort.

Pour vérifier cette hypothèse il faut tout d'abord déterminer quel est le régime convectif d'écoulement (forcé, mixte, ou libre) à l'interface liquide – air. Cela est possible en comparant les forces contrôlant les phénomènes, à l'aide du nombre de Reynolds R_e qui

détermine la turbulence de la couche limite (équation I.3) et d'un autre nombre adimensionnel : le nombre de Grashof G_r (équation III.2) qui compare les effets des forces de gravité sur les effets de viscosité du fluide.

$$G_r = \frac{c_v - c_{air}}{c_{air}} \left(\frac{g r^3}{\nu^2} \right) \quad \text{III.2}$$

où : c_v est la concentration de vapeur saturée à l'interface liquide – air (kg.m^{-3})
 c_{air} est la concentration de vapeur dans l'air à l'infini (kg.m^{-3})
 g est l'accélération de la gravité standard (9.81 m.s^{-2})

Le rapport $\frac{G_r}{R_e^2}$ permet d'estimer le régime d'écoulement (Atarassi *et al.*, 2006) :

fondamentalement, si $\frac{G_r}{R_e^2} \ll 1$, il y a convection forcée, et si au contraire $\frac{G_r}{R_e^2} \gg 1$, la diffusion prédomine. Un critère proposé par Gates permet de distinguer les trois régimes différents (Gates, 1980) :

- i) si $\frac{G_r}{R_e^2} < 0.1$ il y a **convection forcée**;
- ii) si $\frac{G_r}{R_e^2} > 16$ il y a **convection libre**;
- iii) si $0.1 < \frac{G_r}{R_e^2} < 16$ les différents régimes contribuent tous deux de manière significative, c'est la **convection mixte**.

Nous avons calculé ce rapport pour un ensemble de vitesses de vent comprises entre 0.01 m.s^{-1} et 5 m.s^{-1} , pour des gouttes de volume $10 \mu\text{L}$ (Figure III.4).

La Figure III.4 montre que pour les cas où :

- i) $U < 0.25 \text{ m.s}^{-1}$ il y a diffusion pure;
- ii) $0.25 < U < 1.5 \text{ m.s}^{-1}$ il y a convection mixte (particulièrement pour les vitesses de vent comprises entre 0.25 et 0.5 m.s^{-1});
- iii) $U > 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ au moins 50% du processus évaporatif a lieu en convection forcée.

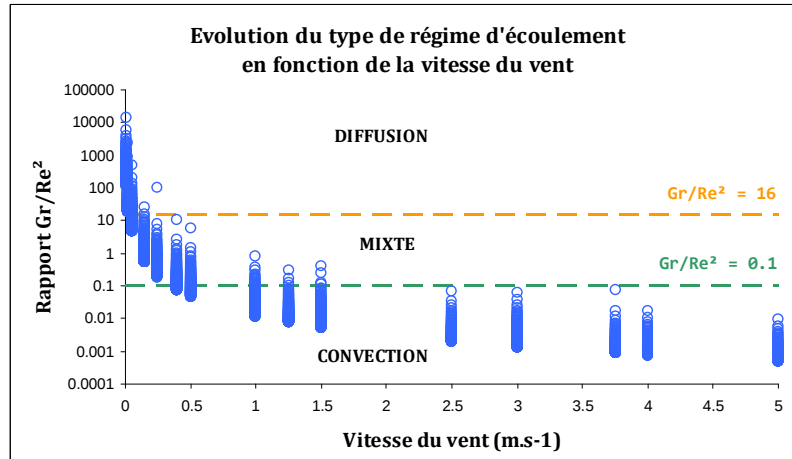


Figure III.4 – Evolution du rapport G_r/R_e^2 en fonction de la vitesse du vent. Pour chaque vitesse de vent le nuage de points correspond à une évolution temporelle de G_r/R_e^2 au fil de l'évaporation de la goutte considérée.

La quantité de cas où le régime est en convection mixte voire libre n'est pas négligeable. Il apparaît donc indispensable de corriger notre modèle pour les cas où le vent est faible ($U < 0.5 \text{ m.s}^{-1}$).

I.2.b. Tentative d'une nouvelle expression de la résistance r_H

Rappelons que dans des conditions de vent calme ou nul ($U < 0.5 \text{ m.s}^{-1}$), les phénomènes de convection et de diffusion pilotent l'évaporation de concert. Cette compétition est nettement à l'avantage du phénomène convectif lorsque le vent est plus fort, la composante diffusive devenant alors négligeable (Kelly-Zion *et al.*, 2011).

L'évaporation en air calme, donc pilotée par la diffusion, a maintes fois été étudiée, mais sans tenir compte de la convection libre générée par les gradients thermiques entre la goutte et l'air ambiant (Hu & Larson, 2002; Picknett & Bexon, 1977). Des travaux récents se sont toutefois penchés sur l'impact et la prise en compte de la convection libre sur l'évaporation de petites gouttes (Weon *et al.*, 2011).

Dans la continuité de ces travaux, nous avons cherché à ajouter à notre modèle la prise en compte de la perte de masse par diffusion. La formule proposée par Hu & Larson (Hu & Larson, 2002) présente l'intérêt de tenir compte de l'angle de contact formé entre la goutte et son support :

$$\frac{dm}{dt} = \pi r d_{vap} \left(1 - \frac{e_{air}}{e_{sat}(T_{air})} \right) c_v (0.27\theta_e^2 + 1.3) \quad \text{III.3}$$

où d_{vap} est la diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

Mais cette modélisation ne tient pas compte du couplage entre la diffusion et la convection. Or, l'évaporation en diffusion pure est un cas très particulier. Ainsi, l'équation III.3 produit dans les cas de convection mixte une erreur proportionnelle à la taille de la goutte (Figure III.5).

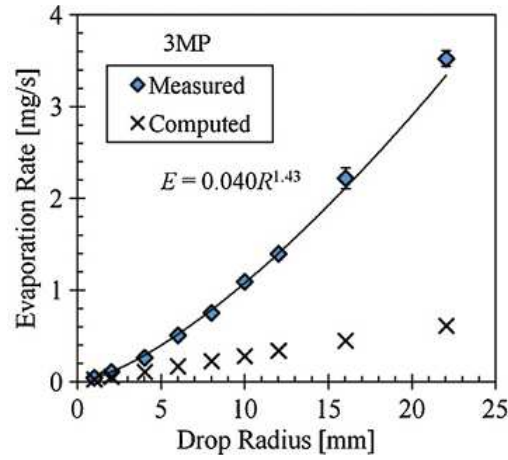


Figure III.5 - Evaporation d'une goutte de 3-méthylpentane simulée d'après l'équation 2 (x) et mesurée(♦) - in (Kelly-Zion *et al.*, 2011)

L'introduction d'un paramètre décrivant la convection libre dans l'équation III.3 permet de tenir compte de ce couplage. Encore une fois le nombre de Grashof semble à même de pondérer le taux d'évaporation.

C'est dans ce sens qu'à partir de mesures d'évaporation, Kelly-Zion *et al.* (Kelly-Zion *et al.*, 2011) proposent de multiplier l'équation III.3 par un coefficient empirique fonction de G_r (équation III.4) :

$$\frac{dm}{dt} = (1 + 0.310 G_r^{0.216}) \pi r d_{vap} \left(1 - \frac{e_{air}}{e_{sat}(T_{air})} \right) c_v (0.27\theta_e^2 + 1.3) \quad \text{III.4}$$

Cette équation III.4 nous a permis de déterminer une expression de la résistance de couche limite pour la diffusion. En effet, lorsque le vent est nul, seule la diffusion pilote l'évaporation et les taux d'évaporation décrits par les équations I.2 et III.4 doivent s'égaliser. En résolvant cette égalité, on obtiendra l'expression de la **résistance de couche limite pour la diffusion** que l'on notera r_D .

Pour $U = 0$ on a :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{E S_{urf}}{\lambda}$$

$$\left(1 + 0.310 G_r^{0.216}\right) \pi r d_{vap} (1-H) c_v (0.27 \theta^2 + 1.3) = \frac{\rho_{air} C_p^{air}}{\gamma^* r_D} S_{urf} (e_{sat}(T_S) - e_{air}) \quad \text{III.5}$$

où H est l'humidité relative de l'air.

En développant l'expression $(1-H)c_v$ on trouve le produit Hc_v qui est décrit à l'infini comme la concentration de vapeur dans l'air c_∞ (Hu & Larson, 2002). En utilisant la loi des gaz parfaits pour la vapeur d'eau

$$p_{vap} V = \frac{m}{M_{eau}} R_{GP} T \quad \text{III.6}$$

où p_{vap} est la pression de la vapeur (Pa)

m sa masse (kg)

M_{eau} sa masse molaire (kg.mol⁻¹)

R_{GP} la constante des gaz parfaits (8.31 J.K⁻¹.mol⁻¹)

T la température du fluide (K)

on peut écrire :

$$c_{air} = \frac{m}{V} = \frac{e_{air} M_{eau}}{R_{GP} T_{air}} \quad \text{III.7.a}$$

$$\text{et } c_v = \frac{e_{sat}(T_S) M_{eau}}{R_{GP} T_S} \quad \text{III.7.b}$$

En insérant ces équations dans l'égalité III.6, il vient alors :

$$r_D = \frac{\rho_{air} C_p^{air} S_{urf} R_{GP}}{\pi \gamma^* d_{vap} r M_{eau}} \frac{1}{(0.27 \theta^2 + 1.3) \left(1 + 0.310 G_r^{0.216}\right)} \frac{e_{sat}(T_S) - e_{air}}{\frac{e_{sat}(T_S)}{T_S} - \frac{e_{air}}{T_{air}}} \quad \text{III.8}$$

Contrairement à l'expression de r_H en convection forcée qui dépend uniquement des conditions d'évaporation et de la forme de la goutte, l'expression III.8 fait apparaître une dépendance au déficit de pression de vapeur ($e_{sat}(T_S) - e_{air}$), à la température de l'air (T_{air}) et à la température de surface (T_S).

La linéarisation de r_D faite en supposant $T_s \approx T_{air}$, permet d'obtenir une expression ne dépendant plus que des conditions d'évaporation :

$$r_D = \frac{\rho_{air} C_p^{air} S_{urf} R_{GP}}{\pi \gamma^* d_{vap} r M_{eau}} \frac{1}{(0.27\theta^2 + 1.3)(1 + 0.310G_r^{0.216})} T_{air} \quad \text{III.9}$$

Nous avons fait ici une hypothèse forte sur le gradient de température entre l'air et la surface de la goutte. Les perspectives d'amélioration de la représentation de r_H seront discutées par la suite.

Nous disposons à présent de deux expressions pour la résistance de la couche limite correspondant à deux cas limites : r_D pour la convection libre (pour une vitesse du vent quasiment nulle, notée U_{diff} , fixée arbitrairement à 10^{-8} m.s^{-1}) et r_C pour la convection forcée (à partir d'une vitesse de vent seuil notée U_{seuil} prise égale à 0.5 m.s^{-1} d'après le Tableau III.3 la Figure III.4) définie par :

$$r_C = \frac{1.12 L \rho_{air} C_p^{air}}{0.6 R_e^{0.47} k_{air}} \quad \text{III.10}$$

Or dans la pratique, l'évaporation d'une goutte à l'air libre peut se faire en convection libre, forcée et mixte et passer d'un type de convection à l'autre de **manière continue** en fonction de l'intensité du vent. Il est donc important pour la modélisation de disposer d'une expression de cette résistance, notée r_M , dans le cas mixte. Ne connaissant pas la forme analytique du cas mixte, notamment aux points de raccordement aux valeurs U_{diff} et U_{seuil} , celle-ci a été déduite des deux cas extrêmes en raccordant linéairement les deux expressions r_D et r_C entre les vitesses U_{diff} et U_{seuil} (Figure III.6). Le choix d'un raccord linéaire est un parti pris de notre part, qui restitue de manière simple le sens d'évolution de la résistance de couche limite.

$$\ln(r_C) = \ln\left(\frac{1.12 L \rho_{air} C_p^{air}}{0.6} \left(\frac{U}{L}\right)^{0.47}\right) - 0.47 \ln(U) \quad \text{III.11}$$

Suivant l'équation III.11 où $\ln(r_C)$ est une fonction linéaire de $\ln(U)$ (cf. chapitre I §I.2) (Butler, 1990), nous avons également exprimé r_M sous la forme $a \ln(U) + b$. Le

raccordement à r_D pour $U=U_{diff}$ et à r_C pour $U=U_{seuil}$ permet d'exprimer les coefficients a et b :

$$a = \frac{\ln(r_C(U_{seuil})) - \ln(r_D(U_{diff}))}{\ln(U_{seuil}) - \ln(U_{diff})} \quad \text{III.12}$$

$$\text{et } b = \ln(r_D(U_{diff})) - a \ln(U_{diff}) \quad \text{III.33'}$$

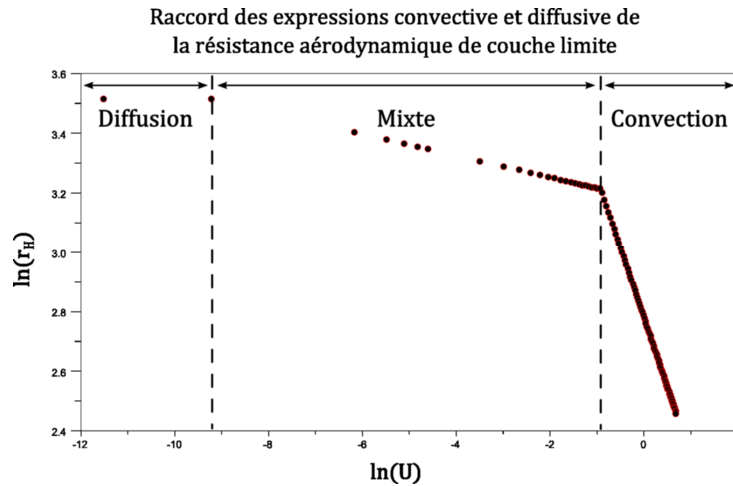


Figure III.6 – Tracé des différentes expressions de la résistance de couche limite raccordées dans l'espace logarithmique

Ainsi, on détermine un critère de choix qui déterminera selon la vitesse du vent quelle expression sera employée (Figure III.7)

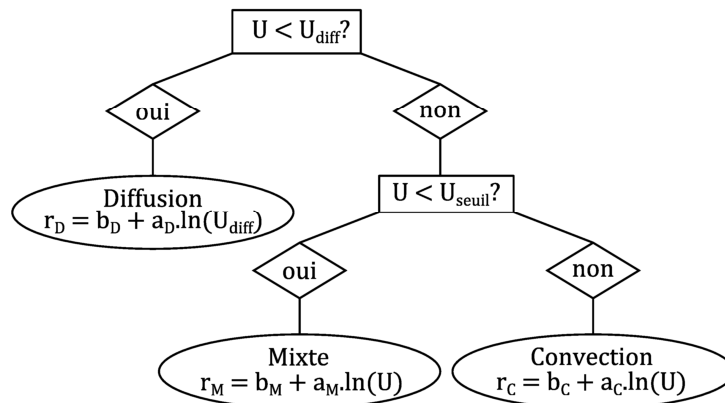


Figure III.7 – Critères sur la vitesse du vent déterminant l'expression de la résistance de couche limite employée pour le calcul

Nous disposons à présent d'une expression continue de la résistance de la couche limite fonction de la vitesse du vent *i.e.* quel que soit le type d'écoulement considéré (Figure III.8).

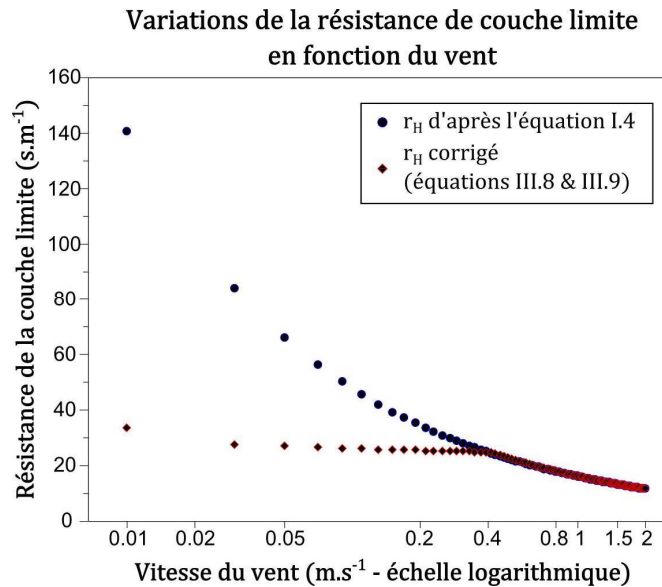


Figure III.8 – Evolution de la résistance de couche limite en fonction de la vitesse du vent d'après la représentation de l'équation I.4 (tracé bleu) et celle des équations III.8 et III.9 (tracé rouge)

I.3. Nouvelle validation du modèle après correction des équations

Une fois le modèle modifié (cf. §1.2.b.) les tests de validation du modèle par comparaison avec les mesures de Magarey sur Parafilm 'M' ont été repris pour la vitesse du vent et les autres paramètres intervenant dans la simulation de l'évaporation : le volume de la goutte, la température de l'air, l'humidité relative de l'air, et le rayonnement.

I.3.a. Vitesse du vent variable

La durée d'évaporation à vitesse de vent variable simulée après correction est donnée dans le Tableau III.4. A conditions climatiques équivalentes, notre représentation de la diffusion donne une durée identique, l'évaporation par diffusion ne tenant logiquement

pas compte de la vitesse du vent. Ainsi, pour un vent de 0.05m.s^{-1} et un vent de 0.025m.s^{-1} dans les mêmes conditions, on calcule la même durée d'évaporation (cf. les deux premières lignes du Tableau III.4). Mais la précision de la totalité des mesures n'étant pas fournie par l'auteur (Magarey *et al.*, 2005a), ces dernières peuvent être sujettes à discussion.

Volume (L)	Vitesse du Vent (m.s^{-1})	Tair ($^{\circ}\text{C}$)	Humidité Relative (%)	Rayonnement Net (W.m^{-2})	Durée d'Evaporation Observée (min)	Durée d'Evaporation Simulée (min)
5.00E-06	0.025	24.8	43	0	65	72.83
5.00E-06	0.05	24.8	43	0	47	72.83
5.00E-06	0.15	25.3	43	0	51	71.83
5.00E-06	0.25	25.3	43	0	50	64.83
5.00E-06	0.4	25.3	43	0	39	52.00
5.00E-06	0.5	25.3	43	0	39	46.83
5.00E-06	1	25.3	43	0	28	33.83
5.00E-06	1	24.8	43	0	38	34.17
5.00E-06	1.25	24.8	43	0	30.5	30.83
5.00E-06	1.5	25.3	43	0	22	28.00
5.00E-06	1.5	24.8	43	0	36	28.33
5.00E-06	2.5	25.3	43	0	21	22.00
5.00E-06	3	25.3	43	0	22	20.17
5.00E-06	3	24.8	43	0	20	20.50
5.00E-06	3.75	24.8	43	0	19	18.50
5.00E-06	4	24.8	43	0	15	17.83
5.00E-06	5	25.3	43	0	24	15.83
R ²	0.8671					
Erreur Type	10.3932					
Biais	4.98					

Tableau III.4 – Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à volume de goutte variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

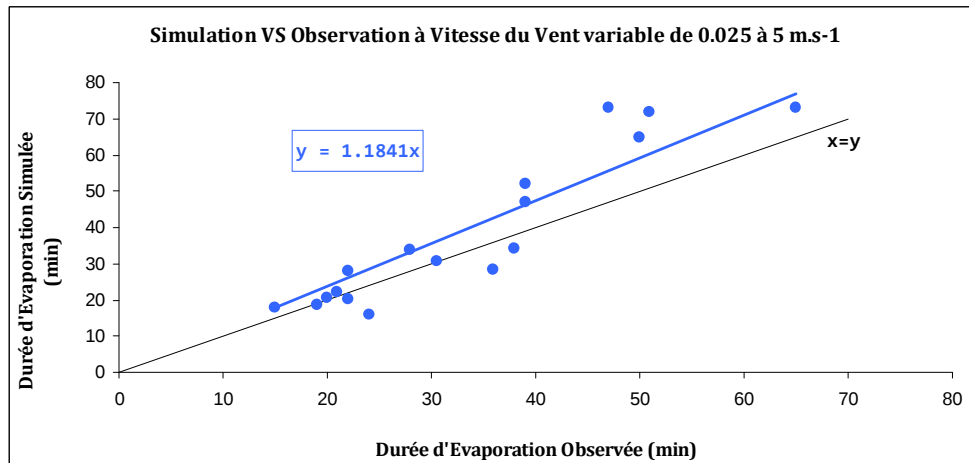


Figure III.9 – Comparaison entre les durées d'évaporation observées et simulées pour la vitesse du vent variable après amélioration de la représentation du vent dans la résolution des équations de bilan thermique

Les résultats de la modélisation en fonction du vent sont nettement plus satisfaisants (Figure III.9) avec un coefficient R^2 égal à **0.87** et une pente de la régression de **1.18**.

I.3.b. Volume Variable

Les données sont mesurées à paramètres climatiques constants (température fixée à 20°C, humidité relative à 48%, et vitesse du vent à 0.5 m.s⁻¹), dans le noir (rayonnement net nul). Seul le volume des gouttes est modifié et varie de 1μL à 50 μL (Tableau III.5).

Volume (L)	Vitesse du Vent (m.s ⁻¹)	Tair (°C)	Humidité Relative (%)	Rayonnement Net (W.m ⁻²)	Durée d'Evaporation Observée (min)	Durée d'Evaporation Simulée (min)
1.00E-06	0.5	20	48	0	18	26.47
2.00E-06	0.5	20	48	0	34	37.68
3.00E-06	0.5	20	48	0	39	46.33
4.00E-06	0.5	20	48	0	46	53.65
5.00E-06	0.5	20	48	0	51	60.12
1.00E-05	0.5	20	48	0	88	85.60
2.00E-05	0.5	20	48	0	130	121.88
2.50E-05	0.5	20	48	0	153	136.58
4.00E-05	0.5	20	48	0	147	173.57
5.00E-05	0.5	20	48	0	195	194.50
R²	0.9652					
Erreur Type	11.5234					
Biais	3.54					

Tableau III.5 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à volume variable – d'après (Magarey, communication personnelle)

Les observations montrent qu'une augmentation du volume de la goutte induit une augmentation de la durée d'évaporation de ladite goutte (Tableau III.5 & Figure III.10).

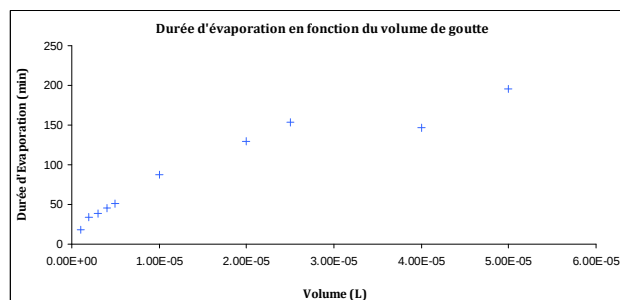


Figure III.10 - Evolution de la durée d'évaporation des gouttes en fonction de leur volume – d'après (Magarey, communication personnelle)

Nos simulations, pour lesquelles le volume est la première variable d'entrée, sont bien sûr sensibles à la variation du volume, et en comparant les durées d'observation simulées à celles observées, la corrélation est bonne, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.96$ (Tableau III.5 & Figure III.11). La simulation présente toutefois une erreur type de l'ordre de 11.5 minutes. Cela peut induire une forte erreur sur

l'évaporation de gouttes de faible volume ($V < 5\mu\text{L}$). En effet, pour une goutte de $1\mu\text{L}$, l'erreur commise ici par notre modèle est de 46.5%, et elle passe à 15% pour une goutte de $5\mu\text{L}$. Il est toutefois à noter que cette incertitude peut contenir les éventuelles erreurs de mesure.

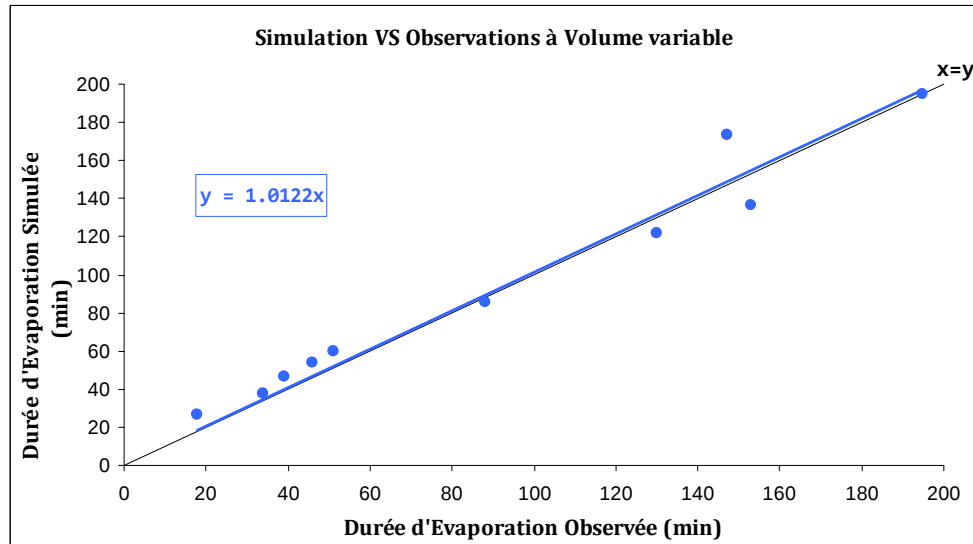


Figure III.11 - Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à volume de gouttes variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

I.3.c. Température Variable

Les données ont ici été mesurées en fixant tous les paramètres climatiques hormis la température, qui varie de 10°C à 35°C avec une précision de $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ (Magarey *et al.*, 2005a). Trois ensembles de mesures ont été effectués pour des volumes de gouttes de $1\mu\text{L}$, $5\mu\text{L}$ et $10\mu\text{L}$ (Tableau III.6). Pour les gouttes de $10\mu\text{L}$, seules 2 mesures ont été effectuées, pour des températures de 20.1°C et 20.4°C . La grande différence (29 minutes) entre les deux durées d'évaporation mesurées vient probablement du fait que ces mesures proviennent d'une autre série de données, des conditions spécifiques telles que le dépôt de goutte peuvent avoir eu une influence non négligeable sur la durée d'évaporation des gouttes.

Volume (L)	Vitesse du Vent (m.s ⁻¹)	Tair (°C)	Humidité Relative (%)	Rayonnement Net (W.m ⁻²)	Durée d'Evaporation Observée (min)	Durée d'Evaporation Simulée (min)
1.00E-06	0.5	10.1	70	0	51	66.33
1.00E-06	0.5	15.2	69	0	39	53.83
1.00E-06	0.5	20.4	70	0	41	48.00
1.00E-06	0.5	25	71	0	37	44.33
1.00E-06	0.5	30	70	0	35	38.17
1.00E-06	0.5	35	70	0	30	34.67
5.00E-06	0.5	10.1	70	0	148	150.50
5.00E-06	0.5	15.2	69	0	125	122.33
5.00E-06	0.5	20.1	70	0	110	109.67
5.00E-06	0.5	20.1	70	0	110	109.67
5.00E-06	0.5	20.4	70	0	98	108.83
5.00E-06	0.5	25	71	0	101	100.50
5.00E-06	0.5	30	70	0	78	86.67
5.00E-06	0.5	35	70	0	77	78.83
1.00E-05	0.5	20.1	70	0	167	156.17
1.00E-05	0.5	20.4	70	0	138	154.83
R ²	0.9755					
Erreur Type	8.6606					
Biais	4.90					

Tableau III.6 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à température de l'air variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

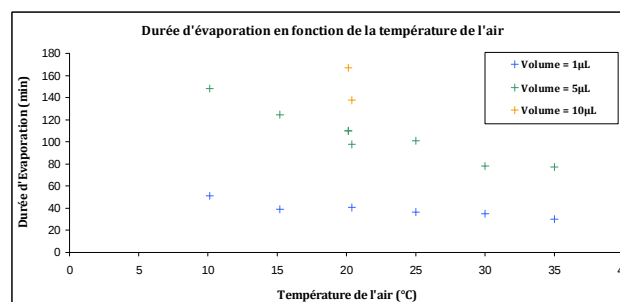


Figure III.12 – Evolution de la durée d'évaporation en fonction de la température de l'air – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

Les données observées montrent que l'influence de la température est relativement faible pour les gouttes de 1 µL, mais cette influence augmente pour des gouttes de 5 µL (Figure III.12).

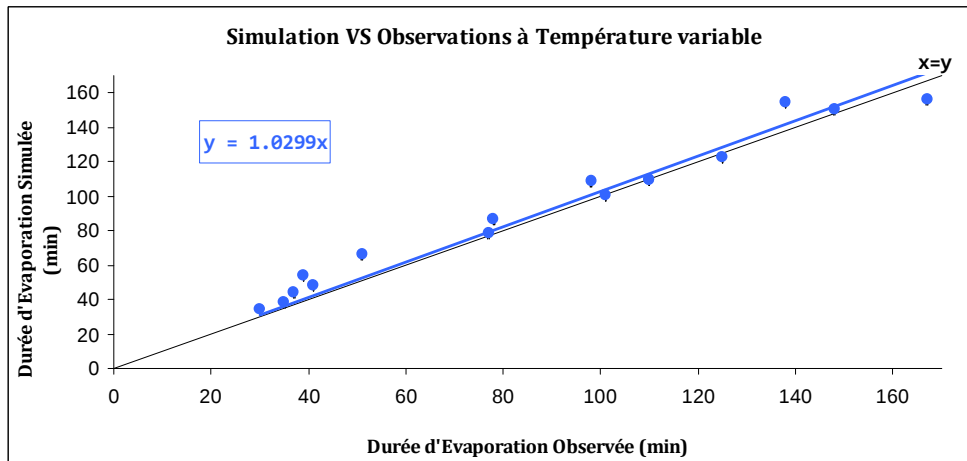


Figure III.13 - Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à température variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

La comparaison de nos simulations avec les durées d'évaporation observées montre une nouvelle fois un bon accord, avec un R^2 de **0.98**. L'erreur type est de l'ordre de 8.6 minutes, ce qui reste une nouvelle fois important pour les plus petites gouttes, mais l'erreur est réduite avec l'augmentation de température (Figure III.13).

I.3.d. Humidité Relative Variable

Dans cette partie, l'humidité relative est le paramètre variable. Celle-ci varie de 14% à 90% avec une précision de $\pm 3\%$ (Magarey *et al.*, 2005a). Trois volumes de gouttes ont été employés : 1 μ L, 5 μ L et 10 μ L. On remarque que si l'influence de l'humidité relative augmente encore une fois avec le volume des gouttes, l'évaporation des gouttes de 1 μ L est plus sensible à l'humidité relative qu'à la température (Tableau III.7 & Figure III.14).

La comparaison des observations avec nos résultats de simulation dans ces conditions donnent encore une fois un accord satisfaisant, avec un R^2 de **0.90**. De nouveau, l'erreur type reste élevée avec ici une valeur de l'ordre de 15 minutes (Figure III.15).

Volume (L)	Vitesse du Vent (m.s ⁻¹)	Tair (°C)	Humidité Relative (%)	Rayonnement Net (W.m ⁻²)	Durée d'Evaporation Observée (min)	Durée d'Evaporation Simulée (min)
1.00E-06	0.5	20	14	0	13	14.67
1.00E-06	0.5	20	34	0	18	20.17
1.00E-06	0.5	20	52	0	25	29.00
1.00E-06	0.5	20	62	0	27	37.50
1.00E-06	0.5	20	70	0	44	48.50
1.00E-06	0.5	20	71	0	27	50.17
1.00E-06	0.5	20	74	0	67	56.33
1.00E-06	0.5	20	78	0	71	67.33
1.00E-06	0.5	20	80	0	59	74.33
1.00E-06	0.5	20	89	0	114	137.83
1.00E-06	0.5	20	90	0	110	151.83
5.00E-06	0.5	20	14	0	37	33.33
5.00E-06	0.5	20	34	0	49	45.83
5.00E-06	0.5	20	52	0	69	65.83
5.00E-06	0.5	20	62	0	77	85.17
5.00E-06	0.5	20	70	0	110	110.00
5.00E-06	0.5	20	70	0	110	110.00
5.00E-06	0.5	20	70	0	113	110.00
5.00E-06	0.5	20	74	0	162	128.00
5.00E-06	0.5	20	78	0	120	152.67
5.00E-06	0.5	20	80	0	155	168.67
1.00E-05	0.5	20	14	0	51	47.33
1.00E-05	0.5	20	18	0	53	50.33
1.00E-05	0.5	20	34	0	78	65.17
1.00E-05	0.5	20	52	0	102	93.67
1.00E-05	0.5	20	62	0	130	121.33
1.00E-05	0.5	20	70	0	167	156.50
1.00E-05	0.5	20	71	0	155	162.33
R ²	0.90					
Erreur Type	15.10					
Biais	2.89					

Tableau III.7 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à humidité relative variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

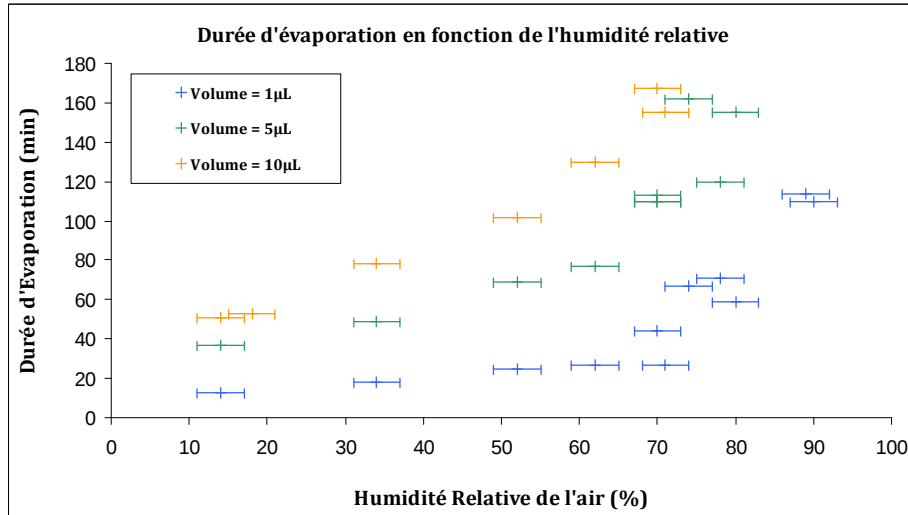


Figure III.14 – Evolution de la durée d'évaporation en fonction de l'humidité relative – d'après (Magarey, communication personnelle)

Dans la majorité des cas, le modèle surestime la durée d'évaporation pour une forte humidité relative (supérieure à 60%) et sous-estime la durée d'évaporation pour des humidités relatives faibles (inférieures à 60%). Ces erreurs d'estimations peuvent provenir de la manière dont la pression de vapeur saturante (dont dépend l'humidité relative) est reliée à la température de l'air. En effet, la formule utilisée dans le modèle

(équation I.8) de la forme $a_{Allen} \exp\left(\frac{b_{Allen} T_{air}}{T_{air} + c_{Allen}}\right)$ est une expression empirique définie

comme un standard pour l'estimation de la pression de vapeur saturante en conditions naturelles (cette équation a été établie à partir de mesures météorologiques moyennées sur une journée et prises à 2m du sol au-dessus d'un sol recouvert d'herbe irriguée) (Allen *et al.*, 1998). Si elle permet d'approcher l'ensemble des valeurs observées dans la réalité, cette équation reste une approximation mais nous ne savons toutefois pas quelle est l'amplitude de variabilité des paramètres empiriques a_{Allen} , b_{Allen} et c_{Allen} .

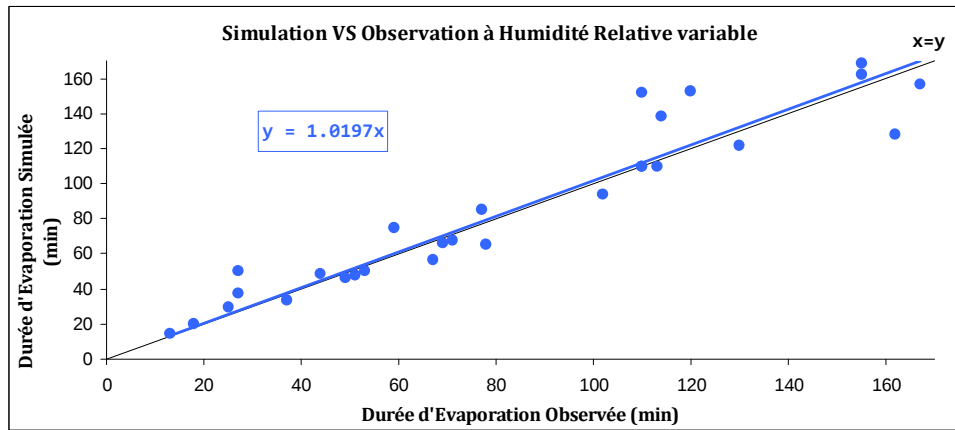


Figure III.15 – Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à humidité relative variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

I.3.e. Rayonnement Variable

L'influence du rayonnement est intuitivement forte dans le processus d'évaporation. C'est pourquoi Magarey a fixé un volume de goutte à $5\mu\text{L}$ et fixé les paramètres climatiques autres que le rayonnement net, qui varie dans des proportions réalistes, de 0W.m^{-2} à 837W.m^{-2} (Tableau III.8).

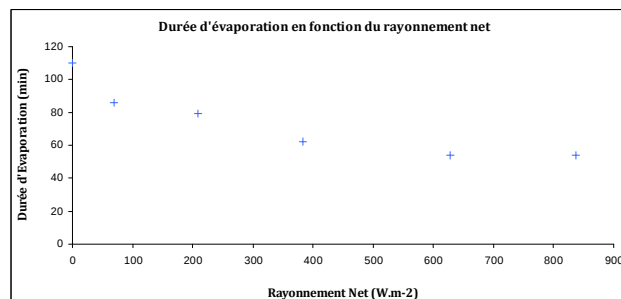


Figure III.16 – Evolution de la durée d'évaporation en fonction du rayonnement – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

La corrélation entre rayonnement et durée d'évaporation est claire, malgré une pente relativement faible (Figure III.16). On peut remarquer de plus les durées d'évaporation observées par Magarey pour les rayonnements de 628.02W.m^{-2} et 837.36W.m^{-2} sont identiques. Cela ne semble pas normal et est certainement lié encore une fois à des erreurs de mesure.

Volume (L)	Vitesse du Vent (m.s ⁻¹)	Tair (°C)	Humidité Relative (%)	Rayonnement Net (W.m ⁻²)	Durée d'Evaporation Observée (min)	Durée d'Evaporation Simulée (min)
5.00E-06	0.5	20	70	0	110	109.88
5.00E-06	0.5	20	70	69.78	86	98.28
5.00E-06	0.5	20	70	209.34	79	81.13
5.00E-06	0.5	20	70	383.79	62	66.57
5.00E-06	0.5	20	70	628.02	54	53.12
5.00E-06	0.5	20	70	837.36	54	45.22
R ²	0.9365					
Erreur Type	6.5093					
Biais	1.53					

Tableau III.8 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à rayonnement net variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

Dans notre modèle, l'influence du rayonnement n'est pas limitée et les durées d'évaporation simulées pour ces deux valeurs de rayonnement net sont différentes. Nos simulations montrent tout de même un bon accord avec les données observées, et on a ainsi un R² de **0.94**. L'erreur type est de l'ordre de 6.5 minutes, et l'erreur faite sur la mesure pour $R_n = 837.36 \text{ W.m}^{-2}$ est de 16% alors qu'elle est de 0.1% pour $R_n = 0 \text{ W.m}^{-2}$ (Figure III.17).

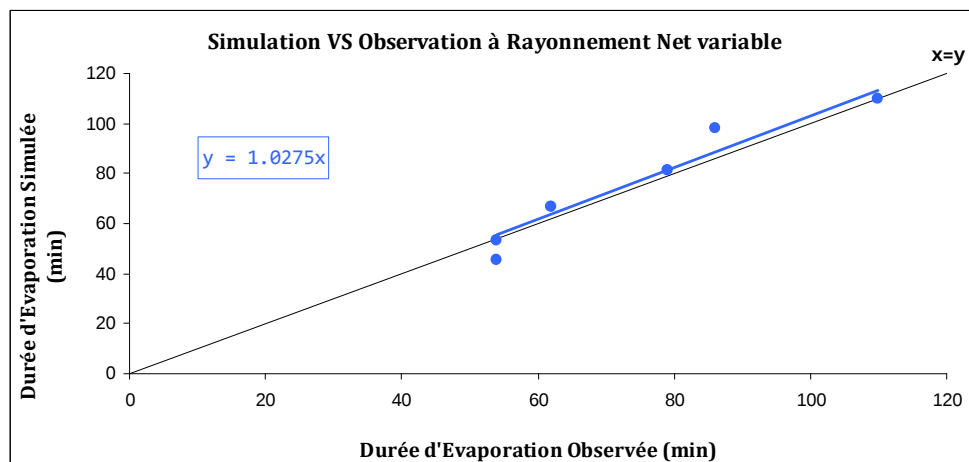


Figure III.17 – Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à rayonnement variable – d'après (Magarey, *communication personnelle*)

I.3.f. Bilan et remarques sur la validation du modèle

Après correction de l'expression de la résistance aérodynamique pour prendre en compte les conditions de vent faible, les équations de notre modèle ont restitué de manière satisfaisante l'influence des différents paramètres sur l'évaporation.

Les pentes des régressions linéaires entre simulations et observations et les coefficients de détermination de cette comparaison sont résumés pour chaque variable dans le Tableau III.9.

Paramètre variable	Pente de la droite de régression	R ²
Volume	1.012	0.965
Température	1.030	0.976
Humidité Relative	1.020	0.900
Vitesse du Vent	1.184	0.867
Rayonnement Net	1.027	0.936

Tableau III.9 – Récapitulatif des pentes de régression et des coefficients de détermination calculés pour les comparaisons entre simulation et observation

Il est important de rappeler que les données issues des mesures de Magarey dont nous avons disposé présentent une certaine incertitude. En effet, elles comportent très peu de répétitions et l'incertitude de la mesure n'est indiquée que pour la température et l'humidité relative.

L'analyse des données fournies par Magarey montre que la précision de ses mesures varie de 2 à 64%. Pour les trois répétitions de la vitesse de vent notamment (1, 1.5 et 3 m.s⁻¹), l'incertitude de mesure est d'au moins 10%. La difficulté expérimentale de maintenir une vitesse homogène de vent tout en conservant une hygrométrie constante est certainement à l'origine de ces erreurs.

L'objectif final de ce modèle étant d'être couplé à une courbe de risque de type Mills (Figure B.23), il est important d'**évaluer la précision de notre modèle à celle de la prévision de risques**. L'erreur type la plus forte de nos simulations est de l'ordre de 15 minutes, et cette valeur est affectée par l'incertitude des mesures. Nous avons déterminé

l'erreur commise sur l'estimation de risques pour les infections primaire (par ascospores) et secondaire (par conidies) (Figure III.18). L'erreur commise est au maximum de 4.5%. Il ne semble donc pas nécessaire de chercher à encore améliorer les estimations d'évaporation au vu de cette validation. La question du couplage du modèle d'évaporation à des courbes de risques sera toutefois traitée dans la discussion générale de ce travail.

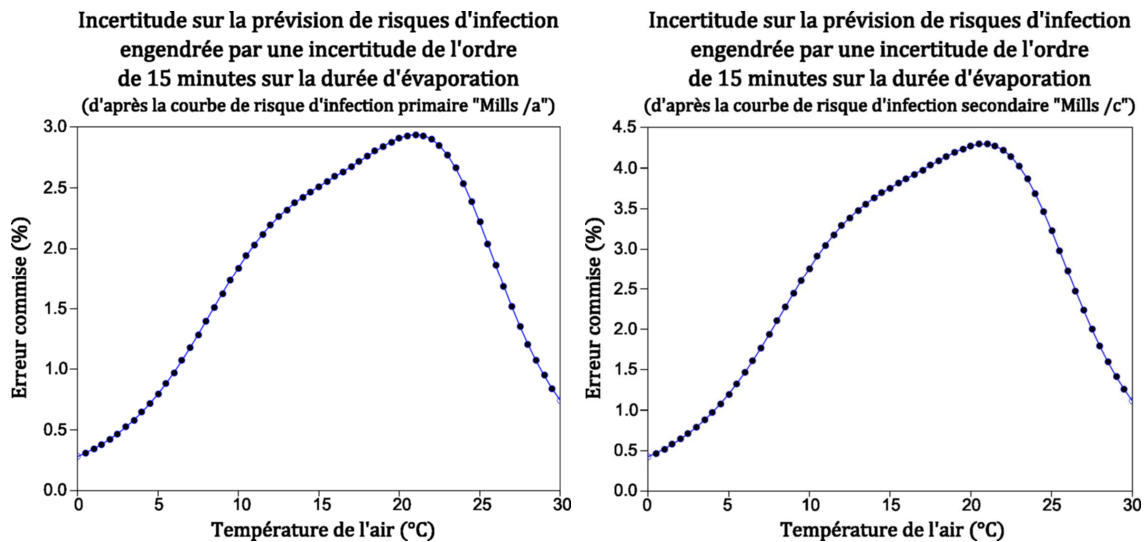


Figure III.18 – Evolution de l'incertitude sur la prévision de risque d'infection en fonction de la température pour l'infection primaire (gauche) et secondaire (droite)

II. Analyse de sensibilité

Une fois le modèle validé par comparaison avec des mesures expérimentales d'évaporation sur Parafilm 'M', nous avons cherché à évaluer quels paramètres et interactions de paramètres prédominaient sur le phénomène d'évaporation modélisé. Nous avons pour cela fait une analyse de sensibilité du modèle aux différents paramètres d'entrée, en faisant varier ceux-ci dans les gammes de valeurs observées dans la réalité (Tableau III.10) et en calculant l'évaporation sous toutes les combinaisons possibles de ces paramètres. Nous avons ensuite effectué une ANOVA (analyse des variances – R) de la durée d'humectation en fonction des paramètres morphologiques (volume de goutte, angle de contact) et climatiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent, rayonnement) et des interactions entre eux (Figure III.19). Du fait du grand nombre de paramètres intervenant dans le processus évaporatif, le logiciel R s'est montré incapable de décomposer la variance de toutes les interactions. Nous avons donc pris le parti de ne sélectionner que les interactions *a priori* les plus influentes (Tableau III.11). Les résidus englobent toutes les interactions qui ne sont pas discriminées.

On observe sur la figure III.19 que pour les volumes supérieurs ou égaux à 20 μ L l'ordre des indices d'influence est constant. Pour les volumes inférieurs, l'humidité relative est le paramètre le plus influent.

Les paramètres ont été classés par ordre décroissant d'influence pour déterminer à quelles variables notre modèle est le plus sensible (Tableau III.11). L'évaporation simulée par notre modèle apparaît être majoritairement sensible aux valeurs d'humidité relative et de rayonnement.

Variable	Volume (µL)	Angle de contact (°)	Température de l'air (°C)	Humidité Relative (%)	Vitesse du Vent (m.s ⁻¹)	Rayonnement (W.m ⁻²)
Minimum	0.1	5	5	5	0.5	0
Maximum	110.1	125	40	95	5.0	1200
Pas	20.0	15	5	15	0.5	150

Tableau III.10 – Gamme de variation des paramètres pour l'analyse de sensibilité

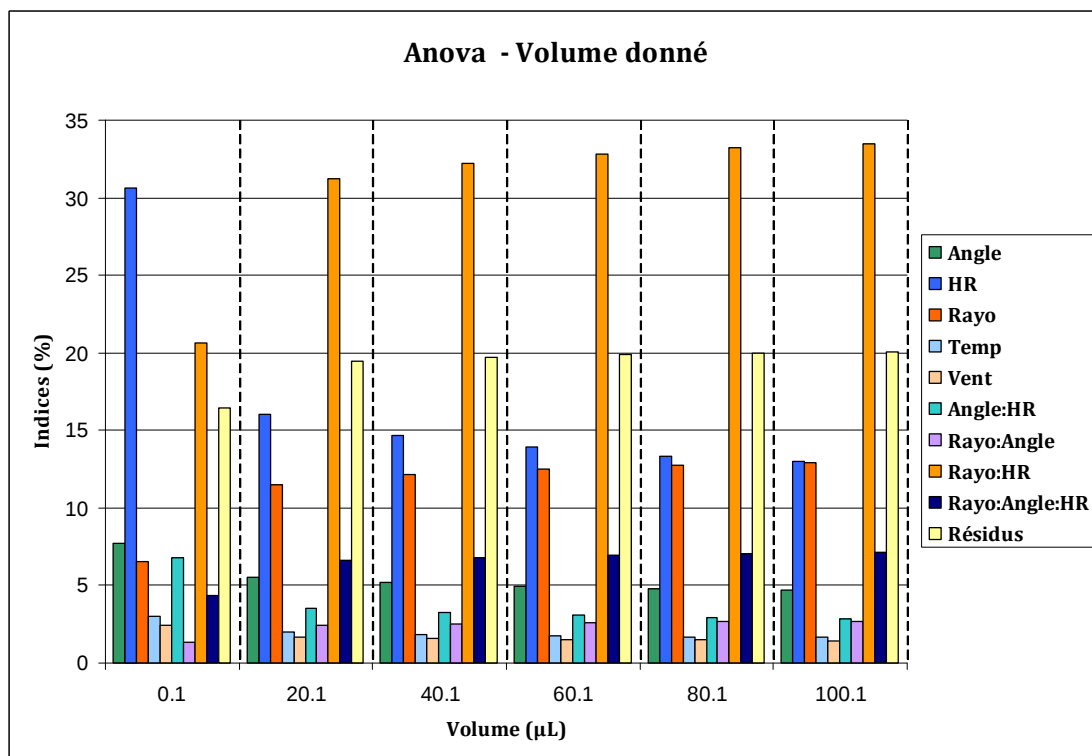


Figure III.19 – Analyse de variance des différents paramètres intervenant dans le calcul de l'évaporation, classés par volume de goutte (*Rayo* = Rayonnement, *Angle* = Angle de contact, *HR* = Humidité Relative, *Temp* = Température)

Paramètres & Interactions		Indices d'influence (%)
Du plus influent  au moins influent	Rayonnement - Humidité Relative	30.61
	Rayonnement	11.38
	Humidité Relative	16.94
	Angle de contact	5.48
	Rayonnement - Angle de contact - Humidité Relative	6.48
	Angle de contact - Humidité Relative	3.75
	Rayonnement - Angle de contact	2.39
	Température	2.00
	Vent	1.69
	Résidus	19.28

Tableau III.11 – Classement des paramètres et interactions entre paramètres des plus influents aux moins influents sur le bilan thermique d'évaporation de notre modèle

III. Simulations du modèle en conditions naturelles

Il a fallu, pour compléter la validation du modèle, comparer des observations d'évaporation en conditions naturelles (*i.e.* où tous les paramètres évoluent simultanément) à des simulations.

Des gouttes de 10µL ont été déposées au verger sur un capteur de durée d'humectation placé à une hauteur de 3m à l'air libre. La mesure simultanée – à raison d'une mesure toutes les 10 secondes – des variables météorologiques a fourni un ensemble de données qui ont servi de variables d'entrée pour le modèle, renouvelées toutes les 10 itérations de pas de temps 1 seconde. Le dispositif expérimental fait également partie intégrante de l'étude de la variabilité spatiale de la durée d'humectation qui fait l'objet du chapitre suivant. **Le dispositif sera donc décrit en détails dans le §I chapitre IV.**

D'après nos mesures de mouillabilité sur capteurs de durée d'humectation (cf. Chapitre II, Tableau II.5), nous avons choisi pour les gouttes un angle de contact de 66° (la mesure était précisément $(66.2 \pm 7.2)^\circ$).

Neuf dépôts de gouttes ont été effectués au cours de la journée du 27 juin 2011. Les conditions climatiques moyennes sont données dans le Tableau III.12.

Episode n°	Température Moyenne (°C)	Humidité Relative Moyenne (%)	Vitesse du Vent moyenne (m.s ⁻¹)	Rayonnement Global moyen (W.m ⁻²)	Durée Observée (min)	Durée Simulée (min)
1	20.2	61	0.73	224.77	17.33	82.17
2	20.9	58	0.73	279.08	16.33	71.83
3	28.4	33	1.57	825.61	4.67	18.67
4	30.1	31	1.71	921.21	2.83	17.67
5	31.4	25	1.99	886.15	3.83	14.50
6	30.1	31	1.76	921.47	4.17	15.50
7	31.7	26	1.44	868.00	5.00	15.33
8	31.7	25	1.80	852.48	6.33	15.83
9	32.2	27	1.68	734.41	4.00	14.67
R ²	0.96					
Erreur Type	30.28					
Biais	22.41					

Tableau III.12 – Durées d'évaporation moyennes observées au verger, et indication des variables climatiques moyennes pour chaque épisode

La comparaison entre les durées d'évaporation observées et les durées simulées dans les mêmes conditions présente un écart important (Tableau III.12 & Figure III.20). D'après la pente de régression linéaire de la Figure III.20, les durées simulées s'avèrent durer en moyenne 4.35 fois plus longtemps que celles mesurées sur les capteurs. Le coefficient R^2 est de l'ordre de 0.96, mais n'a aucune valeur statistique, les données étant réparties en deux nuages indépendants. En effet, si l'on ne tient compte que des épisodes.3 à 9, le R^2 est de l'ordre de **0.01**.

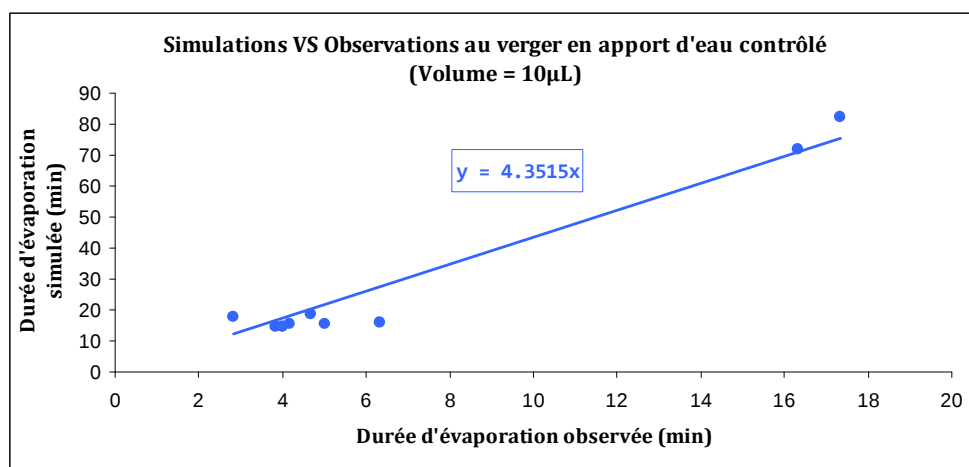


Figure III.20 – Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées au verger

Toutefois, une comparaison entre les durées d'évaporation observées et simulées et les paramètres climatiques moyens par épisode : température de l'air, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement global fait apparaître un rapport de l'ordre de 4.5 entre observations et simulations (Figure III.21). Et elle traduit, – comme il a été vérifié au § **b**. – la restitution correcte par le modèle de l'influence de ces paramètres sur la durée d'évaporation.

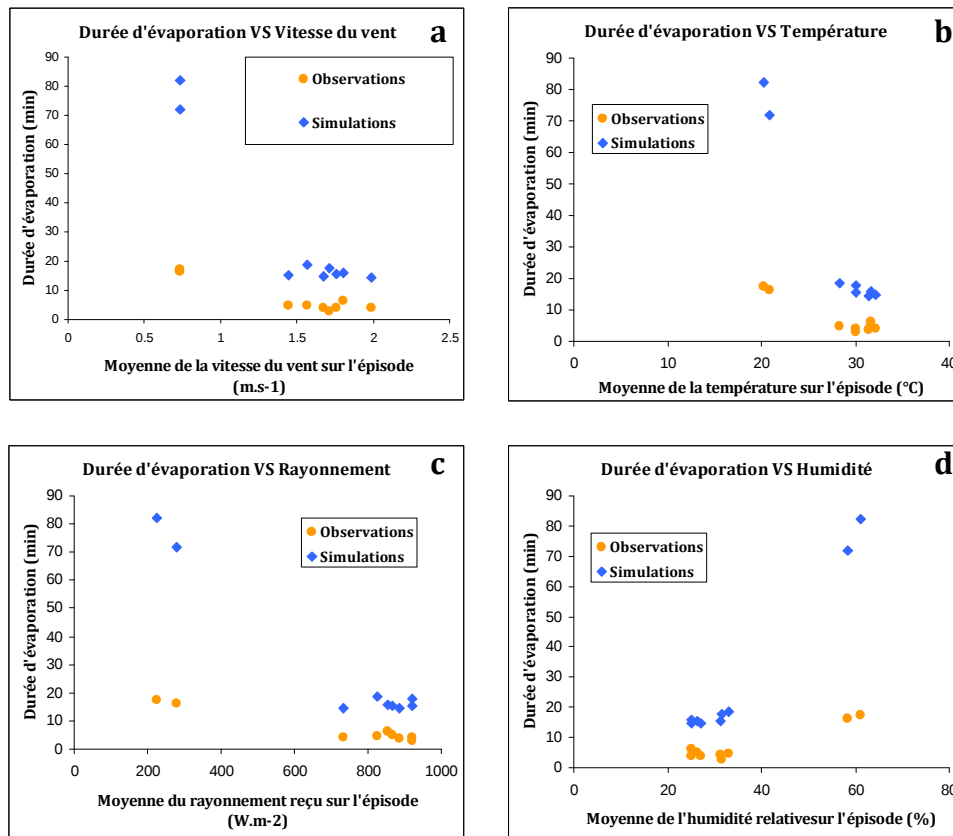


Figure III.21 – Evolution de la durée d'évaporation observée et simulée en fonction de a) la vitesse du vent; b) la température; c) le rayonnement; d) l'humidité relative

En revanche, le modèle d'évaporation a été validé via les observations menées par Magarey (Magarey *et al.*, 2005a; Magarey, *communication personnelle*). Celles-ci correspondent à des mesures effectuées sur un support bien particulier : le Parafilm 'M' qui présente des propriétés de mouillabilité différentes d'un capteur de durée d'humectation (Tableaux II.4 & II.6). Ainsi les mesures sur capteurs effectuées au champ présentent deux différences majeures par rapport au cas de validation : l'**angle de contact** et des **conditions climatiques fluctuantes dans le temps**.

On peut également supposer que la surface des capteurs de durée d'humectation s'échauffe en plein soleil, **modifiant ainsi la température de la goutte**. Or notre modèle ne tient pas compte des échanges de chaleur entre la goutte et son support.

Nous discuterons ultérieurement de ces sources d'erreur et des pistes permettant d'améliorer le modèle.

Conclusion du chapitre

Dans la première étape de validation, le modèle d'évaporation développé au cours de ce travail a été incapable de restituer les interactions entre vitesse du vent et évaporation. Ce problème a mené à centrer les efforts de développement sur la représentation du vent, notamment lorsque ce dernier est faible *i.e.* en convection mixte, situation pas abordée dans la littérature sur des problématiques agronomiques. Après ajout d'un critère de sélection sur la vitesse du vent permettant de considérer une évaporation en convection mixte et non plus uniquement par convection forcée, nous avons pu valider le modèle par rapport à la vitesse du vent. La validation de l'ensemble des paramètres climatiques ainsi que du volume de gouttes a été effectuée. Nous avons alors cherché à analyser la sensibilité du modèle à ces différents paramètres, ce qui a mené à remarquer que l'influence de l'humidité relative et du rayonnement est nettement supérieure à celle des autres paramètres entrant en jeu dans le processus d'évaporation.

Mais une comparaison des simulations avec des mesures effectuées au verger en contrôlant le volume d'eau à évaporer sur un capteur de durée d'humectation a montré un écart important. Ainsi, nous n'avons pas été en mesure de valider ce modèle pour plus de deux supports de différentes mouillabilités.

En effet, les premières validations ont été effectuées uniquement à l'aide d'observations faites sur un seul matériau, le Parafilm 'M'. Les observations au verger ont été effectuées sur un capteur de durée d'humectation dont la mouillabilité est très différente de celle du Parafilm 'M' (cf. chapitre II). Le modèle n'est donc pas en l'état actuel en mesure d'estimer la durée d'évaporation sur d'autres supports que le Parafilm 'M'. De plus, l'absence de suivi d'évaporation sur ce support en conditions naturelles (variables climatiques fluctuant simultanément) ne permet pas de savoir si le modèle est représentatif de cette dynamique ou s'il présente également une erreur importante. Sans l'appui de données mesurées expérimentalement, il est impossible d'évaluer précisément la nature et l'origine de nos erreurs de modélisation. C'est pourquoi celles-ci seront mises en question dans la discussion générale de ce travail, où nous proposerons des perspectives pour corriger l'erreur de simulation et valider le modèle sur différents supports et en conditions climatiques réelles.

Chapitre IV

Mesures de durée d'humectation au sein
d'un couvert

Introduction

Nous avons développé un modèle d'évaporation de gouttes d'eau sur un support végétal, prenant en compte la mouillabilité dudit végétal, ainsi que les paramètres microclimatiques. Mais lors d'une pluie ou d'une rosée, ce n'est évidemment pas une seule goutte d'eau qui est à prendre en considération, mais une distribution d'eau répartie sur différentes feuilles au sein de l'arbre. Sans changement d'échelle pour passer de la goutte à l'arbre, notre modèle n'a pas de portée d'un point de vue phytopathologique et agronomique.

Gardant en ligne de mire l'objectif de disposer des outils propres à la modélisation de la durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier pour prévoir les risques d'épidémie de tavelure, nous avons mis en place un dispositif de mesure de durée d'humectation au cœur d'un verger de pommiers de variété Jubilé.

Les objectifs de ces mesures étaient multiples :

- (i) Etudier la variabilité spatiale de la durée d'humectation dans la couronne de l'arbre, et évaluer l'existence d'une corrélation entre structure de l'arbre et durée d'humectation;
- (ii) Etudier la différence sur la durée d'humectation entre pluie et rosée;
- (iii) Disposer de mesures d'humectation en conditions naturelles pour valider notre modèle (chapitre III).

Pour remplir ces objectifs, nous avons disposé des capteurs de durée d'humectation au cours des années 2009, 2010 et 2011.

La partie qui suit est entièrement dédiée à la présentation de la parcelle et du dispositif expérimental, ainsi qu'à l'analyse des résultats collectés au cours des trois saisons d'expérimentations.

I. Matériel et Méthodes

I.1. Capteur de durée d'humectation

I.1.a. Présentation des capteurs

Nous avons conçu des capteurs de durée d'humectation à mesure de résistance électrique. Selon le principe décrit au §II.4.b.iii) de la Synthèse Bibliographique, nos capteurs sont des plaques d'époxy de 7.5cm*6.3cm sur lesquels sont imprimés des circuits constitués de deux "peignes" d'or d'une surface de détection de 3.7cm*5cm, dont la conception a été assurée par la société Eurocircuits (Eurocircuits, Armeau, France). Les branches de peigne ont une épaisseur de 1mm, et l'espace entre deux branches est de 0.5mm (Figure IV.1). Ces dimensions permettent de mesurer un signal d'humectation pour des gouttes de petite taille.

Une résistance $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ est associée au circuit, et une résistance $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ se trouve en bout de câble. Le demi-pont de résistance ainsi formé permet la mesure de la résistance du circuit par une excitation électrique $V_{EX} = 2500 \text{ mV}$ provenant de la centrale d'acquisition. La centrale mesure la tension de sortie du circuit V_S , et en déduit la valeur de la résistance du circuit R_{capteur} par résolution de l'équilibre du pont (cf. schéma sur la figure B.24 dans la Synthèse Bibliographique) :

$$R_{\text{capteur}} = \frac{R_2}{\frac{V_S}{V_{EX}}} - R_2 - R_1 \quad \text{IV.1}$$

Les centrales utilisées pour le contrôle et l'acquisition des données des capteurs sont les modèles CR10X et CR1000 (Figure IV.2) de Campbell Scientific (Campbell Scientific Ltd., Loughborough, UK). Les limitations de stockage de données des centrales nous ont amené à prendre tout au long de la saison (hors expérimentations dédiées à des évaporations rapides, cf. §I.5 de ce chapitre) un taux d'échantillonnage d'une mesure toutes les 30 minutes. La durée d'évaporation suite à un épisode de pluie ou de rosée

étant de plusieurs heures, cette résolution d'acquisition des données était satisfaisante. Les données des centrales étaient téléchargées toutes les deux semaines.

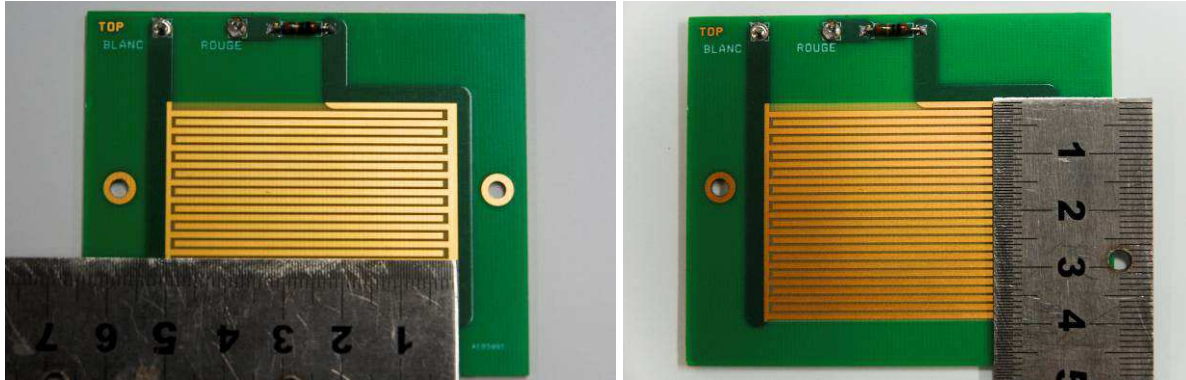


Figure IV.1 – Capteur de durée d'humectation développé au PIAF

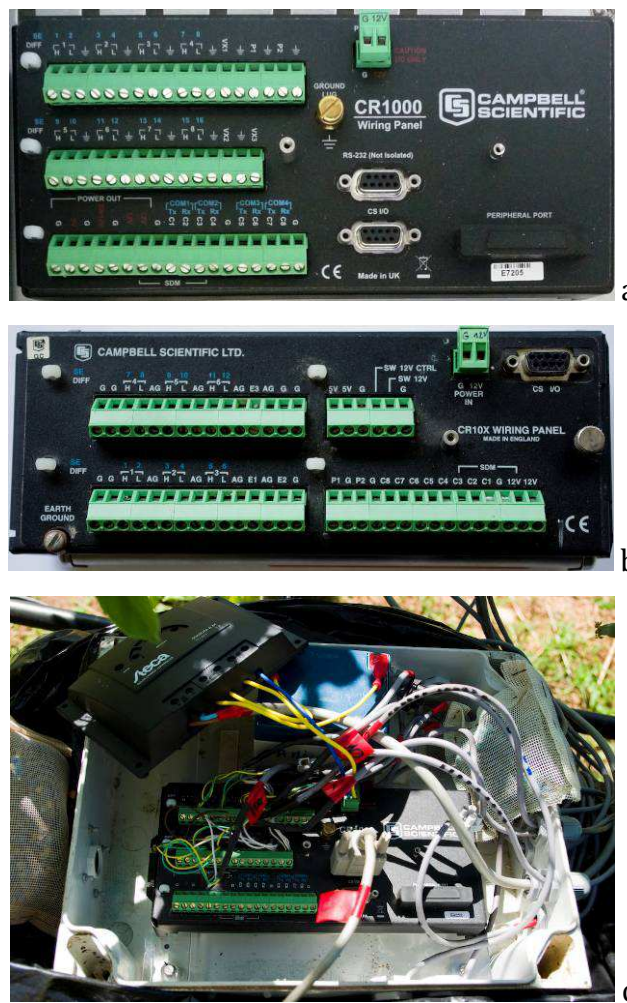


Figure IV.2 – a) Centrale d'acquisition Campbell Scientific CR 1000; b) Centrale d'acquisition Campbell Scientific CR 10X; c) Centrale CR 1000 câblée et alimentée au verger

I.1.b. Calibration des capteurs

La longueur des câbles des capteurs varie entre 3m et 6m. Celle-ci affecte la valeur de la résistance, l'atténuation du signal étant proportionnelle à la longueur du câble. Cependant, les essais des capteurs en laboratoire ont montré que le seuil de résistance d'un capteur humecté était indépendant de la longueur du câble. Ce seuil a été fixé à 500 k Ω .

On trouve dans la documentation technique de certains capteurs des "degrés d'humectation", en général discriminant un état sec d'un état peu humecté ou très humecté. S'il est bien entendu possible d'établir la différence entre un état sec et un état humecté, nous avons mené des essais en laboratoire pour déterminer s'il est possible d'établir ces degrés sur nos capteurs.

Nous avons mesuré la résistance de capteurs mouillés de différentes façon :

(i) avec des gouttes de tailles différentes, de sorte que l'eau recouvre un nombre différent de branches du circuit;

(ii) avec différentes gouttes de volume identique éparpillées sur l'ensemble du circuit.

Ces manipulations n'ont pas révélé de différences significatives dans la valeur de la résistance : celle-ci n'était pas systématiquement plus faible lorsque l'eau recouvrait une surface du circuit plus importante.

Nos capteurs de durée d'humectation ne fournissent donc qu'une information binaire : humecté, si $R_{\text{capteur}} \leq 500 \text{ k}\Omega$, et sec si $R_{\text{capteur}} > 500 \text{ k}\Omega$.

I.1.c. Conception du support des capteurs

Les capteurs de durée d'humectation étant dédiés à une installation au verger au sein de pommiers, et souhaitant en installer de nombreux dans un même arbre, il nous a fallu imaginer un support peu encombrant et suffisamment robuste pour supporter des vents et pluies. Une structure tubulaire en PVC a été imaginée, présentant l'intérêt d'être peu coûteuse et simple à fabriquer, et offrant une souplesse et une robustesse face aux conditions du verger (Figure IV.3).



Figure IV.3 – Bras de support des capteurs de durée d'humectation avec les anneaux mobiles de fixation

Un bras coudé de PVC sera ainsi fixé sur un axe droit, à l'aide de vis, de colliers de serrage ou de ruban adhésif entoilé (Figure IV.4).



Figure IV.4 – Détail de la fixation d'un bras support de capteurs

Le capteur est fixé à l'aide de tiges sur une structure articulée permettant une rotation selon 3 axes. Ainsi, quelle que soit l'inclinaison du bras, l'horizontalité du capteur est réglable (Figure IV.5).



Figure IV.5 – Détail des fixations d'un capteur de durée d'humectation et ses degrés de liberté

Deux piquets de 10cm de diamètre et de 110cm de haut sont plantés de part et d'autre de l'arbre échantillon sur la rangée à environ 60cm du tronc. Ils ont servi à fixer des bras supports vers l'intérieur de la couronne, et à éviter de trop contraindre le tronc (Figure IV.6).



Figure IV.6 – Piquet de fixation des bras support

I.2. Parcelle expérimentale

L'UERI de Gotheron (Saint-Marcel-lès-Valence, 26) dispose d'une grande surface de terres cultivables organisées en vergers protégés par des haies brise-vent (Figure IV.7). Plusieurs expériences y sont menées sur pommiers (Alaphilippe *et al.*, 2009; Simon *et al.*, 2007), dont la variété Delbard Jubilé® Delgollune, sur une parcelle plantée en 2003. On étudie notamment sur ce cultivar – peu sensible à la tavelure – les effets de la modification du mode de conduite sur la fructification (programme Européen ISAFRUIT) et les épidémies de maladie (Brun *et al.*, 2008).

Les arbres sont plantés à 2m d'intervalle dans chaque rangée, celles-ci étant espacées de 4.5m les unes des autres. Les rangées sont orientées sur l'axe Nord – Sud (Figure IV.8).

Ainsi sur cette parcelle, certains arbres sont taillés selon le mode de conduite "centrifuge", d'autres selon le mode de conduite "axe structuré". Ces architectures d'arbres offrent des conditions d'éclairement intra-couronne très contrastées (cf. Synthèse Bibliographique §II.1.c figure B.3), et nous avons donc décidé d'installer des capteurs de durée d'humectation sur un arbre de chaque mode de conduite. Des arbres appelés *pollinisateur* sont également présents sur la parcelle. Ces arbres restent de petite taille et produisent de nombreuses fleurs qui favorisent la pollinisation des arbres.



Figure IV.7 – Vue satellite de la parcelle expérimentale (source : Géoportail)



Figure IV.8 – Schéma détaillé de la parcelle Jubilé, des arbres équipés de capteurs et de la station météorologique (source de l'image de fond : Géoportail)

L'installation a eu lieu en 2009, en 2010, et également en 2011, chaque année au début du mois d'avril, en coïncidence avec le débourrement des arbres (stade phénologique C₃ sur l'échelle Fleckinger, correspondant à la sensibilité maximale – toute résistance génétique confondue – aux infections par *Venturia Inaequalis*).

Le feuillage n'étant pas réellement établi, les capteurs ont été disposés sur chaque arbre à des positions présageant des conditions d'éclairement différentes, à différentes altitudes dans le feuillage. En 2011, les capteurs ont été principalement installés à l'intérieur de la couronne dans le prolongement des branches et sous les bourgeons de pousse. Le but était d'être au plus près des pousses pour trouver une éventuelle corrélation entre éclairement des organes et développement de la tavelure (Matallah, 2011; Osbert, 2011). Ce parti pris de l'installation a eu pour conséquence de réduire la variabilité de l'éclairement reçu par les capteurs pour l'année 2011. On s'attend par conséquent à observer une variabilité d'humectation plus faible, ce qui apporterait une information sur l'impact de l'éclairement sur l'humectation : si à faible variations d'éclairement la variabilité de durée d'humectation observée est faible, les résultats de l'analyse de sensibilité du modèle d'évaporation effectuée au §II du chapitre III seront confirmés.

Chaque arbre était équipé de 12 capteurs (Figure IV.9). Nous avons disposé tous les capteurs à l'horizontale à l'aide d'une nivelle à bulle. Chaque centrale d'acquisition était alimentée par une batterie 12V rechargée à l'aide d'un panneau solaire disposé au-dessus de la rangée d'arbres.



Figure IV.9 – Arbres échantillons équipés de 12 capteurs chacun en avril 2009, à gauche l'Arbre 1 sous conduite "Axe Structuré"; à droite l'Arbre 2 sous conduite "Centrifuge"

I.3. Données météorologiques

Paramètre clé des méthodes d'estimation de risque d'épidémie de maladies fongiques utilisées en verger, la durée d'humectation est une mesure standard des stations météorologiques en verger, qui comprennent par conséquent un capteur semblable au nôtre. Le domaine de Gotheron est équipé d'une telle station, avec l'aide du réseau AgroClim (US1116-INRA). Mais le positionnement standard de la station veut qu'elle soit située à environ 1 km de la parcelle de pommiers Jubilé, sur une zone dégagée. Dans ces conditions, les paramètres mesurés ne sont pas représentatifs des conditions climatiques de la parcelle, notamment le vent et l'humidité, de par la présence des haies brise-vent autour de notre parcelle. Nous avons par conséquent installé une station météorologique à proximité des arbres expérimentaux (Figure IV.8).

Il s'agit d'un mât sur lequel sont installés (Figure IV.10) :

- (i) un thermo-hygromètre dans un abri Stevenson, fournissant la **température** à $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et l'**humidité relative** à $\pm 2\text{ }\%$;
- (ii) un anémomètre à hélice donnant la **vitesse du vent** à $\pm 0.2\text{ m.s}^{-1}$ et sa **direction** à $\pm 3^{\circ}$;
- (iii) un capteur de **rayonnement global** donnant le rayonnement en W.m^{-2} ($\pm 3\%$);
- (iv) un capteur de durée d'humectation identique à ceux installés sur les arbres, donnant la **durée d'humectation de référence** en heures;
- (v) un pluviomètre à auget basculant donnant la **quantité de pluie** à $\pm 0.2\text{ mm}$.

Les données étaient collectées via une **centrale d'acquisition Campbell Scientific CR10X** dont la batterie était réalimentée par un **panneau solaire** fixé sur le mât.

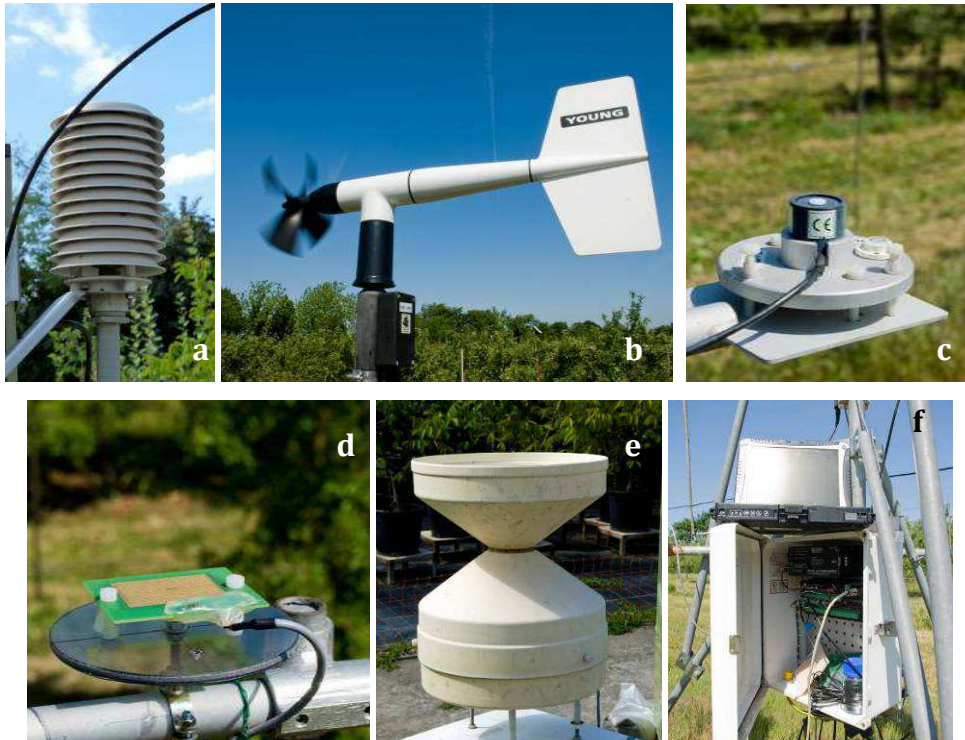


Figure IV.10 – Instruments de mesure de la station météorologique installée au verger : a) Thermo-hygromètre; b) Anémomètre; c) Capteur de rayonnement global; d) Capteur de durée d'humectation; e) Pluviomètre; f) Boîtier d'alimentation et centrale d'acquisition.

I.4. Digitalisation

Une fois les capteurs installés dans les arbres et reliés aux centrales d'acquisition, il restait à attendre la rosée et les intempéries pour collecter et exploiter des données de durée d'humectation. Mais le but de cette expérimentation étant de confronter les durées d'humectation aux éclaircissements relatifs des capteurs dans le couvert. La caractérisation de leur environnement lumineux a donc été entreprise.

La digitalisation des pommiers s'est alors imposée comme un moyen d'atteindre cet objectif, par la méthode de **digitalisation de contact** qui est présentée au §II.1.c de la Synthèse Bibliographique et dans l'Annexe 1. Il s'agit de la meilleure méthode de digitalisation au verger, et la seule permettant d'obtenir une discrétisation des organes dans la maquette.

Nous avons donc, une fois la végétation adulte des arbres en place, digitalisé à l'échelle des pousses les deux pommiers équipés de capteurs ainsi que leurs voisins directs dans le rang.

En effet, les arbres en 2009 mesuraient entre 2m et 3m, et l'influence des voisins sur l'éclaircissement n'est pas supposée négligeable, ainsi l'ombrage causé par les arbres voisins doit être pris en compte pour disposer d'un éclaircissement réaliste pour nos capteurs.

Ainsi, au cours du mois de juillet 2009, nous avons digitalisé :

- (i) l'arbre échantillonné de conduite "Axe Structuré", appelé **arbre 1** par la suite;
- (ii) le voisin Nord de l'arbre 1;
- (iii) le voisin Sud de l'arbre 1, qui est un pollinisateur;
- (iv) l'arbre échantillonné de conduite "Centrifuge", appelé **arbre 2** dans la suite;
- (v) le voisin Nord de l'arbre 2;
- (vi) le voisin Sud de l'arbre 2, qui est également un pollinisateur;
- (vii) les positions des capteurs installés sur les arbres échantillons.

Sur les arbres 1 et 2, nous avons digitalisé la charpente ainsi que les types et longueurs de pousses de l'année. Nous avons également digitalisé les dimensions et angles des feuilles d'un échantillon de chaque type de pousse, puis ces pousses ont été prélevées pour mesurer leur longueur et leur surface foliaire à l'aide d'un planimètre Li-Cor Li3100 (Li-Cor, *Lincoln, Nebraska USA*) de laboratoire (Figure IV.11), en vue d'établir les relations allométriques propres au cultivar Jubilé. Celles-ci ont servi à la reconstruction du feuillage dans les maquettes 3D des arbres (Figure IV.12).

Sur les arbres voisins Nord des deux pommiers échantillons, nous avons uniquement digitalisé la charpente ainsi que les types et longueurs de pousses.

Enfin, sur les voisins pollinisateurs, de petite taille mais disposant d'un feuillage très dense, seule la charpente et des points périphériques du couvert ont été digitalisés, pour estimer les dimensions de l'"enveloppe" de ces arbres.



Figure IV.11 – Planimètre LiCor Li3100 utilisé pour calculer la surface des feuilles échantillonnées

Au cours des années 2010 et 2011, à la même période de l'année (lorsque la végétation adulte des arbres est établie, entre juillet et août), nous avons digitalisé de nouveau les arbres 1 et 2.

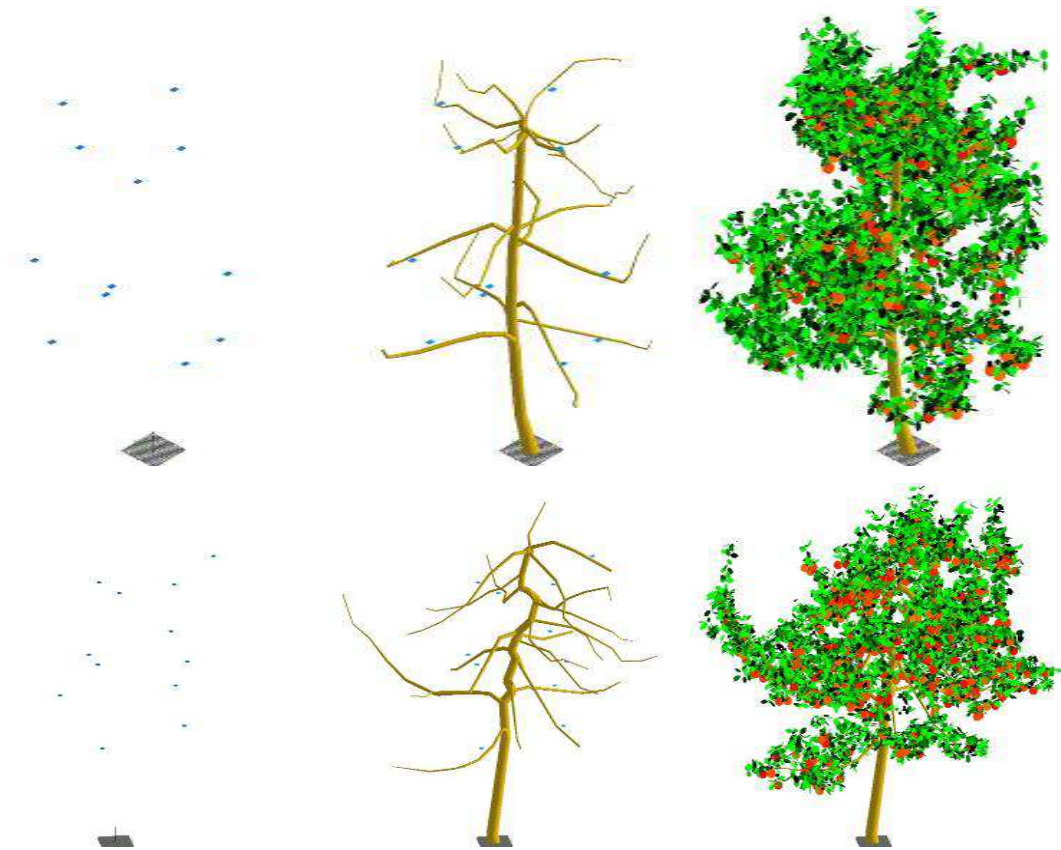


Figure IV.12 – Construction des maquettes de l'année 2011 pour l'arbre 1 (haut) et l'arbre 2 (bas) : positions des capteurs digitalisés (gauche), ajout de la charpente de l'arbre (milieu) puis du feuillage (droite)

I.4.a. Exploitation des maquettes d'arbre en 3D

Nos études se centrant principalement sur l'éclairement des capteurs, nous avons appliqué sur nos maquettes d'arbres en 3D des simulations de course du soleil. Le logiciel *VegeSTAR* développé au PIAF (Adam *et al.*, 2007) est dédié à ce type d'exploitation (Figure IV.13 & Figure IV.14).

Basé sur un outil de visualisation 3D, ce logiciel permet de placer notre maquette dans un espace virtuel, dans lequel on ajoute un ensemble de points correspondant aux positions du soleil. Il est possible de simuler ainsi (i) la course du soleil à une position géographique et à une date données (Figure IV.15), mais également (ii) une sphère céleste discrétisée en 46 facettes ("tortue") décrivant la lumière diffuse autour de la maquette (Figure IV.15) (Sinoquet *et al.*, 1998). La position des points donnés à la caméra peut alors être calculée en fonction de la position du soleil. Ainsi, ce que "voit" la

caméra est ce que "voit" le soleil. La surface de l'objet vue représente alors la surface éclairée à l'instant correspondant à la position solaire. On obtient alors le coefficient d'éclairement, le **STAR** en calculant le rapport de la surface "vue" par le soleil sur la surface totale (Sinoquet *et al.*, 2005; Sinoquet *et al.*, 2007).

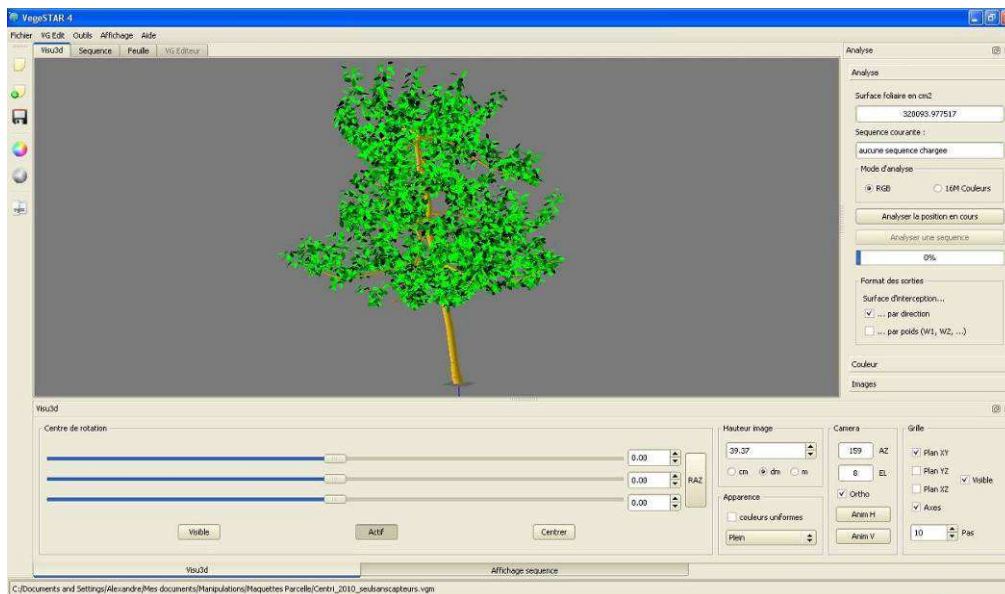


Figure IV.13 – Capture d'écran de la fenêtre de visualisation du logiciel VegeSTAR

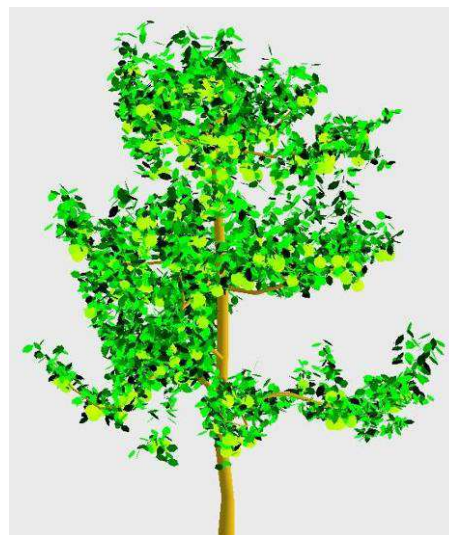


Figure IV.14 – Arbre 1 en 2011 au verger (gauche) et sa maquette reconstruite sous VegeSTAR (droite)

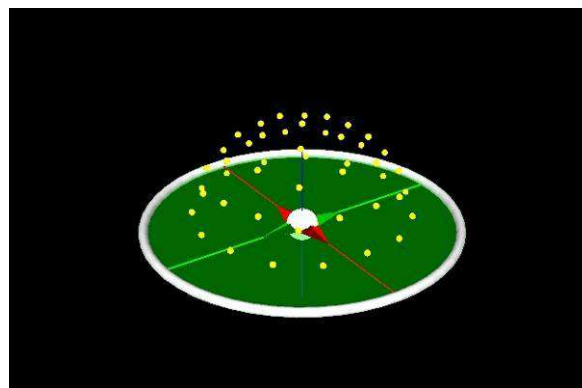
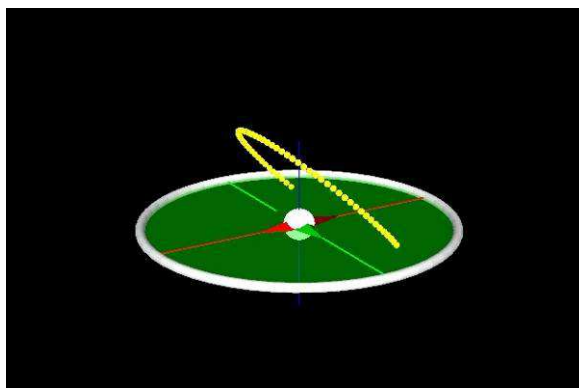


Figure IV.15 – Représentation sous VegeSTAR de la course du soleil (gauche) et des points représentant les centres des facettes constituant la "tortue" (droite)

I.4.b. Le STAR : Silhouette to Total Area Ratio

La valeur du STAR d'un objet est donc comprise entre 0 et 1, il vaut 0 si l'objet n'est pas du tout éclairé, et 1 si toute sa surface est éclairée.

Le STAR déterminé à partir de la course du soleil à une date et une heure donnée est appelé **STAR direct**, car il correspond à la lumière directement reçue du soleil. Celui déterminé à l'aide de la "tortue" correspond quant à lui à la lumière ambiante, on parle dans ce cas de **STAR diffus**. Dans la réalité, l'éclairage direct et diffus sont combinés, mais pas forcément en proportions égales.

Si par exemple le ciel est clair, le rayonnement direct sera prédominant, le STAR direct aura un poids plus important. A contrario, si le ciel est nuageux, le STAR diffus aura un poids plus important. On établit en conséquence un **STAR global** en appliquant un coefficient a_{STAR} aux ratios d'éclairement (Bonhomme, 1993) :

$$STAR_{global} = a_{STAR} * STAR_{direct} + (1 - a_{STAR}) * STAR_{diffus} \quad IV.2$$

Ce coefficient peut être appliqué rayonnement global mesuré sur la parcelle étudiée pour déterminer l'éclairement réel reçu par un objet, déterminé par :

$$Rayonnement\ reçu\ par\ l'objet\ (W) = STAR * Rayonnement\ global\ (W.m^{-2}) * Surface\ Totale\ (m^2)$$

Il est possible grâce au logiciel VegeSTAR de calculer le STAR des objets de la maquette. On peut par exemple, estimer le STAR des pousses d'un arbre pour déterminer lesquelles recevront le meilleur éclairement (Figure IV.16).

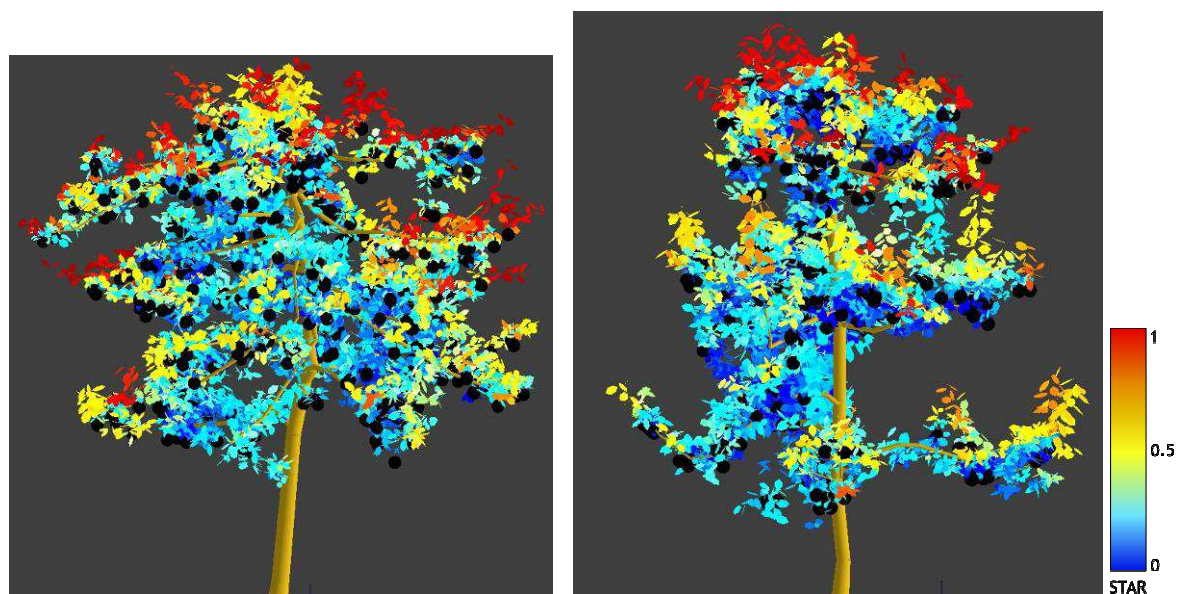


Figure IV.16 - Maquettes de pommier (gauche : Arbre 2 à conduite centrifuge en 2011; droite : Arbre 1 à conduite axe structuré) où est représenté le STAR global des pousses moyenné sur la journée du 22 juillet 2011

I.5. Manipulations spécifiques d'apport d'eau contrôlé

La durée d'humectation est le résultat d'un apport d'eau (pluie, rosée, irrigation) et de son évaporation. Les mesures des durées d'humectation issues du dispositif expérimental intègrent donc ces deux composantes. Afin de découpler apport d'eau et évaporation, des mesures de la composante évaporative ont été entreprises en apport d'eau contrôlé. Ainsi les variations de la durée d'humectation mesurée ne dépendront que de la structure de l'arbre et du microclimat qu'elle induit sur les différentes zones du couvert.

Pour cela des mesures avec apport d'eau contrôlé ont été effectuées au cours de trois journées : pour chaque mesure une goutte a été disposée sur chacun des 25 capteurs (12 capteurs par arbre plus le capteur de référence de la station météorologique) du dispositif expérimental, et l'opération était réitérée une fois tous les capteurs secs. Ces mesures ont eu lieu le 27 août 2009 (16 mesures par capteur), le 26 mai 2011 (8 mesures par capteur), et le 27 juin 2011 (15 mesures par capteur).

Lors de ces 3 journées en ciel clair, nous avons disposé un volume d'eau pure identique (10 μ L) au centre de chaque capteur. Un volume de 10 μ L est relativement rapide à évaporer, donc un temps d'échantillonnage de 10 secondes a été instauré. Nous avons fait de même sur la centrale du mât météorologique, afin de disposer de la même résolution sur les variations climatiques fines, notamment la vitesse du vent. L'ensemble de ces données (mesures climatiques + humectation) a été exploité dans les simulations de notre modèle d'évaporation de gouttes d'eau (cf. §III du chapitre III).

I.6. Exploitation des données

I.6.a. Durées d'humectation (*DH*) et variables météorologiques

Comme décrit au §I.1.a., les données d'humectation sont obtenues sous la forme de valeurs de résistance, en $k\Omega$. Cette unité est peu lisible en termes de durée d'humectation. C'est pourquoi nous effectuons une conversion. Les données sont moyennées toutes les 30 minutes : si la résistance moyenne dans cette période est supérieure à $500 k\Omega$, on écrira 0 heures d'humectation, et si au contraire la valeur est inférieure à $500 k\Omega$, on écrira 0.5 heure d'humectation (Tableau IV.1).

Les données de la station météorologique, hormis le capteur de durée d'humectation de référence, converti de la même façon, sont collectées directement à la sortie de la centrale d'acquisition.

Jour	Heure (hhmm)	Capteur 1 (kΩ)	Capteur 2 (kΩ)	Capteur 3 (kΩ)	Capteur 4 (kΩ)	Capteur 5 (kΩ)	Capteur 6 (kΩ)
206	1500	7992	73.58	7999	424.4	12.47	7999
206	1530	7999	617.5	7999	1745	21.24	7999
206	1600	7.302	6.25	9.19	10.34	7.552	2.838
206	1630	6.371	7.269	2.615	7.106	9.48	1.972
206	1700	11.4	73.8	2.364	7.211	2707	2.212
206	1730	14.8	179.2	2.632	8.94	1625	2.936
206	1800	15.85	535.2	3.093	12.79	7999	3.397
206	1830	18.19	1033	4.466	17.08	7999	3.839
206	1900	19.96	4311	34.8	30.87	7999	4.586
206	1930	19.6	7999	4796	62.56	7999	5.272
206	2000	16.74	7999	7999	102.6	7999	5.575
206	2030	15.21	7999	7999	111.5	7999	5.278
206	2100	9.37	28.26	195.3	45.57	123.9	4.231

Jour	Heure (hhmm)	Capteur 1 (h)	Capteur 2 (h)	Capteur 3 (h)	Capteur 4 (h)	Capteur 5 (h)	Capteur 6 (h)
206	1500	0	0.5	0	0.5	0.5	0
206	1530	0	0	0	0	0.5	0
206	1600	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
206	1630	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
206	1700	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5
206	1730	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5
206	1800	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5
206	1830	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5
206	1900	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5
206	1930	0.5	0	0	0.5	0	0.5
206	2000	0.5	0	0	0.5	0	0.5
206	2030	0.5	0	0	0.5	0	0.5
206	2100	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tableau IV.1 - Exemple de conversion des données brutes issues des capteurs (haut) en durées d'humectation (bas)

A partir de ces données transformées, un **épisode d'humectation** est défini comme la période débutant à l'instant où au moins un capteur sur l'arbre est humecté (0.5), et terminant lorsque le dernier capteur sur l'arbre est sec (0).

Il est intéressant d'associer ces durées d'humectation à la nature de l'épisode d'humectation, c'est-à-dire une pluie ou une rosée. Il faut pour cela associer entre elles les données des deux arbres et du mât météorologique pour établir la nature de l'évènement.

Les critères établis par Schmitz (Schmitz & Grant, 2009) pour différencier un épisode de pluie d'un épisode de rosée et écarter les épisodes incertains, ont été utilisés. Ces critères sont les suivants :

(1) Si l'humectation et la pluviométrie sont positives dans le même temps, l'épisode est caractérisé comme une **pluie**.

$$(Capteur\ Humecté) \cap (Pluvio > 0) \rightarrow PLUIE$$

(2) Si une humectation nocturne (rayonnement nul) est détectée sans pluie, alors on est en présence d'un épisode de **rosée**.

$$(Rayonnement = 0) \cap (Pluvio = 0) \cap (Capteur\ Humecté) \rightarrow ROSEE$$

(3) Si pendant la nuit de la rosée apparaît, puis **un** court épisode pluvieux (durant moins de 30 minutes (Schmitz & Grant, 2009)) est observé au cours de la même nuit, alors on considère l'épisode comme une **rosée**.

$$(Rayonnement = 0) \cap (Capteur\ Humecté) \cap (Pluvio > 0\ durée < 30\min) \rightarrow ROSEE$$

(4) Si une pluie débute pendant la journée (rayonnement positif) et que de la rosée se forme dans la nuit, on considère l'épisode comme une **pluie**, à moins qu'il y ait une période sèche entre les deux épisodes.

$$(Pluvio > 0) \cap (Rayonnement > 0) \text{ puis } (Capteur\ Humecté) \cap (Rayonnement = 0) \rightarrow PLUIE$$

(5) Si une rosée apparaît, puis une série d'épisodes pluvieux apparaît pendant la nuit et se prolonge au jour suivant, on considère que l'on a une **pluie**.

$$(Capteur\ Humecté) \cap (Pluvio > 0) \cap (Rayonnement = 0 \text{ puis } > 0) \rightarrow PLUIE$$

(6) Si l'on ne peut se prononcer avec clarté sur l'épisode (par exemple si l'on observe de très courtes périodes d'humectation sans pluie et en plein jour), **la période de l'étude est écartée**. Cela peut être imputable à plusieurs causes, notamment des déjections d'insectes (Weiss & Hagen, 1983), qui seront lessivées lors de la rosée ou de la pluie suivante.

I.6.b. Détermination de l'éclairement des capteurs

Une fois les relations allométriques établies pour Jubilé (cf Synthèse Bibliographique §II.1.c & Annexe 1), celles-ci ont été employées pour reconstruire le feuillage des arbres à partir des informations sur les pousses digitalisées suivant Sonohat *et al.* (Sonohat *et al.*, 2006) (Figure IV.12). Cette opération a été répétée pour chaque année de mesure.

La création des objets 3D dans VegeSTAR étant simple (chaque objet est défini par le type de forme, sa couleur, et ses 9 descripteurs d'espace : X, Y, Z, A, B, C, Longueur, Largeur, Epaisseur), il est possible d'ajouter des objets dans la maquette. Les capteurs de durée d'humectation ont ainsi été intégrés aux maquettes 3D. Pour cela ils ont été assimilés à des surfaces planes rectangulaires aux dimensions réelles de leur surface de détection (3.7cm*5cm) (Figure IV.17).

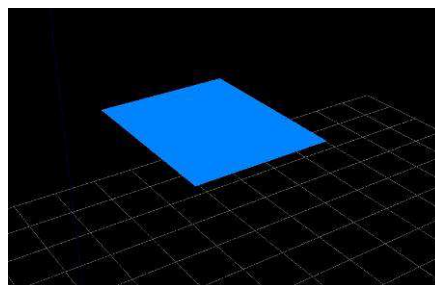


Figure IV.17 - Représentation 3D d'un capteur digitalisé sous VegeSTAR

Afin d'approcher au mieux les éclaircissements des capteurs au sein du couvert, les maquettes 3D des arbres équipés des capteurs et les 8 arbres voisins ont été intégrées aux scènes 3D (Figure IV.18). À partir de ces couverts virtuels, les STAR (Silhouette to Total Area Ratio) directs et diffus de chaque capteur ont été estimés grâce au logiciel VegeSTAR (Figure IV.19) pour les trois années de mesures.

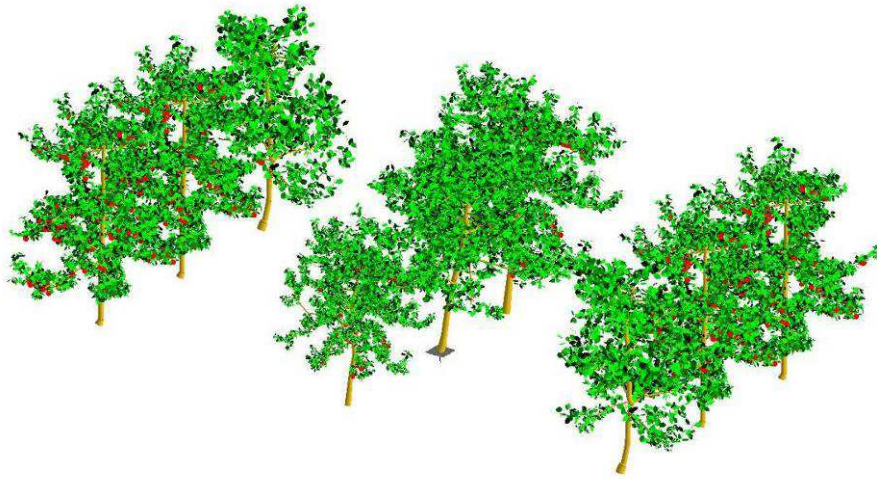


Figure IV.18 –Scène de parcelle de l'Arbre 2 (conduite centrifuge) au centre de ses 8 arbres voisins (bas)

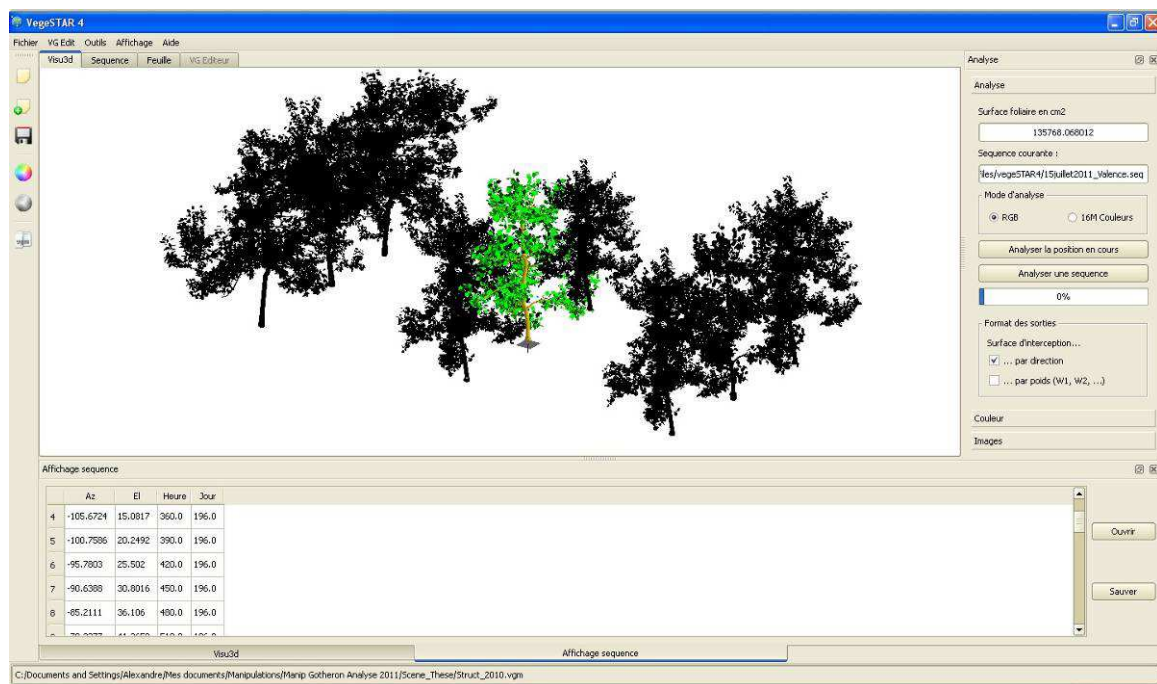


Figure IV.19 - Capture d'écran de la préparation de calcul de STAR sous le logiciel VegeSTAR. Tous les éléments dont on ne veut pas estimer le STAR sont masqués en noir (le fond de la scène est également noir lors des calculs) pour déterminer l'ombrage des objets étudiés.

II. Résultats & Discussions

Le dispositif expérimental au verger a été répété au cours des années 2009, 2010 et 2011 (Tableau IV.2)

Année	Date de début d'exploitation	Date de fin d'exploitation
2009	16/05/2009	31/12/2009
2010	24/03/2010	04/10/2010
2011	05/04/2011	06/08/2011

Tableau IV.2 - Dates de début et de fin des campagnes de mesures de durée d'humectation au verger pour les trois années de mesures

Pour l'analyse, les données obtenues ont été séparées en deux parties: les mesures d'humectation au verger en conditions naturelles, et les mesures d'humectation avec apport d'eau contrôlé.

II.1. Mesures d'humectation en conditions naturelles totales

L'exploitation de ces données a permis en premier lieu de déterminer s'il existe ou non une variabilité de durée d'humectation entre les différents capteurs. Au cours des trois années d'expérimentation, les campagnes de mesures n'ont pas eu la même durée, c'est pourquoi la comparaison s'est faite sur les heures d'humectation cumulées au cours de toute la campagne, divisées par le nombre de jours de mesure. On observe, indépendamment de l'année des mesures, des durées d'humectation variant de 3 heures par jour à 13 heures par jour, avec une dispersion d'environ 1.5 heures par jour autour de la moyenne (Figure IV.20).

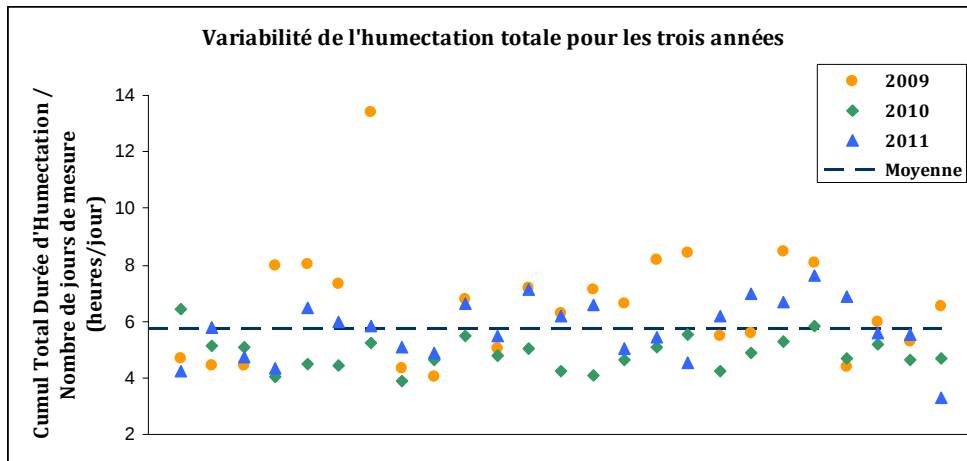


Figure IV.20 – Tracé de la variabilité de durée d'humectation au cours des 3 années de mesure (1 point par capteur pour chaque année sur l'axe des abscisses)

Il existe donc une variabilité spatiale indépendante du type d'apport d'eau (rosée ou pluie). Il reste à étudier cette variabilité en différenciant le type d'apport d'eau, pour savoir si celle-ci est liée à la nature de l'épisode, ou uniquement à la position du capteur dans l'arbre.

Un total de 679 épisodes d'humectation ont été identifiés au cours des trois saisons d'expérimentation : 169 épisodes de pluie et 510 épisodes de rosée (Tableau IV.3). On remarque que le nombre d'épisodes dénombré sur chaque arbre est légèrement différent. Pourtant, ceux-ci se trouvaient dans le même verger et les mesures étaient simultanées. Cela peut s'expliquer par des épisodes de pluie très brefs dont la durée d'humectation dans un arbre a duré moins de 30 minutes pour l'ensemble des capteurs, auquel cas l'humectation moyenne aura décrit le capteur comme sec. Pour le cas de la rosée, l'effet microclimatique induit par les différents modes de conduite des arbres peuvent être à l'origine de ces écarts. Ces effets ne sont toutefois pas majoritaires, comme on peut le voir dans le Tableau IV.4 présentant une étude sur trois capteurs de chaque arbre et leur état humecté ou non au cours d'épisodes de pluie ou de rosée. Dans une grande majorité des cas présentés, les capteurs des deux arbres sont tous humectés.

2009	Arbre 1	Pluie	32
		Rosée	94
	Arbre 2	Pluie	28
		Rosée	107
2010	Arbre 1	Pluie	40
		Rosée	92
	Arbre 2	Pluie	37
		Rosée	91
2011	Arbre 1	Pluie	17
		Rosée	63
	Arbre 2	Pluie	15
		Rosée	63

Tableau IV.3 - Nombre d'épisodes de pluie et de rosée identifiés au cours des expérimentations au verger

Nature de l'épisode	Arbre 1			Arbre 2		
	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3
pluie	X	X	X	X	X	X
rosée	X	X	0	X	X	X
pluie	X	X	X	X	X	X
rosée	X	X	X	0	0	0
pluie	X	X	X	X	X	X
pluie	X	0	X	X	0	X
rosée	0	0	X	X	0	X
pluie	X	X	X	X	X	X
pluie	X	X	X	X	X	X
pluie	X	X	0	X	0	0
pluie	X	X	X	X	X	X
rosée	0	0	X	X	X	0
rosée	X	0	0	0	X	0
pluie	X	X	X	X	X	X
rosée	X	X	X	X	X	X
rosée	X	X	X	X	X	X
pluie	X	X	X	X	X	X
rosée	X	X	X	0	X	0
rosée	X	X	X	X	X	X
rosée	X	X	X	X	X	X
rosée	X	X	X	X	X	X

Tableau IV.4 – Détection des épisodes d'humectation par 3 capteurs de chaque arbre pour l'année 2010. X : capteur humecté lors de l'épisode; 0 : capteur sec lors de l'épisode

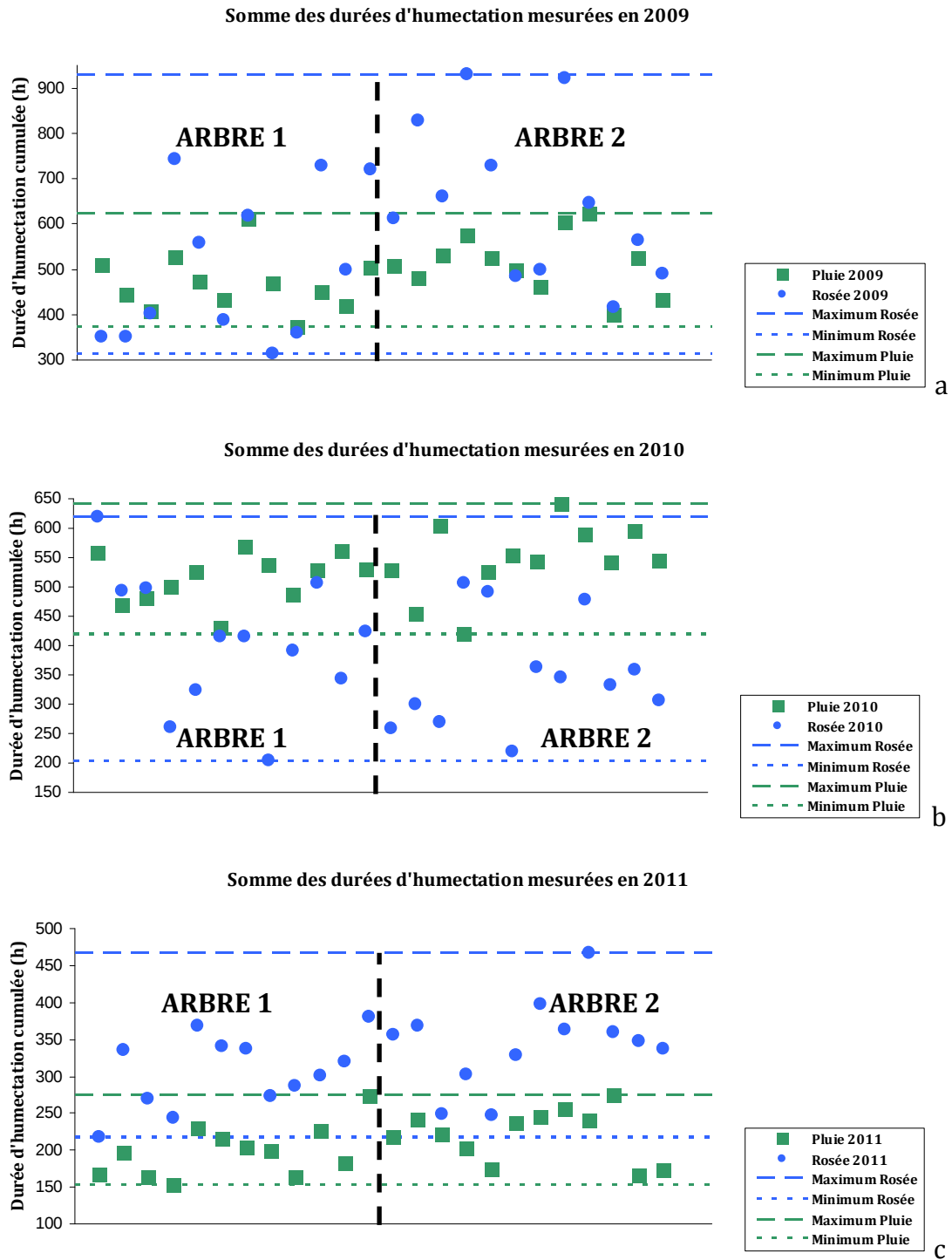
II.1.a. Mise en évidence d'une variabilité de la durée d'humectation entre capteurs

La lecture des durées d'humectation cumulées pour chaque année permet de voir la dispersion des valeurs (Figures IV.21.a, IV.21.b & IV.21.c). La variabilité relative des durées d'humectation résultant d'une pluie est plus faible que celle issue d'une rosée (Tableau IV.5). Ce constat confirme qu'il est nécessaire d'étudier les deux types d'épisodes séparément, comme nous avons par exemple pu voir au §III.3.d du chapitre II lors de l'étude de la forme des gouttes liées à la pluie ou la rosée.

L'apport d'eau se produit selon des mécanismes différents en fonction de l'épisode : l'eau de pluie est une eau nuageuse qui tombe et est distribuée au sein du couvert, alors que l'eau de rosée est nucléée directement sur les organes. Cette différence est certainement à l'origine des écarts de variabilité, et sera discutée par la suite.

Pluie	écart-type	2.74
	moyenne	14.45
Rosée	écart-type	1.41
	moyenne	4.97

Tableau IV.5 – Ecart-type et moyenne de la durée d'humectation moyenne par épisode pour la pluie et la rosée



Au vu de ces mesures et d'après la littérature (Sentelhas *et al.*, 2005; Schmitz & Grant, 2009; Batzer *et al.*, 2008), il est pertinent de se pencher sur l'origine de cette forte variabilité, notamment des effets probables de la structure de l'arbre et de son influence sur le microclimat de l'arbre.

Pour cela, nous avons confronté les durées d'humectation à l'éclairement des capteurs de l'arbre.

II.1.b. Etude de la variabilité spatiale de la durée d'humectation et de l'éclairement

II.1.b.i) Comparaisons entre durée d'humectation et coordonnées spatiales des capteurs

En premier lieu, à la manière de plusieurs études proposant d'estimer la variabilité spatiale de la durée d'humectation à l'aide des coordonnées spatiales (*i.e.* l'orientation cardinale Est-Ouest et la hauteur) des capteurs (Batzer *et al.*, 2008; Dalla Marta *et al.*, 2007; Dietz *et al.*, 2007; Sentelhas *et al.*, 2005), nous avons comparé les épisodes d'humectation à ces coordonnées (Figure IV.22 & Figure IV.23)

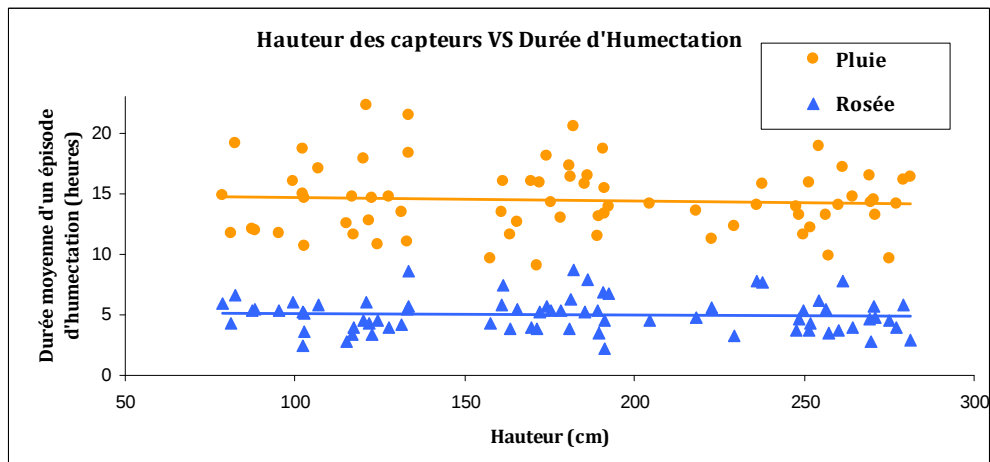


Figure IV.22 – Relation entre hauteur des capteurs et durée moyenne d'un épisode d'humectation pour l'ensemble des capteurs au cours des trois années

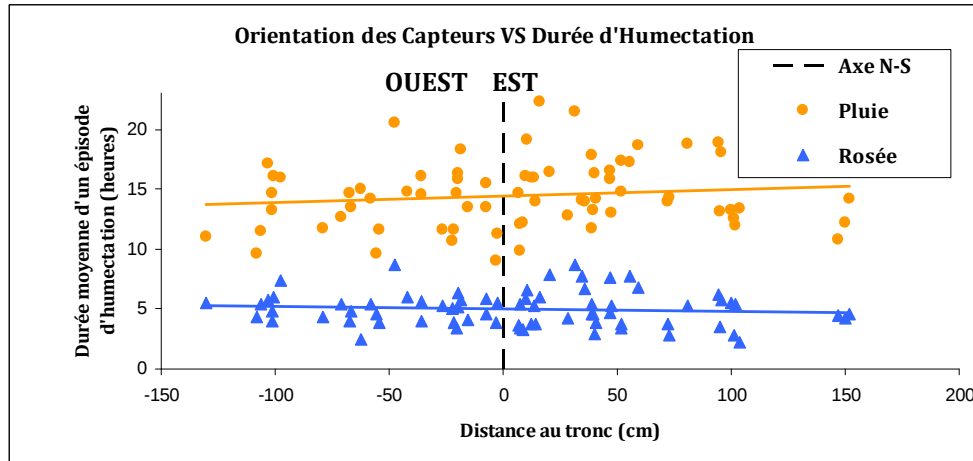


Figure IV.23 – Relation entre orientation Est-Ouest des capteurs et durée moyenne d'un épisode d'humectation pour l'ensemble des capteurs au cours des trois années

Type d'épisode	R ² Hauteur	R ² Orientation
Pluie	0.0034	0.0162
Rosée	0.0015	0.0094

Tableau IV.6 - Coefficients de détermination des comparaisons entre humectation et paramètres spatiaux par type d'épisode

Ces relations ne montrent aucune corrélation significative ($p \gg 0.05$) entre la durée moyenne d'un épisode d'humectation et les coordonnées spatiales des capteurs (Tableau IV.6). Ces paramètres d'estimation de la variabilité spatiale de la durée d'humectation, pourtant très souvent utilisés, ne sont pas pertinents dans notre étude pour caractériser dans son ensemble la variabilité du microclimat au sein de l'arbre. L'éclairement relatif, quantifié par le STAR, nous semble a priori plus à même de décrire la variabilité microclimatique. En effet, l'éclairement est non seulement un indicateur quantifiant la lumière reçue (donc conditionnant le rayonnement et la température), mais il donne de plus une information sur la position relative d'une feuille par rapport aux organes de l'arbre. Si une feuille a un éclairement faible, il est fort probable qu'elle soit masquée par des feuilles au-dessus d'elle, ce qui défavorise l'interception de pluie et également la nucléation de rosée, la proximité des autres feuilles générant un microclimat différent de celui d'une feuille plus exposée. Nous avons par conséquent

orienté notre étude dans ce sens en exploitant les données de digitalisation des arbres et en confrontant les STAR des capteurs aux durées d'humectation qu'ils ont mesurées.

II.1.b.ii) Calcul des paramètres d'éclairement

Le STAR de chaque capteur a été calculé à partir des maquettes 3D des arbres échantillons. Pour un objet au sein d'un couvert donné, le STAR moyenné sur une journée varie de façon négligeable au cours de la saison végétative (Saudreau *et al.*, *communication* personnelle). Ainsi pour chaque année d'étude nous avons calculé la moyenne des STAR direct et diffus des capteurs sur une journée et les avons appliqués à l'ensemble des données. Pour l'étude générale, nous avons calculé à l'aide de l'équation IV.1 le STAR global moyen en choisissant un coefficient a_{STAR} égal à 0.5 (Bonhomme, 1993), donnant autant de poids au STAR direct qu'au STAR diffus dans le calcul du STAR global (Tableaux IV.7.a, IV.6.b & IV.6.c). Ce choix de pondération nous a paru pertinent sur l'ensemble des saisons étudiées. En effet, d'après les mesures d'insolation et de nébulosité des stations météorologiques du département de la Drôme (source : Météo France, Centre Départemental de la Drôme) et les fluctuations de rayonnement global mesurées par notre station météorologique, la répartition de périodes en ciel clair et de périodes en ciel couvert est approximativement équivalente sur l'ensemble des saisons de mesures.

2009							
Arbre 1				Arbre 2			
Capteur	STAR diffus	STAR direct	STAR global	Capteur	STAR diffus	STAR direct	STAR global
1	0.246	0.118	0.182	1	0.454	0.728	0.591
2	0.319	0.177	0.248	2	0.713	0.850	0.781
3	0.403	0.283	0.343	3	0.256	0.192	0.224
4	0.533	0.931	0.732	4	0.632	0.652	0.642
5	0.423	0.594	0.509	5	0.456	0.689	0.573
6	0.387	0.448	0.418	6	0.169	0.161	0.165
7	0.133	0.084	0.109	7	0.413	0.440	0.427
8	0.096	0.162	0.129	8	0.457	0.690	0.573
9	0.527	0.574	0.551	9	0.170	0.314	0.242
10	0.758	0.976	0.867	10	0.188	0.275	0.231
11	0.281	0.219	0.250	11	0.182	0.209	0.195
12	0.797	0.762	0.780	12	0.349	0.402	0.375

a

2010							
Arbre 1				Arbre 2			
Capteur	STAR diffus	STAR direct	STAR global	Capteur	STAR diffus	STAR direct	STAR global
1	0.474	0.340	0.407	1	0.249	0.372	0.311
2	0.488	0.555	0.521	2	0.162	0.174	0.168
3	0.490	0.263	0.377	3	0.163	0.062	0.113
4	0.153	0.171	0.162	4	0.463	0.596	0.530
5	0.442	0.202	0.322	5	0.521	0.452	0.487
6	0.442	0.202	0.322	6	0.322	0.410	0.366
7	0.519	0.705	0.612	7	0.421	0.519	0.470
8	0.199	0.218	0.208	8	0.056	0.050	0.053
9	0.717	0.849	0.783	9	0.213	0.246	0.229
10	0.365	0.502	0.433	10	0.116	0.039	0.077
11	0.246	0.146	0.196	11	0.092	0.063	0.078
12	0.674	0.487	0.581	12	0.186	0.159	0.173

b

2011							
Arbre 1				Arbre 2			
Capteur	STAR diffus	STAR direct	STAR global	Capteur	STAR diffus	STAR direct	STAR global
1	0.009	0.007	0.008	1	0.202	0.314	0.258
2	0.661	0.654	0.658	2	0.367	0.317	0.342
3	0.153	0.109	0.131	3	0.247	0.089	0.168
4	0.114	0.079	0.097	4	0.304	0.275	0.290
5	0.236	0.122	0.179	5	0.151	0.170	0.161
6	0.168	0.218	0.193	6	0.275	0.418	0.347
7	0.251	0.310	0.281	7	0.436	0.346	0.391
8	0.093	0.138	0.116	8	0.256	0.123	0.190
9	0.131	0.204	0.168	9	0.260	0.073	0.167
10	0.000	0.000	0.000	10	0.154	0.202	0.178
11	0.152	0.096	0.124	11	0.042	0.026	0.034
12	0.172	0.082	0.127	12	0.426	0.413	0.420

c

Tableau IV.7 - STAR (diffus, directs, globaux) calculés en moyenne sur une journée pour les capteurs des arbres en a) 2009, b) 2010, c) 2011

La Figure IV.24 montre la faible variabilité entre les STAR globaux pour l'année 2011, en comparaison des années 2009 et 2010. La présence d'un STAR global moyen nul pour l'un des capteurs de l'arbre en conduite axe structuré présente un intérêt au sens où aucun rayonnement n'est à priori reçu. De plus, on voit qu'hormis un capteur, tous ceux installés en 2011 ont un STAR inférieur à 0.5, ce qui signifie qu'ils sont au moins ombragés à 50%. Cela donne une faible variabilité en termes d'éclairement, et on se concentrera plus sur les années 2009 et 2010 dans nos études de la relation entre éclairement et durée d'humectation.

Pour s'assurer que le STAR est décorrélié de la hauteur ou de l'orientation, nous avons confronté les données géographiques des capteurs à leurs STAR respectifs (Figure IV.25 & Figure IV.26)

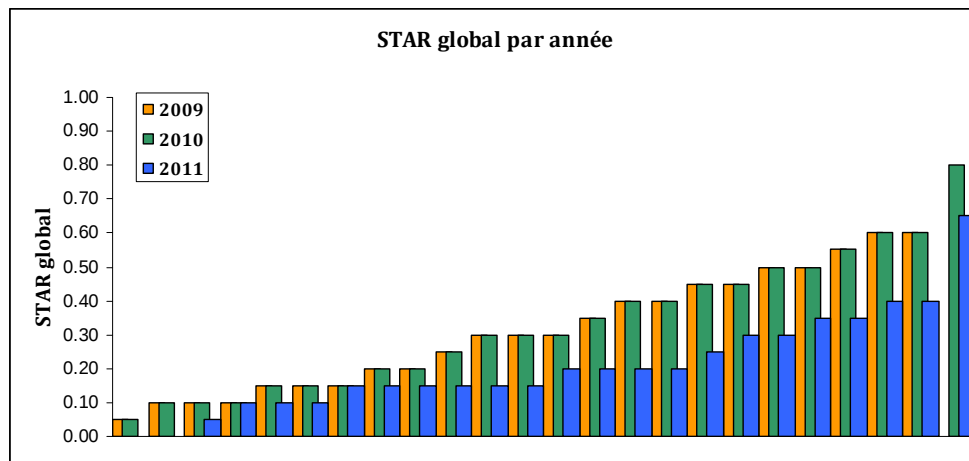


Figure IV.24 - Valeurs des STAR globaux par capteur triées en ordre croissant pour les trois années de mesures

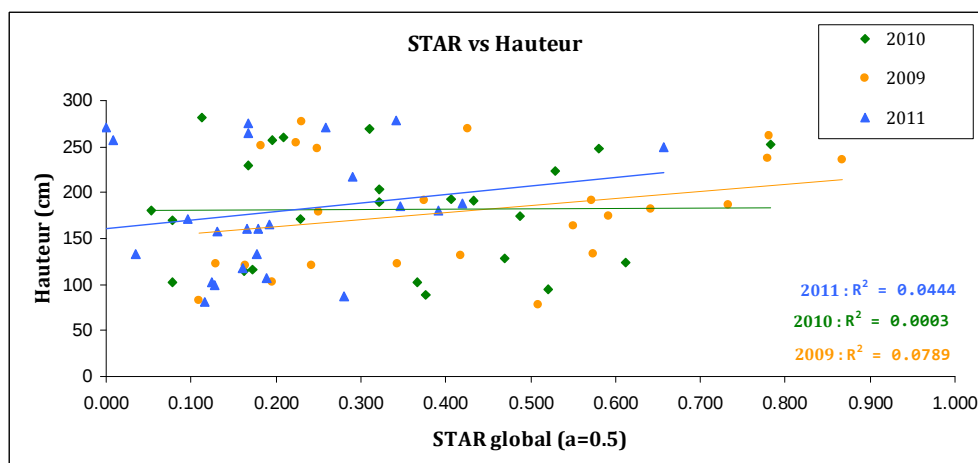


Figure IV.25 - Relation entre STAR global et hauteur des capteurs

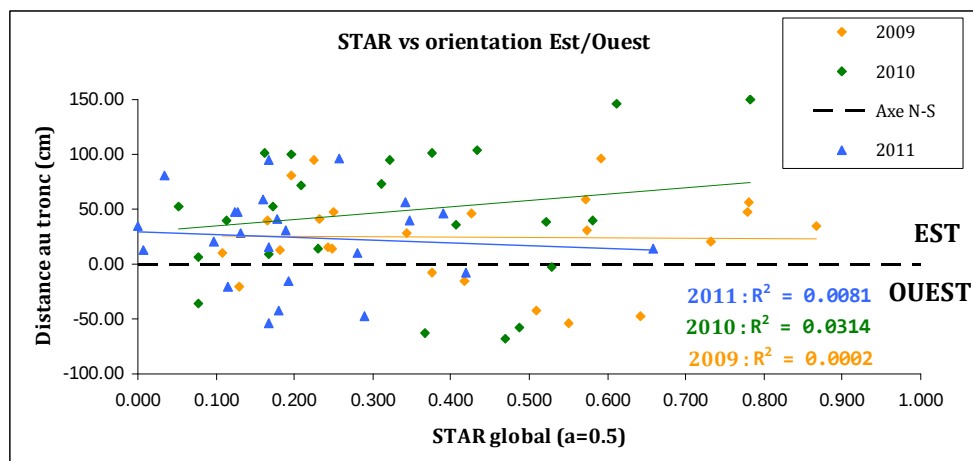


Figure IV.26 - Relation entre STAR global et orientation des capteurs

Sur l'ensemble des trois années d'étude, aucune corrélation entre le STAR des capteurs et leurs variables géométriques n'est significative ($p \gg 0.05$), on peut en conclure logiquement qu'au sein de la couronne d'un arbre en conduite Centrifuge ou Axe Structuré, l'éclairement n'est pas lié à la position géographique du capteur dans l'arbre.

II.1.b.iii) Comparaison avec les mesures d'humectation en conditions naturelles totales

Voyons à présent les résultats d'une confrontation entre le STAR global moyen des capteurs et les épisodes de durée d'humectation.

Pour les trois années de mesures, les régressions linéaires présentent des pentes et des coefficients de détermination faibles (Figures IV.27 & IV.28; Tableau IV.8).

Pour la pluie, seuls les résultats de l'année 2010 sont significativement corrélés au STAR ($p < 0.05$) (Tableau IV.8). L'effet du STAR sur la durée d'humectation de l'eau de pluie n'est donc pas clairement défini. La corrélation observée pour l'année 2010 laisse toutefois penser que le STAR intervient bien dans le processus de durée d'humectation pour l'eau de pluie, mais que son influence n'est pas prédominante sur d'autres facteurs. Pour la rosée, en revanche, on note une corrélation significative ($p < 0.05$) pour les années 2009 et 2010 (Tableau IV.8).

On pourrait s'attendre dans tous les cas à une corrélation linéaire significative entre le STAR global moyen et durée d'humectation, étant donné qu'une feuille avec un STAR plus élevé reçoit plus de lumière, donc sa durée d'évaporation devrait être réduite par l'effet du réchauffement lié au rayonnement reçu.

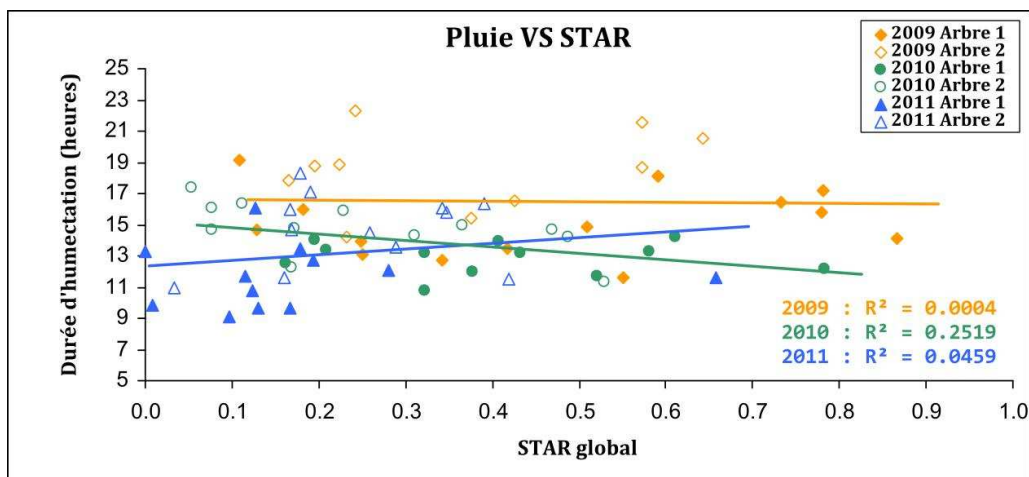


Figure IV.27 – Relation entre STAR global et durée d'humectation de pluie normalisée pour chaque capteur

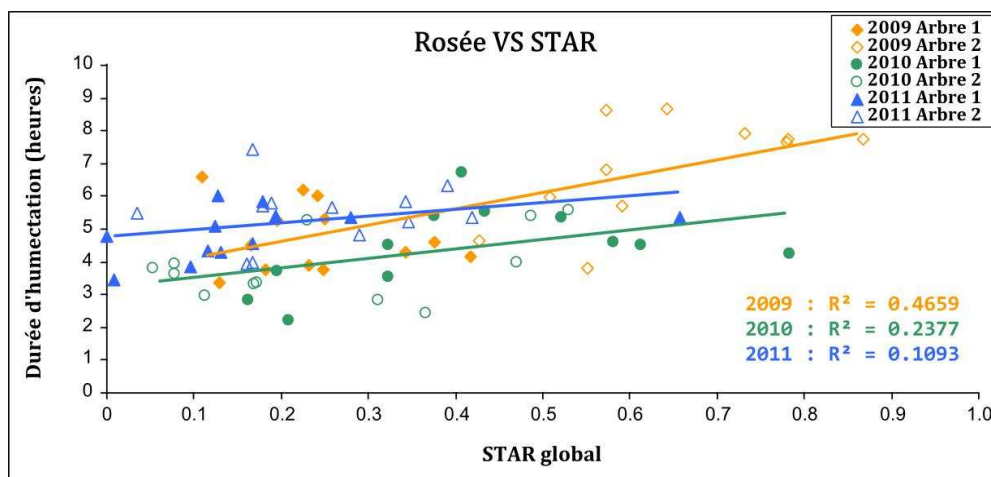


Figure IV.28 – Relation entre STAR global et durée d'humectation de rosée normalisée pour chaque capteur

Episode	Année	R ²	pente	Significatif
Pluie	2009	0.0004	-0.26	non
	2010	0.2519	-4.32	oui
	2011	0.0459	3.88	non
Rosée	2009	0.4659	4.98	oui
	2010	0.2377	2.91	oui
	2011	0.1093	2.05	non

Tableau IV.8 - Analyse statistique des corrélations entre épisodes d'humectation et STAR global

L'impact réel du rayonnement est toutefois plus complexe, et l'effet attendu est contrecarré par un impact de l'apport d'eau qui tend au contraire à augmenter la durée d'humectation. En effet, la distribution spatiale des volumes d'eau introduit un effet la durée d'évaporation moyenne en plus du rayonnement reçu. Pour les épisodes de **pluie** notamment, la quantité d'eau sur chaque capteur dans la couronne est modulée par la trajectoire des gouttes et les éventuels ruissellements (si un volume d'eau est trop important sur une feuille) et *splashings*. L'apport d'eau est donc fonction de la position du capteur dans la couronne.

Le STAR déterminant la portion dégagée de la surface d'un objet, nous avons cherché à voir s'il était possible de déterminer un gradient de volume d'eau reçu à l'aide du STAR direct. Notre hypothèse était la suivante : sachant que les chutes de pluie sont principalement verticales, on pourrait assimiler l'interception d'eau de pluie au STAR direct "zénithal" (on décrit ainsi par abus de langage la plus haute position solaire au-dessus du verger) : plus ce dernier est grand, plus la durée d'humectation devrait être grande suite à un apport d'eau plus important. Par conséquent le STAR instantané à la position du soleil la plus haute dans le ciel a été calculé et comparé aux durées d'humectation de pluie mesurées en 2010.

Cette comparaison du STAR direct "zénithal" avec la durée d'humectation pour les épisodes de pluie n'apporte toutefois pas de meilleure corrélation ($p > 0.05$) (Figure IV.29). On ne peut donc pas approcher la quantité d'eau obtenue à l'aide du STAR direct instantané "zénithal".

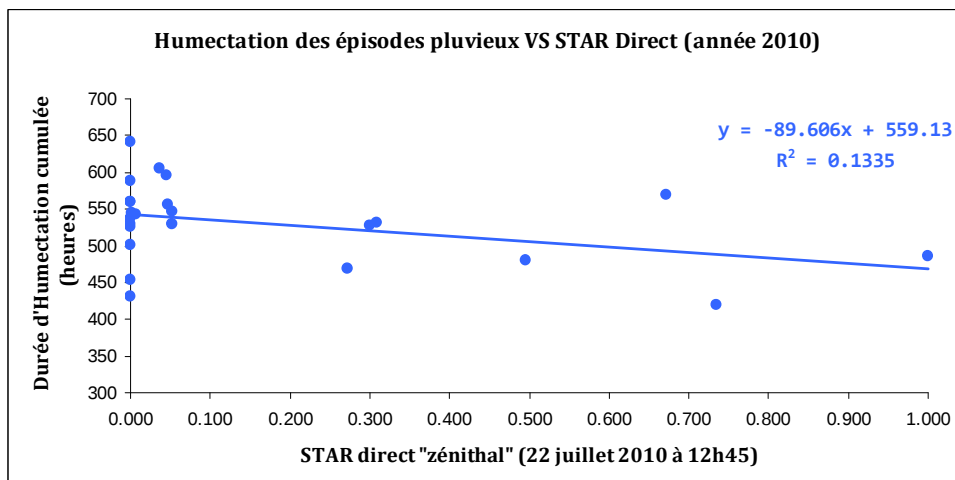


Figure IV.29 – Relation entre le STAR direct calculé à la position solaire la plus haute pour le 22 juillet 2010 à 12h45 et le cumul des durées d'humectation liées à la pluie en 2010

Dans le cas de la **rosée**, la question de l'apport d'eau est à aborder sous un autre angle. En effet, la rosée est un phénomène qui se produit la nuit et se prolonge en début de matinée. Le rayonnement à ces périodes est en général nul ou très faible, celui-ci n'intervient donc pas dans le processus évaporatif. Dans ces conditions, la durée d'évaporation est uniquement fonction de la température, de l'humidité relative, et du vent. Une corrélation significative entre le STAR global moyen et la durée d'humectation liée à la rosée a pourtant été mise en évidence pour les années 2009 et 2010, c'est-à-dire lorsque certains capteurs avaient des STAR supérieurs à 0.4. Pour expliquer ces corrélations, il faut revenir au mécanisme contrôlant la rosée : pour qu'il y ait nucléation d'eau de rosée sur un support, la température de celui-ci doit être inférieure à la température du point de rosée (température à laquelle la pression de vapeur dans l'air devient saturante). Au cours de la nuit, les capteurs dans l'arbre se refroidissent en émettant un rayonnement infrarouge. Ainsi, plus un capteur a un environnement dégagé plus il émettra de rayonnement, plus il se refroidira (un obstacle au-dessus du capteur produira au contraire un effet de serre et réémettra une partie du rayonnement vers le capteur), plus la rosée sera à même de se former à sa surface (Wittich, 1995). Or, plus un capteur est exposé plus il a de chances d'avoir un STAR global élevé.

L'absence de corrélation entre durée d'humectation de rosée et STAR global moyen peut donc être liée à cette observation. Ceci est confirmé par la comparaison de la durée d'humectation liée à la rosée pour les années 2009 et 2010, en considérant uniquement les STAR inférieurs à 0.4. En effet celle-ci ne donne pas de corrélation significative ($p \gg 0.05$) (Figure IV.30).

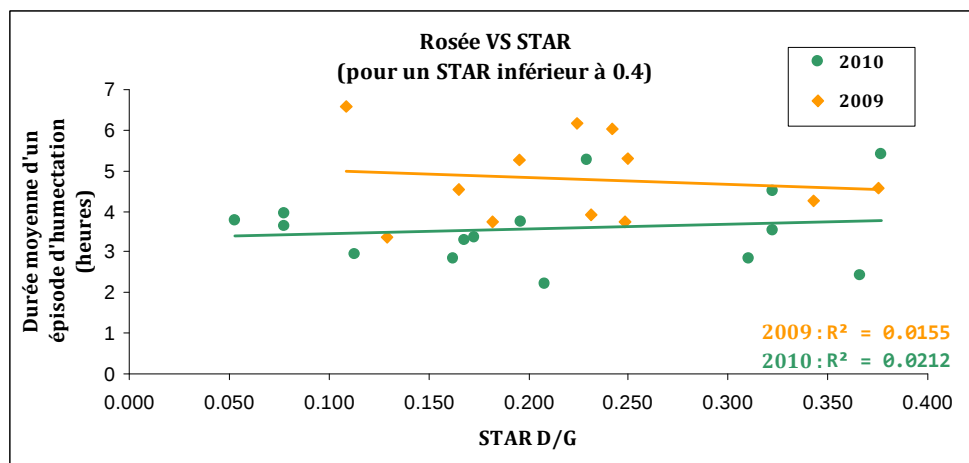


Figure IV.30 – Relation entre STA global (STAR global < 0.4) et durée moyenne d'un épisode d'humectation rosée pour chaque capteur

Pour la rosée comme pour la pluie, la durée d'évaporation dépend du volume d'eau recueilli par le capteur, qui dépend lui-même de la position du capteur dans l'arbre. Il paraît donc indispensable de connaître le volume d'eau intercepté par chaque capteur pour s'affranchir de cet effet et pouvoir corrélérer la durée d'humectation et l'éclairement des capteurs.

C'est dans ce sens que nous avons complété les mesures au verger en conditions totalement naturelles, par des mesures où le volume d'eau présent sur les capteurs est contrôlé.

II.2. Mesures de durée d'humectation en apport d'eau contrôlé

II.2.a. Etude des durées d'humectation cumulées sur chaque journée

La durée moyenne des périodes d'humectation définies entre le dépôt de la première goutte et le séchage de la dernière goutte est de 23 minutes. Dans ces conditions de ciel clair et de gouttes de petite taille (10µL), c'est le STAR direct qui a le plus d'influence sur l'éclairement reçu (Bonhomme, 1993). C'est pourquoi nous avons dans un premier temps confronté le STAR direct moyenné sur chacune des journées de mesures (27 août 2009, 26 mai 2011 et 27 juin 2011) aux durées d'humectations mesurées ces jours (Figure IV.32 & Figure IV.33). Les conditions climatiques variant au cours de chacune des trois journées (Figure IV.31), nous avons pour chaque capteur cumulé l'ensemble des durées d'humectations (équation IV.3):

$$LWD_{n\text{cumulée}} = \sum_i LWD_{ni} \quad \text{IV.3}$$

où n correspond au numéro de capteur et i correspond à une période d'évaporation (entre le premier dépôt de goutte et le dernier capteur sec).

En effet d'après l'analyse de sensibilité effectuée au §II du chapitre III, il est clair que le niveau d'éclairement n'est pas le seul paramètre intervenant dans le contrôle de l'évaporation. Ainsi, en cumulant les différentes durées d'évaporation de gouttes faites au cours de la journée, nous nous sommes affranchis de la variabilité journalière de l'évaporation liée aux variations climatiques, notamment de température et d'hygrométrie de l'air.

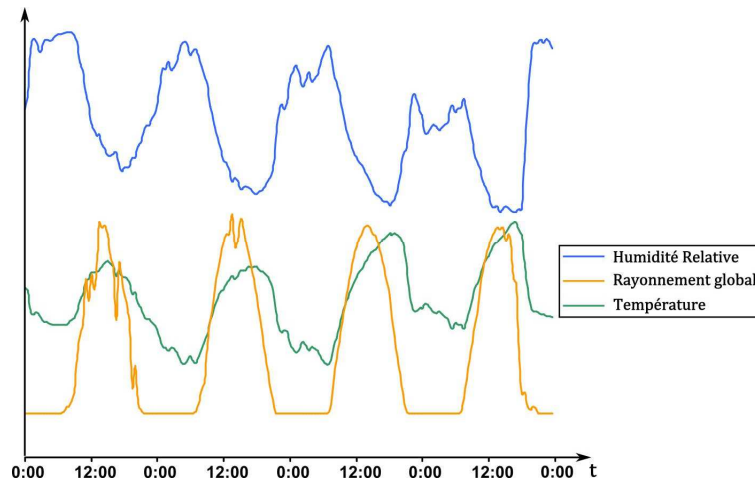


Figure IV.31 – Evolution temporelle (4 journées de mesures de la station météorologique au verger du 29 juillet au 1er août 2010) de l'humidité relative, de la température et du rayonnement global

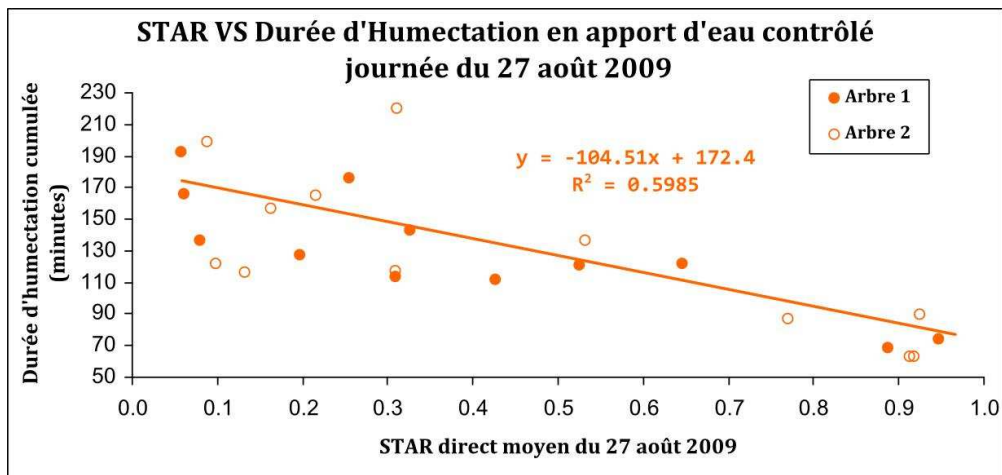


Figure IV.32 – Relation entre le STAR direct moyenné sur la journée du 27 août 2009 et le cumul de durées d'évaporation mesurées sur les capteurs

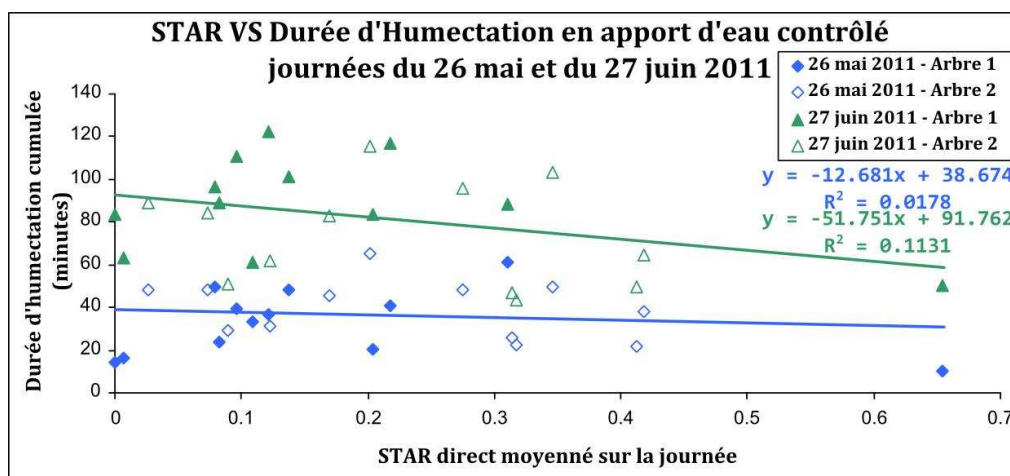


Figure IV.33 – Relation entre le STAR direct intégré sur les journées du 26 mai et 27 juin 2011 et le cumul de durées d'évaporation mesurées sur les capteurs

La variabilité entre les STAR directs des capteurs installés dans les arbres au cours de l'année 2009 étant plus grande qu'en 2011, les relations observées sur les figures IV.32 et IV.33 présentent un effet plus marqué pour la journée du 27 août 2009. Encore une fois, la faible valeur de STAR de la majorité des capteurs de 2011 explique ces résultats. Nous avons vérifié cette propriété en discriminant les valeurs des STAR directs moyens, et en étudiant la corrélation entre ceux-ci et les durées d'évaporation cumulées pour la journée du 27 août 2009 (Tableau IV.9) : lorsque les STAR sont inférieurs à 0.5 (soit un échantillon de 15 capteurs sur les 24 étudiés), la corrélation n'est pas significative ($p > 0.05$), alors que pour des valeurs supérieures ou égales à 0.5 (soit un échantillon de 9 capteurs sur 24) on obtient une corrélation significative ($p < 0.01$) avec un coefficient R^2 de 0.86.

Intervalle de valeurs de STAR	R^2
$0 \leq \text{STAR} \leq 1$	0.5985
$\text{STAR} < 0.5$	0.0709
$\text{STAR} \geq 0.5$	0.8586

Tableau IV.9 – Coefficient de détermination entre durée d'humectation et STAR direct pour la journée du 27 août, selon l'intervalle de valeurs du STAR

On peut déduire de ces informations qu'en cas de fort ombrage ($\text{STAR} < 0.5$), il existe une variabilité spatiale dans la durée d'évaporation, mais celle-ci ne provient pas des différences entre les niveaux d'éclairement des capteurs.

Dès lors, **le STAR ne s'impose plus comme paramètre caractérisant la structure dans l'ensemble des conditions, mais a priori uniquement pour un éclairement des organes de 50% et plus.**

Ces observations ont été effectuées en moyennant tous les dépôts de gouttes ainsi que les STAR directs sur l'ensemble des journées d'expérimentation. Nous cherchions alors à annuler l'effet des fluctuations journalières des variables climatiques. Mais ces fluctuations du rayonnement au cours de la journée induisent probablement une variabilité de l'influence du STAR sur l'évaporation. Dans cette optique, nous avons décidé d'étudier la dynamique de l'évaporation au cours de la journée, en ne moyennant

plus le STAR direct sur l'ensemble de la journée, mais en calculant un STAR direct moyenné sur la durée d'un épisode d'évaporation (durée entre l'instant où est déposée la première goutte sur un capteur et l'instant où le dernier capteur est sec). Cette approche nous a permis de déterminer plus clairement les interactions entre éclaircissement et évaporation, et ainsi de savoir dans quelles limites il est possible de corrélérer ces deux paramètres.

II.2.b. Etude dynamique au cours des journées de mesure

Nous avons vu dans les paragraphes II.1.b et II.1.c de ce chapitre que le calcul d'un STAR (global ou direct) moyenné sur une journée n'était pas une approche pertinente pour caractériser l'influence de l'éclaircissement sur la durée d'humectation au sein d'un couvert. Nous avons par conséquent cherché à affiner nos observations en calculant les STAR directs et globaux moyennés pour chaque période d'évaporation. Ceux-ci ont été confrontés aux durées d'évaporation correspondantes. Les tableaux IV.10.a, IV.10.b et IV.10.c présentent les coefficients de détermination R^2 de ces relations. Leur observation montre une grande variabilité, ce qui confirme logiquement l'hypothèse selon laquelle l'éclaircissement ne joue pas un rôle prépondérant dans l'évaporation tout au long de la journée.

Arbre 1 Axe Structuré				
Période	11h40 - 12h24	12h30 - 13h05	13h18 - 13h48	14h26 - 14h52
R ² direct	0.64	0.59	0.39	0.44
R ² diffus	0.19	0.26	0.43	0.2
R ² global	0.13	0.19	0.45	0.34
Période	15h20 - 15h42	15h51 - 16h10	16h45 - 17h07	17h18 - 17h42
R ² direct	0.22	0.42	0.23	0.16
R ² diffus	0.09	0.33	0.15	0.02
R ² global	0.26	0.54	0.28	0.11
Arbre 2 Centrifuge				
Période	11h24 - 12h23	12h40 - 13h24	13h24 - 14h00	14h19 - 14h47
R ² direct	0.21	0.17	0.44	0.67
R ² diffus	0.16	0.21	0.4	0.49
R ² global	0.15	0.23	0.46	0.52
Période	15h27 - 15h50	15h56 - 16h15	16h39 - 17h01	17h10 - 17h34
R ² direct	0.33	0.27	0.54	0.63
R ² diffus	0.27	0.39	0.53	0.3
R ² global	0.2	0.32	0.46	0.25

Tableau IV.10.a – Coefficients R² des relations entre évaporation et STAR direct, diffus et global (STAR_{global} = 0.5*STAR_{direct} + 0.5*STAR_{diffus}) pour chaque période d'évaporation de la journée du 27 août 2009

Arbre 1 Axe Structuré				
Période	10h28- 10h45	13h53- 14h13	15h12- 15h23	15h26- 15h42
R ² direct	0.12	0.48	0.00	0.01
R ² diffus	0.13	0.00	0.07	0.00
R ² global	0.13	0.00	0.03	0.01
Arbre 2 Centrifuge				
Période	10h52- 11h17	13h47- 14h03	14h28- 14h44	14h47- 15h00
R ² direct	0.09	0.01	0.17	0.11
R ² diffus	0.00	0.58	0.14	0.35
R ² global	0.02	0.44	0.10	0.22

Tableau IV.10.b- Coefficients R² des relations entre évaporation et STAR direct, diffus et global (STAR_{global} = 0.5*STAR_{direct} + 0.5*STAR_{diffus}) pour chaque période d'évaporation de la journée du 26 mai 2011

Arbre 1 Axe Structuré				
Période	08h23-09h24	11h08-11h24	11h36-11h54	13h32-13h47
R ² direct	0.04	0	0.24	0.05
R ² diffus	0.03	0	0.02	0.07
R ² global	0.04	0.01	0.02	0.12
Période	14h52-15h04	15h05-15h16	16h07-16h21	16h22-16h36
R ² direct	0.03	0.13	0.22	0.28
R ² diffus	0.27	0.22	0.04	0.19
R ² global	0.26	0.19	0.04	0.17
Arbre 2 Centrifuge				
Période	09h30-10h09	10h13-10h44	13h39-14h12	14h31-14h44
R ² direct	0.06	0.01	0.02	0.07
R ² diffus	0	0.04	0.12	0.4
R ² global	0.01	0.01	0.04	0.44
Période	14h45-14h56	15h21-15h42	15h43-15h58	
R ² direct	0.15	0.02	0.04	
R ² diffus	0.44	0.09	0.16	
R ² global	0.31	0.07	0.12	

Tableau IV.10.c – Coefficients R² des relations entre évaporation et STAR direct, diffus et global (STAR_{global} = 0.5*STAR_{direct} + 0.5*STAR_{diffus}) pour chaque période d'évaporation de la journée du 27 juin 2011

Un tracé de l'évolution des R² entre évaporation et STAR direct et global respectivement montre qu'avant 13h30 environ, les corrélations ne sont que très peu significatives (80% des cas avant 13h30 ne présentent pas de corrélation significative). Les quelques mesures effectuées après 17h00 laissent croire qu'en fin de journée, les corrélations ne sont pas nécessairement significatives. (Figure IV.34).

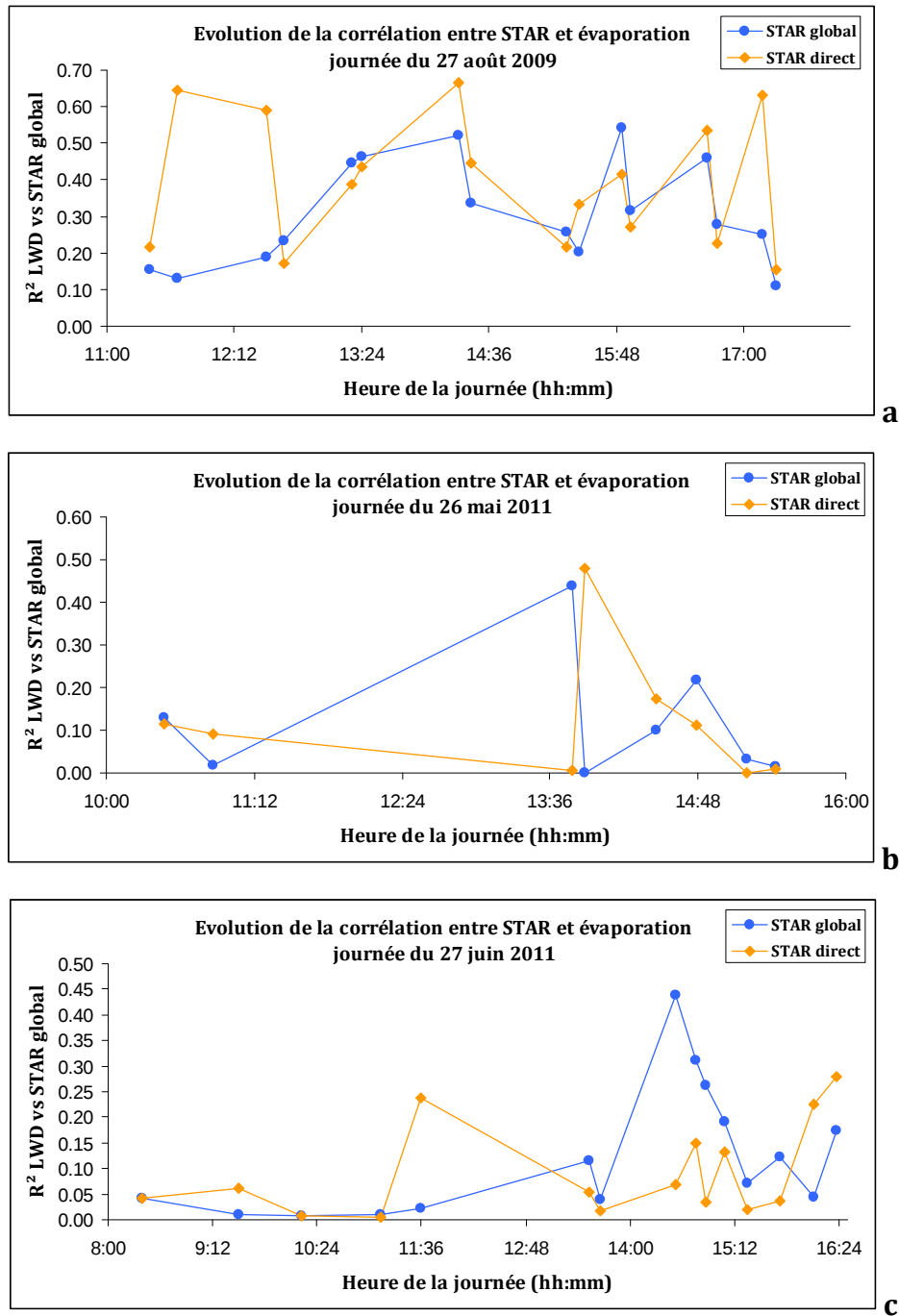


Figure IV.34 – Evolution du coefficient de détermination entre la durée d'humectation des différentes périodes en fonction de l'heure de la journée pour a) le 27 août 2009; b) le 26 mai 2011; c) le 27 juin 2011

Comme il a été vu lors de l'analyse de sensibilité du modèle parmi les variables climatiques (cf. chapitre III §II), l'évaporation est principalement pilotée par l'humidité relative. Nous avons comparé les durées d'évaporation de chaque période aux variables climatiques mesurées au verger moyennées sur la période en question: température, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement. Celui-ci dépend de l'éclairement reçu

par les capteurs (le rayonnement reçu par un capteur est déterminé en multipliant le rayonnement global de la station météorologique par le STAR Direct à la période considérée) (Figures IV.35.a, IV.35.b, IV.35.c & IV.35.d). Ces relations confirment les résultats de l'analyse de sensibilité. L'ensemble des durées d'évaporation pour les trois journées est significativement corrélé avec la température et l'humidité relative ($p < 0.05$). Le rayonnement global n'est pas corrélé aux évaporations du 26 mai 2011 et les corrélations du 27 août 2009 et du 27 juin 2011 sont contradictoires. La vitesse du vent quant à elle est corrélée significativement aux trois journées, mais encore une fois on observe des pentes opposées entre la journée de 2009 (pente positive) et les deux journées de 2011 (pentes négatives)(Tableau IV.11). On peut toutefois remarquer que les gammes de vent sont très différentes entre 2009 et 2011, ainsi la corrélation entre vitesse du vent moyenne au verger et durée d'évaporation n'est sans doute pas une corrélation linéaire, à l'image de la dépendance au vent dans le bilan énergétique d'évaporation (cf. §1.2 du chapitre III). On note par ailleurs que le vent moyen mesuré est toujours supérieur à la vitesse de vent U_{seuil} en dessous de laquelle la convection est mixte. Cependant, les mesures instantanées de vitesse de vent donnent parfois des valeurs comprises entre 0 m.s^{-1} et 0.4 m.s^{-1} (8% des mesures de vent sur les journées du 26 mai et du 27 juin 2011).

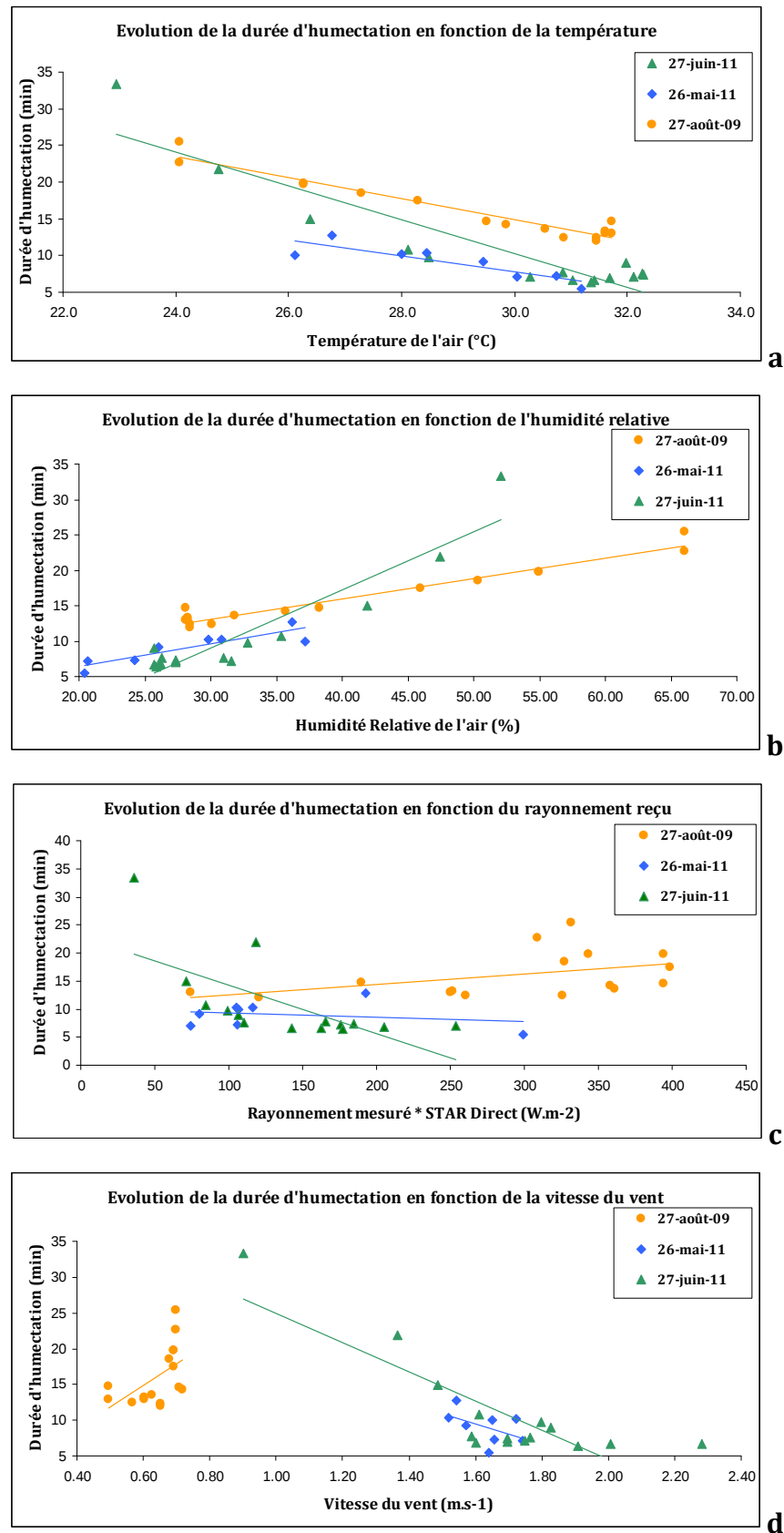


Figure IV.35 – Durée d'évaporation en fonction : a) de la température; b) de l'humidité relative; c) du rayonnement reçu; d) de la vitesse du vent

Jour	Variable	Température	Humidité	Rayonnement	Vent
27 août 2009	Pente	-1.4402	0.2844	0.0186	29.562
	R ²	0.9392	0.9509	0.1930	0.2690
26 mai 2001	Pente	-1.0934	0.3159	-0.0074	-14.222
	R ²	0.7558	0.7856	0.0591	0.2458
27 juin 2011	Pente	-2.318	0.8214	-0.0871	-20.437
	R ²	0.8386	0.8740	0.4435	0.7104

Tableau IV.11 - Pentes et coefficients de détermination des comparaisons entre durée d'évaporation et variables climatiques, les valeurs en rouge illustrent des corrélations non significatives

L'étude de la dynamique d'évaporation au verger au cours d'une journée complète les informations obtenues en intégrant les données sur chaque journée. Il ressort que la représentation de l'éclairement par un STAR intégré sur une journée n'est pas représentative de la dynamique, celui-ci n'ayant une influence significative sur l'évaporation qu'une partie de la journée, principalement lorsque le soleil est au zénith et lorsque le ciel est clair.

De plus, une analyse des capteurs ayant un STAR nul au cours des périodes de dépôt de gouttes montre que les durées d'évaporation mesurées sont variables (Figure IV.36). Il existe donc une variabilité spatiale de paramètres influençant l'évaporation des gouttes dans l'arbre.

Toutefois il n'est pas possible avec nos seules données expérimentales de déterminer quelle est la variabilité spatiale de ces paramètres. Au vu de la dépendance de l'évaporation à la température et à l'humidité et à l'aide du bilan thermique (cf. chapitres I & III) on peut supposer que les variations de température et d'humidité liées au microclimat sont suffisamment grandes pour exercer une influence sur la durée d'évaporation des gouttes. Mais ces interactions entre température/humidité et position dans l'arbre ne peuvent être déterminées sans une mesure de température et d'hygrométrie localisée sur chaque capteur. Sans ce type d'expérimentation, il est impossible de découpler les effets liés à la température et à l'humidité, et à l'éclairement.

Enfin il est envisageable que sur deux capteurs à STAR équivalent, une goutte ait été posée sur la portion éclairée, et l'autre goutte sur la partie ombragée. Ces conclusions seront discutées par la suite.

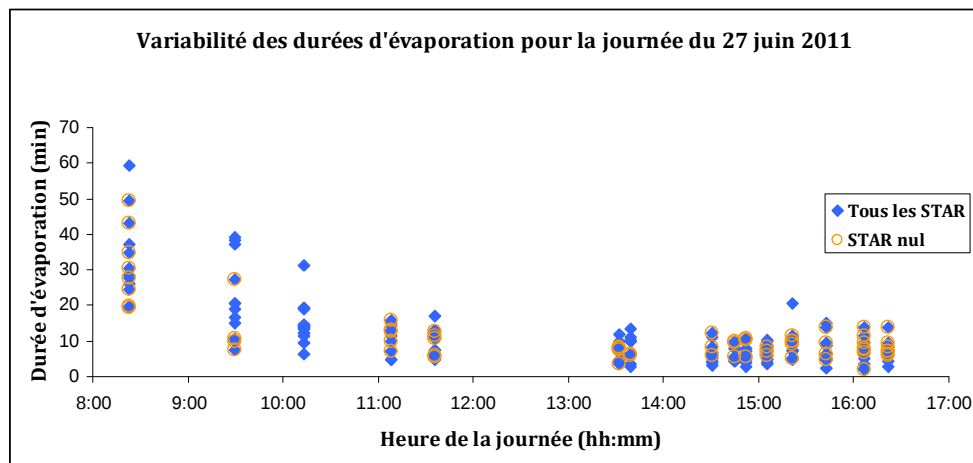


Figure IV.36 – Comparaison de la durée d'évaporation entre l'ensemble des capteurs et les capteurs ayant un STAR nul.

Conclusion du chapitre

Les mesures de durée d'humectation au verger ont fourni un grand nombre de données, révélant des informations importantes, notamment l'absence de corrélation entre les coordonnées spatiales des organes dans l'arbre et la durée d'humectation à leur surface, corrélation qui est souvent employée dans la littérature, mais apparaît ici peu pertinente. C'est pourquoi nous avons proposé de caractériser cette variabilité dans la durée d'humectation à l'aide d'un paramètre nous paraissant plus approprié : le STAR. Cependant, nous n'avons pas trouvé de corrélation entre la composante d'apport d'eau de la durée d'humectation et le STAR. Incapables de déterminer la distribution d'eau au sein du couvert avec nos dispositifs expérimentaux, nous avons centré notre étude sur la partie d'évaporation de la durée d'humectation. Celle-ci montre une nette dépendance au STAR pour un éclaircissement supérieur à 50% (soit un STAR égal à 0.5), plus particulièrement lorsque le soleil est proche du zénith (le matin et en fin de journée, on observe très peu de corrélation). D'autres manipulations sont à prévoir pour les STAR inférieurs à ce seuil, car les données ne sont alors plus corrélées, sans possibilité encore une fois d'évaluer précisément l'origine de cette variabilité. Il est toutefois fort probable qu'il existe une variabilité de la température et de l'humidité relative liée à la structure de l'arbre. Celle-ci pourrait être responsable de la variabilité d'évaporation observée au cours de nos mesures. Pour mettre cet effet en évidence ou infirmer son existence, il est nécessaire d'effectuer des mesures dédiées à la température et à l'hygrométrie.

Cette étude de la seule composante évaporative de la durée d'humectation au verger a donc montré que le STAR n'est pas un paramètre exclusif pour caractériser la variabilité spatiale du microclimat dans l'arbre. On ne peut donc en l'état actuel des choses décrire précisément les interactions entre le STAR et les variables climatiques intervenant dans le processus d'évaporation de l'eau. Un changement d'échelle de notre modèle n'est donc pas possible sans recherches complémentaires.

Discussion Générale

Trois niveaux d'échelle ont été abordés au cours de ce travail :

- i) **l'échelle microscopique** dans l'étude des interactions entre une goutte d'eau et son support;
- ii) **l'échelle de l'organe** dans la modélisation de l'évaporation d'une goutte sur une feuille en fonction de leurs micro-environnements;
- iii) **l'échelle de l'arbre** dans l'étude de l'influence de la structure de l'arbre sur la durée d'humectation.

Ces changements d'échelle se sont imposés pour réunir toutes les informations nécessaires à l'avancement d'une modélisation fiable de l'évaporation d'une goutte sur une feuille dans des conditions au champ. En effet ces trois échelles illustrent parfaitement les différents paramètres clés dans l'évaporation d'une goutte dans un verger. Par la structuration spatiale de son feuillage, l'arbre va générer une variabilité de microclimat à l'échelle des feuilles, microclimat qui va conditionner le temps d'évaporation des gouttes dont les formes et donc les surfaces d'échange vont dépendre des interactions avec leurs supports. Ces trois niveaux d'approche centrés sur l'évaporation d'une goutte ont fourni des résultats qui apportent des réponses aux questions initiales, mais dont il est nécessaire de préciser la portée.

A l'échelle microscopique, nous avons mis en évidence une variabilité ontogénique de la mouillabilité au sein d'un cultivar de pommier, Golden Delicious. Cela montre que l'évolution physiologique de la feuille a un effet non négligeable sur l'état de sa surface, et pourrait expliquer en partie la résistance ontogénique des feuilles à la maladie de la tavelure.

Nos travaux à ce niveau d'échelle ont également permis de vérifier les hypothèses d'existence d'une variabilité de la mouillabilité des feuilles au sein de l'espèce de pommier *Malus domestica*, et d'une variabilité de la mouillabilité de différentes espèces de fruitiers de la famille des rosacées.

Enfin, nous avons pu, grâce à l'étude des interactions entre des gouttes d'eau et des feuilles de pommier, établir via le nombre de Weber un lien entre la vitesse d'impact des gouttes et la forme que prendront celles-ci une fois à l'équilibre.

Ces expérimentations à une échelle très fine ont été effectuées pour atteindre un objectif majeur dans ce travail de thèse : développer un modèle d'évaporation représentatif des interactions entre l'eau et son support.

Notre modèle prend en compte la forme des gouttes via l'angle de contact. Il a ainsi été possible d'évaluer la sensibilité des équations décrivant le processus évaporatif aux paramètres climatiques et morphologiques. Il est ressorti de cette analyse de sensibilité que l'hygrométrie et le rayonnement sont les principaux moteurs de l'évaporation, mais que l'angle de contact a une influence forte sur la durée d'évaporation, en plus de la température et de la vitesse du vent.

Nous avons validé ce dernier par comparaison avec des données observées en conditions contrôlées sur un support hydrophobe, le Parafilm 'M'. Après un ajustement du modèle pour des conditions de vent très faible, les résultats se sont avérés particulièrement concluants, le modèle restituant convenablement les durées d'évaporation observées expérimentalement.

Toutefois, notre modèle s'est révélé incapable de reproduire des durées d'évaporation observées en conditions naturelles sur la surface hydrophile d'un capteur de durée d'humectation. Par manque de temps, nous n'avons pu aborder en profondeur ce problème, mais son origine a été ciblée sur le paramètre décrivant la couche limite de la goutte, et sera discutée, en vue d'une amélioration future du modèle.

Les expérimentations au champ, menées en parallèle des études de mouillabilité et des travaux de modélisation, ont été effectuées dans le but de mettre en évidence un paramètre caractérisant la variabilité spatiale de la durée d'humectation dans un arbre, afin de porter l'échelle de notre modèle de la simple feuille à l'arbre entier. L'erreur commise par notre modèle n'ayant pas été réglée, un changement d'échelle du modèle n'a bien entendu pas été fait. Mais les résultats apportés par ces trois saisons de mesures expérimentales ont apporté des éléments de réponse quant à la caractérisation de la variabilité spatiale de l'humectation, qui a été observée par comparaison des durées d'humectation mesurées par les capteurs placés à des positions différentes dans les arbres (Figure IV.20).

Nous avons ainsi cherché à caractériser cette variabilité à l'aide d'un paramètre rendant compte de l'hétérogénéité structurale de l'arbre. Après avoir vérifié que les paramètres géométriques des capteurs (hauteur, orientation Nord-Sud et Est-Ouest) n'étaient pas pertinents pour caractériser la variabilité spatiale de l'humectation pour les modes de conduite que nous avons étudiés, nous avons proposé d'employer le niveau d'éclairement des capteurs, estimé par leurs valeurs de STAR, qui décrit l'ombrage d'un objet au sein du couvert. Les résultats obtenus peuvent se résumer ainsi:

- i) aucune corrélation entre STAR et durée d'humectation liée à la **pluie** n'a été observée;
- ii) une corrélation entre STAR global moyen et durée d'humectation liée à la **rosée** a été mise en évidence, mais elle n'existe pas pour les zones trop ombragées (STAR inférieurs à 50%);
- iii) une corrélation entre STAR direct et durée d'**évaporation** a été mise en évidence, mais uniquement pour des fortes valeurs de STAR (supérieurs à 50%). La qualité de cette corrélation dépend également des fluctuations journalières du rayonnement, indiquant qu'il n'est pas pertinent d'utiliser un STAR journalier pour caractériser la variation d'éclairement.

La discussion qui suit s'attache à reprendre et à discuter les principaux résultats de cette thèse du plus petit niveau d'interaction étudié au plus grand, afin de mettre en exergue les nouvelles interrogations qui en découlent et les points clés à aborder à la suite de ce travail.

I. Echelle Microscopique : interactions entre la surface de la feuille et le liquide en contact

La forme que prennent les gouttes "sessiles" (gouttes au repos, par opposition aux gouttes tombantes) d'un fluide donné dépend du support sur lequel elles reposent. De cette forme dépendront des propriétés physiques diverses, notamment les capacités de glissement de la goutte, et l'évaporation de celle-ci. En effet, la surface d'échange entre l'air et le liquide a une forte influence sur la rapidité du processus d'évaporation : plus cette surface est grande, plus il y a de molécules d'eau capables de vaporiser simultanément. L'étude de la mouillabilité qui caractérise les interactions entre les gouttes d'eau et les feuilles de pommier était par conséquent une étape indispensable pour décrire la forme des gouttes et leur surface d'échange. Les variabilités mises en évidence montrent la complexité du phénomène : la mouillabilité des feuilles varie en fonction de l'espèce de la plante, en fonction de la variété, et en fonction de l'âge de la feuille au sein d'une même variété. De plus, la vitesse d'impact de la goutte sur la feuille va avoir un effet d'autant plus important sur la forme de la goutte que la surface de la feuille est hétérogène.

I.1. La variabilité ontogénique de l'état de surface des feuilles et ses implications

Les travaux sur la tavelure font état d'une sensibilité ontogénique de la feuille de pommier à cette maladie (cf. Synthèse Bibliographique §II.3.c.), sans toutefois parvenir à en déterminer les origines de manière exhaustive. Cette résistance serait en partie liée à une modification du pH de la surface foliaire évoluant avec l'âge de la feuille pour défavoriser l'infection (MacHardy, 1996). Mais sachant que les feuilles jeunes de pommier sont pubescentes, et que ces poils ont pour effet de modifier l'albédo des feuilles ainsi que la durée d'évaporation des gouttes à leur surface (Jones, 1983), nous

avons tenté de déterminer si la mouillabilité des feuilles présentait une variabilité en fonction de l'âge de la plante.

Cependant, il n'était pas attendu que la pubescence des feuilles rende les mesures d'angles de contact très compliquées, tant de par le piégeage des gouttes par les trichomes (Figure II.8) que par la structure très sensible des feuilles empêchant les répétitions de mesure sur la même portion de feuille. Face à ce problème, un grand échantillon de feuilles aurait permis de maximiser les chances d'obtenir un ensemble de valeurs suffisant. Mais au cours de notre étude, les croissances de 3 pousses seulement ont été suivies, ce qui a produit un trop faible échantillonnage de ces mesures relatives à la variabilité ontogénique. Celles-ci ont tout de même mené à des angles de contact dynamiques exploitables, comme il a été vu au §III.3.c. du chapitre II. Deux résultats principaux ont été obtenus : i) à partir d'un certain âge de feuilles, la mouillabilité évolue de la même manière pour les différents types d'angles de contact observés; et ii) tout au long de la croissance de la feuille, l'hystérésis d'angle de contact diminue.

I.1.a. Sens de variation des médianes des angles de contact

L'analyse de ces valeurs a mis en évidence une tendance commune aux médianes des trois types d'angles de contact considérés à partir d'un âge de 116 degrés-jours. Cette tendance n'est pas monotone et le sens de variations des médianes des angles de contact est séparé en 4 parties : une augmentation, une diminution, puis une nouvelle augmentation avant une dernière diminution jusqu'à l'âge adulte de la feuille.

Si l'on s'attendait à une évolution ontogénique linéaire, nos résultats montrent que la variation de mouillabilité n'est pas monotone. Au vu de ce constat, l'hypothèse de l'existence d'une dynamique ontogénique non linéaire de l'état physiologique de la surface d'une feuille (densité de trichomes, composition et épaisseur de la cire à la surface de la feuille) est à envisager.

Cette hypothèse est en partie confirmée par les travaux de Bringe *et al.* (2006) sur la variabilité ontogénique de feuilles de pommier Golden Delicious (Bringe *et al.*, 2006). Bringe *et al.* (2006) ont cherché à caractériser une variation de l'état de surface des feuilles en fonction de l'insertion des feuilles sur une pousse : la composition chimique

de la cire et sa quantité n'évolue pas de façon monotone selon l'âge de la feuille caractérisé par son point d'insertion.

Mais cette étude ne caractérise pas l'évolution de la surface d'une même feuille au cours de son développement. Ainsi, la vérification de notre hypothèse ne peut être complète qu'à l'aide d'un suivi dynamique de l'état de surface de la feuille

I.1.b. Evolution globale de l'hystérésis d'angles de contact

Nous avons également constaté une diminution de l'hystérésis au fur et à mesure que la feuille vieillit (Figure II.27).

Les observations au MEB à deux stades extrêmes dans la cinétique de développement de la feuille (feuille à 4 jours après débourrement et feuille adulte) apportent une explication structurale à cette diminution de l'hystérésis (Figures II.5, II.6 & II.7).

Les feuilles jeunes présentent un espace intercellulaire creux et de nombreux trichomes à leurs surfaces. Au contraire, une surface lisse et cireuse et l'absence de trichome caractérise les feuilles adultes.

Si l'hystérésis d'angle de contact est un bon descripteur de l'état d'une surface, elle apporte également une **information pertinente sur la durée d'évaporation : la variabilité des valeurs d'angles de contact à l'équilibre diminue avec l'âge des feuilles.**

I.1.c. Perspectives de vérification des hypothèses liées à la variabilité ontogénique de la mouillabilité

Notre étude de la variabilité ontogénique a été imparfaite, au sens où les observations microscopiques ont concerné uniquement les deux stades extrêmes du développement de la feuille, et la répétition trop faible de nos mesures d'angles de contact

Une amélioration de notre étude consisterait à suivre un plus grand nombre de pousses de sorte à disposer d'un grand échantillon, afin d'étudier :

- i) l'état microscopique de la surface des feuilles en fonction de leur âge, par observations des feuilles au MEB et comptage de la densité de trichomes sur la surface;
- ii) la mouillabilité détaillée de la surface des feuilles en fonction de leur âge, par mesure des angles de contact statiques et dynamiques à la surface des feuilles.

La dynamique ontogénique de la surface des feuilles de pommier et de l'hystérésis pourrait alors être clairement définie et il serait alors envisageable d'établir une équation décrivant l'hystérésis en fonction de l'âge des feuilles.

D'autre part, nous avons mis en évidence une variabilité intra-spécifique non négligeable chez le pommier. Réduire l'étude de la variabilité ontogénique à un seul cultivar présente le risque de négliger des propriétés ontogéniques propres à chaque cultivar. Si le suivi de pousses est contraignant, il nous semble approprié dans le futur d'effectuer l'étude sur au moins un cultivar de pommier supplémentaire, afin de vérifier si la dynamique ontogénique de la surface des feuilles est dépendante ou non de la variété considérée.

I.2. Effet de l'impact des gouttes sur leur forme à l'équilibre

L'estimation des angles dynamiques et donc de l'hystérésis des feuilles de pommier a constitué une étape importante dans la modélisation de l'évaporation des gouttes d'eau car ces données permettent de borner la variabilité des angles de contact statiques des gouttes d'eau à la surface des feuilles. Nos mesures montrent que pour le pommier – et certainement pour beaucoup d'espèces fruitières – cette variabilité est forte. Elle induit donc une grande incertitude sur la forme des gouttes formées après une pluie ou une rosée. Au niveau de la modélisation il nous a donc paru important de voir si cette variabilité pouvait être expliquée. Nous avons donc essayé de comprendre quel **facteur pouvait conditionner la valeur que prend l'angle de contact à l'équilibre sur un support à grande hystérésis.**

Au-delà de l'interaction goutte/support, les conditions de dépôt, et notamment la vitesse de l'impact, jouent également un rôle important sur la forme à l'équilibre (Range & Feuillebois, 1998; Tadmor & Yadav, 2008). En effet une goutte " rapide " va fortement s'écraser sur la surface avant de trouver une situation d'équilibre (Vadillo *et al.*, 2009). Dans certains cas la goutte peut rebondir ou éventuellement se scinder en plusieurs gouttes, voire quitter la surface d'impact, comme on peut parfois observer dans le cas d'une feuille d'arbre. Ce rebondissement, ou éclaboussement de l'eau est appelé *splashing* (cf. Synthèse Bibliographique §II.3.a).

Comme il a été présenté au §III.3.d du chapitre II, l'intensité de l'impact peut se caractériser par le **nombre de Weber** We qui compare l'inertie d'une goutte à la tension de surface défini par l'équation II.2 :

$$We = \frac{\rho_{eau} D v^2}{\sigma}$$

où ρ_{eau} est la densité volumique de l'eau ($\approx 1000 \text{ kg.m}^{-3}$), D le diamètre de la goutte (m), v la vitesse de la goutte à l'impact (m.s^{-1}), et σ la tension de surface de l'eau ($7.3 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$ à 20°C).

On peut distinguer alors plusieurs seuils :

- i) pour $We < 10$, la goutte ne s'étalera pas à l'impact;
- ii) pour We compris entre 10 et une valeur critique We_c , la goutte va s'étaler à l'impact;
- iii) au-dessus de la valeur critique We_c la goutte va rebondir par effet de *splashing*.

Au cours de nos mesures nous avons effectué les mesures d'angles de contact statiques selon deux approches :

- i) l'une en **déposant** la goutte à même la feuille pour simuler la **rosée**, la goutte avait alors un nombre de Weber de l'ordre de 0.4;
- ii) l'autre en **lâchant** la goutte d'une certaine hauteur pour simuler la pluie, la goutte avait dans ce cas un nombre de Weber de 45.

Cette comparaison a permis de voir de grandes différences entre ces deux cas. Mais elle ne décrit que deux des trois cas intervenant lorsqu'une goutte entre en contact avec son support, et le *splashing* n'a pas été étudié.

Il est important de noter que l'influence du nombre de Weber sur l'angle de contact statique final de la goutte à l'équilibre ne s'exprime que si l'hystérésis du support est grande. En effet, lors de l'étude de la déformation de gouttelettes de glycérine sur lamelles de verre (matériau rigide très hydrophile (angle d'avancée égal à 10° et angle de recul égal à 6°) et à faible hystérésis (4°)) Sikalo *et al.* (2005) montre que quelle que soit la vitesse d'impact (décrite par le nombre de Weber pour un même liquide), l'angle de contact entre la goutte et son support tend vers la même valeur d'équilibre (Sikalo *et al.*, 2005). Cela pourrait signifier que pour un intervalle donné de vitesses de chute, la pluie aboutirait à la formation de gouttes ayant la même forme (même angle de contact). Il est évident que **cette conclusion n'est pas valable sur support végétal**.

Il apparaît donc nécessaire d'étudier les relations entre les angles à l'équilibre et le nombre de Weber. En effet, nos mesures n'ont été effectuée que pour deux valeurs de W_e correspondant à des **gouttes déposées** ($W_e = 0.4$) à même la feuille et à des **gouttes lâchées** d'une hauteur de 11cm environ ($W_e = 45$). Ces cas ne sont évidemment pas représentatifs de l'ensemble des vitesses d'impact de gouttes d'eau dans un arbre, qui peuvent aller d'une vitesse quasi nulle (donc un Weber proche de zéro) à une vitesse de 10 m.s^{-1} , induisant un nombre de Weber de l'ordre de 6500 pour une goutte de 6mm de diamètre (Gunn & Kinzer, 1949; van Boxel, 1997). C'est pourquoi il faudrait **vérifier le seuil d'étalement de la goutte** fixé à $W_e = 10$ dans la littérature (Wang *et al.*, 2009) et **déterminer l'existence ou non d'une relation permettant d'exprimer l'angle de contact à l'équilibre θ_e en fonction de W_e** .

I.3. Extension des études de mouillabilité aux fongicides

Nous avons au cours de ce travail uniquement étudié la mouillabilité des feuilles avec de l'eau pure. Or, les arbres sont traités avec des produits phytosanitaires composés de molécules possédant des propriétés de tension de surface et de viscosité différentes de celles de l'eau pure, notamment des surfactants dont le but est d'étaler la goutte au maximum pour maximiser la surface de contact du produit sur la feuille (Dutschk *et al.*, 2003; Rulison, 2007; Yu *et al.*, 2009). Si ces produits ne sont pas employés en irrigation, une pluie ou une rosée vont avoir tendance à lessiver ces produits : la composition de l'eau va alors intégrer ces molécules et les redistribuer au sein de l'arbre par ruissellement ou par *splashing*.

Ainsi, il serait intéressant d'étudier le mouillage de ces produits sur feuilles de pommier, afin de déterminer si l'usage de ces produits induit une modification forte de la durée d'évaporation de l'eau sur les organes, et dans quel sens se produit cette éventuelle modification.

II. Echelle de l'organe : la feuille et la goutte dans leur environnement

Le développement d'un modèle d'évaporation d'une goutte avait pour but de disposer d'un outil simple gérant la variabilité des interactions eau/support végétal et la dynamique temporelle des conditions climatiques. La majorité des modèles d'évaporation développés dans le cadre de l'étude des maladies fongiques prennent explicitement et correctement la dynamique du microclimat. Par contre, et au-delà de l'utilisation de l'équation de Penmann-Monteith sans se préoccuper de l'hypothèse sous-jacente à son établissement, aucun modèle ne prend explicitement en compte l'interaction de l'eau avec son support. Seuls Magarey *et al.* (2005a) et Butler (1990) avaient esquissé ce point, mais de manière très succincte pour Magarey *et al.* (2005a) (mesure du rayon de contact) et sans prendre en compte la surface d'échange réelle entre la goutte et l'air, et de manière purement géométrique pour Butler (1990) *i.e.* sans lien avec la mouillabilité du support. Notre travail de modélisation est donc un réel progrès car il relie explicitement une caractéristique du couvert (la mouillabilité) et la forme des gouttes. Toutefois, l'intégration de cette interaction ad hoc a conduit à des résultats erronés en conditions contrôlées et aux champs. Ces résultats nous ont mené à nous interroger sur la pertinence des approches utilisées dans la littérature pour représenter la résistance de couche limite, et ont amené un constat important: un manque de données expérimentales permettant d'estimer cette résistance de couche limite en régime de convection mixte. Cette absence conduit à des difficultés fortes sur le choix pertinent d'une échelle de longueur caractéristique de la goutte dont la forme évolue au cours du temps.

II.1. Régime d'écoulement et expression de la résistance aux transferts convectifs de la couche limite

A l'échelle d'une goutte d'eau, la modélisation des flux de masse et de chaleur est basée sur une approche de type Fourier : les flux de surface sont pilotés par les gradients spatiaux d'hygrométrie et de température entre la goutte et son environnement (Guéna, 2007). Ainsi les flux sont proportionnels à $\frac{\Delta X}{L}$ où X représente la variable pilotant le

flux et L une échelle de longueur caractéristique sur laquelle s'exerce ce gradient. Dans le cadre d'une goutte posée sur un support l'échelle de grandeur des gradients L dépend fortement des conditions d'écoulement de l'air, et est liée à l'épaisseur de la couche limite autour de la goutte. En l'absence de vent – on parle de convection libre – cette épaisseur est celle d'une couche limite thermique (Chassaing, 1997). A contrario, pour des vitesses de vent importantes – on parle de régime de convection forcée – L correspond à l'épaisseur de la couche limite dynamique (Chassaing, 1997). En fonction de l'intensité du gradient thermique et de la vitesse du vent, cette couche limite peut-être pilotée par les deux processus simultanément. On parle alors de convection mixte (Chassaing, 1997). Lorsque les vitesses d'écoulement sont suffisamment importantes, la couche limite peut devenir turbulente et induire des changements des gradient et donc des transferts de masse et de chaleur (Schlichting & Gersten, 2000).

Dans tous les cas précités, l'échelle de longueur pertinente reste L mais elle évolue fortement d'un cas à l'autre. Elle est également dépendante de la forme et de la taille de l'objet considéré (Nobel, 1975). La forme de l'objet ayant également un impact sur le type de couche limite notamment pour ce qui est de la transition vers la turbulence (Monteith & Unsworth, 1990; Schlichting & Gersten, 2000).

Il est possible à partir d'hypothèses fortes (vent nul, diffusion pure, (Hu & Larson, 2002; Picknett & Bexon, 1977)) ou dans un cas très précis et à partir de calculs numériques impliquant la résolution des équations de transports de l'air (équations de Navier-Stokes) sur un maillage important (Kang *et al.*, 2009) de restituer la bonne échelle de longueur L des transferts.

De par les hypothèses sous-jacentes ou en raison de la puissance de calcul nécessaire, ces approches ne sont pas adaptées à des calculs rapides prenant en compte la dynamique du climat utilisables dans le cadre d'une prospection de la variabilité intra-couvert de l'évaporation (cf. Chapitre I §I.1). D'où le développement de modèles faisant abstraction, d'un point de vue calcul, de cette couche limite. Dans ce cas l'écoulement de l'air n'est plus simulé mais l'intensité des flux doit tout de même être contrainte par le type d'écoulement considéré. Cela est fait via l'utilisation d'une résistance de couche limite r_c (Leclerc *et al.*, 1985; Monteith & Unsworth, 1990). La difficulté est alors de paramétrer r_c à partir des conditions d'évaporation (vent, humidité relative, températures, rayonnement) et de la forme de l'objet considéré, ici une goutte reposant sur un substrat solide.

Dans le cas d'un contrôle convectif (par le vent) et diffusif (par le gradient de pression de vapeur) des transferts de masse, une analyse dimensionnelle conduit à rechercher une expression de r_c fonction du nombre de Grashof (G_r) et du nombre de Reynolds (R_e) (Butler, 1990; Chassaing, 1997; Kelly-Zion *et al.*, 2011; Monteith & Unsworth, 1990) :

$$r_c = \frac{G_r^c L^d}{a R_e^b} \quad \text{D.1}$$

Ainsi la détermination de r_c passe par la détermination des paramètres a , b , c et d et par le choix d'une échelle de longueur caractéristique L pour l'expression de R_e et G_r .

Au niveau des gouttes reposant sur un support, la bibliographie fait surtout état de paramétrisations dans le cas de vent fort (Butler, 1990) dans le cas de gouttes ou de film (Magarey *et al.*, 2005a). C'est l'expression qui avait été choisie *a priori* dans cette thèse. Dans le cadre de la validation du modèle, il est logiquement apparu que cette expression n'était pas pertinente dans la gamme de vents faibles à nuls. L'utilisation de données bibliographiques dans le cas de vent nul sans gradient thermique (Hu & Larson, 2002) et avec gradient thermique (Kelly-Zion *et al.*, 2011), nous a permis d'estimer la résistance de couche limite en convection libre indépendamment de l'angle de contact entre la goutte et son support. Ainsi, nous avons été en mesure d'estimer la durée d'évaporation pour un vent nul ($\leq 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$) ou pour un vent fort ($\geq 0.4 \text{ m.s}^{-1}$). Mais il n'a pas été

possible, à partir des données bibliographiques, d'estimer et donc d'intégrer dans le modèle une expression du cas mixte.

Connaissant l'expression analytique de la résistance de couche limite en convections libre et forcée, l'approche retenue a donc simplement consisté à les relier linéairement pour obtenir une forme continue de la résistance pour les cas de convection libre, mixte et forcée. Ce choix résulte d'un parti pris de modélisation et peut être discuté. En effet, les tangentes aux points de raccordement ne sont pas continues si l'on considère un raccordement linéaire, mais il s'agit là d'une première approche de modélisation en l'absence de données expérimentales pour déterminer précisément la forme de cette résistance en convection mixte.

Toutefois, si cette formulation du modèle donne des résultats très satisfaisants lors d'une validation faisant varier un à un chaque paramètre en conditions contrôlées sur Parafilm 'M', la validation sur capteurs de durée d'humectation en conditions naturelles où température, vitesse du vent, humidité relative et rayonnement varient en même temps, produit des valeurs éloignées du résultat attendu. *A priori*, le modèle établi restitue correctement la dépendance de l'évaporation aux conditions climatiques. En revanche la différence majeure avec la validation sur Parafilm 'M' est la mouillabilité du support qui induit des angles, et donc des formes de gouttes, différents dans les deux cas. Or, la forme de l'objet considéré impacte fortement les transferts de masse (Monteith & Unsworth, 1990). Ce point est d'autant plus important que, dans le cas de notre étude, la forme évolue au cours du temps. Cela nous conduit à nous interroger sur une échelle de longueur caractéristique de la goutte pertinente pour estimer l'épaisseur de la couche limite.

II.1.a. Quelle échelle de longueur?

Dans la plupart des cas, c'est le rayon de contact de la goutte qui est pris comme échelle de longueur caractéristique du flux de masse pour estimer la résistance de couche limite (Butler, 1990; Guéna, 2007; Leclerc *et al.*, 1986; Leclerc *et al.*, 1985; Monteith & Unsworth, 1990). Or il est clair que la résistance au transfert de masse d'un hémisphère ($\theta_c = 90^\circ$) est très différente de celle d'une plaque plane ($\theta_c = 0^\circ$) (Monteith & Unsworth,

1990), car la forme (hauteur notamment) est fortement différente même si le rayon de contact de ces deux cas extrêmes – que l'on peut comparer respectivement à une goutte et à un film d'eau – est identique. Ainsi telle que nous l'avons définie dans l'équation III.10, la résistance aérodynamique de couche limite r_c ne tient pas compte de ces évolutions puisque établie sur le rayon de contact ($L = r$). Dès lors, la question de la longueur caractéristique L se pose pour savoir quelle serait l'expression de r_c la plus pertinente pour le cas d'une goutte dont la forme – et donc la couche limite – évolue au cours du temps.

En convection forcée ($c=0, d=1$) l'expression de r_c d'après l'équation D.1 est la suivante :

$$r_c = \frac{L}{aR_e} \quad \text{D.2}$$

Afin de prendre en compte l'évolution au cours du temps de la forme de la goutte et donc du changement de l'échelle caractéristique L , nous avons basé son calcul sur le rayon d'une demi-sphère de volume V :

$$L = \left(\frac{3V}{2\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{D.3}$$

Il s'agit ici d'un choix *a priori*. Afin d'estimer sa pertinence nous avons comparé les résultats obtenus pour différents choix : diamètre de contact de la goutte, sa hauteur, ou encore son arc de courbure. Chaque expression fournit un résultat différent (Figure D.1), **sans qu'il soit possible de déterminer lequel est le plus pertinent de manière absolue.**

Avec une pente de régression linéaire l'ordre de 1.076, il semblerait que le choix du volume soit la meilleure option au vu de la figure D.1, mais cela n'est vérifié que pour le cas étudié (validation à partir des observations de Magarey sur du Parafilm 'M' qui est hydrophobe (Magarey *et al.*, 2005a). Si par exemple on considère les données d'évaporation mesurées au verger (cf. chapitre III §IV et Figure D.2) sur un support plutôt hydrophile, l'écart entre les simulations utilisant les différentes échelles de longueur reste présent et le rapport entre les pentes des différentes simulations est très proche dans les deux figures (Tableau D.1), mais aucune des échelles proposées ne permet aux simulations de s'approcher des observations.

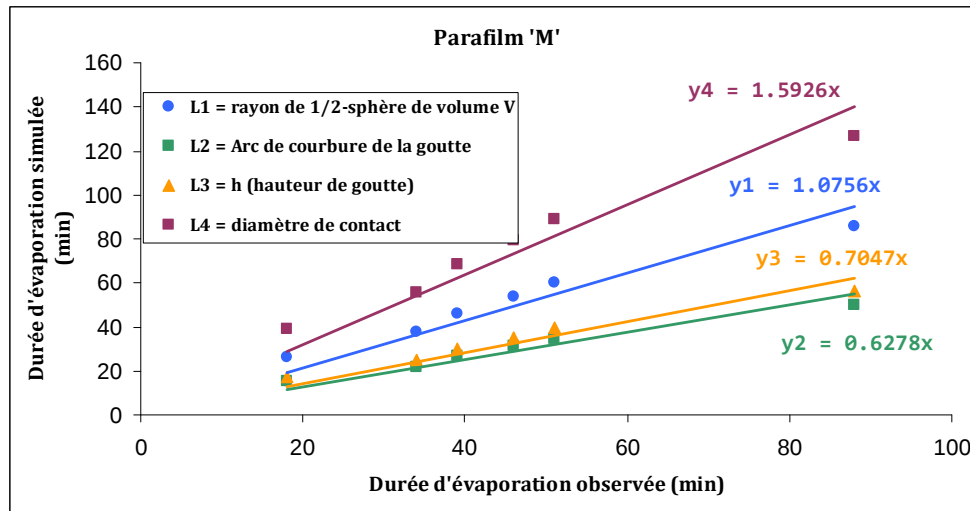


Figure D.1 – Comparaison des résultats de simulation pour différentes échelles de longueur intervenant dans l'expression de la résistance de couche limite : cas d'évaporation observés par Magarey sur Parafilm 'M' (Magarey *et al.*, 2005a)

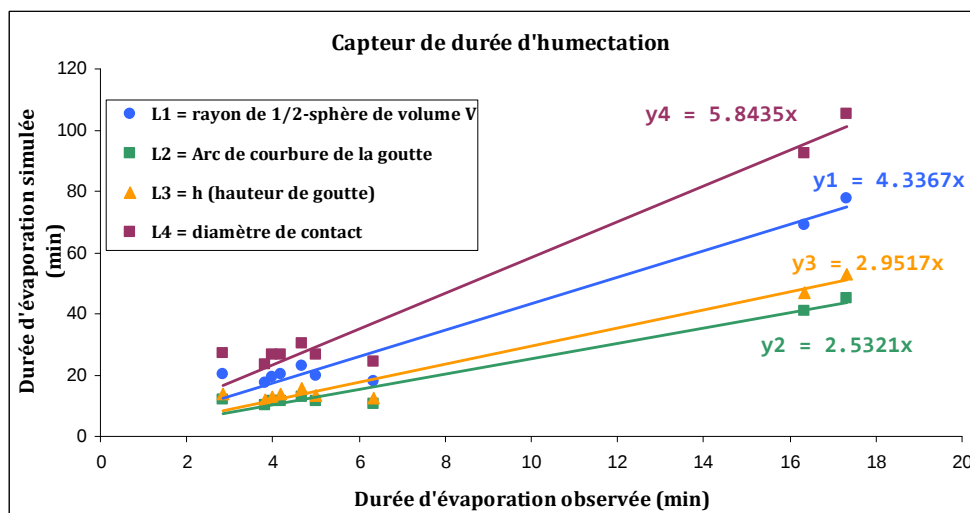


Figure D.2 – Comparaison des résultats de simulation pour différentes échelles de longueur intervenant dans l'expression de la résistance de couche limite : cas d'évaporation observés sur capteurs de durée d'humectation au verger

Rapport de pentes	Parafilm 'M'	Capteur
y_1/y_2	1.71	1.71
y_1/y_3	1.53	1.47
y_1/y_4	0.68	0.74

Tableau D.1 – Rapports entre les pentes de régression des simulations d'évaporation en fonction des différentes échelles de longueur

On peut voir sur le tableau D.1 que le choix de l'échelle de longueur donne les mêmes écarts de simulation entre le Parafilm 'M' et le capteur de durée d'humectation. Les calculs ayant été effectués à paramètres a et b (cf. équations D.1 & D.2) constants, ces différences plaident pour une adaptation de a et b en fonction du support considéré.

La recherche des paramètres employés dans la littérature montre une grande diversité de leurs valeurs. En effet ces paramètres sont déterminés de manière empirique. De telles expérimentations ont été maintes fois mises en œuvre (Butler, 1985; Butler, 1990; Leclerc *et al.*, 1986). La lecture de ces différents travaux converge vers le constat suivant : chaque expérimentation fournit des valeurs différentes pour ces paramètres.

Butler (1990) a proposé une représentation de la résistance aérodynamique convective d'après des observations d'évaporation (Butler, 1990). Notre représentation est proche de ces valeurs mais dans ses travaux, Butler (1990) a établi ses paramètres d'ajustement de la résistance de couche limite à partir d'expérimentations sur feuilles de blé, dont nous avons vu que la mouillabilité ($\theta_e=142^\circ$) est très différente de celle du Parafilm 'M' ($\theta_e=106^\circ$) et des capteurs de durée d'humectation ($\theta_e=66^\circ$) (Tableau II.6). Ainsi, pour déterminer précisément une expression la plus exacte possible de la résistance de couche limite pour le Parafilm 'M', les capteurs de durée d'humectation et à terme les feuilles de pommier, il apparaît nécessaire d'effectuer des mesures d'évaporation afin d'en déterminer la résistance r_c correspondante.

II.2. Prévision des risques épidémiques à partir du modèle d'évaporation

La problématique de notre travail était de mettre au point une méthode de prévision des risques d'infection des feuilles de pommier par *Venturia inaequalis* précise afin d'éviter les surestimations de risques menant à des traitements fongicides inutiles.

Même si notre modèle d'évaporation en tant que tel ne répond pas directement à cette problématique, il en donne une composante essentielle qui permet d'estimer la durée d'humectation dans la couronne de l'arbre, à condition de connaître la distribution de l'eau au sein de la couronne de l'arbre *a priori* (cette question a été discutée plus haut).

Cette durée d'humectation peut être traduite en termes épidémiques par couplage avec les courbes de Mills révisées, qui sont le lien entre le couple de variables climatiques (température, durée d'humectation) et le risque infectieux (Figure B.23 et Tableau B.4). En effet, l'estimation d'un risque d'épidémie de tavelure étant directement lié à la température de l'air (pouvant être estimée par des modèles climatiques) et à la durée d'humectation, il est possible en connaissant la température de l'air et la durée d'évaporation du volume d'eau présent sur la feuille, d'obtenir un point qui sera comparé aux courbes de Mills.

Lors de la validation de notre modèle à partir de durées d'évaporation mesurées par Magarey en conditions contrôlées sur Parafilm 'M' (Magarey *et al.*, 2005a; Magarey, *communication personnelle*), nous avons déterminé une erreur de l'ordre de 15 minutes. Un écart de 15 minutes d'humectation sur les courbes de Mills relatives aux infections primaire et secondaire produit une erreur de 0 à 4.5% sur l'estimation de risque. Cette erreur est satisfaisante et garantit une bonne précision de l'estimation, notamment sur des périodes types de risque épidémique durant plusieurs heures (la durée minimale d'humectation pour qu'il y ait un risque d'humectation est de l'ordre de 4 heures d'après courbes de risques de Mills révisées (MacHardy & Gadoury, 1989). De plus, cette erreur a été estimée à partir de données expérimentales certainement imprécises (cf. chapitre III §I). L'erreur du modèle d'évaporation pourrait donc être plus petite encore. Cependant, cette **erreur ne concerne que la précision sur la durée d'évaporation**, et ne tient pas compte des incertitudes sur les variables d'entrée du modèle évaporatif : le volume de la goutte, son angle de contact et les variables climatiques.

III. Changement d'échelle : de la feuille à l'arbre

III.1. Pourquoi modéliser à l'échelle de l'arbre?

La simulation de la durée d'évaporation d'une goutte sur une feuille couplée à des courbes de risques d'infection de tavelure n'a pas de réel sens tant que l'on considère la feuille comme un objet isolé et que l'on ne considère qu'une seule goutte d'eau. En effet, les courbes de risques ont été évaluées à partir de l'observation d'arbres dans leur ensemble et non de feuilles individuelles (Brun *et al.*, 2008; MacHardy, 1996; Machardy & Gadoury, 1989; Mills, 1951; Osbert, 2011). Il est de plus clair que le spectre dimensionnel des gouttes d'eau de pluie ou de rosée est étendu (Brain & Butler, 1985), et que la distribution d'eau au sein d'un arbre est modulée par la structure même de cet arbre (Calder, 1996; Llorens & Gallart, 2000; Ulbrich, 1983). Il en va de même pour les paramètres climatiques : le vent, le rayonnement, la température et l'hygrométrie ne sont pas distribués uniformément au sein de la couronne d'un arbre (Chelle & Cellier, 2009; Jackson, 1980).

Parallèlement, la structure de l'arbre va jouer un rôle dans la dissémination intra-couronne du pathogène (MacHardy, 1996; Saint-Jean *et al.*, 2006).

Ainsi, l'exploitation de notre modèle d'évaporation à des fins de prévisions épidémiologiques nécessite une description de l'impact de l'architecture de l'arbre sur l'évaporation. L'échelle de l'organe est alors insuffisante et il est nécessaire d'augmenter l'échelle du modèle (*upscaling*) vers l'arbre dans son ensemble.

Mais un tel changement d'échelle peut également avoir une portée plus fondamentale, et servir de base à des réflexions sur une possible évolution des modes de conduites générant par exemple des microclimats propices à l'évitement de la maladie.

III.2. Comment effectuer le changement d'échelle?

La modélisation de l'humectation dans l'arbre peut s'envisager de différentes manières :

- i) Représentation de l'arbre comme une "grande feuille";
- ii) Représentation de l'arbre sous la forme de plusieurs strates horizontales;
- iii) Représentation de la structure 3D de l'arbre en considérant chaque pousse comme une "grande feuille";
- iv) Reconstruction 3D détaillée de l'arbre et de son feuillage.

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. Les modèles de type "grande feuille" ne tiennent pas du tout compte de la structure de l'arbre et ne peuvent donc pas rendre compte des variabilités microclimatiques au sein du couvert. S'ils présentent un intérêt théorique à l'image du modèle d'évaporation que nous avons développé (Magarey *et al.*, 2005b), l'erreur commise en termes de variabilité climatique dans l'arbre est trop importante.

Les modèles en strates sont une alternative intéressante (Huber, 1988), mais comme nous avons pu voir au chapitre IV, la seule hauteur des zones de l'arbre ne traduit pas les variations d'humectation observées.

Les modèles iii) et iv) peuvent en revanche être des options intéressantes, car prenant en considération la variabilité spatiale du microclimat des arbres via la reconstruction en trois dimensions de la structure de l'arbre. La complexité d'un feuillage entièrement discrétisé et le temps de calcul envisagé par une telle approche laisserait dans un premier temps préférer le type iii) de modèle au type iv).

En effet, regrouper des pousses au sein d'une maquette d'arbre permet d'estimer un volume et une surface foliaires réalistes à partir des relations allométriques propres à la variété considérée, tout en permettant de déterminer un microclimat moyen à l'ensemble de chaque pousse (Sonohat *et al.*, 2006).

Au cours de ce travail, nous avons notamment étudié la variabilité de la durée d'humectation en fonction de l'architecture de l'arbre. Nous avons proposé de caractériser cette dernière à l'aide d'un paramètre reliant la position relative des organes entre eux et leurs microclimats respectifs : le STAR. Ce dernier ne s'est pas avéré pertinent en l'état actuel de nos acquis théoriques et expérimentaux. Mais si l'on parvient à unifier les liens entre STAR et rayonnement, température et humidité relative, il serait alors possible de modéliser précisément les conditions

microclimatiques des différentes zones de l'arbre, et ainsi de simuler la durée d'évaporation en tenant compte de sa variabilité spatiale.

III.3. Vers des architectures favorisant de courtes durées d'humectation

Les problématiques environnementales et sociétales liées aux méthodes d'enrayement des épidémies de maladies fongiques convergent vers la mise au point de méthodes "vertes", tout en gardant à l'esprit les notions de productivité fruitière et de changements climatiques. La recherche à long terme vise donc à déterminer les moyens de maximiser l'évitement de l'épidémie par les arbres d'une manière durable et respectueuse de l'environnement (Alaphilippe *et al.*, 2009; Brun *et al.*, 2007).

Dans cette optique, les modèles "exploratoires" tels que le modèle d'évaporation que nous avons développé sont un atout non négligeable, leur avantage étant leur simplicité d'utilisation et la possibilité qu'ils offrent d'étudier l'influence et la variabilité des paramètres d'entrée intervenant dans les phénomènes simulés.

Dans le cadre de l'étude du pathosystème pommier-tavelure, mettre au point une architecture d'arbre favorisant des microclimats accélérant la durée d'évaporation de l'eau présenterait un intérêt dans l'enrayement "propre" de la maladie (Simon *et al.*, 2007).

Il est alors envisageable d'utiliser notre modèle, couplé à des modèles de croissance végétative (Costes *et al.*, 2008; Lacointe & Donès, 2007), et à des modèles de changement climatique, pour tester des modes de conduite (à l'aide de maquettes 3D) garantissant à la fois un microclimat désavantageant le pathogène et un bon rendement fruitier

IV. Echelle de l'arbre : variabilité spatiale du microclimat et de la durée d'humectation

Nous avons établi la nécessité d'élargir l'échelle de notre modèle d'évaporation pour répondre à la problématique générale de l'étude de la durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier. Dans cette optique, un des objectifs de nos mesures de durée d'humectation au verger était de caractériser une relation entre l'humectation et la structure d'un arbre – caractérisée dans ce travail par la distribution de l'éclairement dans l'arbre (exprimée à l'aide du STAR qui donne le rapport de la surface éclairée d'un objet sur sa surface totale).

Les résultats obtenus dans ce sens présentés au début de cette partie nous ont mené à conclure que le STAR n'est manifestement pas un indicateur représentatif de la variabilité intra-couronne de la durée d'humectation, et nous rappelle que cette variable est le résultat de processus complexes (apport d'eau et évaporation) qui sont sous la contrainte de toutes les variables climatiques : pluie, rayonnement, température d'air, hygrométrie de l'air et vitesse du vent. Ainsi il apparaît clair qu'une relation entre durée d'humectation et ombrage au sein du couvert n'existe que si la variabilité spatiale de l'ombrage est corrélée à une de ces variables et si cette variable est le principal moteur déterminant de la durée d'humectation. Une illustration directe est le lien fort entre le STAR direct et la durée d'évaporation lorsque le rayonnement global est important. En effet, et **uniquement dans ce cas**, il existe effectivement un gradient de STAR qui peut être relié à un gradient de rayonnement au sein du couvert (figure IV.32). Le gradient de rayonnement pilote alors le processus d'évaporation. Toutefois, l'introduction du STAR comme descripteur de ce gradient de rayonnement n'a pas montré de corrélation avec la durée d'humectation dans l'ensemble des situations (heures de la journée, nature de l'épisode d'humectation).

L'analyse des résultats obtenus montre que la difficulté d'établir un lien entre STAR et durée d'humectation provient principalement de la variabilité spatiale des paramètres au sein du couvert : l'apport d'eau est conditionné par la structure de l'arbre (Chang, 2006), et l'évaporation subit l'influence de la variabilité microclimatique induite par la

structure de l'arbre (Butler, 1986). Il nous semble donc important de discuter ici plus avant ces liens vis-à-vis de leurs impacts sur la durée d'humectation en distinguant i) les paramètres climatiques influençant l'évaporation, ii) de la partie apport d'eau.

IV.1. Variabilité des paramètres climatiques au sein du couvert influençant l'évaporation

IV.1.a. Variabilité spatiale de la température et de l'humidité relative

Les paramètres climatiques varient au cours du temps (Figure IV.31) et sont susceptibles de varier spatialement au sein du couvert (Grimmond *et al.*, 2000; Sinoquet *et al.*, 2001; Chelle & Cellier, 2009). En fonction du moment considéré et de la position des capteurs dans le couvert, le moteur principal de l'évaporation peut donc être très différent. Ainsi une corrélation entre niveau d'éclairement et durée d'évaporation ne peut être obtenue que si l'éclairement est le moteur de l'évaporation et que si un gradient d'éclairement existe. Cela est parfaitement mis en évidence par les résultats du chapitre IV où des corrélations n'apparaissent qu'en milieu de journée. En début et fin de journée, le rayonnement n'étant plus suffisamment important, le processus d'évaporation est piloté majoritairement par l'humidité relative et la température. L'absence de corrélation entre durée d'évaporation et STAR durant ces périodes indique que soit i) il n'existe pas de gradient de température et d'hygrométrie au sein du couvert, ii) soit ces gradients existent mais le STAR n'en est pas un bon indicateur. Les données acquises au cours de cette thèse ne permettent pas de trancher. Néanmoins des travaux antérieurs ont montré que l'hypothèse ii) est possible car des gradients spatiaux au sein d'un couvert de température d'air (Chelle & Cellier, 2009) et d'humidité relative (Grimmond *et al.*, 2000) parfois importants ont été mesurés. Cette hypothèse est certainement à privilégier car il nous paraît clair que l'"ouverture" au ciel d'une zone de l'arbre va avoir un effet sur la température et l'hygrométrie : la température d'une zone ombragée sera moins grande que celle d'une zone ensoleillée, et une zone "fermée" (par exemple un feuillage dense) est plus humide qu'une zone à l'air libre (par exemple le

sommet de l'arbre). Il est à noter également que dans le cadre de cette étude, des zones enherbées sont présentes au pied des arbres étudiées favorisant certainement l'apparition de gradients hygrométriques et thermiques.

IV.1.b. Validité de la détermination du STAR

On trouve dans la littérature de nombreuses études cherchant à décrire la variabilité spatiale de la durée d'humectation au sein d'un couvert via les orientations cardinales Nord-Sud et Est-Ouest ou plus simplement la hauteur au sol (Batzner *et al.*, 2008; Dietz *et al.*, 2007; Penrose & Nicol, 1996; Sentelhas *et al.*, 2005). Cette représentation ne nous semble pas pertinente dans le cadre de l'étude de la durée d'humectation car les processus étudiés (interception de l'eau et évaporation) sont liés à la distribution spatiale du feuillage qui n'est pas essentiellement liée à des considérations géométriques. En ce sens l'utilisation du STAR lors de cette étude nous a parue plus pertinente. En effet, même si le STAR est à la base un indicateur d'éclairement (Sinoquet *et al.*, 1998), il prend en compte explicitement le degré de couverture foliaire au dessus de l'objet considéré. Il permet donc également d'estimer la couverture foliaire des capteurs d'humectation. Nous avons donc choisi d'analyser la variabilité de la durée d'humectation au sein de nos arbres échantillons en fonction du STAR, et avons justifié ce choix par l'absence de corrélation entre durée d'humectation et orientations cardinales et hauteur (Figures IV. 22, IV.23, IV.25 & IV.26), lesquelles n'étaient d'ailleurs pas corrélées au STAR global moyen (Figures IV.25 & IV.26)

C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé tout au long de cette étude le niveau d'éclairement relatif (STAR) comme indicateur de l'environnement lumineux des capteurs. Il est donc important de préciser les hypothèses sous-jacentes à son établissement et leurs conséquences sur son utilisation.

Cet indicateur prend en compte simultanément et explicitement 3 composantes : l'éclairement direct lié à la position du soleil dans le ciel, l'éclairement diffus lié au rayonnement rediffusé par le ciel, et la structuration spatiale de la frondaison. Parmi ces 3 composantes, la prise en compte de l'éclairement direct et de la structuration spatiale de la frondaison sont les plus problématiques.

En effet, l'éclairement direct évolue au cours du temps suivant la position du soleil dans le ciel. Or, lors de l'analyse globale des résultats intégrant toutes les données de la saison de végétation (cf. Chapitre IV §II.1.b.), c'est un STAR journalier moyen et calculé pour une seule journée qui a été utilisé (Chapitre IV). L'aspect temporel infra-journalier a ainsi totalement été gommé bien que l'humectation moyenne des capteurs présente une durée inférieure à l'échelle journalière. De même, si à structure donnée le STAR évolue peu au cours de la saison (Saudreau *et al.*, *communication personnelle*), l'évolution saisonnière a été ignorée et un seul STAR global a été employé pour chaque année d'étude.

D'autre part, les STAR des capteurs ont été estimés à partir de maquettes virtuelles issues de pommiers digitalisés. Or ces pommiers ont été digitalisés à l'échelle de la pousse. Les feuilles ont donc été reconstruites à partir de relations statistiques (Sonohat *et al.*, 2006 - cf. Annexe 1). La distribution du feuillage ainsi reconstruite ne décrit donc pas précisément la structure réelle de la plante considérée. **Le STAR d'un capteur tel que nous l'avons calculé n'est donc pas strictement celui du capteur au verger.** L'incertitude causée par cette approximation n'a pas été mesurée dans le cadre de cette thèse, mais une tentative d'estimation a été entreprise par Sonohat *et al.* (2006) sur pêcher (Sonohat *et al.*, 2006). Cette étude a montré que l'environnement lumineux d'une pousse était estimé avec une erreur de 1 à 15 % lorsque toutes les autres pousses étaient reconstruites. Ces conclusions étant liées aux arbres étudiés (pêchers) et à la qualité (échantillonnage) des relations statistiques, nous avons estimé que dans le cadre de ce travail les STAR calculés ont une précision de l'ordre de 10%. La prise en compte de cette erreur dans l'analyse (regroupement par classes des STAR des capteurs) conduit à un renforcement des relations et les résultats des figures IV.32 et IV.33 sont affinés, faisant apparaître plus nettement les corrélations entre éclairement et rosée.

Dans le futur il nous paraît nécessaire de mieux quantifier cette incertitude. Pour palier à la difficulté pratique liée à la digitalisation à l'échelle de la feuille d'un arbre complet, l'utilisation d'un arbre complètement virtuel qui serait pris comme référence et qui serait reconstruit suivant plusieurs qualités d'échantillonnage pourrait compléter le travail de Sonohat *et al.* (2006) et préciser l'incertitude liée au calcul du STAR.

Enfin, et même s'il s'agit certainement d'un effet du second ordre, le vent, et notamment sa composante turbulente ($U > U_{seuil}$), induit des mouvements des branches fonction de

la distribution spatiale de la frondaison, de ses caractéristiques mécanique et de l'intensité de l'évènement turbulent (Rodriguez *et al.*, 2008). Ce mouvement va donc induire des variations d'éclairement au niveau des capteurs qui ne sont pas pris en compte lors de cette étude (Roden, 2003). Encore une fois, une série de mesures du phénomène serait à envisager, par exemple par suivi vidéo de la surface exposée d'un capteur sous un ensemble de feuilles, en conditions de vent réalistes.

IV.2 . Etude expérimentale de la distribution spatiale du volume d'eau au sein du couvert

La pluie et la rosée sont les deux sources d'eau au sein du couvert. Ces deux types d'évènements répondent à des mécanismes différents. En effet, l'eau de pluie est une eau chutant d'une grande altitude et pouvant se produire de jour comme de nuit. La rosée qui est principalement nocturne est liée à un refroidissement radiatif qui conduit à la formation d'eau à même les objets par nucléation. Si les différences entre ces deux types d'apport d'eau ont été étudiées au niveau de la mouillabilité des feuilles, pour déterminer la composante évaporative de la durée d'humectation, il est évident que les mécanismes inhérents à la pluie et à la rosée ont une influence majeure sur la distribution d'eau dans le couvert, c'est-à-dire sur la composante apport d'eau de la durée d'humectation.

IV.2.a. Cas de la rosée

Pour qu'il y ait nucléation d'eau de rosée sur un objet, la température de celui-ci doit être inférieure à la température du point de rosée, entraînant la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la formation des gouttes de rosée. Ce phénomène est nocturne car lorsqu'il fait nuit, les feuilles d'arbre ou les capteurs installés au verger émettent un rayonnement infrarouge orienté vers le haut, qui n'est pas compensé par un rayonnement direct solaire ou diffus de grande longueur d'onde (Monteith & Unsworth,

1990). Cette émission entraîne un refroidissement de leur surface. Plus la surface est froide, plus la nucléation de la rosée est favorisée (Wittich, 1995).

La corrélation positive entre le STAR et la durée d'humectation issue des épisodes de rosée (Figure IV.28) va dans ce sens : en effet, plus le STAR est élevé plus l'ouverture au ciel est grande, et plus il y a d'eau à la surface des capteurs, l'apport d'eau est donc supérieur. Cette corrélation a toutefois été observée entre la durée d'humectation dans son ensemble (apport d'eau et évaporation) et le STAR.

Or, comme on pouvait s'y attendre au vu du lien direct entre STAR et éclairage relatif, la corrélation observée entre STAR et durée d'évaporation (cf. chapitre IV §II.2) est négative pour des STAR élevés (Figure IV.32). Ainsi, le processus résultant des deux composantes constituant la durée d'humectation est positivement corrélé au STAR quand la composante évaporative seule est corrélée négativement au STAR. Ceci renforcerait encore la corrélation positive entre l'apport d'eau de rosée et le STAR (Figure D.3)

Pour vérifier cette hypothèse, des mesures expérimentales de la distribution du volume d'eau de rosée à proximité des capteurs disposés au sein du couvert sont à envisager.

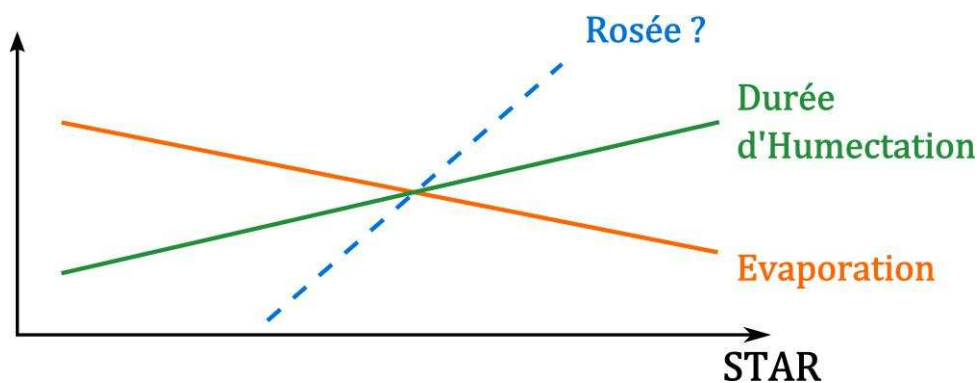


Figure D.3 – Schéma représentant la forme des relations linéaires entre STAR et humectation par la rosée : les relations pour la durée d'humectation et l'évaporation sont connues, celle pour l'apport de rosée (tracé discontinu) est une hypothèse

IV.2.b. Cas de la pluie

La formation d'eau de pluie répond à des contraintes climatiques plus complexes que la rosée, dans le sens où l'eau de pluie peut précipiter de jour comme de nuit, indépendamment de la température de l'air. Cependant, la structure de l'arbre (Chang, 2006; Holder, 2012) joue encore une fois un rôle prépondérant sur la distribution de l'eau de pluie dans le couvert. Chutant du ciel verticalement, les gouttes de pluie viennent impacter les feuilles des arbres sur leur trajectoire ou tombent au sol. Ainsi, une feuille ou un capteur qui aura une grande ouverture au ciel a de grandes chances de recevoir des gouttes de pluie. Mais une goutte peut impacter plusieurs feuilles en cas de *splashing* ou de ruissellement si un amas de gouttes forme un volume supérieur à la capacité de rétention de la feuille (Saint-Jean *et al.*, 2004) et ainsi des feuilles ou des capteurs situés sous des pousses denses peuvent tout de même être humectés. Il est à noter que l'intensité et la durée des épisodes de pluie entrent en compte dans ces considérations. Nos mesures météorologiques ayant une résolution temporelle de 30 minutes, nous n'avons pas été en mesure de déterminer clairement l'influence des courtes pluies, (moins de 30 minutes, sur l'humectation. Il n'a toutefois pas été observé de différences majeures sur la variabilité de durée d'humectation mesurées par nos capteurs pour des pluies durant au plus 30 minutes et les pluies ayant duré plus longtemps. Mais la durée des épisodes de pluie induit sans doute une modification de la composante de durée d'humectation majoritaire. En effet, si une pluie dure longtemps, la distribution d'eau dans la couronne doit certainement s'harmoniser, et le STAR ne serait alors plus représentatif que de la durée d'évaporation. Ne pouvant déterminer au cours de notre étude la variabilité spatio-temporelle du volume d'eau de pluie, nous avons négligé cet aspect.

La dépendance de la durée d'humectation aux autres paramètres pilotant le processus évaporatif n'a par ailleurs pas permis d'observer d'obtenir une information claire sur la distribution d'eau au sein du couvert. L'absence de corrélation nette entre le STAR global moyen et la durée d'humectation liée à la pluie (Figure IV.27) indique en effet que la durée d'humectation n'est pas uniquement liée au STAR, et la corrélation négative observée pour l'année 2010 est peut-être liée à la forte prédominance du rayonnement ou de la température pour les épisodes pluvieux l'année 2010.

La corrélation entre STAR et durée d'évaporation étant négative (Figure IV.32), on peut émettre l'hypothèse que l'apport d'eau de pluie dans le couvert est positivement corrélé au STAR, ce qui expliquerait la forme de la figure IV.27 (Figure D.4). Cette hypothèse semble pertinente au regard de travaux effectués sur l'interception d'eau de pluie par un couvert hétérogène (Gholz *et al.*, 1991; Liu, 1997; Roth *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2000)

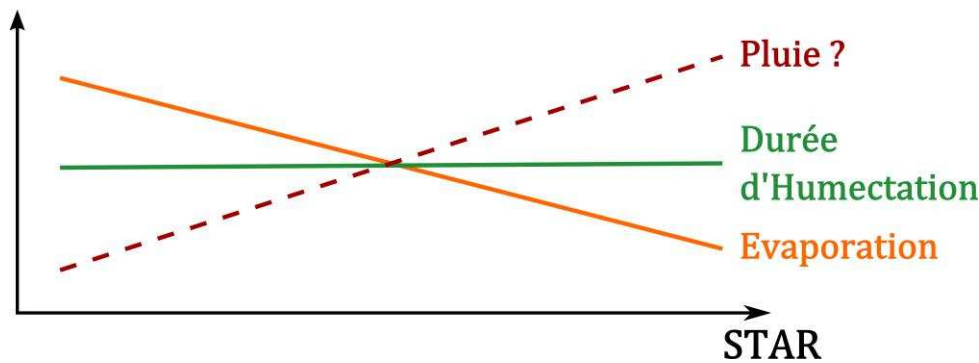


Figure D.4 – Schéma représentant la forme des relations linéaires entre STAR et humectation par la pluie : les relations pour la durée d'humectation et l'évaporation sont connues, celle pour l'apport de pluie (tracé discontinu) est une hypothèse

Nous espérons pouvoir estimer cette variabilité intra-couvert du volume d'eau intercepté par les capteurs d'humectation à partir des données recueillies. En effet d'après leur principe de fonctionnement (cf. Synthèse Bibliographique §II.4.b.iii) la réponse des capteurs de durée d'humectation est fonction de la quantité d'eau présente à leur surface, ou au moins répartie par classes de volumes (cf. documentation technique du capteur Campbell Scientific 237). Toutefois ce point a été infirmé lors de la calibration de nos capteurs de durée d'humectation (cf. §I.1.b du chapitre IV).

Des études sont toutefois à envisager sur d'autres capteurs à mesure de résistance électrique.

La vérification de l'hypothèse sur la corrélation entre STAR et distribution d'eau de pluie passe donc nécessairement par i) un dispositif expérimental de mesure dédié aux volumes d'eau interceptés par les capteurs disposés au sein du couvert, ou par ii) l'utilisation de modèle d'interception de la pluie au sein d'un couvert.

IV.3. Modélisation de la distribution spatiale du volume d'eau au sein du couvert

IV.3.a. Bases de modélisation existantes

Pour effectuer des simulations représentatives des conditions réelles d'humectation il est primordial de restituer convenablement la répartition de volume d'eau.

Il existe pour cela des modèles d'interception de l'eau de pluie par une plante produisant des résultats très satisfaisants (Calder, 1996; Bassette & Bussière, 2008; Bussière *et al.*, 2002; Saint-Jean *et al.*, 2004). Ces modèles ne reposent pas sur des paramètres indicateurs de l'espace tels que le STAR mais sont basés sur des maquettes en trois dimensions des plantes considérées. Ainsi en prenant en compte les phénomènes de *splashing* (à l'aide de méthodes stochastiques ou du nombre de Weber), de ruissellement et en déterminant le volume maximum de stockage d'eau pour une feuille (en fonction notamment de son inclinaison et des angles de contact (Holder, 2012), ils sont à même de restituer convenablement la distribution d'eau dans le couvert.

En outre, la récente mise en évidence d'un *splashing* asymétrique (Bird *et al.*, 2009) permettrait une modélisation pertinente du comportement d'une pluie dans la couronne d'un arbre. En effet, ce phénomène est lié à l'influence d'une vitesse tangentielle (provenant du vent ou d'un premier éclaboussement) s'ajoutant à la vitesse verticale liée à la gravité.

Il est ainsi possible, en couplant ces différentes approches (stockage de l'eau, ruissellement, *splashing* en fonction de la vitesse d'impact et de l'inclinaison de la feuille), d'estimer d'une manière précise la répartition spatiale du volume d'eau au sein d'un arbre.

IV.3.b. Apport de l'étude des interactions eau/feuille dans la modélisation de l'interception.

Le *splashing* est particulièrement important dans la répartition des gouttes à forte vitesse de chute, mais également dans la dispersion du pathogène au sein de l'arbre (Butterworth & McCartney, 1991; Rossi *et al.*, 2001; Saint-Jean, 2006).

L'étude des interactions entre l'eau et les feuilles à une échelle microscopique en vue de répondre à la problématique de l'humectation à l'échelle de l'arbre est encore une fois justifiée. Elle permet en effet de déterminer s'il y aura *splashing* ou non à l'aide du nombre de Weber : comme nous avons vu, il existe un nombre de Weber critique We_C **propre à chaque surface** et au-dessus duquel une goutte va rebondir sur la surface (Kamusewitz & Possart, 2003; Range & Feuillebois, 1998).

Mais l'étude des interactions eau-feuille permet également de déterminer le volume maximal de rétention d'eau par le couvert, notamment grâce à la connaissance des angles de contact d'avancée, qui permettent de prévoir à partir de quel volume d'eau la goutte va glisser de la surface de la feuille (Holder, 2012).

La connaissance d'une distribution de la taille des gouttes de pluie avant impact et leurs vitesses finales associées (Gunn & Kinzer, 1949) rend alors possible l'estimation du nombre de Weber en conditions naturelles.

Ainsi, pour déterminer le nombre de Weber critique We_C propre aux feuilles de pommier, il faudrait mettre en place un suivi expérimental de lâchés de gouttes sur feuilles, afin d'établir ce nombre de Weber critique permettant d'estimer à quelle vitesse une goutte va rebondir à l'impact.

L'utilisation de maquettes d'arbres en trois dimensions et de modèles d'interception d'eau de pluie couplés à un critère sur le nombre de Weber et éventuellement de l'effet de l'inclinaison des feuilles sur un *splashing* asymétrique permettrait alors de déterminer finement le gradient spatial de volume d'eau de pluie. Celui-ci servirait alors de variable d'entrée au modèle d'évaporation pour estimer ainsi la durée d'humectation dans son ensemble.

IV.3.c. *Splashing* et dissémination du pathogène

Comme nous avons pu voir, la caractérisation du seuil de rebond de la goutte à l'impact (IV.3.b.) a une portée allant au delà de la simple description de mouillabilité. L'éclaboussement détermine la distribution de l'eau dans la couronne. De plus, comme nous avons vu au §II.3.a de la Synthèse Bibliographique, le phénomène de *splashing* est en partie responsable de la dissémination du pathogène au sein de l'arbre (Butterworth & McCartney, 1991). Les spores contenues dans les gouttes d'eau sont déplacées entre les feuilles et les fruits de l'arbre par ruissellement ou par *splashing*. A l'issue d'une étude sur la relation entre W_e et cette dispersion de spores, Saint-Jean *et al.* (2006) proposent d'utiliser le nombre de Weber comme un estimateur de la dissémination des spores par *splashing*, celui-ci permettant une approche déterministe du phénomène (Saint-Jean *et al.*, 2006), alors que les estimations employées auparavant étaient basées sur des méthodes purement stochastiques (Saint-Jean *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2000). L'exploitation des maquettes 3D de pommiers pour décrire l'interception et la redistribution d'eau de pluie laisse ainsi entrevoir la possibilité de disposer de nombreux outils pour mieux comprendre les interactions entre l'eau, la plante et le pathogène.

Conclusion

Ce travail de thèse s'est attaché à contribuer à la compréhension de la variabilité de la durée d'humectation au sein du couvert, tant par la modélisation que par l'expérimentation. Les objectifs principaux étaient (i) de quantifier et d'expliquer la variabilité spatiale au sein de couvert de pommiers ; et (ii) de modéliser l'évaporation des gouttes d'eau en prenant en compte la mouillabilité des feuilles.

Le premier point a été abordé par un suivi expérimental de durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier, qui nous a permis d'observer une forte variabilité intra-couronne de la durée d'humectation et de l'éclairement. Cependant nos tentatives de caractérisation du phénomène, par le biais d'un paramètre décrivant l'ombrage d'un objet dans le couvert (le STAR), n'ont pas permis d'établir une explication exhaustive de cette variabilité. Le STAR n'est corrélé à l'humectation que pour les journées où le ciel est clair et où le soleil est haut dans le ciel, et uniquement pour les objets dont plus de 50% de la surface est éclairée. Le STAR doit donc être calculé sur des intervalles de temps correspondant à ces positions solaires et non à l'ensemble d'une journée.

Le modèle d'évaporation développé en parallèle a été validé pour du Parafilm 'M' qui est un support hydrophobe, mais la vérification des simulations sur un autre support n'a pas montré d'accord. Le problème vient de la représentation de la couche limite et du choix d'une l'échelle de longueur caractéristique pour la représenter. Cette représentation ne peut se déterminer que par un suivi expérimental ou une modélisation des transferts de masse sur un maillage très fin. Aucune de ces approches n'a pu être abordée dans le temps de cette thèse, mais elle nous semble une priorité à étudier dans la continuité de ce travail.

L'étude de la mouillabilité des supports végétaux a enfin fourni des résultats originaux et un grand nombre d'informations : l'existence de variabilités inter-spécifique au sein de la famille *Rosaceae*, intra-spécifique au sein de l'espèce *Malus domestica*, et ontogénique au sein d'un même cultivar de pommier. De plus, l'introduction du nombre de Weber pour caractériser l'influence de la vitesse d'impact des gouttes sur leur forme finale constitue un résultat fort, ce nombre adimensionnel étant à même de décrire à la fois la forme des gouttes en fonction du type d'apport d'eau (rosée, pluie faible ou forte)

et la distribution d'eau de pluie dans le couvert par sa capacité à caractériser le phénomène de *splashing*.

Ainsi, c'est par une étude à l'échelle des interactions microscopiques entre l'eau et son support que nous avons pu mettre en place une modélisation de l'évaporation à l'échelle de l'organe, intégrant une caractéristique de la plante considérée via la mouillabilité.

Cette thèse s'inscrivant dans le contexte général de l'étude de la durée d'humectation au sein d'un couvert en vue d'estimer précisément les risques d'infection de tavelure, il est nécessaire de raisonner en termes de variabilité spatiale de l'apport d'eau et de l'évaporation, et notre modèle seul n'apporte pas de réponse à cette problématique. C'est pourquoi nous avons insisté sur la perspective de coupler différents modèles dont la mise en commun restituerait l'ensemble des processus intervenant dans le mécanisme de l'humectation et de l'infection par le pathogène *Venturia inaequalis*.

En effet, les 25 dernières années ont vu la recherche en agronomie et épidémiologie progresser grandement dans la compréhension et la restitution de ces mécanismes. Les améliorations technologiques et la nécessité de renforcer le niveau d'efficacité des modèles de prévision de risques ont permis de mettre en place des simulations proches de la réalité.

Ainsi, la modélisation de l'humectation est passée de modèles de type "grande feuille" à des modèles en strates, et l'on cherche à présent à effectuer des représentations fines du comportement de la durée d'humectation au sein d'un couvert grâce aux plantes virtuelles en trois dimensions.

L'intégration de notre modèle d'évaporation dans une maquette d'arbre 3D permettrait d'estimer les variabilités spatiales de répartition du volume d'eau dans l'arbre et des variables microclimatiques, afin d'estimer le gradient de durée d'humectation dans les différentes zones de l'arbre. L'exploitation de ces résultats dans un modèle de prévision de risque épidémique rendrait alors possible une estimation précise du risque, et une utilisation plus pertinente des traitements phytosanitaires.

Bibliographie

A

B. Adam, N. Donès & H. Sinoquet, VegeSTAR4 : calcul de l'interception lumineuse d'une maquette 3D de couvert végétal. v 4, [url: http://www2.clermont.inra.fr/piaf/fr/methodologies/vegestar.htm](http://www2.clermont.inra.fr/piaf/fr/methodologies/vegestar.htm)

A. W. Adamson & A. P. Gast. *Physical chemistry of surfaces*. Wiley, 1997, 808 p.

G. N. Agrios. *Plant Pathology*. Elsevier Academic Press, 2005.

A. Alaphilippe, L. Brun, J. Guinaudeau, B. Sauphanor, F. Hayer & S. Simon. BioREco : un dispositif innovant pour évaluer les pratiques de protection en verger de pommiers. *L'Arboriculture Fruitière*, 2009, 641. 30-33

R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes & M. Smith. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage*, 1998, 56.

B. Aryal & G. Neuner. Leaf wettability decreases along an extreme altitudinal gradient. *Oecologia*, 2010, 162. (1), 1-9

R. T. Atarassi, M. V. Folegatti & R. P. Camponez do Brasil. Convection regime between canopy and air in a greenhouse. *Scientia Agricola*, 2006, 63. (1), 77-81

B

D. J. Barbara, A. L. Roberts & X. M. Xu. Virulence characteristics of apple scab (*Venturia inaequalis*) isolates from monoculture and mixed orchards. *Plant Pathology*, 2008, 57. (3), 552-561

C. Bassette & F. Bussière. Partitioning of splash and storage during raindrop impacts on banana leaves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148. 991-1004

J. C. Batzer, M. L. Gleason, S. E. Taylor, K. J. Koehler & J. E. B. A. Monteiro. Spatial Heterogeneity of Leaf Wetness Duration in Apple Trees and Its Influence on Performance of a Warning System for Sooty Blotch and Flyspeck. *Plant Disease*, 2008, 92. (1), 164-170

G. Benaouf & L. Parisi. Genetics of Host-Pathogen Relationships Between *Venturia inaequalis* Races 6 and 7 and *Malus* Species. *Phytopathology*, 2000, 90. (3), 236-242

G. O. Berim & E. Ruckenstein. On the shape and stability of a drop on a solid surface. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108. (50), 19330-19338

B. Bhushan & Y. C. Jung. Wetting, adhesion and friction of superhydrophobic and hydrophilic leaves and fabricated micro/nanopatterned surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, 20. (22), 1-24

J. Bico, U. Thiele & D. Quéré. Wetting of textured surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, 206. (1-3), 41-46

J. C. Bird, S. S. H. Tsai & H. A. Stone. Inclined to splash: triggering and inhibiting a splash with tangential velocity. *New Journal of Physics*, 2009, 11. (6), 10

K. S. Birdi & J. Jeppesen. Surface chemical properties of biopolymers determined by contact angle measurements. *Colloid & Polymer Science*, 1978, 256. (3), 261-265

B. R. Bondada & D. M. Oosterhuis. Ontogenic Changes in Epicuticular Wax and Chloroplast Integrity of a Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Leaf. *Photosynthetica*, 2002, 40. (3), 431-436

R. Bonhomme. *The solar radiation: characterization and distribution in the canopy, Crop Structure and Light Microclimate, Characterization and applications*. Editors : C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme and H. Sinoquet, INRA Editions, 1993, pp 17-28

- J. K. Bowen, C. H. Mesarich, V. G. M. Bus, R. M. Beresford, K. M. Plummer & M. D. Templeton. *Venturia inaequalis*: the causal agent of apple scab. *Molecular Plant Pathology*, 2011, 12. (2), 105-122
- P. Brain & D. R. Butler. A model of drop size distribution for a system with evaporation. *Plant, Cell and Environment*, 1985, 8. (4), 247-252
- C. A. Brewer & W. K. Smith. Patterns of leaf surface wetness for montane and subalpine plants (vol 20, pg 1, 1997). *Plant Cell and Environment*, 1997, 20. (4), 535-536
- C. A. Brewer, W. K. Smith & T. C. Vogelmann. Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets. *Plant, Cell & Environment*, 1991, 14. (9), 955-962
- K. Bringe, C. F. A. Schumacher, M. Schmitz-Eiberger, U. Steiner & E.-C. Oerke. Ontogenetic variation in chemical and physical characteristics of adaxial apple leaf surfaces. *Phytochemistry*, 2006, 67. (2), 161-170
- L. Brun, F. Didelot & L. Parisi. Stratégies de protection innovantes contre la tavelure du pommier : conception, évaluation et intégration en verger. In: *Carrefours de l'innovation agronomique, Paris, France, 2007*. (éd.) INRA
- L. Brun, F. Didelot & L. Parisi. Effects of apple cultivar susceptibility to *Venturia inaequalis* on scab epidemics in apple orchards. *Crop Protection*, 2008, 27. (6), 1009-1019
- Z. Burton & B. Bhushan. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces. *Ultramicroscopy*, 2006, 106. (8-9), 709-719
- V. G. M. Bus, E. H. A. Rikkerink, V. Caffier, C.-E. Durel & K. M. Plummer. Revision of the Nomenclature of the Differential Host-Pathogen Interactions of *Venturia inaequalis* and *Malus*. *Annual Review of Phytopathology*, 2011, 49. 391-413
- F. Bussière, F. Solmon & A. Fouéré. Implementation and evaluation of DROP, a model for the simulation of rainfall distribution below plants described in 3D. *Agronomie*, 2002, 22. (1), 93-103
- D. R. Butler. The energy balance of water drops on a leaf surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 32. (4), 337-349
- D. R. Butler. Evaporation from rain drops on leaves in a cereal canopy: A simulation model. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 36. (1), 39-51
- D. R. Butler. Mass transfer from discrete water drops on leaves in a cereal canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 53. (1), 33-42
- J. Butterworth & H. A. McCartney. The dispersal of bacteria from leaf surfaces by water splash. *Journal of Applied Microbiology*, 1991, 71. (6), 484-496
- H. R. Byers, Moses Harry, and Harney Patrick J. . Measurement of Rain Temperature. *U. S. Weather Bureau Thunderstorm Project*, 1949, (Published Contribution No. 8), 51-55
-
- C**
-
- I. R. Calder. Dependence of rainfall interception on drop size : 1. Development of the two-layer stochastic model. *Journal of Hydrology*, 1996, 185. 363-378
- O. Carisse, D. Rolland, B. Talbot & S. Savary. Heterogeneity of the aerial concentration and deposition of ascospores of *Venturia inaequalis* within a tree canopy during the rain. *European Journal of Plant Pathology*, 2007, 117. (1), 13-24
- J.-C. Chambelland, B. Adam, N. Donès, P. Balandier, A. Marquier, M. Dassot, G. Sonohat, M. Saudreau & H. Sinoquet. Automatic instantiation of a structural leaf model from 3D scanner data: application to light interception computation. In: (éd.), *5th International Workshop on Functional-Structural Plant Models Napier, New-Zealand, 2007*. November 4-9, 2007

M. Chang. *Forest hydrology : an introduction to water and forests*. Boca Raton : CRC/Taylor & Francis, 2006., 2006, 474 p.

P. Chassaing. *MECANIQUE DES FLUIDES. Eléments d'un premier parcours*. Cépaduès 1997, 450 p.

M. Chelle. Phylloclimate or the climate perceived by individual plant organs: What is it? How to model it? What for? *New Phytologist*, 2005, 166. (3), 781-790

M. Chelle & P. Cellier. Horizontal variability in air temperature over time within a maize inter-row. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149. 1294-1300

E. Costes, C. Smith, M. Renton, Y. Guédon, P. Prusinkiewicz & C. Godin. MAppleT: simulation of apple tree development using mixed stochastic and biomechanical models. *Functional Plant Biology*, 2008, 35. (10), 936-950

M. J. Crowe, S. Melugin Coakley & R. G. Emge. Forecasting Dew Duration at Pendleton, Oregon, Using Simple Weather Observations. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17. (10), 1482-1487

D

A. Dalla Marta, R. D. Magarey, L. Martinelli & S. Orlandini. Leaf wetness duration in sunflower (*Helianthus annuus*): Analysis of observations, measurements and simulations. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26. (3), 310-316

A. Dalla Marta, R. D. Magarey & S. Orlandini. Modelling leaf wetness duration and downy mildew simulation on grapevine in Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132. (1-2), 84-95

J. R. Dann. Forces involved in the adhesive process : I. Critical surface tensions of polymeric solids as determined with polar liquids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1970, 32. (2), 302-320

P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart & D. Quéré. *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Paris: Belin, 2005, 252 p.

E. L. Decker, B. Frank, Y. Suo & S. Garoff. Physics of contact angle measurement. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, 156. (1-3), 177-189

R. H. Dettre & R. E. Johnson. Contact Angle Hysteresis. In: *Advances in Chemistry; Contact Angle, Wettability, and Adhesion*. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1964, 136-144

F. Didelot, L. Parisi, G. Orain, A. Lemarquand, B. Le Cam, F. Laurens & V. Caffier. Situation actuelle en France du contournement de la résistance Vf par *Venturia inaequalis*. Proposition de méthodes de lutttes adaptées. In: (éd.), *Journées Techniques Fruits et Légumes Biologiques ITAB, Paris, 2009*. 8 & 9 décembre 2009

J. Dietz, C. Leuschner, D. Hölscher & H. Kreilein. Vertical patterns and duration of surface wetness in an old-growth tropical montane forest, Indonesia. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2007, 202. (2), 111-117

N. Donès, B. Adam & H. Sinoquet, PiafDigit 1.1 : outil logiciel pour l'acquisition de la géométrie et de la topologie d'une plante par digitalisation électromagnétique v 1.1, [url: http://www2.clermont.inra.fr/piaf/fr/methodologies/digit.htm](http://www2.clermont.inra.fr/piaf/fr/methodologies/digit.htm)

V. Dutschk, K. G. Sabbatovskiy, M. Stolz, K. Grundke & V. M. Rudoy. Unusual wetting dynamics of aqueous surfactant solutions on polymer surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 267. (2), 456-462

E

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Plan ECOPHYTO 2018 de réduction des usages de pesticides 2008-2018. 10 septembre 2008. [url: http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018-2-2.pdf](http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018-2-2.pdf)

F

D. C. Ferree, K. Clayton-Greene & B. Bishop. Influence of orchard management system on canopy light distribution and net photosynthesis of apple trees. In: (éd.), *3rd International meeting on Regulation of Photosynthesis in Fruit Crops, Perugia, 1990*. september 3 - 4, 1990

J. Fleckinger. Les stades végétatifs des arbres fruitiers en rapport avec les traitements
Extrait du Rapport général du Congrès Pomologique de France, Angers, 1948, 81-83

C. A. J. Fletcher. *Computational Techniques for Fluid Dynamics - Fundamental and General Techniques, Volume 1*. Springer, 1991

G

C. M. K. Gardner & M. Field. An evaluation of the success of MORECS, a meteorological model, in estimating soil moisture deficits. *Agricultural Meteorology*, 1983, 29. (4), 269-284

D. M. Gates. *Biophysical ecology*. New-York: Springer-Verlag, 1980, 611 p.

H. Gavin & C. A. Agnew. Modelling actual, reference and equilibrium evaporation from a temperate wet grassland. *Hydrological Processes*, 2004, 18. (2), 229-246

H. L. Gholz, S. A. Vogel, W. P. Cropper, K. McKelvey, K. C. Ewel, R. O. Teskey & P. J. Curran. Dynamics of Canopy Structure and Light Interception in Pinus Elliottii Stands, North Florida. *Ecological Monographs*, 1991, 61. (1), 33-51

T. J. Gillespie & G. E. Kidd. Sensing Duration of Leaf Moisture Retention Using Electrical-Impedance Grids. *Canadian Journal of Plant Science*, 1978, 58. (1), 179-187

M. Giraud. La tavelure du pommier : réalités et stratégies de protection. In: (éd.), *Entretiens techniques - Salon International de la Filière Fruits Et Légumes, 2010*. CTIFL

C. Godin, E. Costes & Y. Caraglio. Exploring plant topological structure with the AMAPmod software: an outline. *Silva Fennica*, 1997, 31. (3), 357-368

C. Gondrand. *Analyse des transferts d'eau dans les micropiles à combustible (Analysis of water transfers in micro fuel cells)*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006

C. S. B. Grimmond, S. M. Robeson & J. T. Schoof. Spatial variability of micro-climatic conditions within a mid-latitude deciduous forest. *Climate Research*, 2000, 15. 137-149

G. Guéna. *Discussions sur l'évaporation d'une gouttelette mouillante*. Thèse de doctorat, Université Paris IV Pierre et Marie Curie, 18 octobre 2007, 150 p.

R. Gunn & G. D. Kinzer. The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1949, 6. 243-248

H

J. S. Hanan, B. I. Loch & T. D. McAleer. Processing laser scanner plant data to extract structural information In: C. G. e. al. (éd.), *4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France 2004*. UMR AMAP 9-12

J. R. Hartman, L. Parisi & P. Bautrais. Effect of Leaf Wetness, Temperature, and Conidial Inoculum Dose on Apple Scab Infections. *Plant Disease*, 1999, 83. (6), 531-534

I. J. Holb. Effect of Pruning on Apple Scab in Organic Apple Production. *Plant Disease*, 2005, 89. (6), 611-618

C. D. Holder. The relationship between leaf hydrophobicity, water droplet retention, and leaf angle of common species in a semi-arid region of the western United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 152. 11-16

H. Hu & R. G. Larson. Evaporation of a Sessile Droplet on a Substrate. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106. (6), 1334-1344

L. Huber. Modèle de simulation de la durée d'humectation des feuilles au champ après une pluie. Cas d'un couvert homogène. *Agronomie*, 1988, 8. (8), 675 - 684

L. Huber. Déterminisme et mesure de la durée d'humectation en vue de la protection des plantes. *Agronomie*, 1992, 12. 281-295

L. Huber & T. J. Gillespie. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 1992, 30. 553-577

I

IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva, Switzerland.* 2007

J

Journal Officiel de l'Union Européenne, *RÈGLEMENT (CE) No 85/2004 DE LA COMMISSION du 15 janvier 2004 fixant la norme de commercialisation applicable aux pommes*

J. E. Jackson. Light Interception and Utilization by Orchard Systems. *Horticultural Reviews*, 1980, 2. 208-267

S. Janas, P. Malumba, C. Deroanne & F. Béra. Comparaison d'un modèle empirique et d'un modèle physique de séchage de grains de maïs en lit fluidisé. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2010, 14. (3)

E. Javier, G. Pedro & B. Joaquín. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *Hydrological Processes*, 2009, 23. (23), 3342-3353

H. G. Jones. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press, 1983, 232 p.

B. E. Juniper & D. J. Mabberley. *The Story of Apple*. Portland, OR, USA: Timber Press, Inc., 2006, 219 p.

K

H. Kamusewitz, W. Possart & D. Paul. The relation between Young's equilibrium contact angle and the hysteresis on rough paraffin wax surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, 156. (1-3), 271-279

S. Kang, G. Iaccarino & F. Ham. DNS of buoyancy-dominated turbulent flows on a bluff body using the immersed boundary method. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228. (9), 3189-3208

M. Kearney, P. P. Warren, W. Craig, R. Scott & A. H. Ary. Integrating biophysical models and evolutionary theory to predict climatic impacts on species' ranges: the dengue mosquito *Aedes aegypti* in Australia. *Functional Ecology*, 2009, 23. (3), 528-538

G. W. Keitt. Studies of apple scab and cherry leaf spot infection under controlled conditions. (Abstr.). *Phytopathology*, 1927, 17. 45

G. W. Keitt & L. K. Jones. Studies of the epidemiology and control of apple scab. *Wis. Agric. Exp. Stn. Res. Bull.*, 1926, 73. 104

P. L. Kelly-Zion, C. J. Pursell, S. Vaidya & J. Batra. Evaporation of sessile drops under combined diffusion and natural convection. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, 381. (1-3), 31-36

K. S. Kim, S. E. Taylor, M. L. Gleason & K. J. Koehler. Model to Enhance Site-Specific Estimation of Leaf Wetness Duration. *Plant Disease*, 2002, 86. (2), 179-185

K. S. Kim, S. E. Taylor, M. L. Gleason, F. W. Nutter Jr, L. B. Coop, W. F. Pfender, R. C. Seem, P. C. Sentelhas, T. J. Gillespie, A. Dalla Marta & S. Orlandini. Spatial portability of numerical models of leaf wetness duration based on empirical approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150. (7-8), 871-880

W. H. Kruskal & W. A. Wallis. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 1952, 47. (260), 583-621

L

A. Lacointe & N. Donès. Functional-structural modelling using the generic tool PIAF-1 : a simulation example on young walnut. In: H. J. a. L. B. e. Prusinkiewicz P. (éd.), *5th International workshop on Functional-Structural Plant Models, Napier, New Zealand, 2007*. HortResearch, 04-09/11/2007

Y. F. Lau, M. L. Gleason, N. Zriba, S. E. Taylor & P. N. Hinz. Effects of Coating, Deployment Angle, and Compass Orientation on Performance of Electronic Wetness Sensors During Dew Periods. *Plant Disease*, 2000, 84. (2), 192-197

F. Laurens, Y. Lespinasse & A. Fouillet. A New Scab-resistant Apple: 'Ariane'. *HortScience*, 2005, 40. (2), 484-485

P.-E. Lauri. *Architecture de l'arbre fruitier – de la morphologie des plantes à l'agronomie*. HDR, Université des Sciences de Montpellier II, 18-12-2007, 73 p.

A. Leca, L. Parisi, A. Lacointe & M. Saudreau. Comparison of Penman-Monteith and non-linear energy balance approaches for estimating leaf wetness duration and apple scab infection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151. (8), 1158-1162

M. Y. Leclerc, P. H. Schuepp & G. W. Thurtell. Electrochemical simulations of mass transfer from isolated wet spots and droplets on realistic fluttering leaves. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 34. (4), 399-410

M. Y. Leclerc, G. W. Thurtell & T. J. Gillespie. Laboratory Simulation of Evaporation of Water Droplets on Artificial Soybean Leaves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1985, 36. (2), 105-111

F. H. Lewis. *Studies on spray and dust schedules for control of apple scab in western New York*. PhD thesis, Cornell University, 1943

A. Lindenmayer. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 18. (3), 280-299

S. Liu. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling*, 1997, 99. (2-3), 151-159

P. Llorens & F. Gallart. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*, 2000, 240. (1-2), 131-144

M

W. E. MacHardy. *Apple Scab - Biology, Epidemiology, and Management*. The American Phytopathological Society, 1996, 545 p.

W. E. MacHardy & D. M. Gadoury. Patterns of Ascospore Discharge by *Venturia inaequalis*. *Phytopathology*, 1986, 76. (10), 985-990

W. E. MacHardy & D. M. Gadoury. A Revision of Mills Criteria for Predicting Apple Scab Infection Periods. *Phytopathology*, 1989, 79. (3), 304-310

R. D. Magarey, J. M. Russo & R. C. Seem. Simulation of surface wetness with a water budget and energy balance approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139. (3-4), 373-381

R. D. Magarey, J. M. Russo, R. C. Seem & D. M. Gadoury. Surface wetness duration under controlled environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005a, 128. (1-2), 111-122

R. D. Magarey, R. C. Seem & J. M. Russo. Grape canopy surface wetness: Simulation versus visualization and measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139. (3-4), 361-372

R. D. Magarey, R. C. Seem, A. Weiss, T. J. Gillespie & L. Huber. Estimating Surface Wetness on Plants. In: *Micrometeorology in Agricultural Systems*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005b, 179 p.

R. D. Magarey, T. B. Sutton & C. L. Thayer. A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. *Phytopathology*, 2005c, 95. (1), 92-100

S. Matallah. *Relations entre architecture du pommier, microclimat au sein de la couronne et épidémies de tavelure et d'oïdium*. Rapport de stage Master II, Université de Reims Champagne-Ardenne, 27 septembre 2011, 40 p.

H. Mehri & J. Crabbé. Processus de croissance et d'organogenèse chez le pommier cv Golden Delicious. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 2002, 6. (1), 39-49

W. D. Mills. Efficient use of sulfur dusts and sprays during rain to control apple scab. *Cornell Ext. Bull.*, 1944, 630.

W. D. Mills, and LaPlante, A.A. . Diseases and Insects in the Orchard. *Cornell Ext. Bull.*, 1951, 711. 21-27

R. A. C. Miranda, T. D. Davies & S. E. Cornell. A laboratory assessment of wetness sensors for leaf, fruit and trunk surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102. (4), 263-274

J. L. Monteith & M. H. Unsworth. *Principles of Environmental Physics. Second Edition*. Arnold, Edward. A division of Hodder & Stoughton, London, New York, Melbourne, Auckland, 1990

N

P. S. Nobel. Effective Thickness and Resistance of the Air Boundary Layer Adjacent to Spherical Plant Parts. *Journal of Experimental Botany*, 1975, 26. (1), 120-130

O

J. F. Oliver, C. Huh & S. G. Mason. An experimental study of some effects of solid surface roughness on wetting. *Colloids and Surfaces*, 1980, 1. 79-104

E. Osbert. *Relations entre architecture du pommier, microclimat au sein de la couronne et épidémies de tavelure*. Mémoire de Fin d'Etudes, Agro Campus Ouest, 25/01/2011, 43 p.

A. Otten & S. Herminghaus. How Plants Keep Dry: A Physicist's Point of View. *Langmuir*, 2004, 20. (6), 2405-2408

P

R. Paratte. *Trajectoire d'un collectif de travail et construction de connaissances autour du pommier*. Mémoire de Licence, Université de Neuchâtel, Faculté des lettres et sciences humaines, 150 p.

L. Parisi, V. Fouillet, H. J. Schouten, R. Groenwold, F. Laurens, F. Didelot, K. Evans, C. Fischer, F. Gennari, H. Kemp, M. Lateur, A. Patocchi, J. Thissen & C. Tsipouridis. Variability of the pathogenicity of *Venturia inaequalis* in Europe. In: *Acta Horticulturae; Proceedings of the XIth Eucarpia Symposium on Fruit Breeding and Genetics, Vols 1 and 2*. Leuven 1: International Society Horticultural Science, 2004, 107-113 p.

H. L. Penman. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193. (1032), 120-145

L. S. Penn & B. Miller. Advancing, receding, and "equilibrium" contact angles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1980, 77. (2), 574-576

L. J. Penrose & H. I. Nicol. Aspects of microclimate variation within apple tree canopies and between sites in relation to potential *Venturia inaequalis* infection. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 1996, 24. 259-266

M. Pétrissans. *Etude de la mouillabilité dans les contacteurs liquide-liquide*. Thèse de Doctorat, 1996

J. Phattaralerphong & H. Sinoquet. A method for 3D reconstruction of tree crown volume from photographs: assessment with 3D-digitized plants. *Tree Physiology*, 2005, 25. (10), 1229-1242

R. G. Picknett & R. Bexon. The evaporation of sessile or pendant drops in still air. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977, 61. (2), 336-350

S. Pincebourde, H. Sinoquet, D. Combes & J. Casas. Regional climate modulates the canopy mosaic of favourable and risky microclimates for insects. *Journal of Animal Ecology*, 2007, 76. (3), 424-438

W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling & B. P. Flannery. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2007, 1256 p.

P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, J. S. Hanan, F. D. Fracchia, D. Fowler, M. J. M. de Boer & L. Mercer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer, 2004, 228 p.

Q

D. Quéré, M.-J. Azzopardi & L. Delattre. Drops at Rest on a Tilted Plane. *Langmuir*, 1998, 14. (8), 2213-2216

R

K. Range & F. o. Feuillebois. Influence of Surface Roughness on Liquid Drop Impact. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1998, 203. (1), 16-30

W. Rasband, ImageJ - Image Processing and Analysis in Java v 1.44a, [url: http://rsbweb.nih.gov/ij/](http://rsbweb.nih.gov/ij/)

B. R. Ray & F. E. Bartell. Hysteresis of contact angle of water on paraffin. Effect of surface roughness and of purity of paraffin. *Journal of Colloid Science*, 1953, 8. (2), 214-223

E. J. Reidel, E. A. Rennie, V. r. Amiard, L. Cheng & R. Turgeon. Phloem Loading Strategies in Three Plant Species That Transport Sugar Alcohols. *Plant Physiology*, 2009, 149. (3), 1601-1608

RIMpro (Bio Fruit Advies, NL), RIMpro - program backgrounds [06/01/2011], [url: http://www.biofruitadvies.nl/RIMpro/programmabackground.htm](http://www.biofruitadvies.nl/RIMpro/programmabackground.htm)

T. L. Robinson, A. N. Lakso & Z. Ren. Modifying Apple Tree Canopies for Improved Production Efficiency. *HortScience*, 1991, 26. (8), 1005-1012

L. Roche, M. EDIN, V. MATHIEU & F. LAURENS. *Ariane*. Paris: CTIFL, 2004, 92 p.

J. S. Roden. Modeling the light interception and carbon gaspen (*Populus tremuloides* Michx) leaves. *Trees - Structure and Function*, 2003, 17. 117-126

M. Rodriguez, E. De Langre & B. Moulia. A Scaling Law For The Effects Of Architecture And Allometry On Tree Vibration Modes Suggests A Biological Tuning To Modal Compartmentalization. *American Journal of Botany*, 2008, 95. (12), 1523-1537

V. Rossi, I. Ponti, M. Marinelli, S. Giosuè & R. Bugiani. Environmental Factors Influencing the Dispersal of *Venturia inaequalis* Ascospores in the Orchard Air. *Journal of Phytopathology*, 2001, 149. (1), 11-19

B. E. Roth, C. Slatton & M. J. Cohen. On the potential for high-resolution lidar to improve rainfall interception estimates in forest ecosystems. *Frontiers in Ecology*, 2007, 5. (8), 421-428

S

M. A. Saada, S. Chikh & L. Tadrist. Numerical investigation of heat and mass transfer of an evaporating sessile drop on a horizontal surface. *Physics of Fluids*, 2010, 22. (11), 112115/1-112115/13

S. Saint-Jean, M. Chelle & L. Huber. Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121. (3-4), 183-196

S. Saint-Jean, A. Testa, L. V. Madden & L. Huber. Relationship between pathogen splash dispersal gradient and Weber number of impacting drops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141. (2-4), 257-262

A. Saltelli, M. Ratto, S. Tarantola & F. Campolongo. Sensitivity analysis practices: Strategies for model-based inference. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91. (10-11), 1109-1125

- H. Schlichting & K. Gersten. *Boundary-layer theory*. Springer, 2000
- H. F. Schmitz & R. H. Grant. Precipitation and dew in a soybean canopy: Spatial variations in leaf wetness and implications for *Phakopsora pachyrhizi* infection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149. (10), 1621-1627
- W. F. S. Schwabe. Wetting and temperature requirements for infection of apple leaf by *Venturia inaequalis* in South Africa. *Phytophylactica*, 1980, 12. 69-80
- W. F. S. Schwabe. Wetting and temperature requirements for infection of mature apples by *Venturia inaequalis* in South Africa. *Annals of Applied Biology*, 1982, 100. 415-423
- W. F. S. Schwabe, A. L. Jones & J. P. Jonker. Changes in the Susceptibility of Developing Apple Fruit to *Venturia inaequalis*. *Phytopathology*, 1984, 74. 118-121
- P. C. Sentelhas, T. J. Gillespie, J. C. Batzer, M. L. Gleason, J. Monteiro, J. R. M. Pezzopane & M. J. Pedro. Spatial variability of leaf wetness duration in different crop canopies. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 49. (6), 363-370
- P. C. Sentelhas, T. J. Gillespie, M. L. Gleason, J. Eduardo, B. M. Monteiro, J. R. M. Pezzopane & M. J. Pedro. Evaluation of a Penman-Monteith approach to provide "reference" and crop canopy leaf wetness duration estimates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141. (2-4), 105-117
- P. C. Sentelhas, T. J. Gillespie, M. L. Gleason, J. E. B. A. Monteiro & S. T. Helland. Operational exposure of leaf wetness sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126. (1-2), 59-72
- P. C. Sentelhas, A. D. Marta, S. Orlandini, E. A. Santos, T. J. Gillespie & M. L. Gleason. Suitability of relative humidity as an estimator of leaf wetness duration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148. (3), 392-400
- S. Siegel & N. J. Castellan. *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*. New York: McGraw Hill Publications, 1989, 399 p.
- S. Sikalo, C. Tropea & E. N. Ganic. Dynamic wetting angle of a spreading droplet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, 29. (7), 795-802
- S. Simon, B. Sauphanor & P.-É. Lauri. Control of Fruit Tree Pests through Manipulation of Tree Architecture. *Pest Technology*, 2007, 1. (1), 33-37
- H. Sinoquet, X. Le Roux, B. Adam, T. Ameglio & F. A. Daudet. RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown. *Plant Cell and Environment*, 2001, 24. (4), 395-406
- H. Sinoquet & P. Rivet. Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. *Trees - Structure and Function*, 1997, 11. 265-270
- H. Sinoquet, G. Sonohat, J. Phattaralerphong & C. Godin. Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy. *Plant Cell and Environment*, 2005, 28. (9), 1158-1170
- H. Sinoquet, J. Stephan, G. Sonohat, P. E. Lauri & P. Monney. Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features: assessment with three-dimensional digitized apple trees. *New Phytologist*, 2007, 175. (1), 94-106
- H. Sinoquet, S. Thanisawanyangkura, H. Mabrouk & P. Kasemsap. Characterization of the light environment in canopies using 3D digitising and image processing. *Annals of Botany*, 1998, 82. 203-212
- G. Sonohat, H. Sinoquet, V. Kulandaivelu, D. Combes & F. o. Lescourret. Three-dimensional reconstruction of partially 3D-digitized peach tree canopies. *Tree Physiology*, 2006, 26. (3), 337-351
- G. Strotos, M. Gavaises, A. Theodorakakos & G. Bergeles. Numerical investigation on the evaporation of droplets depositing on heated surfaces at low Weber numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51. (7-8), 1516-1529

J. C. Sutton, T. J. Gillespie & P. D. Hildebrand. Monitoring Weather Factors in Relation to Plant Disease. *Plant Disease*, 1984, 68. (1), 78-84

T

R. Tadmor & P. S. Yadav. As-placed contact angles for sessile drops. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, 317. (1), 241-246

U

C. W. Ulbrich. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *Journal of climate and applied meteorology*, 1983, 22. (10), 1764-1775

US1116-INRA, Agroclim. Avignon, [url: http://www.paca.inra.fr/les_recherches/pole_production_horticole_integree_phi_1/agroclim](http://www.paca.inra.fr/les_recherches/pole_production_horticole_integree_phi_1/agroclim)

V

D. Vadillo, A. Soucemarianadin, C. Delattre & D. C. Roux. Dynamic contact angle effects onto the maximum drop impact spreading on solid surfaces. *Physics of Fluids*, 2009, 21.

Vale Lab (UCSF), µManager - the open-source microscopy software v 1.3, [url: http://valelab.ucsf.edu/~MM/MMwiki/index.php/Micro-Manager](http://valelab.ucsf.edu/~MM/MMwiki/index.php/Micro-Manager)

J. H. van Boxel. Numerical model for the fall speed of raindrops in a rainfall simulator. In: (éd.), *Workshop on Wind and Water Erosion, Ghent, Belgium*, 1997. November 17-18, 1997

N. Vavilov. *Origin and geography of cultivated plants*. Cambridge: Cambridge Univeristy Press, 1992, 505 p.

W

M.-J. Wang, F.-H. Lin, Y.-L. Hung & S.-Y. Lin. Dynamic Behaviors of Droplet Impact and Spreading: Water on Five Different Substrates. *Langmuir*, 2009, 25. (12), 6772-6780

T. Watanabe, M. Yokozawa, S. Emori, K. Takata, A. Sumida & T. Hara. Developing a Multilayered Integrated Numerical Model of Surface Physics - Growing Plants Interaction (MINoSGI). *Global Change Biology*, 2004, 10. (6), 963-982

A. Weiss & A. F. Hagen. Further experiments on the measurement of leaf wetness. *Agricultural Meteorology*, 1983, 29. 207-212

A. Weiss, D. L. Lukens & J. R. Steadman. A sensor for the direct measurement of leaf wetness. Construction techniques and testing under controlled conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 43. 241-249

B. M. Weon, J. H. Je & C. Poulard. *Convection-enhanced water evaporation*. AIP, 2011

R. J. Wichink Kruit, A. F. G. Jacobs & A. A. M. Holtslag. Measurements and estimates of leaf wetness over agricultural grassland for dry deposition modeling of trace gases. *Atmospheric Environment*, 2008, 42. (21), 5304-5316

P. Widmoser. A discussion on and alternative to the Penman-Monteith equation. *Agricultural Water Management*, 2009, 96. (4), 711-721

M. Willaume, P.-É. Lauri & H. Sinoquet. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation. *Trees - Structure and Function*, 2004, 18. (6), 705-713

T. B. Wilson, W. L. Bland & J. M. Norman. Measurement and simulation of dew accumulation and drying in a potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93. (2), 111-119

K. P. Wittich. Some Remarks on Dew Duration on Top of an Orchard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 72. (3-4), 167-180

X

Q. Xiao, E. G. McPherson, S. L. Ustin & M. E. Grismer. A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105. (D23), 173-188

M. Xu & S. S. Korban. A Cluster of Four Receptor-Like Genes Resides in the Vf Locus That Confers Resistance to Apple Scab Disease. *Genetics*, 2002, 162. (4), 1995-2006

Y

T. Young. An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95. 65-87

Z

Y. Yu, H. Zhu, H. E. Ozkan, R. C. Derksen & C. R. Krause. Evaporation and Deposition Coverage Area of Droplets Containing Insecticides and Spray Additives on Hydrophilic, Hydrophobic, and Crabapple Leaf Surfaces. 2009, 52. (1), 39-49

W. A. Zisman. Relation of the Equilibrium Contact Angle to Liquid and Solid Constitution. In: F. Fowkes, *Advances in Chemistry; Contact Angle, Wettability, and Adhesion*. Washington, DC: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1964, pp. 1-51

Liste des figures

Synthèse Bibliographique

Figure B.1 – Chaîne industrielle de calibrage et colorimétrie de pommes dans un entrepôt de traitement après récolte, pour trier les pommes par qualité de couleur et taille.....	29
Figure B.2 – cycle phénologique du pommier, in (Fleckinger, 1948).....	34
Figure B.3 – Représentations virtuelles des charpentes de pommier en architecture "Centrifuge" (gauche) et "Axe Structuré" (droite)	36
Figure B.4 – Pommier digitalisé au verger (gauche) et représentation virtuelle de sa charpente après digitalisation (droite)	39
Figure B.5 – Représentation d'un jeune noyer digitalisé par méthode photographique (gauche) et par digitalisation de contact (droite), in (Phattaralerphong & Sinoquet, 2005).....	39
Figure B.6 - Taches de tavelure sur une feuille de pommier Jubilé	41
Figure B.7 - Taches de tavelure sur une jeune pomme Jubilé	41
Figure B.8 - Pseudothèque sur une feuille de pommier, observée à la loupe binoculaire (gauche) et au microscope (droite)	43
Figure B.9 - Coupe de pseudothèque mûr observée au microscope	43
Figure B.10 - Asques cylindriques contenant chacune 8 ascospores observées au microscope.....	43
Figure B.11 - Ascospores éjectées de leur asque observées au microscope	43
Figure B.12 - Conidies (cônes regroupés au centre) observées au microscope	44
Figure B.13 - Cycle de la tavelure et facteurs climatiques entrant en jeu dans les processus (d'après Agrios, 2005 et Osbert, 2011)	44
Figure B.14 – Coupe transversale d'une feuille de pommier – d'après (Reidel <i>et al.</i> , 2009)	45
Figure B.15 - Relation entre la température de l'air et la croissance des pseudothèques de <i>Venturia inaequalis</i> (gauche : nombre de pseudothèques comptées sur une surface de 240mm ² ; droite : diamètre moyen des pseudothèques) sur gel d'agarose (pointillé) et feuille de pommier (trait plein) – in (MacHardy, 1996).....	45
Figure B.16 - Effets couplés de température et d'humidité relative (mouillé, 95%, 88%, sec) sur le développement des pseudothèques après une inoculation de 7 jours au stade 2 (initiation des pseudothèques), stade 3 (formation ascogoniale), stade 5 (dormance), stade 7 (asques à moitié mûres), et stade 9 (formation des ascospores) – in (MacHardy, 1996).....	46
Figure B.17 – Moyenne sur 4 années de mesures du pourcentage d'ascospores capturées par heure de la journée (précision : 1h) – in (MacHardy & Gadoury, 1986)	47
Figure B.18 - Relation entre température et taux de germination des ascospores - d'après (MacHardy, 1996)	47
Figure B.19 – Relation entre température d'incubation et croissance des lésions de tavelure sur la face supérieure de feuilles de pommier après inoculation par conidies – in (MacHardy, 1996)	49
Figure B.20 - Relation entre température et germination des conidies – in (MacHardy, 1996).....	49
Figure B.21 - Relation entre humidité relative et germination des conidies après une incubation de 24h à 20°C - in (MacHardy, 1996)	49
Figure B.22 – Evolution du nombre de lésions dues à la tavelure en fonction de l'âge des feuilles – d'après (MacHardy, 1996)	50

Figure B.23 - Courbe de risque d'infection en fonction de la température et de la durée d'humectation selon les critères de Mills qui déterminent la sévérité du risque	52
Figure B.24 - Schéma de fonctionnement du demi-pont de Wheatstone des capteurs à mesure de résistance électrique	57
Figure B.25 - Principe de la mesure de l'humectation sur capteur à mesure de résistance électrique	57
Figure B.26 - Capteurs de durée d'humectation à mesure de résistance électrique. a. capteur <i>Campbell Scientific 237</i> ; b. capteur <i>Connecting Nature</i> ; c. Capteur <i>Cimel CE 187A</i> ; d. capteur <i>Adcon Telemetry A733</i>	58
Figure B.27 - Relations entre la durée d'humectation mesurée au niveau du sol, et celle mesurée a) au sommet du couvert; b) à mi hauteur; c) au bas de l'arbre.....	60
Figure B.28 - Mesure des zones homogènes en durée d'humectation au sein d'une couronne d'arbre pour tous les jours de mesure (haut); les jours secs (milieu); les jours de pluie (bas) - in (Batzner <i>et al.</i> , 2008).....	62
Figure B.29 - Relation entre hauteur du couvert et a) concentration aérienne d'ascospores; b) concentration d'ascospores dans l'eau de pluie; c) et d) ascospores déposées sur la face supérieure (c) et inférieure (d) d'une lame graissée - in (Carisse, 2007)	65
Figure B.30 - Illustration du principe de développement d'un modèle mathématique	67
Figure B.31 - Illustration du principe de développement d'un modèle physique	67

Chapitre I

Figure I.1 - schématisation du phénomène d'évaporation : les molécules se déplacent du liquide vers l'air et la réaction endothermique de vaporisation entraîne un refroidissement de la surface	73
Figure I.2 - Variation de la valeur du taux d'évaporation sur la surface d'une goutte - in (Stroto <i>et al.</i> , 2008)	75
Figure I.3 - Variation du flux d'évaporation à la surface d'une goutte (haut). L'intégration d'un flux constant à la surface de la goutte amène une erreur de l'ordre de 5%, en négligeant la hausse du flux à proximité de la ligne triple : la zone négligée est encadrée en rouge (bas) - d'après (Hu & Larson, 2002)	75
Figure I.4 - Exemple de maillage nécessaire pour représenter finement les variations spatiales du flux d'évaporation à la surface d'échange d'une goutte - in (Stroto <i>et al.</i> , 2008).....	75
Figure I.5 - LWD computation using exact solution (○) and the Penman-Monteith solution (▲) compared to observed evaporating time (Leclerc <i>et al.</i> , 1985).....	84
Figure I.6 - Correlation study between the exact and the Penman-Monteith approaches for the droplets reported in Table I.1.....	84
Figure I.7 - Risk assessment comparison between exact (○ / □) and Penman-Monteith (● / ■) modelling approaches and Mills infection risk curve relative to conidia (MacHardy and Gadoury, 1989). Squared dots (□■) stand for 1.5mm radius droplets, with a 95% relative humidity value. Circular dots (○●) stand for 3.5mm radius droplets with relative humidity values varying from 80% to 95% (corresponding relative humidity values are written next to the dots series).	86
Figure I.8 - Evolution de la résistance aérodynamique en convection forcée en fonction du rayon de contact de la goutte (gauche) et de la surface d'échange de la goutte à l'interface liquide - air (droite)	90
Figure I.9 - Photographies de formes de gouttes sur différents supports	93
Figure I.10 - A la surface d'un liquide, les molécules qui le constituent perdent la moitié de leurs interactions attractives - d'après (de Gennes, 2005).....	94

Figure I.11 – Illustration des deux régimes de mouillage possibles sur un substrat solide – in (de Gennes, 2005)	94
Figure I.12 – Equilibre des tensions interfaciales s'exerçant sur la ligne triple, définissant l'angle de contact.....	95
Figure I.13 - Illustration des différents comportements de l'eau selon l'hydrophobie de la surface	97
Figure I.14 – Comparaison entre une représentation cylindrique et une représentation hémisphérique de la goutte pour des calculs d'évaporation – d'après les conditions de mesure de (Leclerc <i>et al.</i> , 1985)	99
Figure I.15 – Influence de la forme de la goutte sur sa durée d'évaporation suivant les conditions expérimentales de Leclerc et al. (1985), (chaque colonne de points correspond à un cas du tableau Table I.1)	100
Figure I.16 - Représentation de la forme d'une goutte d'eau sur un support hydrophile (gauche) et hydrophobe (droite)	101
Figure I.17 – Evolution de la géométrie de la goutte en fonction de l'angle de contact qu'elle forme avec son support pour a) le rayon de contact (bleu) et la hauteur maximale (rouge) de la goutte; b) la surface d'échange à l'interface air – liquide de la goutte.	101
Figure I.18 - Comparaison de calculs d'évaporation pour une goutte hémisphérique (angle de 90°) et une goutte formant un angle de 85° avec le support	103

Chapitre II

Figure II.1 – Illustration de la méthode d'estimation de l'angle de contact par la mesure du diamètre de contact d'une goutte sur un support a) hydrophile et b) hydrophobe – in (Quéré <i>et al.</i> , 1998)	111
Figure II.2 - Représentation des angles $\theta_{\max}$ (avancée) et $\theta_{\min}$ (recul) sur un plan incliné d'un angle α - in (Krasovitski & Marmur, 2005).....	112
Figure II.3 - Illustration de la méthode de gonflage (gauche) et d'aspiration (droite) d'une goutte – in (de Gennes, 2005)	112
Figure II.4 - Rouleau de Parafilm "M" et morceau de film découpé	116
Figure II.5 - Trichomes observés au MEB.....	120
Figure II.6 - Comparaison d'une feuille jeune et feuille adulte.....	120
Figure II.7 - Comparaison de l'état de surface d'une feuille jeune et d'une feuille adulte.....	120
Figure II.8 - Gouttes d'eau sur une feuille très jeune et pubescente sur la pousse	121
Figure II.9 - Goutte d'eau sur un capteur de durée d'humectation	123
Figure II.10 - Caméra rapide <i>pco. 1600 camera</i> (droite) et son alimentation (gauche)	124
Figure II.11 - Objectif macro 105mm (gauche) et bagues-allonges 21+31mm sur un adaptateur d'optique (droite)	125
Figure II.12 - Source halogène (haut) et panneau de rétro-éclairage (bas).....	125
Figure II.13 – Dispositif de contrôle du débit de l'eau	127
Figure II.14 – Illustration de la correction d'angle d'inclinaison de la goutte; en haut: la goutte présente une inclinaison d'un angle α mesurée grâce aux fonctions du logiciel imagej; en bas: l'image corrigée après rotation de la valeur de l'angle mesuré.....	130
Figure II.15 – a) Détermination de l'angle de contact à l'aide de 3 points de mesure; b) Tracé de l'angle de contact illustrant l'équivalence entre la mesure et les pixels de l'image d'origine.....	131

Figure II.16 - Tracés de la dispersion des angles de contact statiques sur Parafilm 'M' pour 560 mesures (gauche) et 45 mesures (droite)	132
Figure II.17 - Répartition des angles dynamiques d'avancée (haut) et de recul (bas) sur Parafilm 'M' pour 51 et 53 angles mesurés respectivement.....	133
Figure II.18 - Prise de vue a) en travers (objectif perpendiculaire) des franges du circuit; b) dans le sens (objectif parallèle) des franges du circuit - la ligne de contact et les angles de contact sont indiqués en rouge	135
Figure II.19 - Aspect schématisé de la goutte "à cheval" sur les franges du circuit d'un capteur de durée d'humectation : face au circuit (gauche) et de dessus (droite).....	135
Figure II.20 - Gouttes de pluie sur capteurs de durée d'humectation	136
Figure II.21 - Nuages de points avec "boîtes à moustaches" par espèces (Pommier, Prunier, Pêcher) pour les angles : a) d'avancée; b) de recul; c) déposés; d) lâchés	139
Figure II.22 - goutte d'eau sur feuille de pommier à l'aspiration (mesure de l'angle de recul) sur Royal Gala (haut) et Fille de l'Orient (bas)	141
Figure II.23 - Nuages de points avec "boîtes à moustaches" par variété de pommier pour les angles : a) d'avancée; b) de recul; c) déposés; d) lâchés.....	141
Figure II.24 - Distributions des angles de contact dynamiques d'avancée (gauche) et de recul (droite) pour les 8 variétés de pommiers étudiées	144
Figure II.25 - Distributions des angles de contact statiques "déposés" (gauche) et "lâchés" (droite) pour les 8 variétés de pommiers étudiées	146
Figure II.26 - Nuages de points avec "boîtes à moustaches" par âge de feuille pour les angles a) d'avancée; b) de recul; c) lâchés - le tracé bleu donne l'évolution des médianes en fonction de l'âge	151
Figure II.27 - Evolution ontogénique de l'hystérésis d'angle de contact mesurée sur feuilles de Golden	152
Figure II.28 - Mise en évidence de la différence entre les angles statiques lâchés et les angles statiques déposés.....	154
Figure II.29 - Photographies haute vitesse (1000 images/s) de gouttes se posant sur une feuille :	156
Figure II.30 - Comparaison des angles de contacts et des hystérésis à la sensibilité à la tavelure des pommiers étudiés	158

Chapitre III

Figure III.1 - Durée d'évaporation observée pour différentes vitesses de vent - d'après Magarey, <i>communication personnelle</i>	168
Figure III.2 - Comparaison entre évaporation observée et simulée pour la vitesse du vent variable sur l'ensemble des valeurs mesurées par Magarey	170
Figure III.3 - Evolution de la résistance de couche limite dans sa représentation issue de l'équation I.4 en fonction de la vitesse du vent (les valeurs sous l'axe des abscisses correspondent à la vitesse du vent, mais l'échelle est logarithmique)	171
Figure III.4 - Evolution du rapport G_r/R_e^2 en fonction de la vitesse du vent. Pour chaque vitesse de vent le nuage de points correspond à une évolution temporelle de G_r/R_e^2 au fil de l'évaporation de la goutte considérée.....	173
Figure III.5 - Evaporation d'une goutte de 3-méthylpentane simulée d'après l'équation 2 (x) et mesurée(ø) - in (Kelly-Zion <i>et al.</i> , 2011)	174

Figure III.6 – Tracé des différentes expressions de la résistance de couche limite raccordées dans l'espace logarithmique	177
Figure III.7 – Critères sur la vitesse du vent déterminant l'expression de la résistance de couche limite employée pour le calcul.....	177
Figure III.8 – Evolution de la résistance de couche limite en fonction de la vitesse du vent d'après la représentation de l'équation I.4 (tracé bleu) et celle des équations III.8 et III.9 (tracé rouge)	178
Figure III.9 – Comparaison entre les durées d'évaporation observées et simulées pour la vitesse du vent variable après amélioration de la représentation du vent dans la résolution des équations de bilan thermique.....	180
Figure III.10 - Evolution de la durée d'évaporation des gouttes en fonction de leur volume – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	181
Figure III.11 - Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à volume de gouttes variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>)	182
Figure III.12 – Evolution de la durée d'évaporation en fonction de la température de l'air – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	183
Figure III.13 - Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à température variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>)	184
Figure III.14 – Evolution de la durée d'évaporation en fonction de l'humidité relative – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	186
Figure III.15 – Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à humidité relative variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>)	187
Figure III.16 – Evolution de la durée d'évaporation en fonction du rayonnement – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	187
Figure III.17 – Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées à rayonnement variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	188
Figure III.18 – Evolution de l'incertitude sur la prévision de risque d'infection en fonction de la température pour l'infection primaire (gauche) et secondaire (droite).....	190
Figure III.19 – Analyse de variance des différents paramètres intervenant dans le calcul de l'évaporation, classés par volume de goutte (<i>Rayo</i> = Rayonnement, <i>Angle</i> = Angle de contact, <i>HR</i> = Humidité Relative, <i>Temp</i> = Température).....	192
Figure III.20 – Comparaison des durées d'évaporation simulées à celles observées au verger	195
Figure III.21 – Evolution de la durée d'évaporation observée et simulée en fonction de a) la vitesse du vent; b) la température; c) le rayonnement; d) l'humidité relative	196

Chapitre IV

Figure IV.1 – Capteur de durée d'humectation développé au PIAF.....	204
Figure IV.2 – a) Centrale d'acquisition Campbell Scientific CR 1000; b) Centrale d'acquisition Campbell Scientific CR 10X; c) Centrale CR 1000 câblée et alimentée au verger.....	204
Figure IV.3 – Bras de support des capteurs de durée d'humectation avec les anneaux mobiles de fixation.....	206
Figure IV.4 – Détail de la fixation d'un bras support de capteurs.....	206
Figure IV.5 – Détail des fixations d'un capteur de durée d'humectation et ses degrés de liberté ...	206
Figure IV.6 – Piquet de fixation des bras support.....	207
Figure IV.7 – Vue satellite de la parcelle expérimentale (source : <i>Géoportail</i>)	208

Figure IV.8 – Schéma détaillé de la parcelle Jubilé, des arbres équipés de capteurs et de la station météorologique (source de l'image de fond : <i>Géoportail</i>)	208
Figure IV.9 – Arbres échantillons équipés de 12 capteurs chacun en avril 2009, à gauche l'Arbre 1 sous conduite "Axe Structuré"; à droite l'Arbre 2 sous conduite "Centrifuge"	210
Figure IV.10 – Instruments de mesure de la station météorologique installée au verger : a) Thermo-hygromètre; b) Anémomètre; c) Capteur de rayonnement global; d) Capteur de durée d'humectation; e) Pluviomètre; f) Boîtier d'alimentation et centrale d'acquisition.....	212
Figure IV.11 – Planimètre LiCor Li3100 utilisé pour calculer la surface des feuilles échantillonnées	214
Figure IV.12 – Construction des maquettes de l'année 2011 pour l'arbre 1 (haut) et l'arbre 2 (bas) : positions des capteurs digitalisés (gauche), ajout de la charpente de l'arbre (milieu) puis du feuillage (droite)	215
Figure IV.13 – Capture d'écran de la fenêtre de visualisation du logiciel VegeSTAR	217
Figure IV.14 – Arbre 1 en 2011 au verger (gauche) et sa maquette reconstruite sous VegeSTAR (droite)	217
Figure IV.15 – Représentation sous VegeSTAR de la course du soleil (gauche) et des points représentant les centres des facettes constituant la "tortue" (droite).....	217
Figure IV.16 – Maquettes de pommier (gauche : Arbre 2 à conduite centrifuge en 2011; droite : Arbre 1 à conduite axe structuré) où est représenté le STAR global des pousses moyenné sur la journée du 22 juillet 2011	219
Figure IV.17 - Représentation 3D d'un capteur digitalisé sous VegeSTAR.....	224
Figure IV.18 – Scène de parcelle de l'Arbre 2 (conduite centrifuge) au centre de ses 8 arbres voisins (bas)	225
Figure IV.19 - Capture d'écran de la préparation de calcul de STAR sous le logiciel VegeSTAR. Tous les éléments dont on ne veut pas estimer le STAR sont masqués en noir (le fond de la scène est également noir lors des calculs) pour déterminer l'ombrage des objets étudiés.....	225
Figure IV.20 – Tracé de la variabilité de durée d'humectation au cours des 3 années de mesure (1 point par capteur pour chaque année sur l'axe des abscisses)	227
Figure IV.21 - Durée d'humectation cumulée au cours des trois années (a. 2009; b. 2010; c. 2011) pour la pluie (vert) et la rosée (bleu) : un point de mesure correspond au cumul total d'heures d'humectation sur l'année pour un capteur	230
Figure IV.22 – Relation entre hauteur des capteurs et durée moyenne d'un épisode d'humectation pour l'ensemble des capteurs au cours des trois années	231
Figure IV.23 – Relation entre orientation Est-Ouest des capteurs et durée moyenne d'un épisode d'humectation pour l'ensemble des capteurs au cours des trois années	232
Figure IV.24 - Valeurs des STAR globaux par capteur triées en ordre croissant pour les trois années de mesures	236
Figure IV.25 – Relation entre STAR global et hauteur des capteurs	236
Figure IV.26 – Relation entre STAR global et orientation des capteurs	236
Figure IV.27 – Relation entre STAR global et durée d'humectation de pluie normalisée pour chaque capteur	238
Figure IV.28 – Relation entre STAR global et durée d'humectation de rosée normalisée pour chaque capteur	238
Figure IV.29 – Relation entre le STAR direct calculé à la position solaire la plus haute pour le 22 juillet 2010 à 12h45 et le cumul des durées d'humectation liées à la pluie en 2010.....	239
Figure IV.30 – Relation entre STA global (STAR global < 0.4) et durée moyenne d'un épisode d'humectation rosée pour chaque capteur	240

Figure IV.31 – Evolution temporelle (4 journées de mesures de la station météorologique au verger du 29 juillet au 1er août 2010) de l'humidité relative, de la température et du rayonnement global	243
Figure IV.32 – Relation entre le STAR direct moyenné sur la journée du 27 août 2009 et le cumul de durées d'évaporation mesurées sur les capteurs	243
Figure IV.33 – Relation entre le STAR direct intégré sur les journées du 26 mai et 27 juin 2011 et le cumul de durées d'évaporation mesurées sur les capteurs	243
Figure IV.34 – Evolution du coefficient de détermination entre la durée d'humectation des différentes périodes en fonction de l'heure de la journée pour a) le 27 août 2009; b) le 26 mai 2011; c) le 27 juin 2011	248
Figure IV.35 – Durée d'évaporation en fonction : a) de la température; b) de l'humidité relative; c) du rayonnement reçu; d) de la vitesse du vent	250
Figure IV.36 – Comparaison de la durée d'évaporation entre l'ensemble des capteurs et les capteurs ayant un STAR nul	252

Discussion Générale

Figure D.1 – Comparaison des résultats de simulation pour différentes échelles de longueur intervenant dans l'expression de la résistance de couche limite : cas d'évaporation observés par Magarey sur Parafilm 'M' (Magarey <i>et al.</i> , 2005a)	273
Figure D.2 – Comparaison des résultats de simulation pour différentes échelles de longueur intervenant dans l'expression de la résistance de couche limite : cas d'évaporation observés sur capteurs de durée d'humectation au verger	273
Figure D.3 – Schéma représentant la forme des relations linéaires entre STAR et humectation par la rosée : les relations pour la durée d'humectation et l'évaporation sont connues, celle pour l'apport de rosée (tracé discontinu) est une hypothèse	284
Figure D.4 – Schéma représentant la forme des relations linéaires entre STAR et humectation par la pluie : les relations pour la durée d'humectation et l'évaporation sont connues, celle pour l'apport de pluie (tracé discontinu) est une hypothèse	286

Annexe 1

Figure A.1 – a) Sphère émettrice du champ magnétique tridimensionnel; b) Cube émetteur du champ magnétique tridimensionnel; c) Pointeur développé au PIAF permettant un contrôle de la mesure des angles d'Euler; d) Pointeur Polhemus; e) Boîtier analyseur	324
Figure A.2 – Mesure des angles d'Euler à la base de la nervure principale d'une feuille de pommier	324
Figure A.3 – Interface du logiciel PiafDigit assurant l'interface entre le digitaliseur et l'ordinateur	326
Figure A.4 – Ordinateur de terrain équipé du logiciel PiafDigit en cours de digitalisation	326
Figure A.5 – Illustration des paramètres à digitaliser et mesurer pour déterminer l'allométrie et la phyllotaxie des feuilles : la position (X_{feuille} , Y_{feuille} , Z_{feuille}) de la base du limbe de la feuille; les longueurs LL, LW et PL; l'angle α entre la pousse et la tige de feuille; l'angle phyllotactique β ; l'angle γ entre le pétiole et le limbe, d'après (Sonohat <i>et al.</i> , 2006)	327
Figure A.6 – Schéma hiérarchique de tous les types de pousses distingués	328
Figure A.7 – Exemple de relations allométriques donnant : a) la surface des feuilles en fonction de la longueur de pousse pour les pousses végétatives longues; b) la distribution des angles d'inclinaison de la nervure principale des feuilles.	329

Liste des tableaux

Synthèse Bibliographique

Tableau B.1 – Taxonomie du pommier domestique	33
Tableau B.2 – Taxonomie de <i>Venturia inaequalis</i>	42
Tableau B.3 Etudes de la validité des courbes de Mills entre 1951 et 1996 d'après (MacHardy, 1996)	53
Tableau B.4 - Formules analytiques de différentes pour rendre compte des différentes conditions d'infection - in (MacHardy & Gadoury, 1989)	54
Tableau B.5 - Tableau comparatif des instruments de mesure de durée d'humectation (d'après Huber, 1992).....	59
Tableau B.6 – Durée d'Humectation (heure) moyenne à 3 hauteurs dans un pommier (Haut = 3.3m; Milieu = 2.1m; Bas = 1.1m) mesurée par Sentelhas (Sentelhas et al 2005)	61

Chapitre I

Table I.1 – Comparison of LWD computaion with observation under controlled conditions (Leclerc et al., 1985).....	83
Table I.2 – Risk of infection assessment using Mills curves with computed LWD.....	85

Chapitre II

Tableau II.1 – Valeurs d'angles de contact mesurés sur Parafilm 'M' issues de la littérature	116
Tableau II.2 - Photographies des feuilles prélevées à différents âges de développement.....	122
Tableau II.3 – Indicateurs statistiques (données en °) sur les populations de données pour 45 et 560 angles mesurés.....	133
Tableau II.4 - Mesures d'angles de contact (exprimés en °) sur Parafilm 'M'	134
Tableau II.5 - Mesure des angles de contact (exprimés en °) sur capteur de durée d'humectation	136
Tableau II.6 - Valeurs des angles de contact (exprimés en °) sur différents matériaux et espèces de végétaux (les précisions sont données par l'écart-type des valeurs, et par la somme des écart-types de l'angle de recul et de l'angle d'avancée pour la précision de l'hystérésis).....	138
Tableau II.7 - Groupes homogènes entre espèces. Chaque ligne contient des espèces statistiquement homogènes pour le type d'angle de contact considéré	140
Tableau II.8 - Groupes homogènes entre variétés de pommiers pour les angles de contact dynamiques.....	148
Tableau II.9 - Groupes homogènes entre variétés de pommiers pour les angles de contact statiques	148
Tableau II.10 - Valeurs des angles de contact mesurés (exprimés en °) sur les différents cultivars de pommiers étudiés.....	149
Tableau II.11 - Valeurs des angles de contact mesurés à différents âges de feuilles de pommier Golden (mesure d'angle de contact statique manquante pour la feuille âgée de 82 degrés-jours)150	

Tableau II.12 - Groupes homogènes d'âges de feuilles de pommier Golden (exprimés en degrés-jours) pour les angles de contact dynamiques et statiques "lâchés".....	152
--	-----

Tableau II.13 - Valeurs des angles de contact statiques sur différents matériaux, en fonction de la manière dont on pose la goutte	154
--	-----

Tableau II.14 - Coefficients de corrélation de Spearman et <i>p-value</i> de la relation entre angles de contact et sensibilité à la tavelure par type d'angle	158
--	-----

Chapitre III

Tableau III.1 - Calcul des angles de contact à partir du rayon observé – d'après données Magarey (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	166
--	-----

Ces valeurs sont en accord avec les données bibliographiques et nos mesures sur Parafilm 'M' présentées au §II.1.a du chapitre II (Tableau II.2). Une angle de 104° a donc été utilisé pour tous les calculs de validation du modèle d'évaporation.....166

Tableau III.2 - Calcul du nombre de Bond pour les différents volumes de gouttes considérées déposées sur Parafilm 'M'.....	167
--	-----

Tableau III.3 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à vitesse du vent variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	169
--	-----

Tableau III.4 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à volume de goutte variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	179
---	-----

Tableau III.5 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à volume variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	181
---	-----

Tableau III.6 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à température de l'air variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>).....	183
---	-----

Tableau III.7 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à humidité relative variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>)	185
---	-----

Tableau III.8 - Récapitulatif des mesures et des simulations de durée d'évaporation à rayonnement net variable – d'après (Magarey, <i>communication personnelle</i>)	188
---	-----

Tableau III.9 - Récapitulatif des pentes de régression et des coefficients de détermination calculés pour les comparaisons entre simulation et observation	189
--	-----

Tableau III.10 - Gamme de variation des paramètres pour l'analyse de sensibilité.....	192
---	-----

Tableau III.11 - Classement des paramètres et interactions entre paramètres des plus influents aux moins influents sur le bilan thermique d'évaporation de notre modèle.....	193
--	-----

Tableau III.12 - Durées d'évaporation moyennes observées au verger, et indication des variables climatiques moyennes pour chaque épisode	194
--	-----

Chapitre IV

Tableau IV.1 - Exemple de conversion des données brutes issues des capteurs (haut) en durées d'humectation (bas).....	222
---	-----

Tableau IV.2 - Dates de début et de fin des campagnes de mesures de durée d'humectation au verger pour les trois années de mesures.....	226
---	-----

Tableau IV.3 - Nombre d'épisodes de pluie et de rosée identifiés au cours des expérimentations au verger	228
--	-----

Tableau IV.4 - Détection des épisodes d'humectation par 3 capteurs de chaque arbre pour l'année 2010. X : capteur humecté lors de l'épisode; Ø : capteur sec lors de l'épisode.....	228
---	-----

Tableau IV.5 - Ecart-type et moyenne de la durée d'humectation moyenne par épisode pour la pluie et la rosée	229
Tableau IV.6 - Coefficients de détermination des comparaisons entre humectation et paramètres spatiaux par type d'épisode	232
Tableau IV.7 - STAR (diffus, directs, globaux) calculés en moyenne sur une journée pour les capteurs des arbres en a) 2009, b) 2010, c) 2011	235
Tableau IV.8 - Analyse statistique des corrélations entre épisodes d'humectation et STAR global	238
Tableau IV.9 - Coefficient de détermination entre durée d'humectation et STAR direct pour la journée du 27 août, selon l'intervalle de valeurs du STAR	244
Tableau IV.10.c - Coefficients R^2 des relations entre évaporation et STAR direct, diffus et global ($STAR_{global} = 0.5 * STAR_{direct} + 0.5 * STAR_{diffus}$) pour chaque période d'évaporation de la journée du 27 juin 2011	247
Tableau IV.11 - Pentes et coefficients de détermination des comparaisons entre durée d'évaporation et variables climatiques, les valeurs en rouge illustrent des corrélations non significatives	251

Discussion Générale

Tableau D.1 - Rapports entre les pentes de régression des simulations d'évaporation en fonction des différentes échelles de longueur	273
--	-----

Annexes

Annexe 1 – Digitalisation Électromagnétique

A.1. Principe de la digitalisation électromagnétique de contact

Le digitaliseur électronique tridimensionnel FASTRAK est un appareil conçu par la société Polhemus (Polhemus, *Colchester, Vermont, USA*). Il mesure les coordonnées d'un point dans un espace délimité. Ce dispositif est constitué d'une source magnétique (sous forme de cube ou de sphère : Figure A.1.a & Figure A.1.b), d'un pointeur (Figure A.1.c & Figure A.1.d), et du boîtier analyseur chargé de contrôler la source magnétique, et transformer l'information reçue par le pointeur en signal numérique (Figure A.1.e). La source magnétique émet par le biais de bobines trois champs magnétiques perpendiculaires formant un trièdre. Le pointeur est lui aussi constitué de 3 bobines qui induisent un courant lorsqu'il pointe dans les champs générés par la source. L'intensité de ces courants est directement corrélée à la distance au centre de chaque champ, ainsi qu'à l'orientation des bobines correspondantes entre elles.

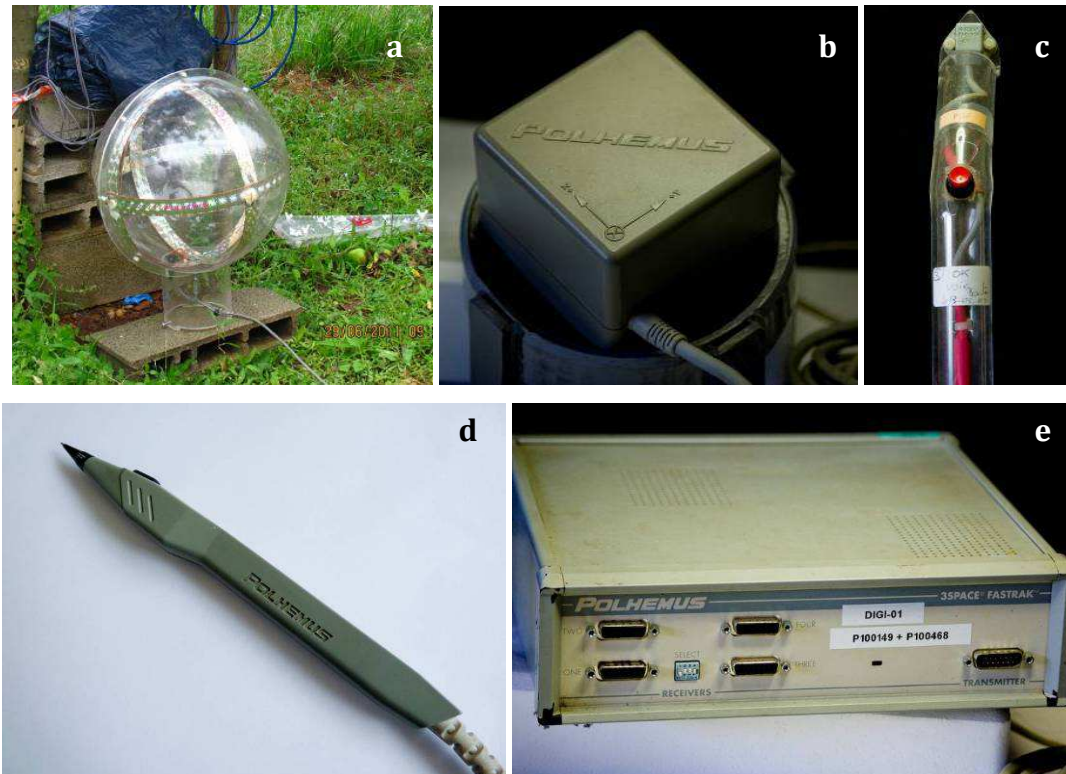


Figure A.1 – a) Sphère émettrice du champ magnétique tridimensionnel; b) Cube émetteur du champ magnétique tridimensionnel; c) Pointeur développé au PIAF permettant un contrôle de la mesure des angles d'Euler; d) Pointeur Polhemus; e) Boîtier analyseur

Chaque pointage donne ainsi les trois coordonnées spatiales X, Y, Z, mais également les trois angles d'Euler A, B, C. Un pointeur spécifique a été développé au PIAF, pour assurer une mesure contrôlée de ces angles lors de la digitalisation des feuilles. (Figure A.1.c & Figure A.2)



Figure A.2 – Mesure des angles d'Euler à la base de la nervure principale d'une feuille de pommier

Le boîtier transfère alors l'information à l'ordinateur via une interface série RS232, avec une erreur de localisation du point inférieure à 0.8mm (Sinoquet & Rivet, 1997). Toutefois, il faut prendre garde à éviter au maximum la présence d'objets métalliques dans le champ électromagnétique formé, ceux-ci pouvant générer des perturbations sur l'estimation de la distance du point à la source.

A.2. Acquisition des données digitalisées

Le logiciel PiafDigit développé au PIAF (Donès *et al.*, 2006) permet à la fois de piloter le digitaliseur et de reconstruire et visualiser la topologie et la géométrie de la plante digitalisée (Figure A.3).

Le pilotage du digitaliseur se fait via une interface graphique permettant de configurer la mesure : réglage du point de référence du repère O de coordonnées **(0,0,0)**, choix d'acquisition d'une topologie (selon le standard AMAPMod (Godin *et al.*, 1997)) de plante (pour déterminer une hiérarchie entre les branches et pousses) ou de la seule géométrie du système, choix du type d'objet (cylindre, sphère, polygone), et stocke les données du pointeur dans un tableur. Une fenêtre de visualisation en 3D permet de voir la plante digitalisée se construire en direct (Figure A.4).

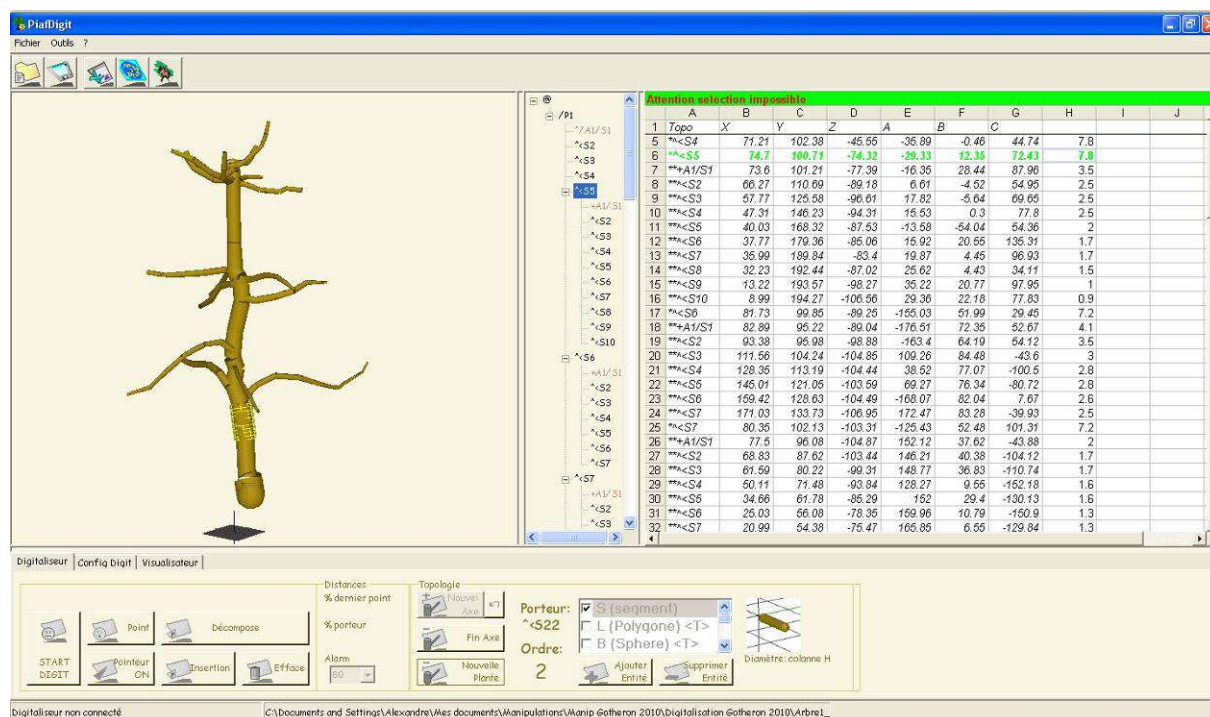


Figure A.3 – Interface du logiciel PiafDigit assurant l'interface entre le digitaliseur et l'ordinateur



Figure A.4 – Ordinateur de terrain équipé du logiciel PiafDigit en cours de digitalisation

A.3. Reconstruction du feuillage

La construction d'un arbre à l'aide de la digitalisation 3D permet d'obtenir un résultat très précis et réaliste de la structure d'un arbre, particulièrement à l'aide de la

digitalisation de contact. Toutefois, un arbre adulte comme le pommier comporte des milliers de feuilles. Digitaliser un arbre adulte par cette méthode chacune d'entre elles serait particulièrement contraignant et prendrait un temps très important.

La phyllotaxie et l'allométrie rendent alors fier service à l'opérateur, celles-ci étant constantes à une variété donnée. Ainsi, l'angle phyllotactique β (angle d'alternance entre les feuilles d'une même pousse) est connu, ainsi que l'angle γ entre le pétiole et la nervure principale.

A la digitalisation, on mesure la position des feuilles dans l'espace X_{feuille} , Y_{feuille} , Z_{feuille} , leurs angles d'Euler RotX (angle de roulis), RotY (angle d'élévation), RotZ (angle azimutal), et l'angle α que les limbes forment avec les pousses.

On mesure également grâce au prélèvement de quelques échantillons des différents types d'éléments végétatifs (pousse végétative courte ou longue, pousse de bourse fructifère ou avortée), la longueur (LL) de la nervure principale, la longueur du pétiole (PL), la largeur maximale du limbe (LW), ainsi que la surface de la feuille. (Figure A.5)

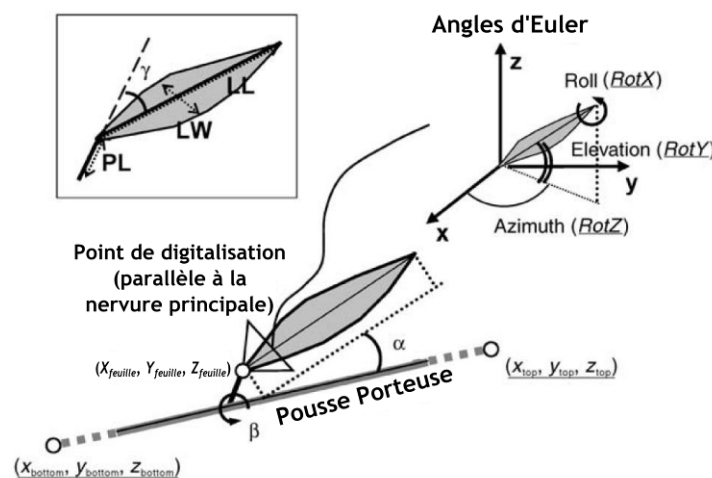


Figure A.5 – Illustration des paramètres à digitaliser et mesurer pour déterminer l'allométrie et la phyllotaxie des feuilles : la position (X_{feuille} , Y_{feuille} , Z_{feuille}) de la base du limbe de la feuille; les longueurs LL, LW et PL; l'angle α entre la pousse et la tige de feuille; l'angle phyllotactique β ; l'angle γ entre le pétiole et le limbe, d'après (Sonohat *et al.*, 2006)

Des relations allométriques entre ces grandeurs permettent de reconstruire le feuillage de manière réaliste, en fonction du type de pousse (Sonohat *et al.*, 2006; Willaume *et al.*, 2004). On dénombre deux principaux types de pousses : les pousses végétatives et les pousses fructifères. Parmi les premières, on distingue (Figure A.6):

- (i) les pousses végétatives courtes, qui mesurent moins de 5cm;
- (ii) les pousses végétatives longues, de plus de 5cm.

Les pousses fruitières se divisent elles en :

- (i) pousses de bourse courtes (moins de 5 cm)
- (ii) pousses de bourse longues, de plus de 5cm;
- (iii) bourses fruitières, portant des fruits;
- (iv) bourses avortées, ayant perdu leurs fruits suite à un éclaircissage ou par action naturelle.

La distribution de ces pousses est propre à chaque cultivar. Un exemple des relations allométriques obtenues est présenté sur les figures A.7.a & A.7.b. Ces relations permettent de reconstruire un feuillage correspondant à la réalité sans avoir à digitaliser chaque feuille de l'arbre.

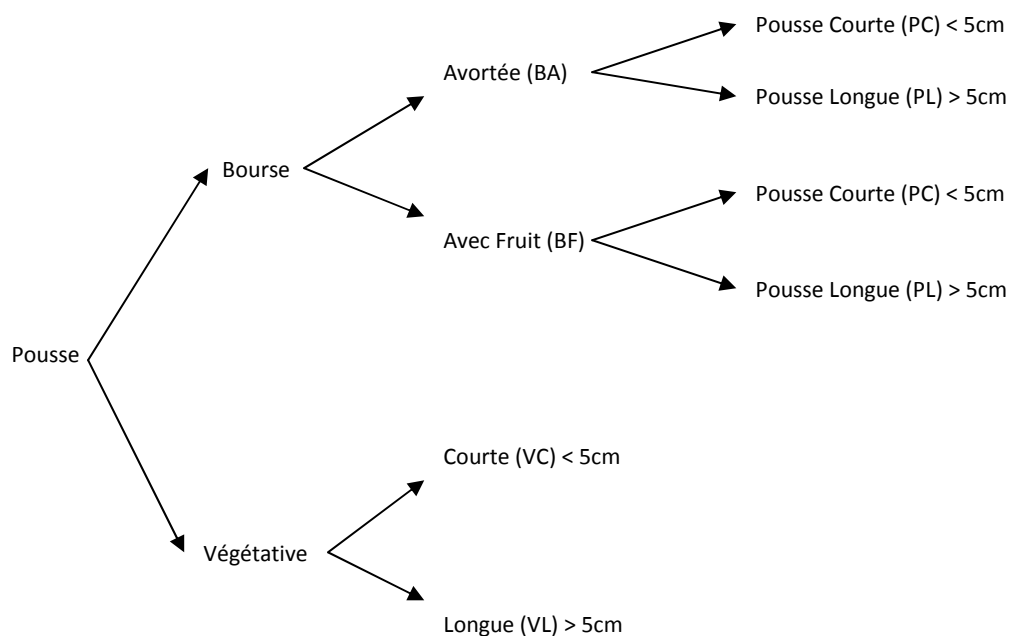


Figure A.6 – Schéma hiérarchique de tous les types de pousses distingués

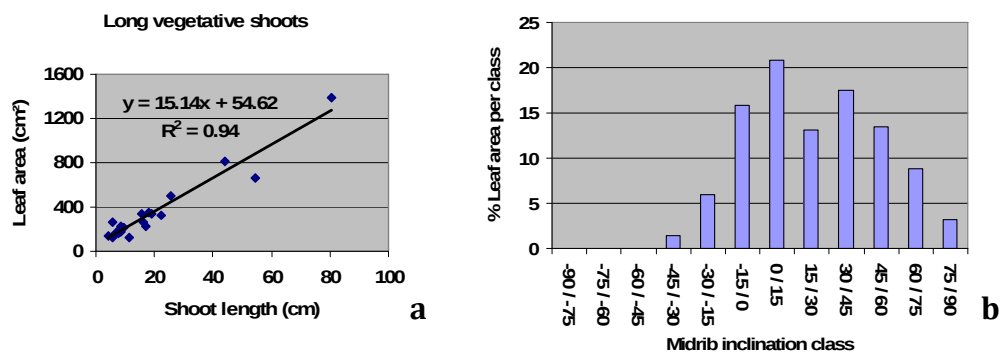


Figure A.7 – Exemple de relations allométriques donnant : a) la surface des feuilles en fonction de la longueur de pousse pour les pousses végétatives longues; b) la distribution des angles d'inclinaison de la nervure principale des feuilles.

Résumé

La pomme, fruit le plus cultivé sur le sol français, est principalement menacée par le pathogène *Venturia inaequalis*, responsable de la maladie de la tavelure qui génère des pertes considérables si elle n'est pas traitée. La politique actuelle de gestion des risques phytopathologiques en France incite à une forte réduction des traitements phytosanitaires tout en maximisant le rendement et la qualité des productions. Dans ce contexte, il apparaît indispensable de mieux comprendre les interactions entre l'arbre, son pathogène, et leur environnement, qui s'articulent pour le cas de la tavelure du pommier autour de la durée d'humectation des feuilles. Au cours de ce travail nous nous sommes intéressés à ce paramètre pour essayer de mieux comprendre les interactions entre microclimat de l'arbre et durée d'humectation. L'étude s'est déroulée en trois étapes majeures : la modélisation de l'évaporation d'une goutte sur un support végétal, l'étude expérimentale de la mouillabilité des feuilles de pommier, et l'étude expérimentale de la variabilité spatiale de la durée d'humectation sous un couvert de pommiers.

Ce travail a permis d'explicitier la forte variabilité intra-couronne de la durée d'humectation via la prise en compte de la structure de l'arbre et de la dynamique horaire du microclimat. Le modèle développé, au-delà des liens déjà connus entre l'intensité du flux évaporatif et les variables climatiques, a montré la sensibilité importante du temps d'évaporation à la mouillabilité du support via la forme de la goutte d'eau, mettant en avant la nécessité de quantifier au mieux cette interaction goutte support via l'estimation des angles de contact statiques et dynamiques.

Mots – clés : Durée d'humectation, évaporation, microclimat, mouillabilité,

Abstract

Apples, which are the most cultivated fruit in France, are mainly endangered by the fungal pathogen *Venturia inaequalis* that cause apple scab disease on apple. This disease can be responsible of major products loss unless orchards are treated against apple scab. Nowadays in France, the phytopathological diseases management policies are encouraging growers to reduce considerably the use of pesticides, while keeping a high quality and yield level. In this context, one must understand better how the plant, the pathogen and their environment, interact with each other: for apple scab, the most important environmental parameter is leaf wetness duration. During this work, we studied leaf wetness duration to understand the interactions that occur between the tree microclimate and the wetness duration. To do that we divided our work in three major steps : the modeling of evaporation of a droplet at rest on a leaf, the experimental study of apple leaves wettability, and the experimental study of wetness duration spatial variability within an apple trees orchard.

This study led us to clarify the strong intra-crown variability of leaf wetness duration through the consideration of tree structure and hourly dynamics of microclimate. The model we developed, beyond the known links between the evaporative flux intensity and the climatic parameters, showed a strong sensibility of the evaporation duration to the substrate wettability, highlighting the necessity to quantify at best this interaction, through the estimation of static and dynamic contact angles.

Keywords : Wetness duration, evaporation, microclimate, wettability