

**UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER II

Formation Doctorale : Sciences du sol
Ecole Doctorale : Biologie intégrative

par

Jihène ABID KARRAY

Le 20/11/2006

**Bilan hydrique d'un système de cultures intercalaires
(olivier- culture maraîchère) en Tunisie centrale :
approche expérimentale et essai de modélisation**

JURY

M. Marc VOLTZ
M. Nader KATERJI
M. Yves COQUET
M. Jean-Paul LHOMME
M. Nétij BEN MECHLIA
M. Jean ALBERGEL
M. Jean-Christophe POUSSIN

Directeur de recherche, INRA
Directeur de Recherche, INRA.
Maître de Conférence, INAPG.
Directeur de Recherche, IRD.
Professeur, INAT.
Directeur de Recherche, IRD
Chargé de Recherche, IRD.

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Co-directeur de thèse
Examineur
Invité

Remerciements

Le travail dont vous allez lire la synthèse est le résultat de collaborations multiples. Je me dois de remercier ici toutes les personnes initiatrices de l'étude, celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail de thèse de doctorat et celles qui m'ont soutenue tout au long de ces longues années de travail. Qu'elles soient ici remerciées et soient assurées que sans elles, ce travail n'aurait vu le jour.

Au début, je voudrais remercier l'IRD-DSF de m'avoir attribué une bourse de thèse, l'US DIVHA, l'UMR LISAH et l'UR CLIFA d'avoir financé ce travail.

Je remercie Mr J. CLAUDE et Mr A. CORNET, Représentants de l'IRD en Tunisie, de m'avoir fourni un environnement adéquat au sein de l'IRD-Tunis tout au long de ces années et de m'avoir permis d'y travailler dans de bonnes conditions.

Je voudrais aussi remercier Mr JEAN-PAUL LUC qui a été mon directeur de thèse durant les premières années de travail ; je le remercie de m'avoir assistée et guidée sur le terrain durant la conduite de la partie expérimentale. Je suis reconnaissante à Mr PATRICK LE GOULVEN d'avoir mis à ma disposition les conditions logistiques et financières qui m'ont permis d'effectuer le travail expérimental.

Mr JEAN-PAUL LHOMME m'a encadré durant la rédaction de la thèse avec un savoir et une rigueur scientifique incontestables. Il a su me transmettre l'esprit de modéliser le fonctionnement des systèmes naturels. Ses conseils concernant la présentation des résultats ainsi que ses corrections pertinentes et minutieuses ont permis à la thèse d'être ainsi présentée. Il a toujours été disponible avec sourire et patience. Je m'estime chanceuse d'avoir travaillé avec lui.

Cette thèse doit beaucoup à Mr NETIJ BEN MECHLIA ; je lui exprime ma profonde reconnaissance pour m'avoir initiée au goût de la recherche depuis mon projet de fin d'étude de l'INAT jusqu'à ce jour. L'aide compétente qu'il m'a apportée, sa patience, ses conseils scientifiques, son encouragement et sa disponibilité ont été irréprochables. Son esprit critique m'a été très précieux pour structurer ce travail et améliorer la qualité des différents chapitres.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Mr JEAN ALBERGEL, pour son support infailible, sa gentillesse, son aide précieuse aussi bien à Tunis qu'à Montpellier. Je le remercie de m'avoir accordé toutes les facilités pour venir à bout de ce travail. Ses conseils et ses critiques lors des réunions du comité de pilotage de thèse étaient très constructifs.

Mes sincères remerciements s'adressent à Mr NADER KATERJI, et Mr YVES COQUET qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Leurs remarques et critiques pertinentes ont permis d'améliorer la première version de la thèse. Je remercie également Mr JEAN-CHRISTOPHE POUSSIN d'avoir accepté d'être membre du jury et d'examiner cette thèse.

J'exprime ma gratitude à Mr MARC VOLTZ pour son accueil à Montpellier; les discussions scientifiques que j'ai eues avec lui et ses commentaires ont été fort utiles et constructifs.

J'aimerais par ailleurs souligner la contribution importante réalisée par Mr MONCEF MASMOUDI qui m'a apporté ses connaissances en informatique, en électronique et en traitement des données. Son savoir technique a été essentiel puisqu'il a assuré la conception des dispositifs d'étalonnage des capteurs de flux de sève et de la coloration de la surface conductrice de l'olivier. Qu'il trouve ici mes remerciements les plus profonds pour son aide, ses encouragements et son amitié.

Mr FREDERIC DO a bien voulu me faire partager son savoir concernant la mesure du flux de sève, durant un stage à l'UR CLIFA. Il a répondu, durant des heures de discussion, à mes questions à propos des problèmes techniques et a participé à l'interprétation des données. Je lui exprime ma gratitude et mes sincères remerciements. Mes sincères remerciements vont également à Mr ALAIN ROCHETEAU pour sa patience et son savoir précieux : il m'a permis d'apprendre à construire des capteurs de flux de sève et à manipuler les programmes des centrales d'acquisition de données.

Les expérimentations sur le terrain et la qualité des données utilisées doivent beaucoup à Mr. BEN YOUNES. Sa patience et son expérience m'ont beaucoup appris et m'ont évité de nombreux errements me faisant gagner un temps précieux. La qualité de ses relations humaines m'a permis de travailler dans de bonnes conditions dans un milieu souvent difficile. Ma reconnaissance va aussi à Mr JAMEL BOURAOUI qui m'a fourni, sans hésitation, les données climatiques fort précieuses avec une rapidité et une gentillesse extraordinaires.

Mr JEAN-CLAUDE REMY, Mme LYDIE GUILIONI, Mr ANDRE GARNIER, Mr CHRISTOPHE CUDENNEC, Mr ZOUHAIR NASR, Mr HEDI DAGHARI, Mr ABDELAZIZ ZAIRI, Mr CHRISTIAN LEDUC, Mr SAID KHLAFALLAH, Mr JALLOUL BACCOUCHE, Mr JEAN PHILIPPE LUC, Melle ZAKIA JENHAOUI, Mr et Mme TEMPLE BOYER sont intervenus à un moment ou à un autre dans ce travail, je les en remercie très sincèrement.

Une dette de reconnaissance va à Melle INSAF MEKKI, pour son aide sur le terrain et dans le traitement des données, son encouragement, sa gentillesse inouïe, sa disponibilité et puis surtout son amitié. Les bons moments passés ensemble à Montpellier m'ont permis de supporter l'éloignement de la famille et de découvrir la vraie amitié.

Un grand merci à la famille MALLAT, puisqu'elle a accepté que l'on envahisse la parcelle de matériels hétéroclites. Elle a accepté les contraintes d'une recherche encombrante sans nous en tenir rigueur.

Un merci tout particulier à mes cousines, Mme SALMA ABID MNIF et Melle KATIA FADENE, pour leur aide précieuse et leur fraternité qui m'ont été d'un soutien inestimable durant des périodes difficiles.

Je tiens à remercier Melle IMENE MAHJOUR, Mr MOHAMED GHRAB, Mme CHARFI MASMOUDI, Mr SEBASTIEN CODIS, Mr MATTHIEU CORN, Mr JEAN CHAMPION, Mme RIM ZITOUNA CHAIBI, pour leurs amitiés et aides précieuses à de multiples étapes de la thèse.

Je suis très reconnaissante à Mr SAID NOUIRA d'avoir accepté, malgré les difficultés, d'aménager mon emploi du temps comme enseignante des TD de climatologie à l'ISSBAT pour que je puisse terminer la thèse dans les délais.

Une attention particulière est adressée aux secrétariats de l'IRD -Tunis et de LISHA-Montpellier qui m'ont aidé dans les voyages, séjours et relations avec l'Université. J'ai eu le plaisir de côtoyer durant ces quelques années à Tunis et à Montpellier des stagiaires et des thésards à qui j'exprime ma profonde sympathie.

Cette thèse n'aurait pas pu se réaliser sans l'appui moral, matériel et inconditionnel de mes parents, ABDESSLEM ABID et NOURA KARRAY ABID, de mon mari MAHER KARRAY et de mon frère MAKRAM ABID. Avec leurs encouragements, leur assistance et leur amour, mes parents ont toujours été là pour me pousser jusqu'au bout de «mes» rêves. Mon mari a bien repris le flambeau. Quand le moral descend au plus bas il était toujours là à me rappeler que je suis assez forte pour arriver au bout du chemin et aussi que la vie est belle quand on rentre chez soi après une dure journée de terrain ou après avoir travaillé tard le soir.

Dédicaces

Ce travail est dédié à tous ceux qui m'ont inculqué un savoir ou une connaissance, à tous mes instituteurs, mes professeurs d'études secondaires et supérieures.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABELAUX

LISTE DES SYMBOLES

RESUMÉ

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I

CADRE DE L'ETUDE 4

Introduction 4

1- Les ressources hydriques et leur gestion 5

1-1- En Tunisie 5

1-2- En Tunisie Centrale 6

2- Cadre de l'étude 7

2-1- Projets MERGUSIE et HYDROMED 7

2-2- Système de culture étudié 8

3- Cultures intercalaires 9

3-1- Terminologie et intérêt 9

3-2- Interactions 12

3-3- Modifications microclimatiques 17

3-4- Efficience et évaluation des systèmes de cultures intercalaires 22

4- Système de culture intercalaire : olivier –culture maraîchère 27

4-1- Etude du fonctionnement hydrique 27

4-2- La culture de l'olivier 28

Conclusion 30

CHAPITRE II

CONSOMMATION EN EAU DES CULTURES 32

Introduction 32

1-Méthodes de détermination de l'évapotranspiration réelle des cultures 33

1-1- Approche hydrologique 33

1-2- Approche micro-météorologique 38

1-3- Approche physiologique.....	39
2- Méthodes de mesure du flux de sève	41
2-1- Principe de base	41
2-2- Méthode par impulsion de chaleur	42
2-3- Méthode du bilan de chaleur	43
2-4- Méthode de dissipation de chaleur.....	44
2-5- Choix de la méthode de mesure du flux de sève.....	45
3- Mesure du flux de sève par la méthode de dissipation de chaleur	46
3-1- Dispositif et théorie de la méthode	46
3-2- Détermination de la densité du flux de sève et erreurs de mesure.....	50
3-3- Méthode modifiée en chauffage alternatif (Do-Rocheteau).....	54
Conclusion.....	56

CHAPITRE III

MODELISATION DES TRANSFERTS HYDRIQUES DANS L'ASSOCIATION OLIVIER – CULTURE ANNUELLE.....

Introduction	58
1- Différents types de modèles de systèmes de cultures intercalaires.....	59
2- Représentation conceptuelle du système culture annuelle –olivier	60
3- Équations du bilan hydrique.....	62
3-1- Réservoir R1.....	62
3-2- Réservoir R2.....	63
3-3- Réservoir R3.....	64
3-4- Calcul des termes de drainage.....	64
4- Paramétrisation des termes d'évaporation et d'évapotranspiration	65
4-1- Évaporation du sol nu	66
4-2- Évapotranspiration de la culture	67
4-3- Transpiration de l'olivier	69
5- Paramétrisation du transfert latéral d'eau.....	70
5-1- Équations générales.....	71
5-2- Équations en présence de la culture intercalaire.....	71
5-3- Équations en absence de la culture	74
6- Mise en œuvre du modèle : Paramètres et variables	74
Conclusion.....	75

CHAPITRE IV

MATERIELS ET METHODES	77
Introduction	77
1- Présentation du cadre de l'expérimentation	77
1-1- Climat	79
1-2- Occupation du sol	80
1-3- Ressources en eau	81
2- Dispositif expérimental	82
2-1- Choix de la parcelle de mesure	82
2-2- Profil pédologique	83
2-3- Conduite de l'essai	84
2-4- Protocole de mesures	85
3- Campagnes de mesure et conditions générales de l'essai	87
3-1- Calendrier des cultures	87
3-2- Conditions hydriques	88
3-3- Conditions thermiques	90
4- Suivi des éléments du bilan hydrique du sol	90
4-1- Capacité au champ et point de flétrissement permanent.....	90
4-2- Densité apparente	91
4-3- Mesure de la tension d'eau	91
4-4- Mesure de l'humidité du sol	92
5- Dispositif expérimental de mesure du flux de sève sur olivier	94
5-1- Développement des capteurs.....	94
5-2- Installation des capteurs et acquisition des données	96
5-3- Etalonnage des capteurs.....	97
6- Détermination de certaines caractéristiques biologiques de l'olivier	101
6-1- Profondeur racinaire de l'olivier.....	101
6-2- Surface conductrice de l'olivier.....	103
Conclusion	103

CHAPITRE V

LES FLUX DE SEVE SUR OLIVIER : ANALYSE	105
Introduction	105
1- Etude de la variabilité entre capteurs et entre arbres	105
1-1- Variabilité du flux entre capteurs à l'échelle horaire	106

1-2- Variabilité du flux de sève entre les capteurs à l'échelle saisonnière	108
1-3- Effet de l'orientation des capteurs sur la variabilité journalière du flux	109
1-4- Variabilité inter-arbre et extrapolation des mesures du flux de sève à l'échelle du verger	111
1-5- Importance du flux nocturne	113
2-Variations du flux de sève en fonction de paramètres climatiques et hydriques	116
2-1- Rayonnement global et du déficit de saturation de l'air	116
2-2- ETo et humidité du sol	118
3- Transpiration de l'olivier à l'échelle parcellaire	120
3-1- Changement d'échelle : arbre -parcelle	120
3-2- Evolution saisonnière	121
4- Relation entre la transpiration de l'olivier et le stock hydrique	124
4-1- Evolution du rapport τ /ETo en fonction du stock hydrique	124
4-2- Paramétrisation de la transpiration de l'olivier	126
Conclusion	127

CHAPITRE VI

TRANSFERTS HYDRIQUES DANS LE SYSTEME OLIVIER-CULTURE ANNUELLE : RESULTATS ET VALIDATION DU MODELE

Introduction	129
1- Analyse des conditions hydriques des différentes campagnes	129
1-1- Campagne de pomme de terre 2002	129
1-2- Campagne du petit pois 2003	133
1-3- Campagne de pomme de terre 2003-2004	137
1-4- Quelques aspects du fonctionnement hydrique	141
2- Validation du modèle de transferts hydriques	145
2-1- Distribution des sites de mesure	145
2-2- Estimation de la transpiration de l'olivier	146
2-3- Comparaison des réserves disponibles	147
2-4- Importance des flux hydriques latéraux	157
Conclusion	159

CONCLUSION GENERALE	160
---------------------------	-----

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....165

ANNEXE 1

ANNEXE 2

ANNEXE 3

ANNEXE 4

LISTES DES FIGURES

Chapitre II

- II.1. Dispositif de mesure de la méthode de dissipation de chaleur de Granier : le capteur formé par une sonde chauffée et une sonde de référence est inséré au niveau du bois conducteur. Il est alimenté par un courant provenant d'une batterie. Le signal envoyé est enregistré par la centrale d'acquisition où ils sont stockés (D'après Lu et al., 2004).

Chapitre III

- III.1. Schéma des compartiments des différents réservoirs R1, R2 et R3 et leurs dimensions (Z_r , l_t , l_s , w_c et w_t), la zone délimitée en pointillé représente l'unité de base représentative du système.

Chapitre IV

- IV.1.a Localisation du gouvernorat de Kairouan : centre- ouest de la Tunisie
- IV.1.b. Carte des limites administratives de la zone avale d'étude du MERGUSIE
- IV.2a. Pluviométrie annuelle moyenne à la station de Chébika (1979-2003)
- IV.2b. Pluviométrie moyenne mensuelle pendant la période d'étude à Chébika (2002-2004)
- IV.3 Parcelle d'étude: l'olivier avec la culture de pomme de terre en intercalaire et quelques sites de mesures (avril 2002)
- IV.4. Répartition des sites de mesures et emplacements des tubes d'accès de la sonde à neutrons et des tensiomètres au niveau des réservoirs R1, R2 et R3.
- IV.5. Schéma chronologique des différentes campagnes des cultures de pomme de terre (pdt) et de petit pois (pp) effectuées pendant cette étude avec les dates de plantation et de récolte de chaque culture.
- IV.6. Evolution de la pluviométrie P et évapotranspiration de référence ET_0 pendant les 3 années d'étude à Chébika.
- IV.7. Evolution des températures moyennes mensuelles minimales T_{min} et maximales et T_{max} durant la période d'étude à Chébika.
- IV.8.a Sondes de fluxmètres à différentes étapes de la fabrication
- IV.8.b. Fluxmètre assemblé
- IV.9. Capteurs de flux de sève installés au niveau de l'arbre selon trois directions

- IV.10. Dispositif d'étalonnage des capteurs de mesure du flux de sève sur une branche d'olivier au laboratoire.
- IV.11. Relation entre la densité de flux de sève F_d ($l\ dm^{-2}\ h^{-1}$) et l'indice de température K_a (adimensionnel) pour différentes puissances de chauffage P (W).
- IV.12. Relation entre le paramètre a et la puissance de chauffage P (W).
- IV.13. Coupe transversale d'une branche d'olivier colorée à la safranine montrant la partie conductrice du bois (couleur rouge)

Chapitre V

- V.1. Variation de la densité du flux de sève F_d ($l\ dm^{-2}\ h^{-1}$) mesurée le 31/08/03 sur les quatre arbres (A1 à A4) dans les trois directions: Nord (N), Sud Est (SE) et Sud Ouest (SO).
- V.2. Evolution du rapport entre les densités du flux moyennes de différents couples formées par les capteurs selon les directions N-SE (F_{d-N}/F_{d-SE}), N-SE (F_{d-N}/F_{d-SO}) et SE-SO (F_{d-5}/F_{d-6}) du 14/08/03 au 21/08/03 avant et après irrigation (Ir).
- V.3. Relation entre le flux de sève journalier F_{di} ($l\ dm^{-2}\ j^{-1}$) mesuré par chaque sonde (1 à 12) et la moyenne journalière du flux de sève F_{dm} ($l\ dm^{-2}\ j^{-1}$), données de 95 jours.
- V.4. Evolution de la densité du flux de sève pour les trois directions : Nord (N), Sud Est (SE) et Sud Ouest (SO) de l'arbre 3 F_{di-A3} en fonction de sa densité moyenne du flux de sève F_{dm-A3} .
- V.5. Variation de la densité moyenne du flux de sève des quatre arbres F_{dm} en fonction de celle de chaque arbre F_{dm-Ai} .
- V.6. Evolution de la densité moyenne du flux de sève des deux arbres A1 et A2 F_{dm} (1,2) du 03/06/03 au 07/06/03.
- V.7. Evolution de la densité de flux de sève moyenne des 12 capteurs F_{dm} ($l\ dm^{-2}\ h^{-1}$), du rayonnement global R_g ($J\ cm^{-2}\ h^{-1}$) et du déficit de saturation de l'air VPD (kPa) du 16/11/03 au 20/11/03.
- V.8. Variation de la densité du flux de sève moyenne des 12 capteurs F_{dm} pour deux journées (le 15/08/03 et 17/08/03) ayant la même demande climatique ET_o avant et après irrigation du 16/08/03.
- V.9. Evolution de la densité du flux de sève moyenne des 4 arbres F_{dm} et celle de l' ET_o avant et après l'irrigation du 16/08/03.
- V.10. Evolution saisonnière de la transpiration moyenne des 4 arbres τ et celle de l' ET_o du 30/04/02 au 16/08/04.
- V.11. Evolution du rapport τ/ET_o du 30/04/02 au 16/08/04
- V.12. Evolution du stock hydrique moyen sous olivier $S-Am$, du rapport entre la transpiration de l'olivier τ et l' ET_o (τ/ET_o) du 04/05/03 au 31/08/03. CC est la capacité au champ et PPF est le point de flétrissement permanent.
- V.13. Relation entre la transpiration de l'olivier estimée $\tau-e$ par l'équation (V.3) et celle mesurée par la méthode du flux de sève $\tau-m$.

Chapitre VI

- VI.1. Evolution de l'*ETo* et des différents apports hydriques: pluie *P*, irrigation de la pomme de terre *Ipdt* et de l'olivier *Iolivier* du 01/02 au 31/07/2002.
- VI.2. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de la culture intercalaire *S-Cm* (mm) en relation avec les précipitations *P* (mm), l'irrigation *Ipdt* (mm), la capacité au champ *CC* et le point de flétrissement permanent *PFPP* du 31/03/02 au 02/07/02.
- VI.3. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de l'olivier *S-Am* (mm) en relation avec les précipitations *P* (mm), la capacité au champ *CC* et le point de flétrissement permanent *PFPP* du 31/03/02 au 02/07/02.
- VI.4. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau du sol nu (*S-Em*, mm) en relation avec les précipitations *P* (mm), la capacité au champ *CC* et le point de flétrissement permanent *PFPP* du 31/03/02 au 02/07/02.
- VI.5. Evolution de l'*ETo* et des différents apports hydriques: pluie *P* et irrigation de la culture du petit pois *Ipp* du 01/01 au 30/06/2003.
- VI.6. Evolution du stock hydrique moyen au niveau du petit pois *S-Cm* (mm) en relation avec la capacité au champ *CC*, du point de flétrissement permanent *PFPP*, les apports hydriques sous forme de pluie *P* et d'irrigation de la culture *Ipp* du 19/03/03 au 30/06/03.
- VI.7. Evolution du stock hydrique moyen au niveau de l'olivier *S-Am* (mm) en relation avec les pluies *P* du 01/01 au 30/06/03, *CC* est la capacité au champ et *PFPP* est le point de flétrissement permanent .
- VI.8. Evolution du stock hydrique moyen au niveau du sol nu *S-Em* (mm) en relation avec la pluie *P* du 01/01 au 30/06/03, *CC* est la capacité au champ et *PFPP* est le point de flétrissement permanent .
- VI.9. Evolution de l'*ETo* et des différents apports hydriques: pluie *P*, irrigation de la pomme de terre *Ipdt* et de l'olivier *Iolivier* du 01/07/03 au 31/01/2004.
- VI.10. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de la culture intercalaire *S-Cm* (mm) en relation avec les apports hydriques sous forme de pluie *P* et d'irrigation *Ipdt* du 23/09/03 au 15/01/04, *CC* est la capacité au champ et *PFPP* est le point de flétrissement permanent.
- VI.11. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de l'olivier *S-Am* (mm) en relation avec les apports hydriques sous forme de pluie *P* et d'irrigation *Iolivier* du 01/07 au 31/12/03, *CC* est la capacité au champ et *PFPP* est le point de flétrissement permanent.
- VI.12. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau du sol nu *S-Em* (mm) en relation avec les apports hydriques sous forme de pluie *P* du 01/07 au 31/12/03, *CC* est la capacité au champ et *PFPP* est le point de flétrissement permanent.
- VI.13. Evolution de la charge hydraulique *H* (cm) au niveau du site *C1* pour les profondeurs 30 et 60 cm en relation avec les irrigations de la pomme de terre *Ipdt* du 11/05/02 au 08/06/02, *CC* est la charge hydraulique correspondant à la capacité au champ.

- VI.14. Evolution de la charge hydraulique H (cm) au niveau du site B1 pour les profondeurs 30 et 60 cm en relation avec les irrigations de la pomme de terre I_{pdt} du 11/05/02 au 08/06/02, CC est la charge hydraulique correspondant à la capacité au champ.
- VI.15. Evolution du profil hydrique au niveau de la culture du petit pois $S-Cm$ du 04/05 au 26/05/03 suite aux irrigations du 08/05/03 et 14/05/03.
- VI.16. Evolution du profil hydrique au niveau de l'olivier $S-Am$ du 15/08 au 05/09/03 suite à l'irrigation du 16/08/03.
- VI.17. Campagne de pomme de terre de saison 2002. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 31/02 au 30/06/02, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pdt} et les précipitations P .
- VI.18. Campagne de pomme de terre de 2002. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 31/02 au 30/06/02, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pdt} et les précipitations P .
- VI.19. Campagne du petit pois 2003. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 19/03 au 30/06/03, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir du petit pois (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pp} et les précipitations P .
- VI.20. Campagne du petit pois 2003. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 19/03 au 30/06/03, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir du petit pois (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pp} et les précipitations (P).
- VI.21. Campagne de pomme de terre (2003-2004). Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 23/09/03 au 15/01/04, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pdt} et les précipitations P .
- VI.22. Campagne de pomme de terre (2003-2004). Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 23/09/03 au 15/01/04, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pp} et les précipitations P .
- VI.23. Période de mesure en absence de culture intercalaire du 23/06 au 30/07/02. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la culture (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec l'irrigation de l'olivier $I_{olivier}$ et les précipitations P .
- VI.24. Période de mesure en absence de culture intercalaire du 23/06 au 30/07/02. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la culture (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec l'irrigation de l'olivier $I_{olivier}$ et les précipitations P .
- VI.25. Evolution des flux latéraux simulés au niveau des 3 réservoirs (L1, L2 et L3, mm) en relation avec les précipitations P et les irrigations I_{pdt} du 31/03/02 au 02/07/02.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

- I.1. Valeurs de la radiation interceptée (MJ m^{-2}), de la biomasse aérienne produite (T h^{-1}) et de l'efficacité de la production de biomasse par rapport à la radiation interceptée (e, g MJ^{-1}) (D'après Corlett et al. (1987) cité par Monteith et al. (1991))
- I.2. Comparaison de l'utilisation de l'eau (WU), de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) des cultures pures et intercalaires (D'après Morris et Garrity, 1993)

Chapitre III

- III.1. Entrées, sorties et paramètres du modèle

Chapitre IV

- IV.1. Variation de l'occupation du sol dans les périmètres irrigués à Kairouan, au Centre et en Tunisie
- IV.2. Variation des superficies irrigables et irriguées dans les périmètres privés et publics à Kairouan, au Centre et en Tunisie
- VI.3. Description des différentes couches du sol du point de vue texture, structure et réaction au HCl.
- IV.4. Dates du déroulement des différentes campagnes de culture avec les quantités d'eau d'irrigation et les pluies enregistrées pendant chaque campagne.
- IV.5. Valeurs des humidités du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent en fonction de la profondeur
- IV.6. Valeurs de la densité apparente (g/cm^3) de chaque horizon
- IV.7. Répartition des racines (%) en fonction de la profondeur
- IV.8. Répartition cumulée des racines par couche de sol

Chapitre V

- V.1. La pente a et R^2 des régressions entre la densité du flux de sève d'une direction donnée (Nord, SE et SO) et la densité moyenne du flux de sève de l'arbre correspondant (A1, A2, A3, A4)
- V.2. Valeurs du flux de sève journalier des deux arbres A1 et A2 $F_{dm}(1,2)$ ($\text{l dm}^{-2} \text{j}^{-1}$), du flux de sève nocturne correspondant $F_{d,n}$ ($\text{l dm}^{-2} \text{h}^{-1}$), de son pourcentage par

rapport au flux journalier et de l'*ETo* journalier (mm) après une irrigation de la pomme de terre effectuée le 20/09/02.

Chapitre VI

VI.1. Répartition des sites de mesures utilisés dans le calcul de la réserve disponible moyenne de chaque sous-unité

LISTE DES SYMBOLES

A_1	superficie de la sous-unité 1 (m^2)
A_2	surface de la sous-unité 2 (m^2)
A_3	surface de la sous-unité 3 (m^2)
b	facteur d'ajustement
D_i	drainage du réservoir R_i ($i = 1,2,3$) dans les couches profondes (mm)
D_a	densité apparente du sol ($g\ cm^{-3}$)
d_u	profondeur de la couche superficielle du sol servant dans le calcul de l'évaporation du sol nu (m)
EET	eau évaporable totale (mm)
EFE	eau facilement évaporable (mm)
E_{si}	évaporation du sol nu du réservoir i ($i = 1,2,3$) (mm)
E_{so}	taux d'évaporation potentiel du sol nu (mm)
ET_c	évapotranspiration de la culture en conditions standards (mm)
ET_{cs}	évapotranspiration de la culture sous stress hydrique (mm)
ETo	évapotranspiration de référence (mm)
ET	évapotranspiration d'une culture (mm)
F_d	densité du flux de sève ($m^3m^{-2}\ s^{-1}$), ($l\ dm^{-2}\ h^{-1}$), ($l\ dm^{-2}\ j^{-1}$)
h	coefficient de transfert de chaleur entre la sonde et le bois ($W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$)
H_i	charge hydraulique moyenne du réservoir R_i ($i = 1,2,3$) (cm)
h_o	coefficient d'échange à flux nul de la sonde thermique ($W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$)
H_s	charge hydraulique à saturation (cm)
I	irrigation (mm)
I_c	irrigation de la culture (mm)
I_t	irrigation de l'olivier (mm)
K	indice de flux
$k_{1,2}$	coefficient de transfert entre R_1 et R_2 (j^{-1})
$k_{1,3}$	coefficient de transfert entre R_1 et R_3 (j^{-1})
$k_{2,3}$	coefficient de transfert entre R_2 et R_3 (j^{-1})
K_a	indice du flux en chauffage alternatif
K_c	coefficient cultural
$K_{c,s}$	coefficient du stress hydrique
K_s	conductivité hydraulique à saturation ($m\ j^{-1}$)

L_1	transfert latéral entre le réservoir R1 et les autres réservoirs (mm)
L_2	flux hydrique latéral entre le réservoir R2 et les autres réservoirs (mm)
L_3	flux hydrique latéral entre le réservoir R3 et les autres réservoirs (mm)
l_s	longueur de la sous-unité 3 (sol nu) (m)
l_t	longueur de la sous-unité 2 (oliviers) (m)
p	fraction de la réserve utile que la plante peut aisément extraire sans réduction de sa transpiration
P	pluie (mm)
Q_r	épuisement du réservoir du sol (mm)
Q_s	quantité totale d'eau puisée de la couche superficielle du sol (mm)
R	ruissellement (mm)
RD	réserve disponible (mm)
RFU	réserve en eau facilement utilisable (mm)
R_i	réservoir i
RU	réserve utile (mm)
S	stock hydrique (mm)
S_{a_i}	surface conductrice de l'arbre i (dm^2)
$S-Am$	stock hydrique de l'olivier (mm)
$S-Cm$	stock hydrique au niveau de la culture intercalaire (mm)
$S-Em$	stock hydrique au niveau du sol nu (mm)
S_o	surface occupée par chaque olivier au niveau de la parcelle (m^2)
T_{ti}	transpiration de l'olivier prélevée dans le réservoir R_i ($i = 1,2,3$) par unité de surface (mm)
VPD	déficit de saturation en vapeur de l'air (kPa)
W	rapport entre l'humidité volumique réelle du sol et celle à saturation
w_c	largeur de la sous-unité 1 (culture annuelle) (m)
w_t	largeur des sous-unité 2 et 3 (olivier et sol nu) (m)
Z_r	profondeur de la couche du sol considérée (m)
α_i	fraction de la transpiration totale de l'olivier prélevée dans le réservoir i
ΔS_i	variation temporelle du stock d'eau dans le réservoir R_i ($i = 1,2,3$) (mm)
ΔT	différence de température entre les deux sondes ($^{\circ}C$)
ΔT_{0a}	différence de température maximale du signal alternatif obtenue à flux nul ($^{\circ}C$)
ΔT_a	différence de température entre les deux sondes en chauffage alternatif

	(°C)
ΔT_{au}	différence de température du signal alternatif au temps t (°C)
ΔT_{max}	différence de température maximale (°C)
ΔT_{off}	différence de température à la fin de la période de non-chauffage (°C)
ΔT_{on}	différence de température à la fin de la période de chauffage (°C)
θ_i	humidité du réservoir i (i = 1,2,3) ($m^3 m^{-3}$)
θ_{CC}	humidité du sol la capacité au champ ($m^3 m^{-3}$)
θ_{PFP}	humidité du sol au point de flétrissement permanent ($m^3 m^{-3}$)
θ_s	l'humidité volumique du sol à saturation ($m^3 m^{-3}$)
$\theta_{s,PFP}$	humidité de la couche superficielle du sol au point de flétrissement permanent ($m^3 m^{-3}$)
$\theta_{s,CC}$	humidité de la couche superficielle du sol à la capacité au champ ($m^3 m^{-3}$)
τ	transpiration par arbre mesurée par la technique du flux de sève ($dm^3 j^{-1}$)
τ_i	prélèvement de l'olivier dans le réservoir Ri (i = 1,2,3) ($dm^3 j^{-1}$)
Λ	distance orthogonale entre les demi entre de deux réservoirs (m)
Λ_{ij}	distance orthogonale entre les demi centres des réservoirs Ri et Rj (m)

RESUMÉ

Le système de cultures intercalaires est généralement utilisé afin d'assurer une utilisation efficace de l'eau. Cette étude, conduite en Tunisie Centrale au niveau d'une association olivier-culture maraîchère, a pour objectif la quantification et la modélisation des transferts hydriques entre les différentes composantes de ce système se basant sur la méthode du bilan hydrique. Le système étudié a été subdivisé en 3 sous-unités occupées respectivement par la culture intercalaire, l'olivier et l'inter-rang maintenu en sol nu. Trois campagnes de cultures ont été suivies: deux cultures printanières (pomme de terre et petit pois) et une culture automnale (pomme de terre). L'approche de modélisation, basée sur l'équation du bilan hydrique, tient compte des flux latéraux entre les sous-unités. L'évolution du stock hydrique montre que l'olivier puise dans le réservoir de la culture et dans celui du sol nu. Des mesures du flux de sève sur quatre arbres munis chacun de 3 capteurs ont montré une variabilité intra et inter-arbre. La moyenne des densités des flux représente la transpiration de l'olivier à l'échelle du verger. Les résultats de la modélisation des transferts hydriques ont montré une assez bonne adéquation aux mesures dans le cas où les flux hydriques latéraux entre réservoirs sont pris en compte. Ce travail apporte des éléments tant sur le plan de l'expérimentation que sur celui de la modélisation du fonctionnement hydrique d'un système de cultures intercalaires. Ces approches sont transposables à d'autres associations.

ABSTRACT

Intercropping system is usually adopted to improve water use efficiency. This study, was conducted in Central Tunisia and concern the intercrop olive/annual crop. Its objective is to quantify and to model water transfers between the system components using water balance method. The system was divided into 3 subunits occupied respectively by the annual crop, olive tree and the inter-alley kept as bare soil. Three crop cycles were studied: two spring crop (potatoes and peas) and one fall crop (potatoes). The modeling approach is based on water balance takes into account lateral flows between subunits. Water content evolution indicates that olive tree takes water from crop reservoir and also from bare soil to a lesser extent. Sap flow measurements on 4 trees each one equipped with 3 probes have shown inter and intra variability. Mean sap flow density was used to estimate stand transpiration. Model outputs agreed rather well with measurements when lateral flow are taken into account. This study provides new elements on modeling water transfer in intercropping system which can be transposable to other intercropping system.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau constitue en Tunisie, comme dans la plupart des pays méditerranéens une ressource limitée. En face de cette contrainte, les agriculteurs ont toujours cherché à valoriser au mieux des pluies faibles et irrégulières. De nombreux petits ouvrages hydrauliques et systèmes de cultures ont été développés en fonction des caractéristiques climatiques et édaphiques locales.

Récemment, la mobilisation des ressources hydriques en Tunisie Centrale a permis de fournir à une agriculture traditionnellement pluviale des quantités d'eau limitées. Ceci a incité les agriculteurs à adopter le système de cultures intercalaires en introduisant des cultures annuelles irriguées au niveau des vergers. Ils estiment que l'eau apportée par irrigation à la culture intercalaire peut être utilisée par l'arboriculture pérenne. On assiste dans cette région à un passage d'un système pluvial extensif vers un système irrigué semi-intensif associant arboriculture et cultures annuelles. Bien que ce système soit de plus en plus utilisé surtout dans les oliveraies ayant une faible densité de plantation, son fonctionnement reste mal connu en raison des interactions existant entre les deux cultures. La conception du système est basée sur l'hypothèse de complémentarité spatiale: l'arbre bénéficie de la quantité d'eau apportée à la culture intercalaire par irrigation. La vérification de cette hypothèse et la modalité avec laquelle ces processus ont lieu doivent servir à optimiser le système par un choix judicieux du type de culture, de la saison de plantation et par une meilleure gestion de l'irrigation.

L'analyse bibliographique a révélé que peu d'études sont consacrées à l'analyse d'un tel système du point de vue hydrique. Sa caractérisation a souvent concerné l'interception de la radiation solaire qui est plus documentée que l'interaction au niveau du sol, plus difficile à étudier. Vu l'importance que revêt la ressource hydrique au niveau du bassin méditerranéen et en Tunisie en particulier, la compréhension du fonctionnement de ce système, qui repose d'abord sur une quantification des flux évaporatoires s'avère nécessaire pour une meilleure utilisation de cette ressource.

Cette étude concerne donc le fonctionnement hydrique de l'association olivier- culture maraîchère en Tunisie Centrale. Cette association a été retenue en raison de son importance croissante dans cette région de Tunisie. Pour le gouvernorat de Kairouan, où se trouve la zone d'étude, avec plus de 300 000 h d'oliveraies et 324 Mm³ d'eau mobilisable, l'extension de ce

Le système nécessite la caractérisation de son fonctionnement afin d'en déduire ses performances et ses limitations. Les cultures adoptées sont la pomme de terre et le petit pois qui sont plantées au printemps et en automne.

L'objectif de l'étude est d'une part la mise en œuvre d'un dispositif expérimental approprié aux cultures hétérogènes par le recours à des techniques qui permettent des mesures séparées des flux transpiratoires et d'autre part la modélisation des transferts hydriques entre le milieu environnant et les différentes composantes du système. Si la consommation hydrique de la culture intercalaire peut être estimée par la méthode du bilan hydrique, les méthodes de mesure du flux de sève au niveau des troncs des arbres constituent, quant à elles, un moyen de mesure directe de la transpiration de l'olivier.

Le document est organisé en six chapitres. Le premier chapitre décrit le contexte d'amélioration de l'utilisation des ressources hydriques par l'adoption de système de cultures intercalaires. Après une présentation sommaire des ressources hydriques de la région et du cadre du travail, un inventaire des avantages du système de cultures associées ainsi qu'une analyse comparative des interactions entre les composantes du système sont présentés.

Les différentes méthodes de mesure de l'évapotranspiration sont exposées dans le deuxième chapitre (approches hydrologique, micro-météorologique et physiologique) afin de justifier les choix faits dans cette étude pour l'estimation des flux hydriques. Les méthodes de mesure du flux de sève sont détaillées (principe de mesure et domaine d'utilisation) dans le but d'argumenter le choix de la technique adoptée sur l'olivier.

Une approche de modélisation des transferts hydriques en relation avec les paramètres climatiques et les apports hydriques est développée dans le troisième chapitre. Elle est basée sur une compartimentation du système et sur des bilans hydriques séparés pour chaque compartiment.

Le protocole expérimental ainsi que les conditions environnementales de la zone et du site d'études sont présentés dans le quatrième chapitre. La mise en place des mesures au niveau du sol (humidité et tension de l'eau) et du végétal (mesure du flux de sève) est détaillée. De même, les différentes étapes relatives à l'estimation de la transpiration de l'olivier (étalonnage des capteurs et détermination de la surface conductrice) sont présentées.

Les résultats concernant la mesure de flux de sève sur olivier sont détaillés dans le cinquième chapitre. La variabilité des flux enregistrés y est montrée ainsi que leurs relations avec les paramètres climatiques et les apports hydriques. La transpiration de l'olivier a été déterminée sous différentes conditions d'alimentation en eau et de demande évaporatoire. Une paramétrisation du flux évaporatoire de l'olivier en fonction de la demande climatique (ET_0) et de l'humidité du sol y est développée.

Le dernier chapitre analyse les résultats des mesures du stock hydrique et de tension de l'eau dans le sol. Afin de valider l'approche de modélisation développée dans le chapitre III, une confrontation des résultats des simulations avec les mesures est présentée par campagne de culture. Elle permet de discuter les performances du modèle en fonction des particularités de chaque culture et de sa date d'installation.

CHAPITRE I

CADRE DE L'ÉTUDE

Introduction

En zone semi-aride de la région méditerranéenne, les conditions climatiques sont définies par une forte irrégularité des précipitations et des étés chauds et secs. Ceci constitue une limitation majeure à l'extension de certaines cultures en régime pluvial. Les moyennes pluviométriques ne font apparaître, ni la répartition aléatoire des précipitations, ni l'importance des averses de forte intensité qui provoquent le ruissellement et accentuent le déséquilibre d'un bilan hydrique déjà négatif. Les productions agricoles sont alors tributaires des conditions hydriques qui sont la plupart du temps déficitaires. De plus, d'après la plupart des scénarios de changements climatiques, l'été du bassin méditerranéen deviendra encore plus sec et chaud (IPCC, 2001). Or, le développement et la régularité de la production agricole sont étroitement liés à une bonne alimentation en eau des cultures. L'irrigation, quand des ressources pérennes sont disponibles, est pratiquée essentiellement pour les cultures à forte demande en eau et/ou à haute valeur marchande (cultures maraîchères et quelques espèces arborées) et d'une façon occasionnelle, comme irrigation d'appoint, pour les céréales.

Dans ces régions, la principale préoccupation des agriculteurs est de rechercher et d'inventer des techniques qui permettent d'assurer une production aussi régulière que possible. Ainsi, en Tunisie, plusieurs aménagements hydrauliques sont utilisés, dans le but de la conservation et l'amélioration de l'utilisation des eaux de pluies. Le choix de ces aménagements est conditionné essentiellement par des facteurs topographiques (relief) et climatiques (pluviométrie annuelle). Un classement de ces ouvrages hydrauliques selon les régions climatiques peut expliquer la répartition géographique qui se présente comme suit :

- En zone subhumide ($P > 550$ mm), étant donné que les pluies couvrent largement les besoins en eau des cultures hivernales, on stocke l'excédent d'eau dans des lacs collinaires pour être utilisé en période sèche.

- En zone semi-aride, ($400 < P < 550$ mm), la pluie couvre tout juste les besoins en eau des cultures hivernales et arboricoles. Pour en augmenter l'efficacité et préserver les sols, les eaux de ruissellement sont stockées et utilisées grâce aux *terrasses* et aux *banquettes*.
- En zone aride ($100 < P < 300$), les eaux de ruissellement sont collectées à l'aide d'aménagement de type *Meskat* dans les zones les moins arides ($200 < P < 300$) (ce sont des impluviums récoltant les eaux de pluie afin de les acheminer aux arbres, essentiellement des oliviers, plantés dans les vallons et aux bas des versants) et *Jessour* dans les zones plus arides ($100 < P < 200$) (il s'agit des superficies délimitées en aval par des barrages aménagés au fond des oueds et piégeant les eaux de pluie).

En plus de ces aménagements, il existe d'autres techniques, moins répandues mais non moins importantes, utilisées à l'échelle locale (El Amami, 1984).

1- Les ressources hydriques et leur gestion

1-1- En Tunisie

En Tunisie, comme dans la plupart des pays méditerranéens, l'eau surtout de bonne qualité, constitue une ressource limitée. Durant les dernières décennies, une phase d'aménagement et d'équipement moderne a été conduite afin d'accroître l'offre utilisable vu que les moyens d'aménagements traditionnels ne répondent plus à la demande croissante de la ressource hydrique. En atteignant les limites de la mobilisation des eaux de surfaces, on s'oriente, d'une part, vers l'utilisation des eaux non conventionnelles et d'autre part, vers l'approfondissement des forages. Ceci a engendré le rabattement des niveaux des aquifères ce qui constitue un problème important. En effet, sur 4000 millions de m³ de ressources exploitables par an en eau de surface et souterraine, 3100 millions sont déjà exploités. De plus, 50 millions de m³ de ce volume exploité correspondent à une surexploitation des nappes (Fayesse, 2001). La baisse des niveaux des eaux due à un pompage excessif par les agriculteurs est préjudiciable à l'agriculteur lui-même qui doit investir plus pour accéder à une eau encore plus profonde.

L'agriculture, qui représente 18 % du PIB tunisien, utilise plus de 80 % des eaux mobilisées et constitue le premier consommateur de cette eau. De plus, les cultures irriguées produisent

35 % de la valeur de la production agricole, et fournissent 27 % de l'emploi agricole. En effet, si l'irrigation a été pratiquée depuis l'époque romaine, pendant les cinquante dernières années, la Tunisie a investi massivement dans l'irrigation aussi bien pour équilibrer sa balance alimentaire que pour assurer une stabilité sociale dans le monde rural.

Cependant, avec un bilan offre/demande de plus en plus serré, la maîtrise de l'utilisation de l'eau, constitue un axe important dans la politique générale de l'eau qui s'appuie principalement sur l'économie de l'eau, la rationalisation et la valorisation de l'eau d'irrigation. Outre une tarification incitant à économiser l'eau, et un encouragement à utiliser des techniques d'irrigation efficaces, il est suggéré de favoriser les cultures à haute valeur marchande, d'opter pour des systèmes de cultures plus productifs valorisant une eau relativement rare et de renforcer les recherches sur le système sol-plante-atmosphère afin d'économiser l'eau utilisée par la plante.

1-2- En Tunisie Centrale

En Tunisie Centrale, les ressources en eau souterraines appartiennent, au système de la nappe phréatique de Kairouan. Quant aux ressources superficielles, depuis 1981, deux barrages sur les oueds Merguellil et Zeroud: El Haouerb et Sidi Saad respectivement ont été construits dans le but de protéger la ville de Kairouan contre les inondations. L'eau mobilisée dans le bassin était moyennement utilisée, mais a augmenté après une évolution rapide des demandes locales. Parallèlement, l'irrigation publique a connu une extension notable avec la création de nouveaux Périmètres Publics Irrigués (PPI) sur forages.

Par conséquent, les niveaux piézométriques relevés depuis plusieurs années, avant et après la construction des barrages, s'abaissent régulièrement. Localisées au début, généralisées depuis les années 1980, ces baisses varient de 0.5 à 1 m par an et semblent vouloir continuer. Si ces chiffres sont peu alarmants dans l'absolu au vu de la capacité de la nappe, ils ont déjà entraîné l'assèchement des puits situés sur les bords de la nappe et l'approfondissement permanent de la quasi-totalité des captages au moyen de forages manuels rudimentaires (Leduc, 2003).

2- Cadre de l'étude

2-1- Projets MERGUSIE et HYDROMED

La Direction Générale des Ressources en eau de Tunisie (DGRE) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ont initié, depuis 1996, le projet MERGUSIE (Merguellil, Ressources, Gestion et USages Intégrés de l'Eau) en réponse à la nécessité d'une connaissance approfondie du fonctionnement du réseau hydrologique de la région en vue d'une meilleure utilisation et gestion des ressources en eau. Il s'agit d'un projet de recherche pluridisciplinaire établi pour analyser l'impact des aménagements de petite et moyenne hydraulique sur le régime hydrogéologique des oueds de la région du centre tunisien et leur valorisation par des usages agricoles. Cette étude a concerné l'usage de l'eau mobilisée à l'échelle d'une unité naturelle régionale jusqu'à l'unité parcellaire chez l'agriculteur. L'étude est menée sur le bassin versant du Merguellil qui fait partie d'un ensemble de 3 bassins versants (Zeroud, Merguellil et Nebhana) drainant le versant sud de la dorsale jusqu'à la plaine de Kairouan. L'étude du bilan hydrique de cultures intercalaires présentée dans ce document s'intègre dans ce projet général.

Les objectifs généraux du projet se situent à plusieurs niveaux :

- Optimiser l'affectation de la ressource en eau (sa répartition spatiale dans un espace donné), et son utilisation (gestion autour d'un aménagement). Les analyses doivent inclure la rationalité économique des irrigants et leur savoir-faire dans le but d'augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau et donc la productivité de l'eau.
- Elaborer et analyser des scénarios en cas de modifications des composantes du système en place: variations prononcées de la ressource, modifications des objectifs de production (variations du contexte socio-économique), changement de règles internes de gestion (tarification, régulation des accès à l'eau) et évolution des techniques d'irrigation.
- Proposer des recommandations sur les cadres institutionnels de gestion et sur la cohérence des interfaces entre les différents niveaux de décisions (législatif, exécutif national, exécutif régional, associatif).

Dans le cadre du volet 'usage' du projet, l'accent a été mis jusqu'à présent sur des modèles de gestion de la demande en eau agricole : modélisation de l'impact de la gestion collective d'un

périmètre irrigué sur le rendement des cultures et sur le revenu des agriculteurs (Faysse, 2001), modélisation des interactions entre le niveau de la nappe et la demande agricole (Feuillette, 2001).

Au niveau du programme HYDROMED (Projet de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen) l'équipe UMR LISAH (INRA-IRD basée à Montpellier) travaille sur les ressources en eau que sont les petits barrages et les lacs collinaires, dont la durée est limitée par le problème d'envasement. Optimiser la valorisation de cette offre décroissante implique le développement de modèles de gestion robustes sur le terme "demande agricole" et donc bien calés sur la consommation en eau des cultures (Albergel et al., 2004). D'où, la nécessité de l'estimation des besoins en eau des systèmes de cultures intercalaires adoptés dans différentes régions autour de ces lacs et barrages collinaires.

2-2- Système de culture étudié

Les perspectives d'amélioration du rendement de l'agriculture non irriguée sont limitées du fait que les précipitations sont soumises à d'importantes variations saisonnières et interannuelles. L'agriculteur s'est tourné vers un système de production en irrigué avec l'aménagement de puits de surface. Cependant, pour répondre à une pression physique locale (abaissement du niveau des nappes) et économique générale (augmentation du prix de l'énergie), il devient impératif d'améliorer l'efficacité de l'eau dans les systèmes irrigués ou de choisir des systèmes intermédiaires moins consommateurs. L'irrigation d'appoint, largement utilisée en céréaliculture, a contribué à l'amélioration notable des rendements avec des apports ponctuels.

Le système de cultures associées, utilisé depuis des siècles en agriculture pluviale consiste à pratiquer, durant les années humides, des cultures céréalières et légumineuses en intercalaire avec des arbres fruitiers. Ce système a été converti en irrigué avec l'introduction des cultures maraîchères ayant une valeur marchande plus élevée, tout en préservant l'option de redevenir un système pluvial si les pressions citées ci-dessus deviennent limitantes. En Tunisie, la superficie des cultures intercalaires représente plus de 15 % des cultures irriguées, ce taux dépassant les 20 % dans le Centre tunisien : plus de 50000 ha sont occupés par des cultures maraîchères conduites en intercalaires, dont 67 % se trouvent au centre du pays.

L'association culturale d'une culture annuelle avec un arbre fruitier semble permettre une meilleure utilisation du sol, de l'énergie solaire et aussi de l'eau sous forme de pluie ou d'irrigation. Par exemple, une pluie qui survient après une irrigation sera perdue par drainage dans le cas d'une culture annuelle pure alors qu'elle peut être utilisée par la culture pérenne (arbre fruitier) dans le cas où celle-ci serait associée à la première puisque son système racinaire est généralement plus profond. Cependant, même si le but de l'agriculteur en adoptant ce système est de valoriser et limiter l'utilisation de l'eau, ses références restent empiriques et ne conduisent pas obligatoirement à une meilleure gestion de la ressource hydrique. En effet, dans le cas d'associations arboriculture-maraîchage, largement présentes dans la zone d'étude et traditionnelles en Tunisie, aucune référence n'existe et les besoins en eau utilisés dans les modèles de gestion ont dû faire l'objet d'approximations non vérifiées. Le choix des cultures se fait en fonction de la demande économique sans tenir compte des meilleures combinaisons possibles culture pérenne/culture associée.

C'est dans ces programmes de recherche (MERGUSIE et HYDROMED) que s'insère cette étude, dans laquelle on se focalisera sur la compréhension de l'utilisation de l'eau au niveau d'un système de culture intercalaire à l'échelle parcellaire. Un modèle qui identifie les interactions entre le système et les différents paramètres environnementaux sera construit, dans le but d'améliorer la gestion et l'efficacité du système du point de vue hydrique.

3- Cultures intercalaires

3-1- Terminologie et intérêt

L'agriculture durable cherche, au moins dans son principe, à utiliser la nature comme modèle pour améliorer les systèmes de culture. D'où, l'intérêt croissant et récent porté aux cultures intercalaires comme un système de production potentiellement bénéfique. Les systèmes de cultures associant des arbres fruitiers et des cultures annuelles en intercalaire ont été pratiqués depuis longtemps. Mais du fait que la mécanisation de l'agriculture avec ses économies au niveau des heures de travail et de la main d'œuvre, est moins applicable dans ce type de système, l'expansion de ce système a été limitée. Cependant, la récente pression démographique, la diminution des ressources hydriques et la réduction des terres agricoles a incité les planificateurs à revoir le rôle des cultures intercalaires comme un moyen d'augmenter la production agricole et la productivité de l'eau (Crookston, 1976).

Le système de *cultures intercalaires* ou *associées* peut être défini comme étant l'association de deux (ou plus) cultures simultanément présentes sur une même parcelle. Les cultures ne sont pas nécessairement plantées (ou récoltées) au même moment, mais elles sont généralement gérées simultanément pendant une période significative. Ceci les distingue des *cultures en relais*, dont les cycles de cultures ne se croisent que pendant une courte période. Il a été suggéré que le terme de cultures intercalaires englobe seulement les cultures plantées sur des rangs différents et que si l'arrangement des cultures est fait d'une manière irrégulière ou mélangée au niveau du rang on parle alors de *cultures mixtes*.

Plusieurs essais de classification ont été présentés, la plus complète semble celle donnée par Baldy (1963), basée sur la taille des cultures en association avec des sous-groupes suivant le type de culture en association. Les *cultures associées homogènes* sont celles qui présentent une taille à peu près égale et ont généralement un type et une durée de végétation semblable. Elles peuvent être donc constituées d'association de cultures annuelles (betterave-maïs, pomme de terre –tournesol) ou de cultures arborées avec des associations forestières ou fruitières. Dans ce dernier groupe, plusieurs combinaisons sont pratiquées traditionnellement : on citera par exemple l'association avec l'oranger du bananier (Liban, Afrique tropicale, Indes) ou d'un autre agrume (clémentinier par exemple). Cette dernière est une association très fréquente en Afrique du Nord.

Les *cultures associées hétérogènes* comportent des espèces de tailles très différentes et dont les durées de végétation sont généralement inégales. On appellera culture dominante celle qui est la plus élevée et l'autre la culture dominée. Il existe dans ce groupe deux variantes : arbres forestiers-cultures annuelles (système agroforestier) et arbres fruitiers-cultures annuelles. Dans ce dernier type, qui constitue notre exemple d'étude, on trouve plusieurs associations types: oliviers ou caroubier comme culture dominante (ou principale) avec des céréales ou des cultures maraîchères considérées comme culture dominée (ou secondaire) (Afrique du nord, Italie du sud, Grèce, Syrie,..). En zone équatoriale, on peut citer l'association bananier-manioc (Congo).

Comme troisième type d'association, on a l'*association oasienne* à 3 étages dont le palmier dattier constitue, généralement, la culture principale. On rencontre alors, comme deuxième étage, sous le palmier, un arbre fruitier (abricotier, figuier, grenadier, olivier) et la troisième strate est constituée par une culture annuelle (céréale ou culture maraîchère).

Dans les régions tropicales à climat semi-aride, les agriculteurs utilisent le système de cultures intercalaires pour des raisons variables et complexes. Dans la plupart des cas, le but principal n'est pas d'augmenter les rendements par rapport aux cultures pures. En effet, dans un environnement variable, les agriculteurs choisissent plutôt ce système de culture comme assurance contre le risque d'une perte partielle ou totale de la production. En général, plus l'environnement est incertain, plus les rendements le sont aussi. Souvent, des espèces différentes sont cultivées simultanément ne seront pas affectées de la même manière par les facteurs externes. Le système de cultures intercalaires minimise les risques liés à une culture unique, dans le cas d'une pluviométrie irrégulière (ou en régime d'irrigation, lors de pannes techniques ou en cas de mauvaise gestion), en cas d'invasion de parasites ou de fluctuations du marché. D'autre part, les investissements importants nécessaires à l'installation de la culture arborescente peuvent être considérablement réduits du fait du profit tiré des cultures annuelles au cours des premières années.

De plus, des combinaisons d'espèces et d'environnements peuvent être utilisées pour un bénéfice optimum de ces associations comme : une utilisation plus intensive de la terre agricole, une réduction des pesticides et des engrais, un contrôle plus performant de l'érosion hydrique et éolienne (Lafolie et al., 1999). En effet, des cultures intercalaires composées d'espèces qui atteignent leur optimum de développement à différentes dates, constituent un bon moyen de lutte contre les mauvaises herbes. On peut considérer chaque espèce additionnelle dans le système de culture comme une mauvaise herbe « recherchée » contribuant positivement au rendement final : un avantage par rapport à la perte souvent occasionnée par les mauvaises herbes « réelles » du fait de la compétition pour les ressources. D'autre part, il est possible que certaines combinaisons de cultures puissent fournir des rendements plus élevés que les cultures pures sous les mêmes conditions. Azam-Ali, (1995) montre que l'association sorgho et arachide peut être avantageuse de 25 à 40 % en terme de rendement par rapport aux cultures pures. Il a été noté aussi que les cultures associées peuvent être plus avantageuses dans le cas de conditions de faibles éléments nutritifs et de sécheresse (Ong, 1995).

Les différents mécanismes qui entrent en jeu dans l'interaction entre cultures associées et permettant, la plupart du temps, une augmentation des rendements, seront abordés dans les paragraphes suivants.

3-2- Interactions

Les mécanismes de capture des ressources par les arbres et la culture peuvent être répartis, selon Ong et Swallow (2003), en trois catégories montrant soit une interaction de compétitivité, soit de complémentarité ou encore de neutralité. Dans le premier groupe, des interactions négatives entre les espèces associées peuvent conduire à des réductions sérieuses de la capacité de l'une des deux espèces à capturer les ressources de croissance. La complémentarité est observée quand les arbres sont capables de capturer des ressources non utilisables par les cultures, ce qui conduit à l'augmentation de l'utilisation globale des ressources. Dans la troisième catégorie, les arbres et la culture exploitent les ressources dans le même réservoir, de sorte que l'augmentation de l'utilisation des ressources par une espèce résulte en une décroissance proportionnelle de l'utilisation de cette ressource par l'espèce associée. Il est important de souligner que les interactions arbre/culture peuvent se déplacer d'une catégorie à l'autre au cours du cycle cultural et ce aussi bien en fonction de la taille et de la population de l'espèce dominante que des apports et de l'accessibilité des ressources de croissance.

3-2-1- Interactions : en cultures pures et intercalaires

Même quand la culture est composée de plantes d'une même espèce, les processus qui déterminent comment les plantes se concurrencent sont complexes. Dans des systèmes de cultures pures, les plantes croissent rarement sans un phénomène de compétition par rapport à la plante voisine. Les plantes se concurrencent dans deux dimensions : l'espace et le temps. La capacité des plantes individuelles à occuper un volume donné d'espace a des implications dans leur utilisation temporelle des ressources à différents stades de développement de la culture. Ceci est dû à ce que l'agriculteur souvent ajuste la densité de plantation de façon à maximiser la productivité d'une communauté de plantes par unité de surface plutôt que par individu dans une population. Finalement, un plateau de productivité est atteint au-delà duquel n'importe quel autre accroissement de la population des plantes aura un faible effet sur la biomasse sèche totale. En effet, la productivité de chaque plante va décroître pour compenser le grand nombre d'individus car les plantes sont forcées de partager les ressources disponibles. Pour n'importe quelle espèce, cette valeur plafond de la biomasse est déterminée essentiellement par la radiation solaire interceptée, par la capacité du sol à fournir les

éléments nutritifs et l'eau disponible (Azam-Ali et al., 1993). Pour produire plus que ce niveau, la culture doit obtenir plus de ressources et/ou doit fixer ces ressources plus efficacement en terme de conversion en matière sèche (Azam-Ali, 1995).

Dans le cas de cultures intercalaires, la production de biomasse dépend, en grande partie, d'interactions dynamiques entre les cultures pour une ressource donnée (lumière, eau, éléments minéraux). La majorité des études effectuées ont été consacrées au phénomène d'interaction entre espèces au niveau de la partie aérienne (l'interception de la radiation, distribution de la demande évaporative,...). Les problèmes afférents à l'interaction au-dessous de la surface du sol pour l'eau et les éléments minéraux ont été peu étudiés parce qu'ils sont moins faciles à appréhender. Cependant, des études effectuées sur des cultures intercalaires en conteneurs ont montré que l'interaction racinaire a des effets plus importants que l'interaction aérienne et qu'elle se manifeste plutôt (Ozier-Lafontaine et al., 1995).

L'interaction entre les cultures associées vis-à-vis d'une ressource donnée peut être positive (on parle alors de complémentarité) ou négative (il s'agit alors de compétition). Le mécanisme de complémentarité sera détaillé plus loin dans le paragraphe (4-4-2), mais celui de compétition sera étudié en fonction de la ressource concernée. En effet, la compétition est quasi inévitable dans le cas de deux espèces cultivées ensemble. La productivité de chaque composante dépend de sa capacité compétitive pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs et de sa réponse aux changements micro-climatiques. Néanmoins, pour minimiser la compétitivité, il faut choisir la meilleure association d'espèces et ajuster les proportions de chaque espèce. Ceci peut se faire, par exemple, en retardant la date de plantation des espèces dites « agressives » (Ong, 1995).

3-2-2- Interaction pour l'eau

Dans un environnement où la disponibilité en eau peut être un facteur limitant, les conditions qui vont affecter le comportement et la compétitivité d'un système donné de cultures associées sont :

- la disponibilité et la mobilité de l'eau dans le sol
- la distribution de la demande climatique en eau (qui sera développée dans le paragraphe 3-3)

- les capacités physiologiques et les stratégies morphogénétiques développées par les espèces (système aérien et racinaire).

La mobilité de l'eau et des éléments nutritifs joue un rôle très important dans cette interaction. Ainsi, l'eau et l'azote, dont la mobilité est plus élevée que celle du phosphore ou du potassium, sont sujets très tôt à la compétition (Ozier-Lafontaine et al., 1995). Pour diminuer l'effet de cette compétition dans une association arbres-culture annuelle, l'arbre et la culture annuelle doivent avoir des systèmes racinaires qui colonisent des zones différentes du sol, les arbres ayant en général des systèmes racinaires profonds alors que les cultures annuelles des systèmes racinaires superficiels (Ong et al., 1996). Cependant, la distribution racinaire de chaque composante du système est fonction de l'environnement physique et des caractéristiques morphogénétiques des espèces concernées. Elle devient encore plus compliquée à cause de sa variation temporelle et des mécanismes adaptatifs.

Ceci peut être illustré par l'étude conduite par Lehmann et al. (1998), dans les savanes du Kenya sur une association agroforestière d'acacia (*Acacia saligna*) et de sorgho (*Sorghum bicolor*). Ils ont remarqué que les racines de l'acacia explorent plus les horizons profonds mais aussi qu'elles sont concentrées sous la frondaison de l'arbre. Par contre, la densité racinaire du sorgho est plus importante, en inter-rang, au niveau des couches superficielles du sol. Notons qu'un phénomène identique a été observé par Huxley et al. (1994) qui ont trouvé une pénétration plus profonde des racines de l'arbre (*Gravillea robusta*) cultivé avec le maïs. L'observation d'une forte abondance racinaire au niveau de l'intra-rang de l'acacia n'est pas constituée d'un simple recouvrement des deux systèmes racinaires mais d'une invasion des racines du sorgho au niveau de la zone racinaire de l'arbre. Ceci est rarement décrit dans la littérature car il est difficile de distinguer entre les différents systèmes racinaires. Cette invasion peut être due à deux mécanismes : le premier est que la culture annuelle est plus agressive dans la capture des ressources du sol et donc capable de remplacer les racines des arbres. Mais l'étendue du système racinaire du sorgho en dessous de l'acacia suggère un deuxième mécanisme. En effet, il a été trouvé une plus grande concentration d'azote sous forme minérale dans la couche superficielle de l'intra-rang qu'au niveau de l'inter-rang après des irrigations ou une taille des arbres. L'accroissement de la colonisation racinaire du sol des cultures associées (enracinement plus profond par les arbres) augmente la consommation hydrique conduisant à une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau qui peut être démontrée par une production de biomasse de 50 à 60 % plus importante dans ce système

combiné que dans ceux en monocultures d'acacia et de sorgho quand ces premiers sont taillés (Lehmann et al., 1998).

3-2-3- Effet des cultures intercalaires sur l'utilisation de l'azote

Les quantités d'azote fixées par les espèces légumineuses et transférées aux cultures associées sont généralement faibles et ne compensent pas la compétition pour l'eau quand ce phénomène a lieu (Dupraz et al., 1999). En effet, des études utilisant la méthode isotopique ont montré qu'un faible transfert direct de l'azote s'effectue à partir des légumineuses saines vers les céréales cultivées en association et que la quantité transférée dans ce sens n'a pas de signification agronomique (Giller et Wilson, 1991). La quantité de l'azote laissée sur place à partir des résidus de récolte d'une légumineuse est plus importante, mais elle est toujours moindre que celle laissée par une légumineuse en monoculture. Cette réduction est encore plus grande quand la plante subit de l'ombre par une haute culture (comme les céréales). C'est le cas de l'arachide quand elle est cultivée avec le sorgho ou le maïs (Ong, 1995).

A ce stade, on peut se poser la question de savoir pourquoi il a été toujours supposé que les associations avec des espèces légumineuses soient bénéfiques du point de vue de la fixation de l'azote ? Plusieurs explications peuvent être données. L'association du riz avec du pois mange-tout à cycle court peut être prise comme exemple. Cette association a souvent permis un gain en rendement du riz de 80 à 86 % par rapport à la culture pure. Des recherches à l'Institut International de Recherche sur le Riz (Philippines) ont été effectuées sur la même association et ont montré que l'arrachage d'une troisième ligne au niveau de la culture du riz, au moment où le pois mange-tout viendrait à maturité, conduit à la même augmentation de rendement obtenue en association. Cette augmentation de production peut alors être expliquée par l'accroissement du volume du sol utilisée pour l'extraction de l'azote suite à l'augmentation de l'espace disponible pour la culture du riz après la récolte du pois mange-tout. D'autre part, l'accroissement du rendement du riz en association avec une légumineuse peut être due à l'utilisation à lui seul de tout l'azote se trouvant dans le sol puisque la légumineuse utilise d'autres sources d'azote (Ong, 1995).

Cependant, une nutrition déficiente en azote peut affecter la croissance et le développement des cultures dans les mêmes proportions qu'un déficit hydrique (Dupraz et al., 1999). L'expérimentation conduite dans le sud de la France, sur vigne en intercalaire avec une

fétuque roseau (*Festuca arundinacea*) a montré une diminution de la croissance de la vigne comparée à celle en monoculture. Etant donné que le sol était pauvre en azote et que la fétuque a utilisé une quantité d'azote correspondant à celle qui est minéralisée (et donc utilisable) pendant une année dans ce type de sol, ceci explique la réduction de croissance de la vigne (Celette et al., 2005). Cette réduction de croissance pourrait être due à une compétition pour l'azote plus que pour l'utilisation de l'eau.

3-2-4- Avantages des cultures intercalaires

Il est possible, au moins théoriquement, qu'une association de plantes ligneuses et herbacées puisse améliorer l'utilisation globale des pluies, aussi bien directement, en utilisant plus d'eau par transpiration, ou indirectement, en augmentant la productivité de l'eau, c'est à dire le rapport entre la biomasse ou la récolte et le volume d'eau utilisé (Ong et al., 2000). En effet, en climat semi-aride et sous une agriculture traditionnelle extensive, à peine 50 % des pluies sont utilisées par les cultures, le reste étant perdu sous forme de ruissellement, d'évaporation du sol et de drainage. La perte d'eau par évaporation du sol, à elle seule, peut représenter 30 à 60 % des précipitations (Cooper et al., 1983; Wallace, 1991). En irrigué, des pertes par drainage peuvent avoir lieu pour les cultures annuelles à faible profondeur racinaire, lorsque l'irrigation est mal gérée ou perturbée par les pluies. Dans un système de cultures intercalaires, ces pertes nettes d'eau sont réduites puisque les composantes du bilan hydrique 'non productives' dans le cas d'une seule culture, peuvent devenir 'productives' dans un système à deux cultures.

Sur le plan agronomique, plusieurs avantages peuvent être mentionnés. Une plus grande quantité de biomasse retourne au sol sous forme de matière organique provenant de feuilles et de fruits qui tombent. L'effet de la biomasse souterraine sur la fertilité du sol dans le cas de cultures intercalaires est plus important que celui de l'application d'un mulch au niveau de l'inter-rang des cultures tropicales (Lehmann et al., 1999). La richesse organique du sol sera mieux conservée si une bonne partie des produits végétaux de l'association est laissée sur place. Il faudrait distinguer cependant les associations dont tous les produits sont pratiquement exportés, de celles où une fraction importante de la matière verte est laissée sur place ou partiellement enfouie comme les fanes de la culture de pomme de terre. Dans les climats tropicaux semi-arides et arides, les avantages de l'interaction arbre/culture sur

l'augmentation de la fertilité du sol est de moindre importance. En effet, les résidus de récolte sont plutôt consommés par le bétail, et l'élagage des arbres est mieux valorisé comme fourrage que sous forme de mulch. Dans ces conditions, l'effet bénéfique majeur devrait être attribué à une plus grande utilisation des ressources physiques (Ong et al., 1991).

D'un point de vue structural, l'association d'une plante herbacée avec un arbre améliore généralement la couche superficielle du sol grâce au développement important des racines évitant ainsi qu'un tassement ou une semelle de labour puisse se produire. Les racines des cultures en association améliorent la porosité, l'infiltration et l'aération du sol. Le recyclage des éléments nutritifs se fait plus efficacement : le système racinaire superficiel réduit les pertes d'éléments nutritifs par lessivage et érosion et les racines profondes ramènent des horizons inférieurs les éléments nutritifs pour les incorporer dans la biomasse. De plus, il y aura une moindre prolifération des mauvaises herbes puisque moins de lumière atteint le sol. La diversité des espèces végétales utilisées en association peut également faire obstacle à la prolifération des insectes.

3-3- Modifications microclimatiques

Le microclimat en monoculture peut être modifié en agissant sur la date de plantation, la densité de semis, la disposition de plantation (espacement et orientation des rangs) et bien d'autres facteurs. Pour un verger, la taille peut s'ajouter à ces pratiques. En système de cultures intercalaires, l'hétérogénéité horizontale et verticale, qui est fonction du temps, multiplie le nombre de configurations possibles. L'interception lumineuse, la protection contre le vent et l'agencement des surfaces évaporantes sont des exemples de modifications microclimatiques rencontrées par les cultures associées (Stigter et Baldy, 1995).

3-3-1- Modifications des relations sol-plante-atmosphère

Les réponses des cultures pures aux facteurs physiques, comme la lumière, l'eau ou la température sont bien connues. Cependant, de telles relations ont été rarement établies pour les cultures associées. La productivité d'un système de cultures intercalaires est corrélée avec l'interception ou l'utilisation de ressources, comme la lumière ou l'eau, en terme de quantité globale utilisée par tout le système (Azam-Ali, 1995). Même s'il a été fréquemment démontré

que les cultures intercalaires présentent des avantages du point de vue rendement dans plusieurs environnements tropicaux, un manque considérable de connaissances sur les interactions entre les composantes fait que la réussite ou non de certaines combinaisons de cultures intercalaires reste souvent inexplicée. En effet, la variabilité du microclimat et des interactions au niveau du sol, la difficulté de leur mesure et la complexité de la modélisation requise pour synthétiser les résultats (Wallace, 1995) ont souvent découragé les scientifiques dans leurs tentatives d'analyse des systèmes de cultures intercalaires.

La compréhension de l'influence globale de chaque facteur environnemental à travers les différentes combinaisons de cultures est souvent basée sur des expérimentations au cours desquelles, l'interception ou l'utilisation d'une seule ressource, par exemple la lumière, peut être mesurée. Ces études fournissent des résultats contrastés et contradictoires. La plupart de ces confusions surviennent à cause de 1) l'existence de différents critères de mesures de la performance du système 2) la difficulté de séparer l'interception et l'utilisation des ressources individuelles en cultures intercalaires, qui sont par définition intimement liées physiquement. Cependant, une compréhension de la façon dont les cultures intercalaires captent et utilisent les ressources doit fournir une base plus scientifique pour recommander les espèces appropriées et l'arrangement des cultures le plus favorable (Azam-Ali, 1995).

3-3-2- Distribution de l'interception du rayonnement solaire

La forte productivité des cultures intercalaires est souvent expliquée par des processus s'effectuant au-dessus de la surface du sol, comme l'amélioration de l'interception lumineuse ou de l'efficacité de production de matière sèche par rapport à l'énergie interceptée. En effet, Corlett et al. (1987) cité par Monteith et al. (1991) ont déterminé, pour une association de mil (*Pennisetum galaucum*) et de l'arbre cassie blanc (*Leucaena leucocephala*) conduite en Inde, la variation de l'énergie interceptée, de la biomasse produite et de l'efficacité de production de la biomasse (e) par rapport à la lumière interceptée et comparé ces résultats à ceux obtenus en monocultures pour différentes saisons (humide et sèche) (Tableau I-1). Il apparaît que la radiation interceptée par le mil en association diminue par rapport à celle en monoculture à cause du phénomène de compétitivité qui induit un feuillage moins dense. Cependant, l'efficacité (e) de cette culture est plus élevée en association. Ceci est probablement dû à ce que le point de saturation lumineux est atteint moins souvent, en cas de sécheresse, dans le cas

d'un ombrage partiel. Par ailleurs, aussi bien pendant la saison sèche qu'humide, le système agroforestier est plus productif que celui des cultures pures. L'augmentation de la biomasse peut être associée à celle de l'interception de la radiation, mais ceci implique aussi l'accès à plus d'eau par les systèmes racinaires.

Tableau (I-1). Valeurs de la radiation interceptée (MJ m^{-2}), de la biomasse aérienne produite (T ha^{-1}) et de l'efficacité de la production de biomasse par rapport à la radiation interceptée (e , g MJ^{-1}) (D'après Corlett et al. (1987) cité par Monteith et al. (1991)).

Culture	Radiation interceptée (MJ m^{-2})	Biomasse (T ha^{-1})	e (g MJ^{-1})
<i>Saison humide (Juillet -Août 1986)</i>			
Mil en monoculture	581	4.7	0.81
Mil en association	300	3.1	1.03
Cassie blanc en monoculture	520	4.0	0.77
Cassie blanc en association	510	4.0	0.77
Association (mil+cassie)	810	7.1	0.88
<i>Saison sèche (Septembre 1986-Juin 1987)</i>			
Cassie blanc en monoculture	1270	1.5	0.12
Cassie blanc en association	1160	1.7	0.15
<i>Année (Juillet 1986-Juin 1987)</i>			
Association (mil+cassie)	1970	8.8	0.45

Les approches expérimentales et théoriques requises pour la quantification de la radiation interceptée par une monoculture sont, à nos jours, assez bien établies et ont été largement utilisées dans des environnements tempérés et tropicaux durant les trois dernières décades. Ces approches ont un caractère unidimensionnelle et négligent la variation horizontale de la radiation transmise rencontrée dans le cas de cultures associées à cause de la variation verticale et horizontale de la structure de la canopée. L'architecture du couvert change constamment dans les cultures en association à cause du comportement différent de ses composantes. Par exemple, dans le cas d'une légumineuse plantée en intercalaire avec des céréales, la première subit une plus grande compétitivité au début du cycle à cause de la grande vitesse de croissance des céréales. Cette compétition sera réduite durant la phase reproductive de la légumineuse puisque les céréales seront déjà récoltées (Black et Ong, 2000).

Cependant, l'ombrage créé par la culture haute dans le cas d'association hétérogène peut réduire la transpiration sans pour autant influencer la photosynthèse. Ceci est le cas d'une culture qui a un faible niveau de saturation lumineux photosynthétique. Dans ces conditions, la réduction de la radiation peut conduire à une augmentation de la productivité de l'eau. Cet

effet bénéfique dépend donc du degré de l'ombrage, du niveau de la radiation incidente et du point de saturation lumineux de la culture (Wallace et al., 1995).

3-3-3-Variation de la température au niveau des cultures intercalaires

D'une façon générale, pour une température de l'air donnée, la température du feuillage augmente avec la radiation, diminue quand l'air devient plus sec et décroît avec l'augmentation de la vitesse du vent. Dans une expérience conduite en Inde (Corlett et al. 1987), la température a été mesurée au niveau du feuillage du millet (*Pennisetum glaucum*) conduit en intercalaire avec le cassie blanc (*Leucaena leucocephala*). Comme prévu, la vitesse du vent était substantiellement et systématiquement réduite au niveau de la culture intercalaire. Au début de la campagne, le feuillage du millet avait une température supérieure de 1 °C à celle de sa culture pure (moins de vent) mais à la fin du cycle elle a été de 0.5 à 1 °C inférieure (moins de radiation). L'effet du microclimat créé par les cultures en association peut aussi se traduire par un changement de la température au sol. Des différences importantes ont été mesurées au niveau de la température du sol, probablement à cause de l'importance plus ou moins grande du brassage de l'air au niveau du sol (Monteith et al., 1991).

En utilisant la notion de température optimale (T_o) à laquelle les processus de développement de la plante sont à leurs maximums, Black et Ong (2000) ont conduit des études sur une association du cassie blanc (*Leucaena leucocephala*) et du millet (*Pennisetum americanum*) et ont montré qu'un retard maximal de la floraison du millet de 2 à 3 jours peut être attendu à cause de la baisse, due à l'ombrage, de la température du sol au niveau de l'inter rang en dessous de T_o . Il a été conclu que le bénéfice de l'ombre ne peut se manifester que si la température du sol au niveau du sous-étage ne descend pas en dessous de T_o . Par ailleurs, en climat chaud, l'effet de l'ombrage devient bénéfique à la culture, puisqu'une température bien supérieure à T_o induirait plutôt une réduction de la croissance végétative suite à un stress thermique (Wallace et al., 1995).

3-3-4- Variation de la transpiration des cultures en association

Le mécanisme de transpiration des cultures en association est fortement influencé par les conditions microclimatiques. Quand la résistance stomatique de la canopée inférieure est

faible, sa transpiration est assez grande pour humidifier l'air environnant et réduire ainsi la transpiration de la culture supérieure (en l'occurrence les arbres). Si la résistance stomatique de la culture annuelle est élevée, la chaleur sensible provenant de cette source est suffisante pour accroître le déficit en vapeur d'eau de l'air autour de l'arbre augmentant ainsi sa transpiration (Wallace, 1995).

De plus, l'ombrage dû à la culture haute est un moyen de réduction de la demande évaporatoire de la culture annuelle, ce qui améliore la productivité de l'eau par la réduction de la transpiration. Tuzet et al. (1995) ont montré que dans le cas d'une association d'arbustes *Guiera (Guiera senegalensis)* et d'herbe annuelle, dans les savanes du Niger, l'effet d'ombrage créé par cet arbuste a induit une réduction de la demande évaporatoire à la surface de l'herbe d'environ 30 % comparée à celle d'une surface ouverte. Supposant une même disponibilité en eau, la réduction de la demande évaporatoire induit une réduction de la consommation hydrique. Ce qui conduirait à l'augmentation de la réserve hydrique du sol par rapport à celle en monoculture. Ainsi, un meilleur rapport est obtenu entre évapotranspiration réelle et demande climatique. Cependant, pour les espèces en C4, dont le taux de photosynthèse à saturation lumineuse est plus élevé, l'ombrage réduirait, en plus de la transpiration, la production de biomasse (Black et Ong, 2000) ce qui constitue une perte qui ne serait pas compensée par le gain obtenu de la diminution de l'utilisation de l'eau.

Le transpiration d'une feuille est presque proportionnelle au déficit de saturation en vapeur de l'air (*VPD*). D'autre part, le taux photosynthétique d'une feuille est approximativement proportionnel à la différence de la concentration du CO_2 à travers les stomates. Sachant que l'ajustement stomatique d'une plante est fonction de la demande climatique de façon à ce que cette différence reste plutôt constante durant la journée dans beaucoup de circonstances. La quantité d'eau transpirée par unité de CO_2 assimilée est approximativement proportionnelle au *VPD*. Cette prédiction est appuyée par plusieurs observations au champ démontrant que la production de matière sèche par rapport à l'utilisation de l'eau est inversement proportionnelle au *VPD*. Au niveau des cultures associées, le microclimat de la culture ombrée est généralement plus humide que celui de la culture ouverte. Cependant, l'air peut aussi être plus chaud, et comme le *VPD* dépend aussi bien de la température que de l'humidité, sa valeur au niveau de la culture peut être plus ou moins grande qu'en culture pure. Les faibles différences du *VPD* enregistrées entre ces deux systèmes impliquent que dans les deux cas, le microclimat et le climat local sont assez couplés, résultat d'un brassage turbulent efficient. Si le *VPD* au niveau de la culture en rang est mesuré juste au-dessus de la

surface du sol, où le microclimat est supposé être réellement découplé du climat local, on enregistre des valeurs plus faibles de *VPD* qu'en culture pure. Des espèces ayant une hauteur faible seront sans doute exposées à un environnement plus humide et devraient alors produire plus de matière sèche par unité d'eau consommée (Monteith et al., 1991).

L'élagage des arbres conduits en intercalaire peut être un moyen de réduire la transpiration de l'arbre en faveur de la culture. En effet, la réduction de la surface foliaire diminue l'utilisation de l'eau des arbres, ce qui permet aux cultures annuelles de se développer au maximum et constituer leur biomasse avant que la frondaison de l'arbre ne soit reconstituée. Dans un exemple d'association d'Acacia (*Acacia saligna*) avec du sorgho (*Sorghum bicolor*) et du niébé (*Vigna unguiculata*), la taille des arbres a réduit leur biomasse produite d'environ un quart, mais cette réduction est compensée par les rendements des cultures intercalaires (Droppelmann et al., 2000).

3-4- Efficience et évaluation des systèmes de cultures intercalaires

3-4-1- Efficience de l'utilisation de l'eau (WUE)

Le bénéfice généré par les cultures associées provient généralement de l'amélioration de l'efficience de l'utilisation de l'eau disponible au niveau du sol. En effet, le système de cultures intercalaires permet d'augmenter la proportion de l'eau utilisée pour la transpiration par un développement important de la canopée et une réduction de l'évaporation du sol (Black et Ong, 2000). L'étude de certains types d'association culturale a montré une augmentation de l'efficience de l'utilisation de l'eau de ces cultures par rapport aux cultures pures sans augmentation significative de la consommation hydrique. En effet, la proportion des flux transpiratoires dans l'évapotranspiration est plus élevée dans le cas de cultures intercalaires qu'en cultures pures. Ceci est dû à ce que l'expansion de la couverture végétale augmente la transpiration du système et diminue l'évaporation du sol. L'environnement climatique créé par l'association a un effet direct sur l'augmentation de l'efficience de la transpiration. La diminution du déficit de saturation de l'air et l'effet de brise-vent que peuvent jouer les arbres au niveau du système contribuent à l'augmentation de la biomasse produite par rapport à l'unité d'eau transpirée. Le tableau (I-2) présente des exemples de consommation hydrique (*WU*) et d'efficience de l'utilisation de l'eau (*WUE*) en monoculture et des variations

correspondantes ΔWU et ΔWUE en cultures associées d'après des études effectuées par plusieurs auteurs (Morris et Garrity, 1993). ΔWU est défini par :

$$\Delta WU = \frac{WU_{ic}}{WU_{s(a,b)}} - 1 \quad (I.1)$$

WU_{ic} représente la consommation hydrique au niveau de la culture intercalaire et $WU_{s(a,b)}$ la moyenne pondérée des deux cultures conduites en monoculture. Pour déterminer la variation relative à l'efficacité de l'utilisation de l'eau, on définit ΔWUE par :

$$\Delta WUE = \frac{WUE_{ic}}{WUE_{s(a,b)}} - 1 \quad (I.2)$$

où WUE_{ic} représente l'efficacité de l'utilisation de l'eau du système intercalaire et $WUE_{s(a,b)}$ la moyenne pondérée des deux cultures pures.

Tableau (I-2). Comparaison de l'utilisation de l'eau (WU), de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) des cultures pures et intercalaires (D'après Morris et Garrity, 1993)

Référence	WU (mm)	ΔWU (%)	WUE (kg/mm)	ΔWUE (%)	Espèces	Rdt mesuré
Singh et al. (1988)	517 à 571	6 à 7	8.0 à 13.0	-8 à 55	Mil + niébé	M.S
Morris et al. (1990)	177 à 271	2 à 5	12.0 à 12.6	25 à 53	Sorgho+niébé	Grain
Hulugalle et Lal (1986)	248 à 554	-5 à 0	1.6 à 4.2	4 à 99	Maïs+niébé	Grain
Suwanarit et al. (1980)	362	4	20.5	78	Maïs+pois mange-tout	M.S
Natarjan et Willey (1980)	585	15	8.3	38	Pois d'Angole+sorgho	grain

Certaines associations culturales, dans le cas de ressources hydriques non limitantes, peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau par rapport à leurs cultures pures. C'est le cas de certaines expériences conduites sur les associations maïs/soja, maïs/pois mange-tout. Hulugalle et Lal (1986) ont conduit une expérience au Nigeria sur l'association, communément utilisée en Afrique de l'Ouest, maïs (*Zea mays*) /niébé (*Vigna unguiculata*). L'efficacité de l'utilisation de l'eau de cette association a été plus importante que celle des cultures pures. En condition de faible disponibilité en eau, le système de cultures associées est plus efficace que la culture pure du niébé, mais moins efficace que le maïs en monoculture. Ceci est probablement dû à la sensibilité du niébé à la sécheresse contrairement au maïs qui

ne le serait pas. D'où l'importance du choix des espèces conduites en intercalaires dans le cas de faibles ressources hydriques.

Il est communément supposé que la diversité des formes de vie dans les forêts tropicales contribue à leur forte efficacité quant à l'exploitation des ressources. Si la combinaison de différentes espèces augmente la productivité et l'exploitation des ressources, ceci pourrait être dû à une utilisation complémentaire des ressources (Sillon et al., 2000).

3-4-2- Complémentarité

Aucune espèce annuelle, en culture pure, ne peut intercepter toute la lumière incidente au niveau de la parcelle ou extraire toute l'eau et les nutriments présents autour de son système racinaire (Monteith et al., 1991). Une association d'espèces devrait aboutir, par un mécanisme de complémentarité, à une productivité plus importante aussi bien en interceptant plus d'énergie qu'en exploitant le plus de ressources disponibles dans le sol. L'analyse des avantages des interactions au-dessus de la surface du sol confirme que l'interception lumineuse est l'avantage le plus commun enregistré par les cultures intercalaires. D'autre part, l'augmentation potentielle possible de la productivité d'un écosystème et de l'utilisation des ressources provient de l'incapacité des espèces dominantes à utiliser complètement les ressources disponibles (Ewel et Haggar, 1997). Cette conclusion est en accord avec l'idée émise par Cannel et al. (1996) "les arbres doivent acquérir les ressources que les cultures ne vont pas autrement acquérir".

Le mécanisme de complémentarité vis-à-vis de l'eau peut être obtenu par une "complémentarité temporelle" à travers le choix de cultures à cycles décalés ou par une "complémentarité spatiale", à travers le choix de cultures à systèmes racinaires différents permettant à l'arbre de profiter de l'eau qui s'infiltré au-delà de la zone racinaire de la culture intercalaire (Huda et Ong, 1989). Souvent, cette complémentarité spatiale est difficile à séparer de celle temporelle.

L'étude d'une association du riz avec le pois d'Angole (*Cajanus cajan*) a révélé que ce dernier extrait, grâce à son système racinaire profond, les quantités d'eau se trouvant en dessous de la zone racinaire du riz montrant ainsi une complémentarité d'utilisation des ressources (Black et Ong, 2000). La productivité de l'association du maïs (*Zea mays*) et du

niébé (*Vigna unguiculata*) est plus importante que celle des deux cultures conduites en monocultures grâce à une complémentarité temporelle traduite par un déphasage des pics de demande des ressources naturelles par chaque culture (Hulugale et Lal, 1986).

Cependant, la contribution relative de chaque système racinaire n'est pas facile à mesurer. Il existe la possibilité d'identifier des zones préférentielles d'absorption hydrique par l'intermédiaire des traceurs radioactifs ou des isotopes naturels de l'eau, mais ces méthodes restent onéreuses et laborieuses. D'où l'intérêt et l'utilité de la modélisation pour représenter les différentes combinaisons possibles entre cultures, techniques et environnement et tester des hypothèses du fonctionnement d'un tel système.

Pour comparer les performances des cultures associées, il faut utiliser une méthode de calcul qui permet de comparer la productivité absolue des diverses combinaisons d'espèces avec celles de cultures pures (Azam-Ali, 1995).

3-4-3- Méthodes d'évaluation des cultures intercalaires

L'évaluation des systèmes de cultures associées vise à quantifier les effets de l'association par rapport aux performances de la culture pure (Ong, 1995). L'accroissement net de la production (I) de la culture, par rapport à celle produite par la même surface en monoculture, attribuée à la présence des arbres est défini par : $I = F - C$ avec F est l'effet de "fertilisation" (effet positif), c'est à dire l'augmentation du rendement attribué aux effets de l'arbre sur le sol et le microclimat, C est l'effet de "compétition" (effet négatif), c'est la réduction du rendement due à une compétition entre l'arbre et la culture pour l'eau, la lumière et les nutriments.

Pour examiner les processus responsables des différences entre les performances des cultures intercalaires et leurs équivalents en cultures pures, il faut une méthode d'analyse qui puisse (Azam-Ali, 1995) :

- 1- Calculer la productivité totale de cultures associées par unité de surface relativement à ce qui a pu être produit à partir de la même surface par les cultures pures.
- 2- Prendre en compte l'effet des différences de durée des cycles de culture pour chaque espèce sur la performance des cultures pures et associées.

- 3- Comparer la capture et la conversion des ressources par les cultures associées et pures sur la même base (la matière sèche ou le rendement).

Il existe dans la littérature, plusieurs méthodes qui comparent l'efficacité des cultures intercalaires avec celle des cultures pures. La quantification des interactions entre les cultures conduites en association a été, en premier lieu, établi par le ratio *LER* (Land Equivalent Ratio) qui est défini comme le rapport, à niveau de techniques identiques, entre la superficie de la culture pure et celle de la culture conduite en association pour produire le même rendement (Willey, 1979) et peut être calculé selon l'équation suivante (Liu et Zhang, 2006) :

$$LER = \sum_{i=1}^{i=n} Y_i / Y'_i = Y_1 / Y'_1 + Y_2 / Y'_2 + \dots + Y_n / Y'_n \quad (I.3)$$

avec Y_1 et Y'_1 sont respectivement la surface relative de la culture conduite en monoculture et en association. Quand le $LER > 1$ ceci indique un avantage des cultures intercalaires en terme d'utilisation des ressources et quand le $LER < 1$, les ressources sont utilisées plus efficacement en cultures pures (Hauggaard-Nielsen et al., 2006). Le *LER* a été longtemps utilisé pour démontrer les avantages des cultures intercalaires. Cependant, la critique majeure au concept du *LER* est qu'il ne prend pas en compte la durée relative du cycle de chaque espèce en système de cultures intercalaires ou de cultures pures. Comme résultats, les valeurs publiées de *LER*, exagèrent souvent les avantages des cultures associées parce que l'intervalle du temps pendant lequel le sol a été laissé non utilisé après la récolte de la culture la plus courte n'est pas inclus dans les calculs. Pour pallier cette faiblesse de conception, Hiebsch et McCollum (1987) proposent l'indice « Area Time Equivalency Ratio » (*ATER*) qui définit le rendement comme une fonction de la surface du sol et du temps. L'équation qui définit cet indice est la suivante :

$$ATER = \left[(RY_1 \times t^{S1}) + (RY_2 \times t^{S2}) \right] / t^1 \quad (I.4)$$

avec RY_1 est le rendement relatif de la culture intercalaire 1 par rapport à celui de sa culture pure, t^{S1} est la durée du cycle de la culture 1 par rapport à celui en monoculture, RY_2 est le rendement relatif de la culture intercalaire 2 par rapport à celui de sa culture pure, t^{S2} est la durée du cycle de la culture 2 par rapport à celui en monoculture, et t^1 est la durée totale des cycles des cultures en intercalaire.

Quand le temps est inclus dans les calculs, ces auteurs ont observé que « des avantages importants attribués à l'utilisation de la terre pour cultiver les plantes en association ont disparu ». Néanmoins, ni le *LER* ni l'*ATER* ne peuvent identifier les processus physiques ou physiologiques responsables de la différence existant entre les cultures associées et pures (Azam-Ali, 1995).

Les recherches en agroforesterie et celles concernant les systèmes des cultures intercalaires ont aussi pour but d'étudier l'évolution de ces systèmes sur le long terme. Il faut donc déterminer dans quel sens va évoluer le rendement de chaque composante, avec quelle vitesse et sur quelle durée. Les réponses à ces questions ne peuvent être souvent obtenues que par la modélisation qui elle-même dépend de la fiabilité des données utilisées pour construire les modèles (Ong, 1995).

4- Système de culture intercalaire : olivier –culture maraîchère

4-1- Etude du fonctionnement hydrique

Compte tenu de ce qui a été décrit à propos de l'interaction hydrique entre les composantes du système de cultures intercalaires et du manque d'information sur l'alimentation en eau des cultures, la gestion de l'eau par l'agriculteur reste très empirique. Pour une quantification précise, chaque composante du système doit être considérée séparément. Les flux d'eau constituent la composante la plus difficile à mesurer. En effet, les méthodes micro-météorologiques classiques de mesure de l'évapotranspiration des plantes ne peuvent pas être appliquées aux composantes de l'association à cause de l'hétérogénéité du milieu. Il faut donc établir un dispositif expérimental applicable à ce système complexe afin d'étudier la répartition des flux hydriques du système (Abid Karray et al., 2005).

Il existe deux approches principales pour déterminer l'utilisation de l'eau par l'olivier et la culture maraîchère : 1) mesurer séparément l'évapotranspiration de chaque composante du système, 2) mesurer l'utilisation totale de l'eau par l'association et celle d'une composante de l'association en vue de déterminer l'évapotranspiration de la deuxième culture par différence.

La première approche est préférable puisqu'elle permet de mesurer la transpiration de chaque composante séparément et sera soumise uniquement aux erreurs inhérentes aux techniques de

mesures utilisées. La deuxième approche présente l'inconvénient que l'estimation de l'une des composantes n'est pas indépendante statistiquement de la première et la valeur obtenue par différence est influencée par les erreurs liées à la détermination de l'évapotranspiration totale de l'association et celles liées à la détermination de l'évapotranspiration de l'autre composante. Cependant, cette approche est considérée comme la seule méthode réaliste car les méthodes de mesures séparées disponibles sont techniquement très laborieuses et onéreuses pour des mesures en continue sur de longues périodes de mesure (Black et Ong, 2000).

Plusieurs études ont essayé de mesurer séparément l'utilisation de l'eau dans les systèmes de cultures associées en déterminant la quantité totale d'eau utilisée par la méthode du bilan hydrique et en mesurant la transpiration de l'une des deux composantes de l'association (Black et Ong, 2000). Cette solution reste la méthodologie la plus pratique. La détermination des différentes composantes du bilan hydrique présente la difficulté de l'estimation de la variation spatiale et temporelle à l'intérieur des différentes communautés cultivées en association. La teneur en eau du sol est généralement déterminée en utilisant la sonde à neutrons ou la sonde TDR alors que la transpiration de la culture ou de l'arbre peut être mesurée en utilisant la porométrie, le système de la chambre ventilée, le traçage au deutérium ou les techniques de mesure du flux de sève.

4-2- La culture de l'olivier

Le choix de la culture de l'olivier réside dans l'importance de cette culture dans la région méditerranéenne en général et en Tunisie en particulier. La culture de l'olivier est très répandue sur le pourtour méditerranéen et la Tunisie compte près de 60 millions de pieds d'oliviers répartis sur 1.6 millions d'ha. De plus, l'olivier grâce au grand écartement traditionnellement pratiqué entre les arbres, permet l'installation de cultures associées au niveau de l'inter-rang. En effet, l'espacement entre les rangs de l'olivier varie en fonction du climat et du type du sol. En se dirigeant du nord de la Tunisie vers le sud, le climat devient plus « sec » et le sol plus léger (sableux). De ce fait, l'écartement entre les oliviers en pluvial va du 10×10 m dans le nord, pour des moyennes pluviométriques de 550 mm à 24×24 m dans le sud pour des moyennes inférieures à 200 mm. L'augmentation de l'écartement permet à l'olivier d'avoir une plus grande réserve d'eau dans un volume de sol à explorer plus

important. D'autre part, les caractéristiques physiologiques de cette espèce la classe parmi les cultures les plus adaptées aux conditions hydriques limitantes ou variables. L'olivier s'adapte remarquablement bien à des conditions extrêmes telles que la sécheresse et la chaleur ce qui justifie son extension dans la région méditerranéenne caractérisée par un climat semi-aride, où il est traditionnellement conduit en pluvial. En effet, si l'olivier est considéré comme l'arbre fruitier xérophyte par excellence, c'est grâce à sa capacité à puiser l'eau à un potentiel hydrique du sol de l'ordre de -2.5 MPa en maintenant un fort gradient de potentiel entre feuilles, racines et sol ce qui lui permet de valoriser de très faibles quantités d'eau dans le sol non utilisables par d'autres espèces (Fernández et Moreno, 1999). A ces caractéristiques s'ajoutent ses adaptations morphologiques au niveau des feuilles (de petites tailles et couvertes de trichomes des deux côtés diminuant la perte d'eau) et du tronc (présence de couche subéreuse dont l'épaisseur dépend de l'aridité du climat) (COI, 1997). En cas de déficit hydrique, l'olivier est capable de réduire la quantité d'énergie interceptée par son feuillage en augmentant l'enroulement des feuilles et réduisant l'angle des feuilles par rapport au tronc (Fernández et Moreno, 1999). Toutefois, en absence d'irrigation continue ou de précipitation, il est connu que l'olivier peut valoriser une irrigation d'appoint en lui permettant d'assurer une production minimale. L'importance de cette valorisation dépend du stade phénologique de l'olivier (Michelakis, 1995).

Durant les années humides, des cultures céréalières et légumineuses sont pratiquées en intercalaire avec l'olivier. Plus récemment, le développement de l'irrigation à partir de puits de surface a permis l'intensification des cultures et la substitution des cultures maraîchères aux céréales car elles ont une valeur marchande plus élevée. On assiste ainsi à l'évolution d'un système pluvial extensif vers un système irrigué plus productif. En effet, bien que l'olivier s'adapte bien aux faibles apports hydriques, il peut à l'opposé valoriser hautement l'irrigation. Il est à remarquer que la plupart des cultivars de l'olivier réagissent bien à des conditions hydriques et nutritives favorables et peuvent faire l'objet d'une culture semi-intensive en verger, avec une croissance vigoureuse et une fructification relativement importante (COI, 1997). En effet, l'irrigation de l'olivier a un effet positif sur le développement végétatif de l'arbre, elle augmente la production et favorise le grossissement du fruit. Des apports hydriques par l'irrigation semblent également atténuer le phénomène d'alternance dans la production, très connue chez cette espèce.

Conclusion

En climat aride, la rareté de l'eau, surtout celle de bonne qualité, constitue une limitation majeure pour une agriculture intensive en plein développement. Les techniques d'amélioration de l'utilisation des eaux de pluie ont permis d'augmenter les rendements agricoles. L'expansion démographique et parallèlement celle des besoins en produits agricoles incite à mobiliser davantage les ressources hydriques et à développer des systèmes irrigués. Cependant, comme cette ressource est limitée, il est crucial d'adopter une utilisation efficiente de l'eau avec des quantités moindres. Le système de cultures associées a été traditionnellement conduit en pluvial afin de mieux profiter des années pluvieuses. Dans le contexte actuel, la conversion de ce système en irrigué est une alternative presque obligatoire, tout en conservant les potentialités du pluvial en cas de pénurie d'eau.

La conduite de ce système repose essentiellement sur des bases empiriques. Son étude est donc nécessaire afin d'analyser les interactions hydriques entre les cultures pour une meilleure compréhension des interactions en fonction des ressources environnementales. Ceci permet d'améliorer la gestion hydrique du système. Une méthodologie appropriée est à développer pour évaluer la consommation hydrique de chaque culture de l'association afin de fournir les éléments nécessaires à la modélisation du fonctionnement du système.

L'association olivier- culture maraîchère cultivée chez un agriculteur de la Tunisie Centrale a été choisie en raison de l'importance de ce système de culture dans cette région. Deux cultures ont été choisies pour cette association : la pomme de terre et le petit pois. Le choix de la pomme de terre se justifie par l'importance de cette culture sur le plan national. Du fait que plusieurs cycles de culture peuvent être réalisés par année on peut choisir la saison de culture la plus avantageuse au système. En effet, quand la culture associée est irriguée, il est judicieux de choisir l'époque où les irrigations peuvent être les plus bénéfiques à l'olivier. Il faudrait chercher aussi s'il n'y aurait pas au contraire un effet de compétition entre les deux cultures pour une saison particulière qui serait alors à bannir. La culture du petit pois a été sélectionnée comme une composante d'une rotation culturale pour différentes raisons. D'abord c'est une légumineuse qui, si elle n'enrichit pas significativement le sol en azote, n'entraîne pas une compétition avec l'olivier pour cet élément. Ensuite, n'appartenant pas à la même famille que la pomme de terre, il y a moins de risque de ravageurs communs qui peuvent s'installer d'une culture à l'autre. Enfin, ayant un système racinaire plus profond que

celui de la pomme de terre (1m contre 0.6 m pour la pomme de terre), les deux cultures n'exploiteront pas le sol à la même profondeur.

Les différentes méthodes de mesure de l'utilisation de l'eau par les cultures seront détaillées dans le chapitre suivant afin de dégager les options expérimentales les mieux adaptées au système étudié.

CHAPITRE II

CONSOMMATION EN EAU DES CULTURES

Introduction

La contribution de l'évaporation du sol et de la transpiration des cultures dans l'évapotranspiration totale d'un écosystème du milieu aride et semi-aride est fortement variable à l'échelle spatiale et temporelle. D'où, l'importance des mesures séparées de ces deux composantes dans ces régions. Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer les différents flux évaporatoires. Le choix d'une technique donnée est fonction de l'échelle d'étude (qui varie de l'organe végétal au bassin versant) et de la résolution temporelle requise (pas de temps horaire ou annuel). A cela s'ajoute, l'adaptabilité de la méthode au matériel végétal et au système de culture étudié.

Dans le cas du système de cultures intercalaires, l'hétérogénéité spatiale des cultures, qui ont en plus des propriétés de fonctionnement différentes, rend difficile l'étude de la consommation hydrique de chaque composante du système. Par ailleurs, une mesure précise des différentes contributions des éléments du système est nécessaire pour une meilleure compréhension du fonctionnement hydrique permettant ainsi l'amélioration de la gestion d'une ressource hydrique limitée dans ces zones.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons succinctement les principales méthodes de détermination de l'évapotranspiration. La seconde partie décrit les différentes méthodes de mesure du flux de sève. Enfin, la troisième partie décrit la technique du flux de sève par dissipation de chaleur avec chauffage alternatif qui a été choisie comme technique de mesure sur l'olivier. Dans ce chapitre, les différentes méthodes qui ont été utilisées dans l'expérimentation sont plus détaillées que les autres.

1-Méthodes de détermination de l'évapotranspiration réelle des cultures

Les différentes méthodes de mesure de l'évapotranspiration peuvent être classées selon leur concept de base: hydrologique, micro-météorologique ou physiologique (Rose et Sharma, 1984, Rana et Katerji, 2000).

1-1- Approche hydrologique

1-1-1-Bilan hydrique du sol

La méthode du bilan hydrique repose sur le principe de conservation de masse d'où dérive l'équation du bilan hydrique (Tonrthwaite, 1948 ; Tonrthwaite et Mather, 1955) qui détermine les entrées (apports hydriques) comparées aux sorties (utilisation et/ou pertes d'eau). Ceci peut être appliqué à différentes échelles dans l'espace (de 10 m² à 10 km² ou plus) et dans le temps (allant de l'échelle journalière à l'échelle annuelle) selon l'objectif de l'étude. Chaque composante du bilan est liée à un processus spécifique et peut être mesurée ou estimée. La détermination de l'évapotranspiration réelle par cette méthode s'effectue d'une façon indirecte. En effet, l'*ET* est estimée comme un terme résiduel de l'équation du bilan. Sa détermination consiste à chiffrer les quantités d'eau qui entrent, sortent ou demeurent dans un volume spécifique du sol, au cours d'une période donnée, selon l'équation suivante :

$$\Delta S = P + I + W - ET - R - D \quad (\text{II.1})$$

Tous les termes de l'équation peuvent être exprimés en millimètres. ΔS (variation du stock hydrique), elle est déterminée au niveau de la zone racinaire entre deux dates (*i* et *i-1*) et est définie comme suit : ($\Delta S = S_i - S_{(i-1)}$) avec *S* : la teneur en eau du sol. *P* (précipitations), elles constituent la principale source en eau du sol. Elles se trouvent sous plusieurs formes (pluie, neige, grêle,...). *I* (irrigation), elle représente un apport hydrique artificiel qui peut être en continu dans le cas d'un système irrigué ou de complément quand l'irrigation est pratiquée seulement en cas d'un déficit hydrique aigu (appelé aussi irrigation d'appoint) ou encore une irrigation déficitaire (un processus selon lequel les cultures sont moins irriguées pendant les stades de croissance végétative relativement insensibles au stress hydrique). *W* (remontée capillaire), c'est la contribution d'une nappe sous forme de remontée capillaire. *ET* (évapotranspiration de la culture), elle est égale à la quantité d'eau utilisée par la plante et

évaporée du sol. D (drainage), est défini comme le mouvement de l'eau vers les profondeurs du sol qui va alimenter les nappes phréatiques et les réseaux souterrains. R (ruissellement), il s'effectue au niveau d'un sol ayant une certaine pente. R dépend des caractéristiques des précipitations (quantité, durée et intensité) et de la capacité du sol à les infiltrer. Dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration, l'écoulement de surface se produit. Dans le cas d'un sol à tendance argileuse et plutôt sec, l'impact des gouttes d'eau peut provoquer, l'éclatement d'agrégats et une distribution des particules les plus fines en surface conduisant à la fermeture progressive des pores et l'imperméabilisation du sol (phénomène de battance). Le ruissellement cause la dégradation du sol par transport solide.

Comme il est difficile de mesurer tous les paramètres de l'équation du bilan, plusieurs simplifications sont effectuées. Souvent, certains termes peuvent être négligés et l'équation du bilan hydrique (II.1) est utilisée sous sa forme simplifiée :

$$\Delta S = P + I - ET \quad (\text{II.2})$$

En effet, dans les zones arides et semi-arides, le ruissellement (R) peut être négligé dans le cas de très faible pente (Holmes, 1984). De même, pour un certain type de sol (sableux, limono-sableux ou sablo-limoneux), R peut être négligé dans certaines conditions (Jensen et al, 1990).

Le drainage (D) est le paramètre le plus difficile à mesurer. L'identification du plan du flux nul peut être utilisée pour déterminer l'occurrence du drainage. L'utilisation des mesures tensiométriques avec celles de l'humidité du sol au-delà de ce plan permet de déterminer le drainage, dans certaines conditions. Cependant, une variation nulle de la teneur en eau à une certaine profondeur ne traduit pas nécessairement des conditions de flux nul (Rose et Sharma, 1984). Son importance doit donc être vérifiée dans chaque situation particulière, bien qu'il n'ait pas simple d'établir si le drainage peut être négligé ou non (Katerji et al., 1984). Généralement, à l'échelle journalière, D peut être négligé si le stock d'eau du sol résultant d'un apport d'eau ne dépasse pas la capacité au champ (Rana et Katerji, 2000).

L'évaluation de la contribution de la nappe (W) dépend du type du sol étudié. Dans le cas d'un système fermé (sol peu profond ou sol avec une nappe souterraine très profonde), W peut être négligé. Par contre, si le système est ouvert (sol profond ou nappe superficielle), W ne peut pas être négligé et la variation du stock (ΔS) sera difficile à mesurer d'une manière précise. En effet, durant les saisons humides ΔS et W sont de même ordre de grandeur, alors

que durant les saisons sèches W peut atteindre 30 % de l'évapotranspiration réelle cumulée durant la saison (Katerji et al., 1984).

La variation du stock hydrique (ΔS) est déterminée à partir de la mesure de la teneur en eau du sol qui s'effectue généralement avec un pas du temps plus ou moins régulier sur toute la profondeur racinaire. La mesure peut être faite de plusieurs façons : soit par méthode directe (méthode gravimétrique), soit par des méthodes indirectes (sonde à neutrons, TDR, ...) basées sur des relations entre les propriétés physiques du sol (réflexion des molécules d'eau, conductivité électrique...) et sa teneur en eau.

Les erreurs de mesure relatives à la méthode du bilan hydrique dépendent de la précision relative de chaque composante de l'équation. L'erreur standard dans la détermination de l' ET peut être importante et même proche de la valeur estimée quand les autres erreurs sur les composantes du bilan sont élevées. L'erreur de mesure des précipitations peut être due à l'évaporation au niveau du pluviomètre, l'éclaboussement des gouttes, etc. Son exactitude peut varier de $\pm 10-12\%$.

Nous présentons dans ce qui suit, trois des méthodes de détermination du stock hydrique du sol qui sont les plus utilisées: l'échantillonnage gravimétrique, la dispersion neutronique, la réflexion dans le domaine temporel (Time Domain Reflectometry, TDR).

a- La méthode gravimétrique

C'est la méthode directe de détermination de la teneur en eau du sol. Elle consiste à prélever des échantillons du sol à la tarière pour en déterminer la teneur en eau. Le nombre et la profondeur des échantillons dépendent de la profondeur totale étudiée. Une fois prélevés, les échantillons sont mis dans des boîtes en verre ou métalliques, bien étanches, pour être pesés aussitôt afin d'en déterminer le poids humide. Ils sont ensuite mis à l'étuve pendant 24 heures (ou plus, en fonction du type du sol) à une température de 105°C . Ensuite, les échantillons sont à nouveau pesés et la variation de masse est alors égale à la quantité d'eau contenue à l'origine.

C'est la technique la moins coûteuse et la plus simple du point de vue du principe, mais elle est particulièrement lourde dans sa réalisation et ne peut être appliquée qu'à l'échelle de la semaine ou plus. Son inconvénient majeur est d'être très destructrice. En effet, on ne peut prélever des échantillons du sol qu'une seule fois à un même endroit. Cependant, malgré ses

défauts, elle continue à être la méthode de référence par rapport à laquelle d'autres sont calibrées.

b- La sonde à neutron

Cette technique est utilisée depuis les années cinquante (Gardner et Kirkhan, 1952), elle permet de mesurer l'humidité volumique du sol en utilisant les propriétés de réflexion d'un flux de neutrons par les molécules d'eau, à travers les atomes d'hydrogène. La mesure nécessite la mise en place d'un tube en alliage d'aluminium (ou en PVC) enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence. Lorsque la sonde est introduite dans le tube, des neutrons rapides sont émis par la source (mélange de Americium et de Beryllium) dans toutes les directions. Ils se heurtent aux noyaux des divers atomes qui se trouvent sur leur trajectoire et voient ainsi leur énergie cinétique et leur vitesse diminuer progressivement. Si le sol présente une concentration d'atomes d'hydrogène suffisante, le ralentissement des neutrons émis par la source se produit alors qu'ils se trouvent encore à proximité de celle-ci. Les neutrons ralentis par collisions successives se propagent dans des directions aléatoires, si bien qu'il se forme un nuage neutronique dont la densité est plus ou moins constante. Une partie de ces neutrons, qui dépend de la concentration en atomes d'hydrogène, est renvoyé directement en direction du détecteur en créant des impulsions. Le nombre d'impulsions pendant un intervalle de temps donné est enregistré par un compteur. La conversion de la valeur enregistrée par le compteur en une teneur en eau se fait par le biais d'une courbe d'étalonnage.

La sphère d'influence de la sonde varie de 15 à 30 cm selon l'humidité du sol (elle augmente quand l'humidité diminue) (Couchat, 1977 ; Daudet et Vachaud, 1977) ce qui constitue un volume échantillonné relativement important. Cependant, ceci engendre des erreurs pour les mesures proches de la surface du sol constituant un des point faibles de cette technique. En effet, quand la sonde est proche de la surface, les neutrons, dont le nombre ne peut être comptabilisé, peuvent s'échapper vers l'atmosphère. Pour remédier à cela, une calibration spécifique pour les mesures en surface est recommandée en plus de l'utilisation d'un réflecteur neutronique en plastique placé au milieu du tube sur le sol. Evett et Steiner (1995) ont conduit une expérience de vérification de la performance de cette méthode par rapport à des mesures gravimétriques, au niveau d'un sol hétérogène (55 % sable, 23 limon et 22 % argile). Ils ont conclu que les mesures de l'humidité du sol par cette méthode sont précises et satisfaisantes. De plus, l'avantage principal de cette technique réside dans la possibilité de

répéter des mesures, dont le résultat est instantané, en un même emplacement. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans les règlements de sécurité liés à son utilisation qui peuvent être lourds à gérer. D'autre part, la cause principale des erreurs de mesure est l'étalonnage de la sonde qui est long et délicat. L'un des moyens de le faire consiste à effectuer des mesures gravimétriques au voisinage des tubes. La régression linéaire reliant le comptage neutronique à l'humidité du sol doit être faite dans des conditions hydriques limites (sol sec et sol humide avec de préférence une situation intermédiaire). Des erreurs au niveau de la pente de la droite sont généralement dues à l'absence de ces humidités extrêmes du sol lors de l'étalonnage. De même, des erreurs peuvent surgir dans le cas d'une texture hétérogène au niveau du profil du sol qui n'a pas été prise en compte. De plus, lors des mesures neutroniques, il faut s'assurer de la profondeur de mesure qui doit être la même tout au long de la campagne d'étude. Le changement de la côte de mesure peut induire des erreurs dans l'estimation du stock à un niveau donné. La précision de cette technique dépend des erreurs liées aux incertitudes provenant des courbes d'étalonnage. D'après Jaillard et Luc (1979) et Daudet et Vachaud (1977), la précision de cette technique est de $\pm 0.02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

c- Les sondes TDR

La méthode de réflectométrie dans le domaine temporel (Time Domain Reflectometry) (TDR) détermine la teneur en eau du sol à partir de sa constante diélectrique. La technique consiste à envoyer une impulsion électromagnétique dans un guide d'onde généralement formé de deux électrodes (parfois trois) métalliques de longueur connue et à analyser le temps du transit, soit à partir du signal de retour de l'impulsion, soit en mesurant le temps du transit pour différentes tensions. Cette méthode est peu destructrice, permet des mesures qui sont peu affectées par la nature du sol et ne nécessite pas d'étalonnage (existence d'une équation d'étalonnage quasi-universelle). Les sondes TDR mesurent l'humidité volumique du sol en place avec une incertitude inférieure à 2% aussi bien en climat tempéré que semi-aride. Cependant, son installation est lourde et le volume échantillonné par les sondes est faible. De plus, des difficultés peuvent survenir dans le cas d'un sol hétérogène où les perturbations du milieu lors de l'installation des sondes sont conséquentes et se répercutent sur la qualité des mesures.

1-1-2- Le lysimètre

Il s'agit d'une cuve étanche enterrée d'une épaisseur de 0,5 à 2 mètres, à parois verticales, ouverte en surface et remplie par le sol et la culture à étudier. Il existe deux types de lysimètres : à drainage et à balance. Le premier type, qui est le plus ancien, comporte à sa base un système de récupération des eaux qui percolent, ce qui permet de déterminer la quantité d'eau de drainage et d'estimer l'évapotranspiration maximale de la culture en maintenant une percolation permanente. Les lysimètres à balance fournissent des mesures directes de l'*ET* en mesurant les variations du stock d'eau par pesée. Sous climat tempéré, les mesures de l'*ET* par cette méthode à l'échelle journalière se font avec une précision supérieure à 10 % à l'échelle journalière et entre 10 et 20 % à l'échelle horaire (Rana et Katerji, 2000). Cependant, la représentativité des données et la lourdeur de son implantation avec le minimum de perturbation constituent les points critiques des lysimètres à balance (Rose et Sharma, 1984). Cette méthode reste peu utilisée à cause des inconvénients cités ci-dessus, encore moins en système de cultures intercalaires où le "motif représentatif" du système (arbre+culture) ne peut pas être contenu dans un lysimètre.

1-2- Approche micro-météorologique

Ces méthodes permettent la détermination de l'évapotranspiration à partir des variables micro-météorologiques (température, humidité, vitesse du vent,...) mesurées au niveau et/ou au-dessus de la surface évaporatoire. Trois méthodes principales sont généralement utilisées: la méthode de bilan d'énergie-rapport de Bowen, la méthode aérodynamique et la méthode des corrélations turbulentes "Eddy correlation". Les différentes techniques utilisées peuvent fournir des mesures de l'évapotranspiration à l'échelle horaire ou moins, sans perturbation du milieu. Utilisant comme hypothèse la conservation de toutes les densités de flux au-dessus de la culture, ces méthodes ne peuvent être appliquées que sur des surfaces importantes et plates. Ceci constitue une limitation majeure car ces méthodes ne peuvent pas être appliquées dans le cas de petites parcelles. Elles sont plutôt adaptées aux grandes parcelles homogènes ou à des surfaces encore plus grandes (même présentant des cultures hétérogènes) comme le cas d'un bassin versant.

1-3- Approche physiologique

1-3-1- Différentes méthodes physiologiques

La transpiration constitue la partie de l'évapotranspiration qui passe à travers les plantes. Les méthodes physiologiques permettent de mesurer aussi bien l'eau qui passe à travers une plante, qu'une partie de la plante ou encore un groupement de plantes. Différentes méthodes peuvent être utilisées comme celle du système de chambre ventilée, les traceurs isotopiques, le poromètre et les méthodes du flux de sève. Les systèmes du poromètre (mesure de la résistance stomatique) et de chambre ventilée (il s'agit de passer de l'air à humidité connue à travers une enceinte qui contient un échantillon de plante et de mesurer l'augmentation de l'humidité de l'air sortant) permettent des mesures discontinues et laborieuses. Ces techniques sont aussi inapplicables quand le feuillage est mouillé. De plus, il a été montré que la résistance stomatique peut varier au niveau d'une même feuille (Mott et al., 1997), ce qui diminue la précision de la méthode porométrique quand il s'agit d'extrapoler la mesure au niveau du végétal ou encore au niveau de la culture. Quant à la méthode de la chambre ventilée, le brassage de l'air à l'intérieur de la chambre peut affecter la transpiration de l'organe végétal et biaiser les mesures. Le traçage au deutérium évite ces problèmes et permet des mesures de la transpiration sur des périodes de plusieurs jours, mais il est relativement onéreux et requiert des analyses spécifiques. Cependant, l'avènement des techniques de mesure du flux de sève qui sont peu onéreuses, fiables et bien appropriées pour une utilisation en plein champ, a permis des mesures en continu non destructives. Ces techniques fournissent des mesures directes sur des plantes sur de longues périodes. De nos jours, il existe une gamme de techniques du flux de sève relativement peu onéreuses et directes qui permettent des mesures continues de la transpiration sur des espèces variant du point de vue taille d'une plante herbacée comme le riz (Sakuratani, 1990) aux grosses espèces forestières (Granier et al., 1996), souvent avec une précision prétendue de 5-10 % (Black et Ong, 2000).

Au vu de l'inaptitude des méthodes physiologiques telles que le poromètre, la chambre ventilée ou encore les traceurs isotopiques pour des mesures en continu, précises et sans perturbation du végétal, il apparaît que seules les méthodes de mesure du flux de sève peuvent être appliquées dans notre cas. En effet, la mesure de la transpiration du végétal dans le cas du suivi de la consommation hydrique pendant un ou plusieurs cycles de cultures nécessite une méthode qui peut fournir des mesures ininterrompues.

1-3-2- Les méthodes de mesure du flux de sève

La quasi-totalité de l'eau qui passe par les racines transite par le tronc sous forme de sève brute vers les stomates pour être évaporée par transpiration. La mesure du flux de sève représente donc un moyen approprié pour la mesure de la transpiration au niveau des arbres (Masmoudi et al., 2004). L'amélioration récente des techniques thermoélectriques utilisées pour déterminer la transpiration parallèlement à un développement commercial des instruments de mesure ont permis une utilisation accrue de ces techniques. Leur principe général repose sur le calcul du flux massique de l'eau (flux transpiratoire) en utilisant le transfert de chaleur comme traceur. Trois principaux groupes de méthodes sont utilisés : les méthodes basées sur l'application de la chaleur par pulsations, ou en continu, ou encore celles basées sur le bilan d'énergie de la partie chauffée.

Ces méthodes sont idéalement appropriées pour des mesures en continu de la consommation hydrique des plantes, si l'utilisateur sélectionne la méthode la plus adaptée aux objectifs. En effet, lors du choix du type de méthode à utiliser, il faut tenir compte des sources potentielles d'erreur pour prendre les précautions nécessaires (Smith et Allen, 1996). Ces méthodes présentent l'avantage de pouvoir être appliquées sur des plantes individuelles hétérogènes ou à des espèces différentes dans un même verger. Néanmoins, il faut tenir compte de ces différences lors de l'intégration des mesures au niveau de la parcelle. En effet, il a été démontré que la mesure du flux de sève fournit des mesures précises de la transpiration à l'échelle de la parcelle si un échantillonnage adéquat a été fait tenant compte de la représentativité des arbres du point de vue taille et âge. Ainsi, la mesure du flux de sève peut être extrapolée de l'arbre à l'échelle du verger, en utilisant des paramètres caractéristiques comme le nombre d'arbre par unité de surface, la circonférence de l'arbre, la surface conductrice ou la surface foliaire (Granier et al., 2000).

Nous exposons dans ce qui suit, les différentes méthodes de mesure du flux de sève avec leur principe de base et leur domaine d'application afin de choisir la meilleure méthode applicable à l'olivier.

2- Méthodes de mesure du flux de sève

2-1- Principe de base

Suite aux travaux pionniers de Huber au début du siècle (1932), plusieurs méthodes de mesures du flux de sève ont été décrites. Elles se basent sur la très forte capacité calorifique de l'eau dont les déplacements perturbent sensiblement la diffusion de chaleur dans les tissus végétaux. Ces méthodes utilisent la chaleur comme traceur du mouvement de la sève. Elles utilisent des hypothèses concernant la perte de chaleur par conduction. Les méthodes de mesure du flux de sève diffèrent selon le temps de chauffage (impulsion instantanée ou chauffage continu), les paramètres mesurés (temps ou écart de température), la complexité, le coût de l'installation et le domaine d'application. Certaines techniques nécessitent une calibration préalable, ce qui peut constituer un handicap limitant l'extrapolation des résultats à des espèces différentes (Masmoudi et al., 2004). Mais la mesure du flux en elle-même représente une première étape dans l'étude du flux de sève. Il s'agit par la suite d'intégrer les données obtenues par les capteurs à l'échelle de l'arbre puis de les extrapoler au niveau du verger.

Les méthodes de mesure du flux de sève peuvent fournir des mesures directes à des échelles du temps et d'espace très fines. Elles permettent des mesures non destructives et une estimation de l'utilisation de l'eau par les plantes en plein champ ou en pot. Ces méthodes ne sont pas exigeantes en terme de dimensions de la parcelle ou de topographie particulière, comme c'est le cas pour les méthodes micro-météorologiques. La possibilité d'automatisation rend ces méthodes pratiques et adaptées à des mesures à long terme (Yunusa et al., 2000, avec de nombreuses applications en agriculture, horticulture, foresterie et écologie (Smith et Allen, 1996).

Ces méthodes peuvent être classées en trois principaux groupes. Le premier groupe comporte les techniques basées sur la vitesse de transfert d'une impulsion de chaleur: méthodes de mesure d'impulsion de chaleur. Le deuxième groupe comprend les méthodes qui analysent le bilan thermique en présence d'une source de chaleur continue: les méthodes de bilan de chaleur. Le troisième est constitué de méthodes basées sur l'observation de la variation de la température au voisinage d'une source de chaleur connue : elles forment les méthodes de mesure par dissipation de chaleur.

2-2- Méthode par impulsion de chaleur

2-2-1- Principe de la méthode

Ce sont les premières méthodes qui ont utilisé la chaleur comme indicateur de la vitesse du transfert de la sève brute. Huber (1932) a déterminé la vitesse d'une courte pulsation de chaleur (V en m h^{-1}) transportée par le mouvement de sève selon l'équation $V=x/tm$ où tm est le temps au bout duquel la pulsation émise d'un élément chauffant est détectée par un thermocouple placé à une distance (x) en aval. Considérant le temps de transport de l'onde de chaleur comme égal à celui mis par la sève pour atteindre le point de mesure, cette approche suppose que la chaleur est totalement transportée par convection. En raison de la présence d'un flux conductif associé au transfert convectif de la sève, Huber et Schmidt (1937) proposèrent une deuxième approche améliorée dite de « compensation » (Compensation heat pulse method).

2-2-2- Domaine d'utilisation

La méthode des impulsions de chaleur n'est utilisable que sur des tiges ligneuses. Elle a été utilisée sur plusieurs espèces. Yunusa et al. (2000) l'ont utilisée sur la vigne (*Vitis vinifera* L., cv Sultana) avec des résultats bien corrélés aussi bien avec des mesures gravimétriques qu'avec l'équation de Penman-Monteith. Elle a été également utilisée sur le pin de Monterey (*Pinus radiata*) donnant une étroite relation entre la transpiration de l'arbre et l'humidité du sol (Teskey et Sheriff, 1996). Sur olivier (*Olea europea*), la méthode des impulsions de chaleur par compensation a été utilisée d'abord par Moreno et al. (1996) au niveau des racines et par Fernández et al. (1996) au niveau du tronc. Fernández et Moreno (1999) ont toutefois, critiqué la performance de cette technique en ce qui concerne la prise en compte du gradient du flux au niveau de la surface conductrice. Depuis, plusieurs essais ont été conduits sur olivier montrant la validité de cette méthode si l'intégration du gradient du flux à travers la surface conductrice est prise en compte. La méthode des impulsions de chaleur est très utilisée grâce à son faible coût, sa faible sensibilité aux gradients thermiques et sa faible demande en énergie de fonctionnement (Köstner et al., 1998). Néanmoins, elle est peu sensible aux faibles débits. En effet, des vitesses du flux inférieures à 60 cm h^{-1} ne sont pas détectées par cette technique (Swanson, 1994). D'autre part, elle présente un inconvénient

majeur: les mesures sont ponctuelles, alors que la densité du flux de sève varie avec la profondeur dans le xylème, d'où la nécessité de multiplier les capteurs au niveau d'une même direction.

2-3- Méthode du bilan de chaleur

2-3-1- Principe de mesure

Daum (1967) paraît être le premier à l'avoir proposée, mais ne l'applique, comme Čermák et al. (1973) qu'à un secteur du tronc. Sakuratani (1979) est le premier à appliquer le bilan de chaleur à toute une section du tronc. La méthode du bilan de chaleur a été développée au début pour des plantes annuelles, pour être étendue par la suite à des petits arbres tels que ceux rencontrés dans des vergers de haute densité. Elle consiste à appliquer une faible quantité de chaleur d'une manière continue pour augmenter la température d'une section du tronc et d'en déduire le bilan de chaleur entre la partie chauffée et celle qui ne l'est pas. Le bilan de chaleur peut alors être calculé au niveau d'une section du tronc, par la méthode développée par Sakuratani (1979), ou seulement sur un secteur de la section du tronc par celle décrite par Čermák et al. (1973).

2-3-2- Domaine d'utilisation

La méthode du bilan de chaleur ne nécessite pas de calibration ni de connaissance de la surface conductrice. Elle peut être utilisée sur des arbres à faible diamètre (< 15 cm). Des capteurs de mesure du bilan de chaleur pour des diamètres de tiges variant entre 2 et 125 mm sont commercialement disponibles. Néanmoins, l'installation des capteurs est assez délicate puisqu'il faut s'assurer d'un contact parfait avec la surface du tronc (Smith et Allen, 1996). Cette méthode a été appliquée avec succès sur plusieurs espèces dont le châtaigner (Nasr, 1987), le pacanier (*Carya illinoensis*) (Steinberg et al., 1990), sur pêcher par Massai et al. (2000) et sur vigne par De Lorenzi et Rana (2000).

2-4- Méthode de dissipation de chaleur

2-4-1- Principe de la méthode

La méthode de dissipation de chaleur introduite par Granier (1985, 1987a et b) est basée sur la dissipation de chaleur par convection suite à la circulation de la sève. Elle consiste à mesurer la température au niveau d'une sonde chauffante et une autre non chauffante insérées radialement dans le tissu conducteur de la sève brute (xylème). La différence de température obtenue est maximale pour un débit de sève nul et décroît lorsque la vitesse du flux de sève augmente, puisque la sève évacue une quantité de plus en plus grande de la chaleur produite par la sonde chauffante. Cette méthode, développée à partir d'une calibration empirique au laboratoire sur différentes espèces (relation entre la densité du flux de sève et la différence de température entre deux sondes), est supposée valide pour toutes les espèces. Cependant, des études récentes ont montré la nécessité d'effectuer une calibration spécifique pour chaque espèce étudiée (Lundblad et al., 2001).

2-4-2- Domaine d'utilisation

Appliquée la première fois par Granier (1985) sur Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), son utilisation s'est étendue par la suite à d'autres espèces forestières et fruitières. Une expérience sur un pin maritime conduite par Loustau et al. (1990) a permis de tester cette méthode et a montré une bonne cohérence entre les mesures et celles du potentiel hydrique foliaire. Une analyse théorique de l'erreur de mesure du flux de sève au niveau des racines et du tronc du pommier a montré une bonne estimation de la transpiration de cet arbre fruitier à l'échelle du verger (Cabibel et Do, 1991). Sur les branches charpentières d'un cerisier (*Prunus cerasus*), cette méthode a mis en évidence une hétérogénéité du flux au niveau des branches, liée à celle spatiale et temporelle de l'humidité du sol (Cabibel et Isbérie, 1997). La méthode de Granier a été aussi utilisée sur Manguier (*Mangifera indica*) en culture en pot révélant une étroite corrélation avec des mesures effectuées par gravimétrie (Lu et Chako, 1998). Des mesures de la transpiration du bananier obtenues par les capteurs de Granier ont été étroitement corrélées aux variables micro-météorologiques montrant la fiabilité de cette technique (Lu et al., 2002). Au Costa Rica, O'Brien et al. (2004) ont utilisé cette méthode sur une dizaine d'arbres forestiers afin d'élaborer un modèle de prédiction de l'évolution de la densité du flux de sève en fonction des paramètres climatiques.

2-5- Choix de la méthode de mesure du flux de sève

Après avoir passé en revue les trois principaux groupes des méthodes de mesure du flux de sève (principe, domaine d'application), nous pouvons en déduire que les deux premiers groupes (méthode des impulsions de chaleur et du bilan de chaleur) présentent certains inconvénients qui limiteraient ou rendraient plus laborieuse leur application à l'olivier dans notre cas.

La méthode du bilan de chaleur convient seulement aux faibles diamètres du tronc ce qui la rend inadaptable à notre cas. Toutefois, il est à noter que cette technique a donné de bons résultats sur olivier quand elle a été appliquée sur des arbres âgés de seulement 2 ans ayant alors un faible diamètre du tronc (Dichio et al., 1998).

La méthode des impulsions de chaleur a été déjà utilisée sur olivier et validée par rapport à l'équation de Penman-Monteith (Fernández et al., 1996 ; Moreno et al., 1996). Néanmoins, sa performance a été revue par Fernández et al. (1998) puisque l'inconvénient majeur de cette technique réside dans la ponctualité des mesures qui diminue la précision de la technique. Par ailleurs, Fernández et al. (2001) ont montré qu'il existe une bonne corrélation entre le flux de sève mesuré par la technique de pulsation de chaleur par compensation appliquée sur olivier et les valeurs obtenues par pesée si on introduit un terme correctif à l'équation de base du calcul du flux de sève. Cependant, une mesure ponctuelle ne permet pas d'intégrer l'hétérogénéité, quand elle existe, de la densité du flux de sève au niveau de la surface conductrice du tronc de l'olivier (comme c'est le cas de plusieurs espèces). Pour pallier ce problème, il faudrait multiplier le nombre de capteurs dans une même direction pour intégrer au maximum la variation radiale du flux. Comme il est aussi nécessaire d'effectuer des mesures dans différentes directions, le nombre de capteurs risque d'être important pour une bonne estimation du flux.

Par conséquent, la méthode de dissipation de chaleur (Granier, 1985), semble être la mieux adaptée à l'olivier puisqu'elle permet d'intégrer le flux de sève sur une longueur de 2 cm (égale à la longueur du capteur). Elle permet aussi de longues périodes de mesure puisqu'elle a une faible dérive avec le temps (Granier, 1987a) ; de plusieurs mois à deux saisons de végétation (Lu et al., 2004). L'estimation de la transpiration à partir de cette technique a été bien corrélée aussi bien avec d'autres techniques du flux de sève qu'avec des mesures micro-météorologiques ou encore gravimétriques (Clearwater et al., 1999). D'autre part, cette

technique est simple d'installation, requiert une faible puissance de chauffage pour le fonctionnement du système, son principe de calcul est simple et son coût est faible, ce qui pourrait rendre cette technique la plus utilisée dans le future (Smith et Allen, 1996).

3- Mesure du flux de sève par la méthode de dissipation de chaleur

3-1- Dispositif et théorie de la méthode

3-1-1- Instruments de mesure

Le capteur de Granier est composé de deux sondes cylindriques d'une longueur de 20 mm et de 2 mm de diamètre. Les deux sondes sont insérées radialement au niveau du tronc. La sonde placée en haut est chauffée grâce à un enroulement d'un fil de constantan autour d'une aiguille hypodermique en acier inoxydable. La résistance chauffante, calibrée à 10 Ω , est reliée à une tension d'alimentation stabilisée afin d'avoir une puissance de chauffage de 200 mW. Cette puissance de chauffage représente un compromis entre la sensibilité du capteur (qui augmente avec l'intensité de chauffage) et le risque d'un échauffement de la sonde de référence et du point de mesure. Au milieu de la résistance chauffante, un thermocouple cuivre- constantan est placé et recouvert par une gaine en aluminium pour en uniformiser la température. La deuxième sonde située en dessous de la première à une distance d'environ 10 cm renferme uniquement un thermocouple identique au précédent qui est montée en opposition avec celui de l'élément chauffant de la première sonde (Granier, 1985).

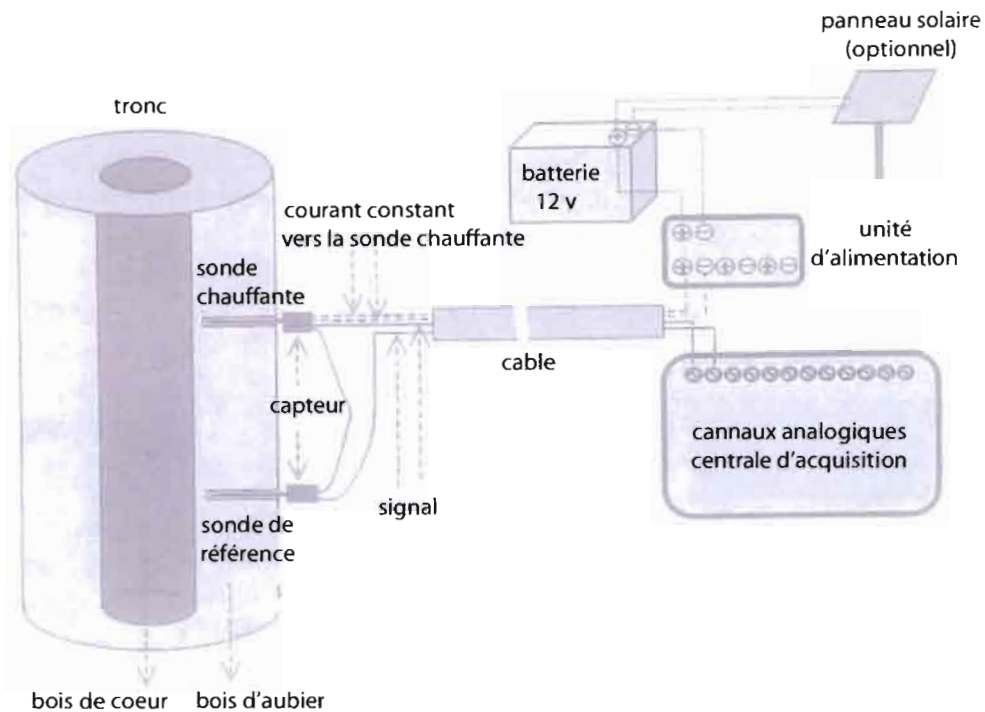


Figure II.1. Dispositif de mesure de la méthode de dissipation de chaleur de Granier : le capteur formé par une sonde chauffée et une sonde de référence est inséré au niveau du bois conducteur. Il est alimenté par un courant provenant d'une batterie. Le signal renvoyé est enregistré par la centrale d'acquisition où ils sont stockés (D'après Lu et al., 2004).

3-1-2- Théorie et mode calcul du flux de sève

Lorsqu'un équilibre thermique s'établit entre l'élément chauffant et le milieu bois-sève, pour un flux de sève constant, la chaleur apportée par effet Joule est entièrement dissipée par convection au niveau de la paroi de la sonde. On peut écrire alors :

$$hS(T - T_{\infty}) = Ri^2 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

h : coefficient de transfert de chaleur ($\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) entre la sonde et le bois.

S : aire de surface d'échange (m^2)

T : température du capteur ($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} : température du matériau bois en l'absence de chauffage ($^{\circ}\text{C}$)

R : résistance électrique de l'élément chauffant (Ω)

i : intensité du courant électrique (A)

Le coefficient h est supposé dépendre du débit de la sève F_d ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sous la forme :

$$h = h_0 (1 + \alpha F_d^{\beta}) \quad (\text{II.4})$$

Où, α et β sont des coefficients dépendants de la quantité de chaleur appliquée, h_0 est le coefficient d'échange lorsque $F_d=0$ (flux nul) qu'il est possible de calculer d'après (II.3) :

$$h_0 = \frac{Ri^2}{S(T_M - T_{\infty})} \quad (\text{II.5})$$

T_M désigne la température maximale à flux de sève nul ($F_d=0$)

En conditions du flux nul, la température dans la zone autour de la sonde chauffante croît et atteint un point où la chaleur dissipée à travers le bois est en équilibre avec l'énergie apportée par la sonde chauffante. La différence de température est donc à son maximum pour décroître par la suite rapidement quand la chaleur autour de la sonde chauffante est dissipée avec le mouvement du flux de sève du xylème. Granier (1985) a établi une équation empirique reliant la vitesse du flux de sève moyen et la différence de température mesurée. Quand il y a circulation de la sève, en combinant les équations (II.3), (II.4) et (II.5), la détermination de F_d se fait selon l'équation :

$$F_d = \left[\frac{1}{\alpha} \frac{T_M - T}{T - T_{\infty}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{II.6})$$

Le rapport $\frac{T_M - T}{T - T_{\infty}}$ est un nombre sans dimension, qui est appelé indice de flux K , proportionnel à F_d (Granier, 1985).

3-1-3- Calibrage des sondes

Les capteurs de la méthode de dissipation de chaleur ont été calibrés lors de la première utilisation de cette méthode par Granier en 1985, sur 3 essences forestières différentes: le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), le pin noir (*Pinus nigra*) et le chêne pédonculé (*Quercus pedunculata*). Granier et al. (1990) suggèrent que les paramètres de l'étalonnage ne dépendent pas des caractéristiques de l'arbre ou de l'anatomie du bois et qu'il est donc possible d'utiliser cette méthode avec une équation unique. L'équation d'étalonnage obtenue est:

$$K = 0.0206 \times 10^{-6} \times F_d^{0.812} \quad (\text{II.7})$$

D'où :

$$F_d = 119 \times 10^{-6} \times K^{1.231} \quad (\text{II.8})$$

Cependant, la calibration de Cabibel et Do (1991) sur trois espèces de feuillus : le Pommier (*Malus domestica*), le Chêne (*Quercus robur*) et le Châtaignier (*Castanea sativa*) et une colonne de PVC remplie de fibres synthétiques, a donné une équation d'étalonnage un peu différente de celle de Granier :

$$K = 0.023 \times 10^{-6} F_d^{0.770} \quad (R^2=0.97) \quad (\text{II.9})$$

et donc :

$$F_d = 137 \times 10^{-6} K^{1.300} \quad (\text{II.10})$$

Les valeurs des flux mesurés à partir de cette calibration sont jusqu'à 15 % plus élevées que celles obtenues à partir de l'équation de Granier pour des valeurs de K allant jusqu'à 1 ce qui est l'intervalle normal des mesures (Lu et al., 2004). Smith et Allen (1996) conseillent de calibrer la technique pour chaque nouvelle espèce à étudier, au moins jusqu'à ce qu'une nouvelle calibration basée sur des bases physiques soit développée.

3-2- Détermination de la densité du flux de sève et erreurs de mesure

3-2-1- Calcul de la densité du flux de sève

L'estimation de la densité du flux de sève par la méthode de Granier est basée sur la détermination d'un paramètre unique: la différence de température entre les deux sondes (ΔT). On définit la différence maximale de température (ΔT_{max}) comme la différence de température obtenue à flux nul. La précision de la détermination ΔT_{max} est fondamentale pour la fiabilité du calcul de la densité de flux. ΔT_{max} est enregistrée généralement avant l'aube, où l'on suppose l'occurrence du flux nul. Ceci n'est cependant pas toujours vérifié puisqu'une nouvelle croissance (végétative ou reproductive) ou une lente restauration du stock hydrique interne de l'arbre suite à une période de sécheresse prolongée peut engendrer un flux nocturne ascendant. Une perte d'eau à partir de la canopée due à un fort déficit de saturation de l'air et une forte vitesse du vent perturbe aussi la détermination de ΔT_{max} . Les propriétés thermiques du bois autour des capteurs peuvent aussi l'influencer. La sous-estimation de ΔT_{max} engendre une sous-estimation de la densité de flux.

En pratique, pour résoudre les problèmes des flux nocturnes et de dérive de ΔT_{max} , Granier (1987b) propose de calculer d'abord la ΔT_{max} sur une période de 10 jours, puis de déterminer la nouvelle ΔT_{max} par une régression linéaire entre les maxima locaux et le temps (jours juliens). Cette procédure a l'avantage de ne pas prendre en compte les nuits où il y a eu une transpiration non négligeable, ou un mouvement de sève. Une autre procédure consiste à utiliser la première interpolation linéaire mentionnée ci-dessus et d'enlever les points de mesures qui ont été en dessous des valeurs estimées pour en déduire une deuxième interpolation linéaire avec les points restants. Selon Granier (1987b), ΔT_{max} doit être déterminée séparément pour chaque capteur puisqu'elle est la combinaison des résultats de plusieurs facteurs qui sont souvent spécifiques au capteur lui-même. Pour des mesures plus fiables et afin d'éliminer des valeurs très hétérogènes de ΔT_{max} , il est nécessaire d'attendre 2 à 3 semaines après l'installation des capteurs afin qu'un bon contact sonde-bois ait lieu et qu'une variation normale des signaux du flux de sève puisse être obtenue (Lu et al., 2002).

3-2-2- Effet d'un gradient radial du flux de sève

Le gradient radial du flux de sève au niveau du tronc est rarement uniforme au niveau de la section conductrice d'une espèce donnée. En effet, la vitesse de la sève est généralement faible au niveau du xylème immature (au niveau du cambium), croît à une certaine distance à l'intérieur du tissu conducteur pour diminuer de nouveau au niveau du vieux bois (le bois de cœur et la moelle) (Swanson, 1994). La vitesse radiale de la sève au niveau du xylème dépend aussi du type du système vasculaire. Il existe trois types de système conducteur : 1) système conducteur non poreux : l'eau circule sous forte résistance au niveau des trachéides qui sont des petites cellules (cas des conifères), 2) système conducteur diffus-poreux : les vaisseaux conducteurs à diamètre similaires sont groupées en 3 ou 4 au niveau du jeune et vieux bois (cas de l'olivier) et 3) système vasculaire à anneaux : les vaisseaux conducteurs les plus larges se trouvent à la périphérie, à proximité de l'écorce et sont responsables à 99 % de la conduction de la sève.

L'allure de la vitesse du flux de sève chez les conifères et les espèces à système conducteur type diffus-poreux est d'aspect régulier à gaussien avec néanmoins plusieurs exceptions, alors qu'elle est d'aspect irrégulier dans le cas d'un système vasculaire à anneaux. Clearwater et al. (1999) ont conclu que la précision de la méthode de Granier dépend du système vasculaire de l'espèce étudiée. En effet, pour les arbres à système vasculaire diffus-poreux, la déviation par rapport à la calibration de Granier est faible, même si la vitesse du flux de sève varie du simple au double le long du capteur. Pour une vitesse du flux moyenne de 0.15 mm s^{-1} , une sous-estimation de seulement 8 % est observée en utilisant la calibration de Granier. Dans le cas des vaisseaux à anneaux poreux, l'erreur est de 45 %. En effet, l'allure du gradient du flux, dans le cas du système diffus poreux, suggère que la méthode de dissipation de chaleur soit relativement insensible à un gradient du flux radial modéré.

Par ailleurs, afin de tenir compte de cette variation du flux de sève, il est recommandé d'établir un facteur correctif reliant la densité du flux à la mesure effectuée à une profondeur donnée dans le xylème. Pour cela, il faudrait effectuer plusieurs mesures du flux de sève à différents points sur un même rayon et déduire la relation entre la densité de sève totale et celle mesurée à une profondeur donnée. Cependant, comme il existe une variation temporelle de ce facteur de correction (Nadezhdina et al., 2002, Lu et al., 2004), ce dernier doit être calculé à partir de valeurs horaires de la densité du flux de sève où celle-ci est maximale à différents moments de la journée (Lu et al., 2004). Une autre méthode consiste à utiliser des

capteurs dont la longueur est fonction de la profondeur du bois conducteur. Il existe dans le commerce des capteurs de longueur 30 mm ou 80 mm (Dynamax, Houston, TX). L'utilisation de capteurs de 10 et 50 mm de longueur a été rapportée par Granier et al. (1990). Cependant, comme ces capteurs sont composés de plusieurs jonctions de thermocouples (3 jonctions pour un capteur de 80 mm de long) des incertitudes seront induites sur la température moyenne mesurée au niveau du capteur. La meilleure approche serait l'utilisation de capteurs relativement courts et d'éviter le contact avec une zone non-conductrice. Si la profondeur de la surface conductrice est plus grande, plusieurs capteurs peuvent être utilisés afin d'obtenir un profil de la densité du flux de sève en fonction de la profondeur (Clearwater et al., 1999).

3-2-3- Effet de l'hétérogénéité de la surface conductrice

Les erreurs dans la détermination de la transpiration dues à la variation radiale du flux décrite ci-dessus sont moins importantes que celles dues à un contact du capteur avec des zones non-conductrices. En effet, l'hétérogénéité de la conduction du xylème peut induire des erreurs lors de l'intégration du flux mesuré à l'échelle de l'arbre. Les capteurs de dissipation de chaleur de Granier sous-estiment les valeurs de K (et par la suite le flux) prédites par la calibration d'origine de Granier quand le capteur est en contact avec une partie inactive du xylème.

Clearwater et al. (1999) ont étudié l'effet du contact d'une portion du capteur avec une zone non active du xylème par rapport à l'estimation du flux de sève sur l'eucalyptus et l'anacardier (noix de cajou). Ils ont trouvé sur la première espèce que K est sous-estimé de 48 % pour une vitesse moyenne totale du flux mesurée par le capteur de 0.15 mm s^{-1} quand la moitié du capteur est en contact avec la partie non active du xylème. Sur l'anacardier, ils ont trouvé qu'un contact de 10 % avec la partie non active du bois a causé la sous-estimation de K de 17 % quand le flux de sève était de 0.14 mm s^{-1} . Ils ont alors conclu que pour une vitesse du flux de sève modérée de 0.05 mm s^{-1} , en notant a la fraction de la zone non-conductrice en contact avec le capteur, la vitesse du flux de sève au niveau de la surface conductrice est sous-estimée de 8 % si $a = 0.1$ et 35 % si $a = 0.5$. A des vitesses du flux de 0.15 mm s^{-1} , la vitesse du flux de sève est sous-estimée de 15 % et de 52 % quand a est égal à 0.1 et 0.5 respectivement. Cependant, il a été observé que le taux de variation du flux autour du tronc

varie peu dans le temps (Nadezhdina, non publié), ce qui n'est pas le cas de la variation radiale du flux.

Le nombre de capteurs (quelle que soit la technique de mesure) nécessaires pour obtenir un échantillonnage adéquat et résoudre le problème de gradient de flux ou de surface conductrice dépend de l'objectif de l'étude. Une seule installation serait suffisante pour déterminer la présence ou non de la transpiration d'une espèce donnée alors que la détermination des quantités horaires ou journalières de la transpiration requiert un nombre plus important de capteurs.

3-2-4- Précision des mesures et type d'erreurs de la méthode de dissipation de chaleur

La qualité des données du flux de sève obtenues par la technique de Granier dépend essentiellement de :

- la qualité du capteur du flux de sève lui-même qui a été amplement étudiée par Granier (1985, 1987b) et Cabibel et Do (1991)
- le degré de représentativité de la densité du flux de sève mesurée par le capteur par rapport à la surface conductrice totale.

Comme il a été mentionné dans les deux derniers paragraphes, la précision des mesures du flux de sève dépend de l'intégration de la variation du flux radial et de l'hétérogénéité de la surface conductrice. Le capteur doit donc être placé de façon à intégrer la variation radiale tout en étant en contact uniquement avec la zone conductrice du flux.

Si la quantité d'eau déstockée de la plante vers le flux transpiratoire le matin est grande relativement à l'absorption totale, le flux de sève extrapolé à l'échelle de la canopée représentera l'utilisation de l'eau plutôt que la transpiration (Ewers et Oren, 2000). D'une journée à l'autre, les variations des réserves hydriques de l'arbre sont généralement négligées et la transpiration journalière est assimilée au flux total de sève cumulé sur 24 heures. Le décalage observé entre le flux de sève et la transpiration foliaire est causé par le phénomène de capacitance au niveau du tronc ou des branches.

La précision relative des flux journaliers est estimée à 10 % (Cabibel et Do, 1991). Cependant, l'utilisateur doit prendre les précautions nécessaires contre les sources potentielles d'erreurs qui sont spécifiques à cette méthode, sinon les erreurs sur les flux de sève peuvent être plus importantes. Les incertitudes sur l'estimation de l'utilisation de l'eau proviennent essentiellement des erreurs commises lors de la détermination de ΔT_{max} , de l'intégration du flux radial, de l'hétérogénéité de conduction et enfin des méthodes d'extrapolation des mesures de la transpiration de la plante à l'échelle du verger.

Un inconvénient de la méthode de Granier, comme pour beaucoup d'autres méthodes, est l'hypothèse des conditions isothermiques à la surface de l'arbre, là où la mesure est faite, en absence d'une chaleur appliquée intentionnellement. Or, d'autres sources de température que les sondes chauffantes, comme les rayons du soleil, le changement de température de la sève au niveau du xylème suite au passage de l'eau des racines vers le niveau supérieur et l'effet du stockage de la chaleur dans le tronc, peuvent générer un gradient de température et brouiller la détermination de l'occurrence du flux nul. Un gradient thermique significatif au niveau des plantes peut donc exister. Plusieurs méthodes de corrections ont été suggérées (Čermák et Kučera, 1981; Cabibel et Do, 1991 ; Köstner et al., 1998) mais leur fiabilité dépend de la variabilité spatiale et temporelle du gradient naturel de température, ce qui constitue une information rare dans la littérature. La correction par l'intermédiaire de corrélation avec les variables climatiques (Cabibel et Do, 1991; Gutiérrez et al., 1994) est lourde et peu adaptée à des suivis de longue durée. Parallèlement, une variante de la méthode de Granier reposant sur un chauffage alternatif constitue une solution simple et fiable à ce problème (Do et Rocheteau, 2002a). Cette adaptation de la méthode de Granier sera détaillée dans ce qui suit.

3-3- Méthode modifiée en chauffage alternatif (Do-Rocheteau)

Des mesures au niveau du tronc d'*Acacia tortilis* au Sénégal en absence de chauffage a révélé que l'hypothèse d'une même température entre les deux niveaux d'insertion des sondes n'est pas vérifiée dans certaines conditions d'étude (Do et al., 1998). Un gradient thermique naturel allant jusqu'à 1.0 °C a pu être observé (Do et Rocheteau, 2002a). Il apparaît systématiquement la nuit et s'annule voire devient négatif le jour. Ce gradient induit une surestimation de ΔT_{max} allant jusqu'à 86 % (Do, 1987).

La méthode de dissipation de chaleur cyclique proposée par Do et Rocheteau (2002b) dérive directement de celle de Granier (1985, 1987a). A la différence de la méthode initiale, la sonde est chauffée de façon cyclique (chauffage/non-chauffage). Plusieurs possibilités de cycles ont été testées (45 mn/15 mn, 40/20, 30/30, 15/15, 10/10, et 5/5). A l'exception du cycle 5/5, tous les cycles ont montré une fiabilité comparable.

3-3-1- Théorie et mode de calcul

Durant un cycle de chauffage/non-chauffage (on/off), le signal alternatif (ΔT_a) obtenu est défini comme l'écart entre la valeur du signal brut à la fin de la période de chauffage et après celle du refroidissement. Il est alors défini par:

$$\Delta T_a = \Delta T_{on} - \Delta T_{off} \quad (\text{II.11})$$

Où, ΔT_{on} est la différence de température à la fin de la période de chauffage et ΔT_{off} est la différence de température à la fin de la période de non-chauffage.

Par analogie avec les calculs de Granier, l'indice de flux K_a en chauffage alternatif est alors calculé comme suit :

$$K_a = (\Delta T_{0a} - \Delta T_{au}) / \Delta T_{au} \quad (\text{II.12})$$

Où, ΔT_{0a} est la différence de température maximale du signal alternatif obtenue à flux nul, et ΔT_{au} est la différence de température du signal alterné mesurée à une certaine densité de flux F_d .

3-3-2- Calibrage de la technique

Pour cette méthode modifiée de la dissipation de chaleur, une relation d'étalonnage a été obtenue sur une colonne hydraulique artificielle remplie de sciure de bois pour les différents cycles de chauffage mentionnés auparavant. La relation entre K_a et le flux de sève (F_d) commune pour les différents cycles testés a été vérifiée sauf pour le cycle 5/5 à cause de la phase de transition qui présente une cinétique rapide puis lente observée entre 5 et 10 mn après le changement du chauffage (on ou off) en conditions du flux nul. En effet, 95 % du

signal maximum enregistré après 45 mn se produit à 10 mn du changement du cycle. L'introduction de la phase de transition dans le calcul semble essentielle pour préserver la sensibilité de K_a aux faibles flux et pour maintenir la même relation pour les différents cycles de mesure.

Comme la dynamique de la dissipation de température peut fluctuer selon le type du bois et sa teneur en eau, le cycle 15/15 qui inclut le plus la phase de transition, tout en permettant une bonne résolution horaire est recommandée (Do et Rocheteau, 2002b).

Les valeurs mesurées de l'indice du flux K_a ont permis d'établir la fonction sigmoïdale suivante :

$$K_a = \frac{1}{1 + 11.3F_d^{-1.414}} \quad (\text{II.13})$$

D'où, l'estimation du flux de sève F_d est donnée par la relation :

$$F_d = \left(\frac{11.3K_a}{1 - K_a} \right)^{0.707} \quad (\text{II.14})$$

A partir de la mesure de la densité du flux de sève (F_d), la transpiration est obtenue par intégration de F_d au niveau de la surface conductrice de l'arbre. Un flux en litres par heure ou par jour est ainsi calculé et peut être alors être extrapolé à l'échelle du verger en fonction du nombre d'arbre par unité de surface.

Conclusion

Il existe de nombreuses méthodes qui mesurent l'évapotranspiration des cultures (ET). Certaines méthodes sont plus appropriées que d'autres en terme de limitations techniques, des hypothèses requises, de précision des mesures. La méthode choisie doit dépendre des objectifs du travail.

Pour un système de cultures associées, l'hétérogénéité du milieu rend difficile l'application d'une méthode unique. De plus, la compréhension de la dynamique des flux hydriques de ce système en fonction des apports hydriques et des paramètres climatiques requiert des mesures

indépendantes des flux évaporatoires. La combinaison d'une méthode de mesure globale et d'une autre appliquée à une composante du système semble une bonne approche pour la compréhension du fonctionnement hydrique du système.

La méthode du bilan hydrique appliquée à l'ensemble du système permet de déterminer les flux hydriques pour chaque composante du système : l'olivier, la culture maraîchère et le sol nu. En effet, pouvant être appliquée à des cultures hétérogènes à petite échelle, elle constitue la méthode la plus adaptée à notre cas.

La détermination de la variation du stock hydrique sera effectuée à partir des mesures neutroniques. En effet, permettant des mesures répétitives, tout en étant peu destructrice, (contrairement à la méthode gravimétrique), cette technique perturbe le moins le sol avec une bonne représentativité spatiale (par rapport à la TDR).

Pour la mesure séparée de la transpiration de l'une des composantes du système, le choix s'est porté sur la méthode de mesure du flux de sève. Celle-ci permet des mesures en continu, sans perturbation majeure du végétal. Elle sera donc appliquée à l'olivier. En effet, des mesures de la transpiration de l'olivier à une échelle de temps fine, permet d'étudier la dynamique de la consommation hydrique de cette culture en fonction des paramètres climatiques, des apports hydriques qu'ils soient sous forme de pluie ou d'irrigation appliquée à l'olivier ou à la culture maraîchère.

L'inventaire des principales méthodes de mesure du flux de sève, de leur fiabilité et adaptabilité a montré qu'il n'existe pas de méthode unique qui donne les meilleurs résultats avec peu d'inconvénients. La méthode de dissipation de chaleur en chauffage cyclique présente le minimum de perturbations pour la plante, intègre plus ou moins le gradient du flux à l'intérieur du xylème et peut être utilisée pour de grands diamètres du tronc. De plus, elle est assez sensible aux faibles flux et surtout, elle est très peu ou pas sensible aux gradients thermiques naturels à l'intérieur du tronc. Elle semble la plus appropriée pour l'estimation de la transpiration de l'olivier.

En conclusion, la méthodologie choisie pour appréhender les transferts hydriques sera une combinaison de méthodes, à la fois hydrologique sur l'ensemble du système et physiologique sur l'olivier.

CHAPITRE III

MODELISATION DES TRANSFERTS HYDRIQUES DANS L'ASSOCIATION OLIVIER – CULTURE ANNUELLE

Introduction

Les avantages qu'on accorde aux cultures intercalaires sont liés à l'augmentation de la productivité du sol et à la durabilité du système, mais les bases scientifiques de ces arguments ont été souvent critiquées (Azam-Ali, 1995). Les modèles de simulation des flux d'eau basés sur l'interaction entre la culture et l'environnement peuvent constituer un moyen de vérifier ces arguments. Ces modèles quantifient la distribution de la ressource hydrique et son utilisation au sein du système en réponse aux interactions entre cultures et aux conditions climatiques et édaphiques.

Dans le cas d'un système de cultures associées, les modèles de simulation offrent un support incontournable pour l'étude de la dynamique de l'utilisation de l'eau d'un tel système. Du fait des nombreuses combinaisons entre espèces et conditions culturelles (saison de culture, pratiques culturelles) la voie expérimentale constitue un moyen trop lourd pour étudier de façon systématique les flux hydriques entre les cultures associées.

De plus, la contribution relative de l'évaporation du sol et de la transpiration des plantes par rapport à l'évapotranspiration totale d'un écosystème en climat aride et semi-aride est fortement variable dans le temps et l'espace. La modélisation et la prédiction de l'évapotranspiration pour ces environnements sont compliquées par l'hétérogénéité de la distribution végétale. A cela s'ajoute, la difficulté d'une mesure in situ et indépendante des flux hydriques des différentes composantes, à des échelles significatives et comparables. Ces problèmes sont spécialement aigus après des pluies, une période très dynamique puisque les flux évaporatoires sont élevés avec des changements rapides de la conductance du sol et des feuilles (Huxman et al., 2004).

Dans ce qui suit, est présentée une brève revue des différents types de modèles utilisées en cultures intercalaires. Par la suite, après avoir défini la représentation conceptuelle qui a été adoptée pour ce système, nous exposons une approche de modélisation des transferts hydriques de l'association étudiée.

1- Différents types de modèles de systèmes de cultures intercalaires

Suivant leurs objectifs et leurs approches, les modèles peuvent être classés en 3 catégories : de type analogique (représentant le système par un autre considéré comme similaire), mécaniste (reposant sur les lois physiques ou biologiques) et enfin de type empirique (reliant facteurs explicatifs et facteurs à expliquer par une loi ajustée à des points expérimentaux, la loi n'ayant aucune signification physique).

Les processus mis en jeu dans le bilan hydrique du sol peuvent être décrits de différentes manières. Dans une approche analogique, le sol est considéré comme un réservoir d'eau dont le volume total est la réserve utile du sol. Dans l'approche mécaniste, les flux hydriques sont régis par l'existence de gradients de potentiel et suivent la loi de Darcy.

La nature des cultures conduites en intercalaire influe sur la construction d'un modèle simulant les transferts hydriques puisque les interactions entre cultures vont dépendre de l'agencement des parties aériennes et des systèmes racinaires. En effet, les interactions entre les cultures associées du même type (arbre- arbre ou culture annuelle- culture annuelle) ne sont pas étudiées de la même façon que celles d'une association hétérogène (arbre- culture annuelle).

De nombreuses expérimentations ont été conduites sur des cultures associées ou des systèmes agroforestiers afin de caractériser et de quantifier les mécanismes d'interaction existant entre les cultures associées. Plusieurs modèles ont été établis dont certains ne sont pas très appropriés car ils sont unidimensionnels alors que les transferts aussi bien verticaux qu'horizontaux doivent être pris en compte pour décrire le transport de l'eau, surtout quand les cultures composant le système sont distribuées en rangées (Caldwell,

1995). D'autres modèles supposent que les deux systèmes racinaires sont ou complètement imbriqués (Adiku et al., 1995) ou totalement séparés (Kiniry et al., 1992). Il existe des modèles qui décrivent les processus hydriques et radiatifs comme celui de Ozier-Lafontaine et al. (1998). Bien que les résultats obtenus par ce modèle sur une association maïs-sorgho soient prometteurs, l'utilisation de ce modèle n'est pas évidente à cause du nombre important de données nécessaires à son fonctionnement. Wallace et al. (1995) et Jackson et al. (1998) ont élaboré le modèle WaNuLCAS (**W**ater, **N**utrients and **L**ight **C**apture in **A**groforestry **S**ystems) pour des systèmes agroforestiers sur des pentes. Ce modèle est une représentation mécaniste des interactions au-dessus et au-dessous du sol. Le nombre important de données requises pour le fonctionnement du modèle, ajouté à sa spécificité pour des terrains en pente, le rend inapplicable dans les conditions de l'étude. Sillon et al. (2000) ont établi un modèle bidimensionnel à base physique qui simule la compétition racinaire pour l'eau en cultures associées. Ce modèle nécessite la connaissance de la carte racinaire des deux cultures en association. De plus, sa validité est limitée dans le temps puisque l'évolution temporelle et spatiale du système racinaire n'est pas prise en compte dans ce modèle.

Nous allons présenter dans ce chapitre une approche simple de modélisation des transferts hydriques dans le système de cultures intercalaires avec oliviers, en prenant en compte les transferts latéraux qui s'y opèrent. Le modèle utilisé dans cette étude est de type intermédiaire entre analogique et mécaniste, conçu sur la base d'un fonctionnement en réservoir avec des relations de type pseudo-mécaniste pour les processus de l'évapotranspiration et des transferts latéraux.

2- Représentation conceptuelle du système culture annuelle –olivier

Pour quantifier les différents flux hydriques intervenant dans le bilan hydrique du système étudié, l'unité de base constitutive de la mosaïque spatiale (surface rectangulaire) a été subdivisée en trois compartiments ou sous-unités, elles-mêmes rectangulaires qui correspondent aux 3 composantes du système (Figure III.1):

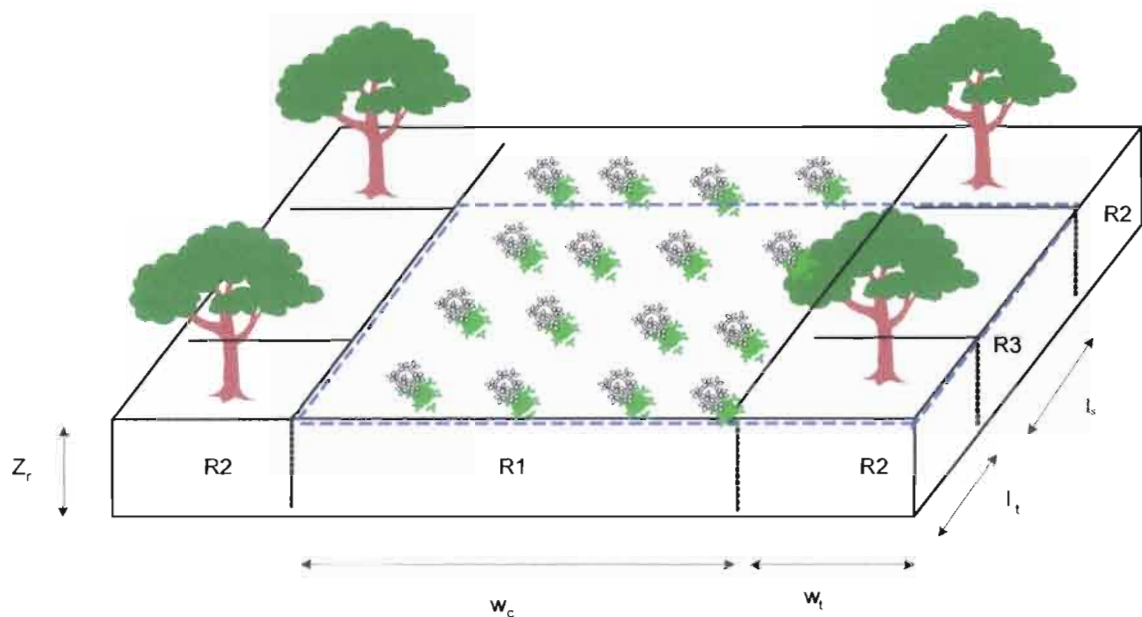


Figure III.1. Schéma des compartiments des différents réservoirs R1, R2 et R3 et leurs dimensions (Z_r , l_t , l_s , w_c et w_t), la zone délimitée en pointillé représente l'unité de base représentative du système.

- 1) la sous-unité représentant la culture entre les oliviers, numérotée 1.
- 2) la sous-unité représentant l'olivier et son pourtour de sol nu, numérotée 2.
- 3) la sous-unité de sol nu entre deux oliviers consécutifs, numérotée 3.

La sous-unité 2 est délimité sur le terrain par les butes entourant l'olivier qui forment le bassin utilisé lors de l'irrigation des oliviers et qui le séparent nettement des deux autres sous-unités.

Un réservoir sol contenant la majorité des racines est attribué à chaque sous-unité avec une profondeur donnée commune égale à la profondeur maximale d'enracinement de l'olivier (≈ 1.25 m). Ainsi, comme le montre la figure (III.1), le système est composé de 3 compartiments différents (1, 2 et 3) avec leurs réservoirs correspondants (R1, R2 et R3).

Les caractéristiques géométriques du système sont les suivantes :

Z_r : profondeur de la couche du sol considérée

w_c : largeur de la sous-unité 1 (culture annuelle)

w_i : largeur des sous-unité 2 et 3 (olivier et sol nu)

l_i : longueur de la sous-unité 2 (oliviers)

l_s : longueur de la sous-unité 3 (sol nu)

3- Équations du bilan hydrique

Le bilan hydrique se base sur le principe de conservation de masse qui peut être formulé de la façon suivante : la somme des apports d'eau moins la somme des pertes en eau d'un volume de sol pendant une période donnée est égale à la variation de la quantité d'eau stockée dans ce même volume pour la période étudiée. Les gains du système, se font sous forme de pluies ou d'apports par irrigation. Les pertes se composent de l'évapotranspiration et du drainage, ce dernier, représentant l'eau qui transite par les couches du sol sans y demeurer et qui est donc perdue pour le système. Les flux latéraux (superficiels et en profondeur) peuvent constituer des apports comme des pertes. Dans le système étudié, les termes de ruissellement ont été négligés du fait de la parfaite horizontalité de la surface. Le bilan hydrique sera appliqué aux trois réservoirs sur une base journalière.

3-1- Réservoir R1

Ce réservoir correspond au compartiment de la culture annuelle. Par conséquent, certains termes de l'équation du bilan changent en fonction de la période de l'année. Un flux latéral (L_l) peut s'établir entre R1 et les autres réservoirs suite à un gradient d'humidité créé en cas d'irrigation de l'une des cultures. Ce flux peut constituer une perte ou un gain pour le réservoir suivant le sens de déplacement de l'eau. L'eau prélevée par les racines de l'olivier se trouvant dans ce réservoir (T_{II}) constitue une perte pour ce système. Ces différents termes exprimés en mm sont reliés entre eux par :

$$\Delta S_1 = P + I_c - ET_c - T_{i1} - D_1 + L_1 \quad (\text{III.1})$$

ΔS_1 : variation journalière du stock d'eau dans le réservoir R1 (mm)

P : précipitation

I_c : irrigation de la culture

ET_c : évapotranspiration de la culture ou l'évaporation du sol nu après la récolte ou avant émergence de la culture notée E_{s1}

T_{i1} : partie de la transpiration de l'olivier prélevée dans le réservoir R1

D_1 : drainage du réservoir R1 dans les couches profondes

L_1 : transfert latéral entre le réservoir R1 et les autres réservoirs

3-2- Réservoir R2

C'est le réservoir contenant la culture pérenne : l'olivier. Les pertes vers l'atmosphère sont constituées par la transpiration de l'olivier (T_{i2}) et l'évaporation du sol nu sous-jacent (E_{s2}). Tout comme pour le réservoir R1, un transfert latéral (L_2) peut exister et constituer soit une perte, en cas d'irrigation de l'olivier soit un gain dans le cas de l'irrigation de la culture annuelle. L'équation du bilan hydrique pour R2 s'écrit comme suit :

$$\Delta S_2 = P + I_i - T_{i2} - E_{s2} - D_2 + L_2 \quad (\text{III.2})$$

ΔS_2 : variation journalière du stock d'eau du sol dans le réservoir R2

I_i : irrigation de l'olivier

T_{i2} : partie de la transpiration de l'olivier prélevée dans le réservoir R2

E_{s2} : évaporation du sol nu du réservoir 2

D_2 : drainage du réservoir R2 dans les couches profondes

L_2 : transfert latéral entre le réservoir R2 et les autres réservoirs

3-3- Réservoir R3

Contrairement aux autres compartiments, celui-ci n'est jamais planté, et les pertes sont constituées par les prélèvements de l'olivier (T_{i3}) dans ce réservoir et l'évaporation du sol nu (E_{s3}) en plus du terme habituel de drainage (D_3). Le flux latéral (L_3) est généralement un apport au système qui fait suite à une irrigation de l'olivier ou de la culture annuelle. L'équation du bilan s'écrit alors :

$$\Delta S_3 = P - T_{i3} - E_{s3} - D_3 + L_3 \quad (\text{III.3})$$

ΔS_3 : variation journalière du stock d'eau du sol dans le réservoir R3

T_{i3} : partie de la transpiration de l'olivier prélevée du réservoir R3

E_{s3} : évaporation du sol du réservoir 3

D_3 : drainage du réservoir R3 dans les couches profondes

L_3 : transfert latéral entre le réservoir R3 et les autres réservoirs

3-4- Calcul des termes de drainage

Le drainage (D) se produit quand l'apport d'eau constitué par la pluie et l'irrigation est supérieur à la capacité de stockage du réservoir sol, définie à partir de la réserve utile (RU) qui est définie comme la différence entre l'humidité du sol ($m^3 m^{-3}$) à la capacité au champ θ_{CC} et au point de flétrissement permanent θ_{PP} dans la couche de profondeur Z_r :

$$RU = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PP})Z_r \quad (\text{III.4})$$

La réserve disponible (RD) correspond à la différence entre l'humidité du sol actuelle (θ) et l'humidité du sol au point de flétrissement permanent (θ_{PPF}) pour la même couche du sol :

$$RD = 1000(\theta - \theta_{PPF})Z_r \quad (III.5)$$

Dans ces équations RU et RD sont exprimés en mm et Z_r en mètre. Le drainage D correspond donc à la différence entre les apports (pluie et irrigation) et la capacité de stockage du réservoir sol définie par $(RU-RD)$ et peut être calculé comme suit :

$$D=(P+I)-(RU-RD) \text{ si } (P+I)>(RU-RD) \quad (III.6)$$

$$D=0 \text{ si } (P+I)\leq(RU-RD) \quad (III.7)$$

4- Paramétrisation des termes d'évaporation et d'évapotranspiration

Le processus d'évaporation du sol nu, après une pluie ou irrigation, est modélisé d'un point de vue chronologique avec l'hypothèse qu'il existe deux étapes bien distinctes dans le processus d'évaporation : une première phase d'évaporation maximale et une seconde phase de réduction de l'évaporation. La teneur en eau de la couche superficielle du sol intervient pour déterminer le passage d'une phase à l'autre. Quant au mécanisme d'évapotranspiration, sa modélisation s'appuie sur la méthode de la FAO (Allen et al., 1998) basée sur la combinaison de la demande climatique (l'évapotranspiration de référence, ET_0) avec des coefficients culturaux et des coefficients de réduction fonctions du stress hydrique que peut rencontrer la culture. La paramétrisation de la transpiration de l'olivier se fera par analogie avec la méthode de la FAO.

4-1- Évaporation du sol nu

L'évaporation du sol nu constitue une fraction importante de l'évapotranspiration après un apport hydrique dans les régions arides et semi-arides. Après une pluie ou irrigation, le

taux d'évaporation du sol est initialement élevé, mais décroît rapidement au fur et à mesure que la surface du sol se dessèche. Nous avons utilisé l'approche de modélisation développée par la FAO (Allen et al., 1998, Annexe 7) qui distingue deux stades dans le processus du dessèchement après une forte pluie ou une irrigation: le stade 1 noté "énergie limitante" et le stade 2 noté "sol limitant" ou "taux décroissant".

- Durant le premier stade, la surface du sol reste humide et l'évaporation est à son maximum, limitée seulement par l'énergie disponible. Au cours de ce stade, l'évaporation à partir de la couche superficielle du sol se fait au taux d'évaporation potentiel (E_{so}), lui-même fonction de l' ET_o . E_{so} est calculée suivant l'équation

$$E_{so} = 1.15ET_o \quad (\text{III.8})$$

La valeur 1.15 représente l'accroissement de l'évaporation potentielle dû au faible albédo du sol humide et à la possibilité du stockage de chaleur dans la couche de surface durant la période précédant le dessèchement. Cependant, pour la sous-unité de l'olivier, la frondaison a un effet contraire et va faire diminuer l'énergie potentielle de l'évaporation: nous la considérons égale à l' ET_o . Ceci a été déjà observé par Jackson et Wallace (1999) au Kenya au niveau d'une association d'arbre forestier (*Grevillea robusta*) et de maïs (*Zea mays*). Ils ont démontré que l'évaporation du sol est réduite à la base des arbres par rapport à celle mesurée au niveau du sol nu à 2.5 m et qu'elle est due, en partie, à l'effet de l'ombrage de l'arbre.

La quantité d'eau qui peut être évaporée durant le stade 1 est nommée "eau facilement évaporable" ou EFE . Le document de la FAO n° 56 donne un tableau (Table 19, Chapitre 7) avec des valeurs recommandées pour EFE selon la texture du sol. Par exemple, pour un sol de texture équilibrée la EFE varie de 6 à 10 mm. Compte tenu des caractéristiques du sol au niveau de la parcelle expérimentale (humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent et de la texture) nous prendrons dans notre cas EFE égale à 8 mm.

- Durant le stade 2, la surface du sol est visiblement sèche et l'évaporation est supposée diminuer linéairement en fonction de la quantité d'eau stockée dans la couche

superficielle du sol impliquée dans le processus du dessèchement, de profondeur d_u [0.10 – 0.15 m]. Si cette valeur est inconnue, une valeur égale à 0.15 m est recommandée (FAO, n°56, 1998). Le sol est supposé pouvoir se dessécher jusqu'à une limite d'humidité intermédiaire entre l'humidité au point de flétrissement permanent et le dessèchement total du sol. Ainsi, l'eau évaporable totale (EET), i.e. la quantité d'eau qui peut être évaporée après un important événement humide (pluie ou irrigation) est estimée par:

$$EET = 1000(\theta_{s,CC} - 0.5\theta_{s,PPF})d_u \quad (III.9)$$

Le terme EET est exprimé en mm, d_u est la profondeur (m) de la couche superficielle du sol impliquée dans le processus du dessèchement, $\theta_{s,CC}$ est l'humidité de la couche superficielle du sol à la capacité au champ (m^3m^{-3}), $\theta_{s,PPF}$ est l'humidité de cette couche au point de flétrissement permanent.

Si Q_s représente la quantité totale d'eau déjà puisée de la couche superficielle du sol, l'évaporation du sol pour $Q_s > EFE$ s'écrit :

$$E_s = E_{s0} \left[\frac{EET - Q_s}{EET - EFE} \right] \quad (III.10)$$

4-2- Évapotranspiration de la culture

L'évapotranspiration de la culture dépend de trois composantes principales : les caractéristiques de la culture, la demande climatique et la disponibilité en eau du sol. La combinaison de ces trois éléments permet une estimation appropriée de l'évapotranspiration réelle de la culture.

4-2-1- Formulation générale

Nous utilisons la notion de coefficient de culture FAO (Allen et al., 1998) pour le calcul de l'évapotranspiration de la culture. Sous des conditions standards, l'évapotranspiration de la culture ET_c est calculée en multipliant l'évapotranspiration de la culture de référence ET_o par un coefficient cultural K_c

$$ET_c = K_c ET_o \quad (\text{III.11})$$

ET_o représente la demande climatique, K_c varie avec les caractéristiques de la culture (le type de culture, et les différents stades de développement). Nous désignons par conditions standards le fait qu'il n'y ait pas de limitation d'évapotranspiration liée au manque d'eau ou à la densité de la culture. Les valeurs de K_c pour différentes cultures sont données dans le tableau 11 du document de la FAO 56. Lorsque l'eau est un facteur limitant, l'évapotranspiration de la culture ($ET_{c,s}$) est donnée par:

$$ET_{c,s} = K_{c,s} ET_c = K_{c,s} K_c ET_o \quad (\text{III.12})$$

$K_{c,s}$ est un coefficient du stress hydrique, décrivant l'effet de ce dernier sur la transpiration de la culture.

4-2-2- Détermination de $K_{c,s}$

Nous avons adapté la méthode FAO (Allen et al., 1998, chapitre 8) à nos conditions de modélisation. Outre le concept de la réserve utile (RU) définie ci-dessus, la réserve en eau facilement utilisable (RFU) est définie comme étant la fraction p [0-1] de la réserve utile que la plante peut aisément extraire sans réduction de sa transpiration (i.e. $K_{c,s} = 1$). Elle est donnée par :

$$RFU = pRU \quad (\text{III.13})$$

p sera calculée à partir de la formule suivante :

$$p = 0.35 + 0.04(5 - ET_c) \quad (\text{III.14})$$

L'épuisement du réservoir (Q_r) est défini comme la différence entre la capacité du réservoir RU et son remplissage au temps t (RD) par :

$$Q_r = RU - RD \quad (\text{III.15})$$

Si Q_r est inférieur à la RFU , $K_{c,s} = 1$. Dans le cas où Q_r serait supérieur à la RFU , l'évapotranspiration de la culture est supposée diminuer proportionnellement à la quantité d'eau qui reste dans le réservoir sol, ce qui s'écrit :

$$K_{c,s} = \frac{RU - Q_r}{RU - RFU} = \frac{RD}{(1 - p)RU} \quad (\text{III.16})$$

4-3- Transpiration de l'olivier

On note τ la transpiration par arbre telle que mesurée par la technique du flux de sève. Nous verrons par la suite (V, 5-2) que τ sera paramétrée de manière empirique, en fonction de la demande climatique (ET_0) et de l'humidité des 3 réservoirs ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) sous la forme :

$$\tau = ET_0(a\theta_1 + b\theta_2 + c\theta_3 + d) \quad (\text{III.17})$$

Compte tenu de la large extension horizontale des racines d'olivier, ce flux d'eau τ peut être prélevé, à priori, dans les trois réservoirs R1, R2 et R3. Nous pouvons donc écrire :

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad (\text{III.18})$$

τ_1, τ_2, τ_3 , étant les prélèvements de l'olivier respectivement dans les réservoirs R1, R2 et R3. On désigne par α_i la fraction de la transpiration totale de l'olivier prélevée dans le réservoir Ri avec $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$. On peut écrire alors :

$$\tau_1 = \alpha_1 \tau \quad (\text{III.19})$$

$$\tau_2 = \alpha_2 \tau \quad (\text{III.20})$$

$$\tau_3 = \alpha_3 \tau \quad (\text{III.21})$$

Cette partition est à priori inconnue. En effet, sa détermination nécessiterait la connaissance de la répartition racinaire dans chaque réservoir en plus de notions sur la dynamique de l'activité des racines qui dépend de leur âge, de la disponibilité en eau du sol et de la régulation physiologique interne de l'arbre.

Les termes de transpiration de l'olivier qui apparaissent dans les équations du bilan hydrique (T_{i1} , T_{i2} , et T_{i3}) doivent tenir compte des surfaces représentatives des réservoirs correspondants puisqu'ils sont exprimés par unité de surface. Nous écrivons donc :

$$T_{i1} = \alpha_1 \tau / [w_c (l_s + l_t)] \quad (\text{III.22})$$

$$T_{i2} = \alpha_2 \tau / [w_t l_t] \quad (\text{III.23})$$

$$T_{i3} = \alpha_3 \tau / [w_s l_s] \quad (\text{III.24})$$

5- Paramétrisation du transfert latéral d'eau

La différence d'humidité qui peut exister entre deux réservoirs suite à un apport par irrigation dans l'un des compartiments, engendre un flux d'eau latéral entre les réservoirs régi par cette différence de teneur en eau. L'apport hydrique sous forme de pluie est supposé à priori réparti de façon homogène sans induire de flux latéral. Les transferts latéraux entre réservoirs peuvent aussi être induits par des systèmes racinaires contrastés qui contribuent à modifier l'état hydrique de chaque réservoir par rapport à un couvert homogène (Ozier-Lafontaine et al, 2000).

5-1- Équations générales

La paramétrisation de transferts latéraux d'eau entre deux réservoirs est basée sur la loi de Darcy. Ainsi, le flux d'eau entre deux réservoirs est pris proportionnel à la différence de leurs charges hydrauliques (ΔH) et à la surface (A) de contact entre eux et inversement proportionnel à la distance qui les sépare (L). Il est défini par l'équation :

$$L = [K(\bar{\theta}) / \Lambda] A \Delta H \quad (\text{III.25})$$

K est la conductivité hydraulique qui dépend de l'humidité moyenne du sol $\bar{\theta}$. Dans ce qui suit nous définissons un coefficient de transfert k selon l'équation :

$$k = K(\bar{\theta}) / \Lambda \quad (\text{III.26})$$

Les relations donnant K et H en fonction de θ (humidité volumique) sont fonction de la texture du sol. Campbell (1974) et Clapp et Hornberger (1978) ont proposé les équations suivantes où $W = \theta/\theta_s$ représente le rapport entre l'humidité volumique réelle du sol (θ) et l'humidité volumique du sol à saturation (θ_s):

$$H = H_s / W^b \quad (\text{III.27})$$

$$K = K_s W^{2b+3} \quad (\text{III.28})$$

H_s et K_s sont respectivement la charge et la conductivité hydraulique à saturation et le paramètre b est un facteur d'ajustement déterminé empiriquement. Tous ces paramètres sont variables et sont donnés en fonction du type de sol (Clapp et Hornberger, 1978).

5-2- Équations en présence de la culture intercalaire

Quand la culture intercalaire est en place, l'olivier n'est pas irrigué et de ce fait, le transfert latéral d'eau entre les sites non irrigués, i.e. R2 et R3, est négligé. Seule le flux entre R1 et les deux autres réservoirs est pris en compte.

6-2-1- Calcul du transfert latéral entre les réservoirs R1 et R2 (L_2)

Le flux d'eau de R1 à R2, des deux côtés du réservoir R2, à travers la surface latérale $A_{1,2} = l_t \times Z_r$, ($L_{1 \rightarrow 2}$) s'écrit d'après l'équation générale ci-dessus :

$$L_{1 \rightarrow 2} = 2k_{1,2}(l_t Z_r)(H_1 - H_2) \quad (\text{III.29})$$

H_1 et H_2 sont respectivement la charge hydraulique du réservoir R1 et R2 et $k_{1,2}$ est le coefficient de transfert entre R1 et R2 défini par :

$$k_{1,2} = K(\theta_{1,2}) / \Lambda_{1,2} \quad (\text{III.30})$$

$\theta_{1,2}$ est logiquement calculée comme la moyenne de θ_1 et θ_2 géométriquement pondérée :

$$\theta_{1,2} = (w_c \theta_1 + w_i \theta_2) / (w_c + w_i) \quad (\text{III.31})$$

En une première approximation, $A_{1,2}$ est considéré comme étant la distance orthogonale entre les demi-centres des réservoirs:

$$\Lambda_{1,2} = (w_c + w_i) / 4 \quad (\text{III.32})$$

Pour le réservoir R2, ce flux doit être normalisé (divisé) par la surface de la sous-unité correspondante $A_2 = w_i \times l_t$ pour obtenir un flux par unité de surface, similaire et comparable aux autres termes de l'équation du bilan hydrique. Par conséquent nous avons :

$$L_2 = L_{1 \rightarrow 2} / A_2 \quad (\text{III.33})$$

$$L_2 = 2k_{1,2}(Z_r / w_i)(H_1 - H_2) \quad (\text{III.34})$$

5-2-1- Calcul du transfert latéral entre les réservoirs R1 et R3 (L_3)

Des équations similaires pour le flux d'eau du réservoir R1 vers le réservoir R3 ($L_{1 \rightarrow 3}$) peuvent être écrites comme suit :

$$L_{1 \rightarrow 3} = 2k_{1,3}(l_s Z_r)(H_1 - H_3) \quad (\text{III.35})$$

Où, $k_{1,3}$ est défini de la même manière que $k_{1,2}$ ce qui donne :

$$k_{1,3} = K(\theta_{1,3}) / \Lambda_{1,3} \quad (\text{III.36})$$

Avec $\Lambda_{1,3}$ calculé par :

$$\Lambda_{1,3} = (w_c + w_t) / 4 \quad (\text{III.37})$$

L'humidité volumique ($\theta_{1,3}$) est pondérée selon l'équation :

$$\theta_{1,3} = (w_c \theta_1 + w_t \theta_3) / (w_c + w_t) \quad (\text{III.38})$$

D'où:

$$L_3 = 2k_{1,3}(Z_r / w_t)(H_1 - H_3) \quad (\text{III.39})$$

5-2-2- Calcul du transfert entre le réservoir R1 et les deux autres réservoirs (L_1)

Pour le flux d'eau L_1 quittant R1, le flux $L_{1 \rightarrow 2}$ du réservoir R1 vers le réservoir R2 et $L_{1 \rightarrow 3}$ du réservoir R1 vers le réservoir R3 doivent être composés ensemble et normalisés par la surface $A_1 = w_c \times (l_t + l_s)$ de la sous-unité 1 contenant la culture.

$$L_1 = -(L_{1 \rightarrow 2} + L_{1 \rightarrow 3}) / A_1 \quad (\text{III.40})$$

Avec

$$L_{1 \rightarrow 2} = 2k_{1,2}(Z_r l_t)(H_1 - H_2) \quad (\text{III.41})$$

$$L_{1 \rightarrow 3} = 2k_{1,3}(Z_r l_s)(H_1 - H_3) \quad (\text{III.42})$$

D'où

$$L_1 = - \left[\frac{2Z_r}{w_c(l_r + l_s)} \right] [l_r k_{1,2}(H_1 - H_2) + l_s k_{1,3}(H_1 - H_3)] \quad (\text{III.43})$$

5-3- Équations en absence de la culture

Après la récolte de la culture annuelle, les sites cultivés seront considérés comme sol nu. Dans ce cas, l'irrigation ne concerne que les sites autour des oliviers (R2). Le flux entre les sites non irrigués R1 et R3 sera négligé et un raisonnement similaire à celui utilisé ci-dessus conduit à la paramétrisation des termes de transferts latéraux pour R2. Ces équations sont présentées dans l'annexe 1.

6- Mise en œuvre du modèle : Paramètres et variables

La mise en œuvre du modèle s'effectue à partir des variables climatiques, des paramètres caractéristiques du système (géométrie, sol et végétation) et des valeurs d'initialisation. Les différentes équations du bilan hydrique sont appliquées à chaque réservoir, avec un pas de temps journalier, dont les paramètres sont estimés en fonction de la présence ou non de la culture. Un fichier Excel composé de plusieurs feuilles correspondants aux différentes campagnes de cultures a été utilisé pour l'écriture du modèle. Les entrées et les sorties du modèle sont présentées dans le tableau III-1.

Tableau (III.1) Entrées, sorties et paramètres du modèle

Entrées	Sorties
Variables climatiques	
Pluie (P, mm)	Evaporation de la surface du sol (E_s , mm)
Irrigation (I, mm)	Drainage (D, mm)
Evapotranspiration de référence (Penman-Monteith) (ET_o , mm)	Evapotranspiration de la culture (ET_c , mm)
Paramètres d'entrée	
<u>Caractéristiques du sol</u>	
Teneur en eau à la capacité au champ (θ_{CC} , $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Stock hydrique (S, mm)
Teneur en eau au point du flétrissement permanent (θ_{PPP} , $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Flux latéraux (L_i , mm)
Teneur en eau à saturation (θ_s , $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Transpiration de l'olivier (T, mm)
Paramètre b dans l'équation (III.25)	
Charge hydraulique à saturation (H_s , cm)	
Conductivité hydraulique à saturation (K_s , $\text{m} \cdot \text{j}^{-1}$)	
Eau facilement évaporable (EFE, mm)	
<u>Caractéristiques des cultures</u>	
Coefficient cultural de la culture (Kc)	
Durée des phases de la culture (i, jour)	
Paramètres de partition de la transpiration de l'olivier (α_i)	
<u>Dimensions caractéristiques du système</u>	
Dimensions des sous-unité (l_b , l_s , w_t et w_c , m)	
Profondeur des réservoirs (Z_r , m)	
Paramètres d'initialisation	
Stock initial de la sous-unité (S_i , mm)	
Stock initial de la couche superficielle participant à l'évaporation du sol (S_{si} , mm)	

Certains paramètres sont mesurés et d'autres sont pris dans la littérature. L'évolution du stock hydrique se fait entre les valeurs du stock à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent.

Conclusion

Dans le modèle décrit dans ce chapitre, différentes représentations ont été utilisées : les processus de base ont été définis par une représentation analogique qui assimile le sol à un réservoir, la transpiration de l'olivier a été définie empiriquement alors que les flux latéraux sont représentés sur la base de la loi de Darcy utilisant ainsi une approche pseudo-mécaniste.

Ce modèle de transferts hydriques de l'association olivier-culture maraîchère sera testé avec les expérimentations conduites. Par la suite, il pourrait être étendu à d'autres types d'associations sous d'autres conditions environnementales.

CHAPITRE IV

MATERIELS ET METHODES

Introduction

Le bassin versant de Merguellil fait partie d'un ensemble de trois bassins versants avec ceux des oueds Zeroud et Nebhana, drainant le versant sud de la dorsale jusqu'à la plaine de Kairouan. La construction du barrage de El Houareb sépare ce bassin en deux zones : la zone amont (1200 Km²) comporte un important dispositif de conservation des eaux et des sols (tabias, lacs collinaires) et la zone aval d'une superficie d'environ 200 Km² sur la plaine, où l'irrigation et les forages d'eau potable ont provoqué un fort abaissement du niveau de la nappe. C'est dans cette zone qu'a lieu l'étude, dans la délégation de Chébika.

Ce chapitre présente le milieu physique, les conditions ainsi que la démarche expérimentale pour le suivi des flux hydriques en cultures intercalaires. La première partie présente le site expérimental, décrit la parcelle d'étude et les conditions climatiques. L'approche méthodologique, le dispositif expérimental et les observations effectuées sur la parcelle expérimentale concernant les méthodes de mesures utilisées seront exposés dans la deuxième partie. Enfin, la troisième partie concerne la mise en place proprement dite de l'expérimentation et du dispositif de mesure de flux de sève sur l'olivier.

1- Présentation du cadre de l'expérimentation

Le site expérimental se trouve près du petit village Chébika dans la plaine de Kairouan sur le versant sud de la dorsale tunisienne, au centre-ouest de la Tunisie dans le gouvernorat de Kairouan (lat : 35°37' N, long : 9°55' O, alt : 110 m) (Figure IV.1a et IV.1b). Il s'agit d'une parcelle située chez un agriculteur pratiquant les cultures intercalaires avec l'olivier. Zone de plaine, la délégation de Chébika bénéficie de ressources en eau des nappes phréatiques profondes. Elle comporte 51280 ha de surface agricole dont 73 % de surface agricole utile (SAU). La superficie irriguée s'étend sur 9500 ha soit 23 % de la SAU (Ben Hamouda, 1999).



Figure.IV.1.a Localisation du Le gouvernorat de Kairouan : centre- ouest de la Tunisie



Figure IV.1.b. Carte des limites administratives de la zone avale d'étude de MERGUSIE

1-1- Climat

Sur le bassin versant du Merguellil, le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne aux alentours de 10°C, le mois le plus chaud est le mois de juillet avec une température moyenne supérieure à 28°C (Bouzaiane et Lafforgue, 1986). En hiver, les minimales moyennes s'abaissent au-dessous de 6°C. La gelée au sol est possible dans toute la région pendant la période allant de décembre à février. Les températures moyennes mensuelles maximales dépassent 36°C pour les mois de juillet et août.

Les données climatiques utilisées dans cette étude ont été collectées au niveau d'une station d'expérimentation agricole se trouvant à 2 km au sud de la parcelle. Au niveau de cette station la pluviométrie moyenne annuelle est de 280 mm (avec un écart type de 130 mm) (moyenne sur 25 ans de 1979-2003). La période sèche dure six mois et s'étale du mois d'avril au mois de septembre. La figure IV.2.a présente la variabilité de la pluviométrie annuelle sur la période de 1979 à 2003. Cette figure montre bien une grande variabilité interannuelle allant de 110 mm (2000) à 718 mm (1990). La très forte majorité des pluies est sous forme d'orages particulièrement violents, spécialement au printemps et en automne. Les relevés pluviométriques indiquent que 90 % de la pluviométrie annuelle sont enregistrés sur la période allant de septembre à mai (Zahar, 1997). La pluviométrie moyenne mensuelle pendant la période d'étude (2002-2004) a varié de 44 mm en septembre à 4 mm au mois de juillet (Figure IV.2b).

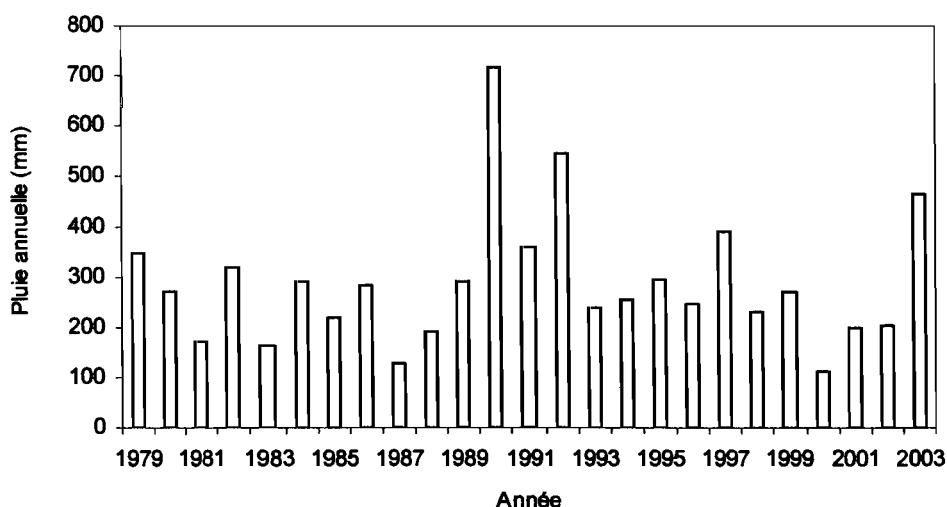


Figure IV.2a. Pluviométrie annuelle moyenne à la station de Chébika (1979-2003)

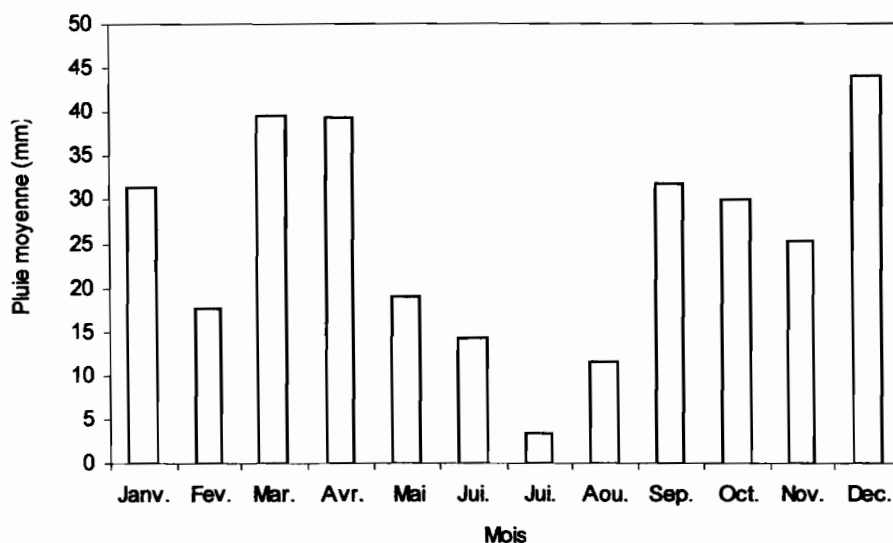


Figure IV.2b. Pluviométrie moyenne mensuelle pendant la période d'étude à Chébika (2002-2004)

En ce qui concerne les autres paramètres climatiques, on peut dire que la demande évaporatoire est très forte. L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Penman est de 1607 mm, ce qui implique un déficit hydrique apparent de l'ordre de 1000 mm (Bouzaiane et Lafforgue, 1986). La moyenne mensuelle de l'humidité relative oscille entre 45 % et 83 % pendant la saison froide et entre 29 % et 74 % pendant la saison chaude. Le climat est donc moyennement sec de Septembre à Avril et très sec de Mai à Août. Les vents dominants sont Nord, Nord - Ouest, (fréquents en hiver) et Nord - Est et Sud (fréquents en été). En hiver, le vent '*Jebbali*' souffle des hautes terres algériennes et donne des températures glaciales. Le sirocco (20 à 55 jours par an) peut entraîner une forte augmentation de la température jusqu'à 49°C. Le nombre de journées de sirocco peut atteindre 10 à 15 jours par mois en Juillet - Août (Bouzaiane et Lafforgue, 1986). Le climat général est donc de type semi-aride caractérisé par un été chaud et sec et un hiver frais et humide.

1-2- Occupation du sol

La zone agricole du gouvernorat de Kairouan est formée d'une mosaïque de cultures annuelles, d'arboriculture et de terres de parcours. Les cultures annuelles dominantes sont la céréaliculture (blé dur, blé tendre, orge, avoine), les fourrages, les légumineuses (fèves, pois chiche, petit pois) et le maraîchage (pastèque, melon, pomme de terre, tomate, piment, oignon). Concernant les cultures pérennes, l'oléiculture couvre la superficie la plus importante, suivie des autres arbres fruitiers (amandier, abricotier). Les périmètres irrigués se

trouvent essentiellement au niveau des plaines autour des grands barrages, ils sont plutôt occupés par la céréaliculture, l'arboriculture et les cultures maraîchères. Les cultures intercalaires représentent également une superficie importante dans le gouvernorat (8500 ha) représentant 30 % des superficies par rapport au centre (Gouvernorat de Sousse, de Mounastir, de Mahdia, de Sfax, de Kairouan, de Gasserine et de Sidi Bouzide) et 15 % par rapport au pays (Tableau IV.1).

Tableau IV.1. Variation de l'occupation du sol dans les périmètres irrigués à Kairouan, au Centre et en Tunisie

Superficie (ha)	Kairouan	Centre	Tunisie
Céréales	19 270	30 190	50 070
fourrages	5 910	24 130	54 600
Légumineuses	180	270	22 010
Cultures maraîchères	18 300	55 390	136 420
Arboriculture	19 540	57 850	163 330
Autres cultures	140	160	4 500
Cultures intercalaires	8 500	28 480	55 110
Total	71 840	196 470	486 040

Source : MA, DG/PDIA : Résultats d'enquête sur les périmètres irrigués, Janvier 2005

1-3- Ressources en eau

Le secteur irrigué, dans le gouvernorat de Kairouan, repose sur l'exploitation de ressources hydriques variées qui permettent de mobiliser un volume annuel de 324 Mm³ répartis comme suit :

- eau de surface : ces ressources sont estimées à un volume de 190 Mm³/an

- nappes superficielles : ce sont des nappes qui peuvent atteindre une profondeur de 50 m. Leur potentiel est estimé à 56 Mm³/an

- nappes profondes : elles ont une profondeur de plus de 50 m. Leur potentiel en eau est estimé à 78 Mm³/an (Ben Hammouda, 1999).

L'importance de ces ressources au niveau de la région se manifeste dans l'étendue des périmètres irrigués par rapport à ceux du centre et de la Tunisie en général. La région de

Kairouan représente à elle seule une grande partie des périmètres irrigués (PI) avec 38 % des (PI) se trouvant au centre et 15 % des PI de la Tunisie (Tableau IV.2).

Tableau IV.2. Variation des superficies irrigables et irriguées dans les périmètres privés et publics à Kairouan, au Centre et en Tunisie

		Kairouan		Centre		Tunisie	
		ha	%	ha	%	ha	%
Superficies irrigables	privée	37 640	71	101 690	69	201 550	48
	publique	15 270	29	45 770	31	217 250	52
	Totale	52 910	100	147 460	100	418 800	100
Superficies irriguées	privée	34 190	72	93 780	73	176 290	54
	publique	13 450	28	34 010	27	150 320	46
	totale	47 640	100	127 790	100	326 610	100

Source : MA, DG/PDIA : Résultats d'enquête sur les périmètres irrigués, Janvier 2005

2- Dispositif expérimental

2-1- Choix de la parcelle de mesure

La parcelle d'étude a été choisie chez un agriculteur pratiquant les cultures intercalaires avec l'olivier. Le choix de la parcelle est justifié par (i) la pratique de système de cultures intercalaires au niveau de l'exploitation conduites en irrigué (à partir d'un puits), (ii) l'accès facile, (iii) la volonté de coopérer de l'agriculteur et (vi) la présence d'une station climatique à 2 km de la parcelle. Une superficie de 0.18 ha a été délimitée comme parcelle expérimentale au sein de l'oliveraie qui couvre une superficie totale de 1.5 ha, conduite en association avec des cultures annuelles (pomme de terre, petit pois). Les oliviers (âgés de 10 ans au début de l'expérience) sont au nombre de 28 plantés en losange et distants de 11 m. La culture maraîchère est cultivée en 3 blocks de 8 lignes espacées de 0.7 m et situés entre 4 rangés d'oliviers.

Une placette équipée par le dispositif expérimental se compose de 4 oliviers qui ont été sélectionnés en fonction de la régularité du diamètre de leurs troncs (critère de sélection important pour l'implantation des capteurs de mesure du flux de sève). De plus, les arbres choisis ont des caractéristiques morphologiques et végétatives moyennes identiques à ceux des autres arbres et peuvent être considérés comme représentatifs de la parcelle d'étude.

2-2- Profil pédologique

Une fosse pédologique a été réalisée au niveau de la parcelle sur 2.5 m de profondeur, 3 m de longueur et sur 2 m de largeur permettant de caractériser le sol. Elle a également été utilisée pour un dénombrement racinaire de l'olivier (la fosse était située à 0.5 m du tronc) (Tableau IV.3). La détermination de la texture du sol ainsi que le pourcentage volumétrique des éléments grossiers ont été effectuée au toucher. La présence du calcaire a été détectée avec une solution de HCl comme réactif. Ces opérations ont été supervisées par un pédologue du ministère de l'agriculture. Le sol a été qualifié de moyennement homogène puisqu'il est constitué, en partie, d'accumulation d'horizons d'origine alluvionnaire à la suite de différents évènements d'inondation qu'a connus la région. Le taux de calcaire actif est assez élevé dans les horizons argileux. Le sol en surface est constitué de limon sableux et argile sableux reposant sur un sable fin (sable limoneux) à 80 cm de profondeur. La texture redevient limono-sableuse à 150 cm de profondeur et à 180 cm de profondeur passe à une texture argileuse avec des poches de sable piégé.

Tableau VI.3. Description des différentes couches du sol du point de vue texture, structure et réaction au HCl.

Horizon (cm)	Texture	Structure	Réaction au HCl	Remarques
0-30	Limono-sableux (équilibrée)	polyédrique	forte	- horizon A - argile momornillonite - transition diffuse avec l'horizon sous-jacent
30-60	Argilo-sableux	Polyédrique-structure grumeleuse	forte	- baie d'accumulation - présence de poche de sable - présence d'argile et de variation de teneur en eau
60-130	Sableux	particulaire	faible	- sable fin
130-165	Limono-sableux	polyédrique fine	moyenne	- ancien horizon travaillé - présence de tâches d'argile
165-220	Argileux	massive, découpage polyédrique	forte	- sol d'alluvion - sable piégé entre les argiles gonflantes : surface de glissement
220-250	Sableux	particulaire	faible	- sable grossier - présence de trace d'hydromorphie temporaire : pseudo-gley
250-260	Argileux	polyédrique	forte	

2-3- Conduite de l'essai

Sur le site a été installé un pluviomètre normalisé constitué d'un seau conique de 4.5 l avec une surface de réception de 400 cm² placé à 1 m au-dessus du sol. La pluie relevée le matin est mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée en 1/10 mm. Les pluviométries relevées manuellement sur un carnet d'observations sont collectées hebdomadairement et saisies après vérification.

L'estimation de la quantité de l'eau d'irrigation est réalisée à l'aide d'un compteur d'eau placé à l'amont du système d'irrigation. Le système d'irrigation utilisé pour la première campagne de pomme de terre est de type gravitaire par rigoles alimentées par un tuyau relié à une station de pompage de l'eau du puits. Pour une meilleure homogénéité spatiale et temporelle des apports d'eau, nous avons installé à partir de la deuxième campagne un système d'irrigation de type Bas-Rhône-Languedoc (BRL) qui consiste en des ajutages ayant un débit de 30 l/h, installées aux niveaux des rampes d'irrigations. Ce système a été dimensionné selon le débit en tête du forage chez l'agriculteur et des huit rangs de la culture intercalaire. Pour cela un test d'infiltration permettant de calculer la conductivité du sol à

saturation (K_s) a été effectué afin de déterminer, en fonction du débit des goutteurs, le nombre des goutteurs et leur espacement sur la rampe. D'après le K_s obtenu (30 mm h^{-1}) et le débit de chaque ajutage (30 l h^{-1}), chaque rampe contient 25 goutteurs.

2-4- Protocole de mesures

Afin de couvrir au mieux la variabilité spatiale, 12 sites de mesures ont été choisis et mis en place en février 2002 à l'intérieur des trois sous-unités du système défini (Figure III. 1). Ils ont été fonctionnels pendant quatre saisons pour les cultures annuelles correspondant à deux saisons de cultures pour l'olivier (2002/2003 et 2003/2004). Chaque site expérimental est équipé d'un tube d'accès de sonde à neutron en PVC (de diamètre extérieur de 45 mm) installé à une profondeur de 2.6 m et d'un jeu de deux tensiomètres implantés à des profondeurs de 30 cm et 60 cm. Pour les sites se trouvant au niveau de la culture intercalaire, ces tensiomètres sont alignés alors qu'ils sont positionnés selon un cercle pour ceux se trouvant à proximité de l'olivier ou en sol nu.

Un ensemble de suivi des paramètres du bilan hydrique et de la transpiration de l'olivier ont été mis en place avec l'objectif :

- d'appréhender la dynamique des stocks hydriques en fonction du temps au niveau du système des cultures associées,
- de quantifier les flux de transpiration de l'olivier au cours de la saison agricole.

La multiplication des sites représente un intérêt notable du fait que l'approche de détermination et de modélisation de la consommation et des transferts d'eau entre les différentes composantes du système de cultures repose sur des mesures ponctuelles. Cependant ce choix présente des difficultés et une lourdeur des mesures.

La figure IV.3 montre la parcelle expérimentale avec les cultures intercalaires (olivier - pomme de terre) pour la saison de 2002. La figure IV.4 montre la position des sites de mesure sur la placette expérimentale et entre les cultures par rapport aux différents réservoirs.



Figure. IV. 3. Parcelle d'étude : culture d'oliviers en intercalaire avec la culture de pomme de terre avec les sites de mesure (avril 2002)

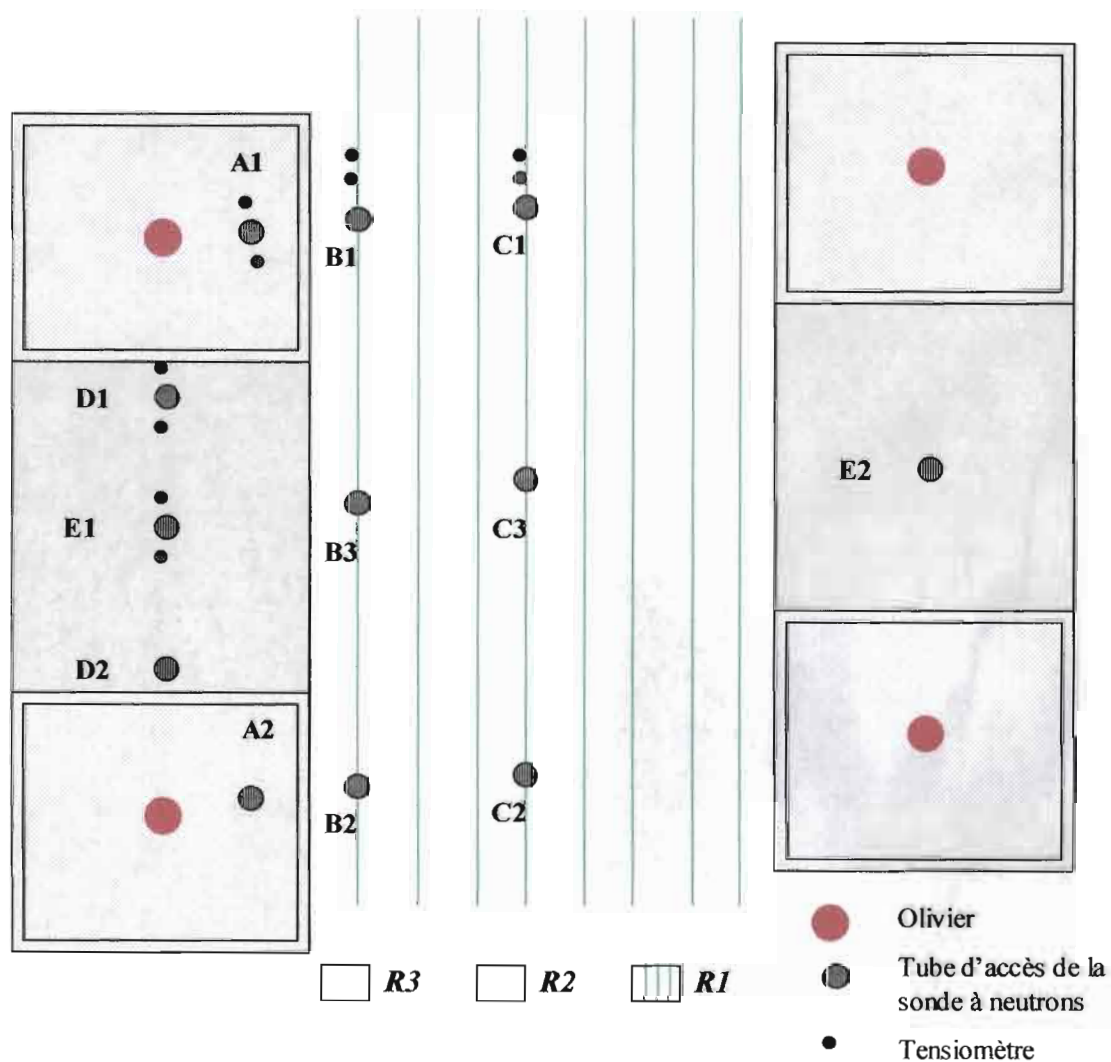


Figure IV.4. Répartition des sites de mesures : emplacements des tubes d'accès de la sonde à neutrons et des tensiomètres au niveau des réservoirs R1, R2 et R3.

Le protocole de mesures a été organisé sur trois pas de temps différents :

- un pas de temps (15 minutes) pour les mesures des flux de sève,
- un pas de temps journalier pour les relevés des précipitations et de la tension de l'eau dans le sol,
- un pas de temps hebdomadaire pour la mesure de l'humidité des sols.

3- Campagnes de mesure et conditions générales de l'essai

3-1- Calendrier des cultures

L'étude a concerné quatre campagnes: deux cultures printanières (de saison) de pomme de terre et de petit pois et deux cultures automnales (d'arrière-saison) de pomme de terre. La culture du petit pois a été effectuée, dans le but d'introduire une rotation culturale (Figure IV.5.).

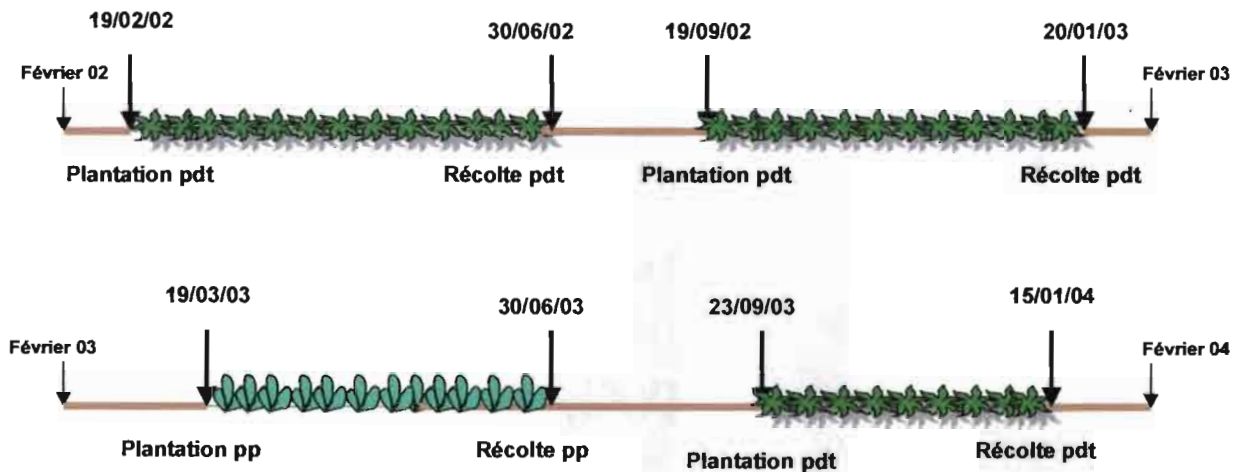


Figure IV.5. Schéma chronologique des différentes campagnes des cultures de pomme de terre (pdt) et de petit pois (pp) effectuées pendant cette étude avec les dates de plantation et de récolte de chaque culture.

La variabilité des précipitations d'une campagne à l'autre et des problèmes techniques relatifs au système de pompage d'eau à la parcelle (panne de la pompe et travaux d'approfondissement du niveau du puits après la baisse du niveau d'eau fin 2002) ont fait que la répartition des apports hydriques n'a pas toujours répondu aux besoins en eau de la culture.

Les dates des différentes campagnes, les précipitations enregistrées correspondantes ainsi que les apports par irrigation sont données dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4. Dates de déroulement des différentes campagnes de culture avec les quantités d'eau d'irrigation et les pluies enregistrées pendant chaque campagne.

Campagne	Date	Quantité d'eau d'irrigation (mm)	Pluie (mm)
Pomme de terre de saison	du 19/02/02 au 30/06/02	330*	105
Pomme de terre d'arrière saison	du 19/09/02 au 20/01/03	78	160
Petit pois	du 19/03/03 au 30/06/03	237	130
Pomme de terre d'arrière saison	du 23/09/03 au 15/01/04	108	195
Olivier	2002	40	
	2003	40	
	2004	170**	

* : cette culture de pomme de terre a été irriguée par rigole

** : en 2004, vu l'absence de culture intercalaire, l'olivier a été irrigué 3 fois (40, 70 et 60 mm)

L'olivier est irrigué en dehors des campagnes de culture en fonction de ses besoins et du déficit hydrique estimé. Bien que les étés des trois années de mesures aient été caractérisés par une forte demande climatique (entre 5 et 8 mm j⁻¹) et des précipitations très faibles ou nulles, l'agriculteur n'a irrigué les oliviers qu'une seule fois en 2002 (02/07/02) et une autre en 2003 (16/08/03). L'absence de culture intercalaire en 2004 a conduit l'agriculteur à irriguer les oliviers trois fois en 2004 (le 16 mars, le 28 mai et le 6 août).

Remarque :

Pour des problèmes techniques liés à la sonde à neutrons la culture d'arrière saison de pomme de terre de 2002 (automne) ne sera pas prise en compte dans l'analyse des résultats.

3-2- Conditions hydriques

L'évapotranspiration de référence mensuelle calculée selon la formule de Penman- Monteith (ET_0) est comparée à celle des précipitations enregistrées pendant la période d'étude (Figure IV.6). Les données pluviométriques pour les trois années expérimentales sont marquées par une année 2003 très pluvieuse avec des précipitations (518 mm) qui sont presque le double de

la moyenne inter-annuelle (280 mm). Les années 2002 et 2004 ont enregistré des précipitations faibles avec seulement 226 et 179 mm de pluie respectivement. Les précipitations mensuelles ont été caractérisées par une forte variabilité entre les trois années de mesure.

La lame d'eau mensuelle évapotranspirée montre que la demande climatique se caractérise par une variation saisonnière marquée. Etant faible de novembre à février (en moyenne 45 mm mois⁻¹), l'*ETo* mensuelle augmente à partir du mois d'avril (en moyenne 100 mm mois⁻¹) et atteint un maximum au mois de juillet et août (en moyenne 180 mm mois⁻¹).

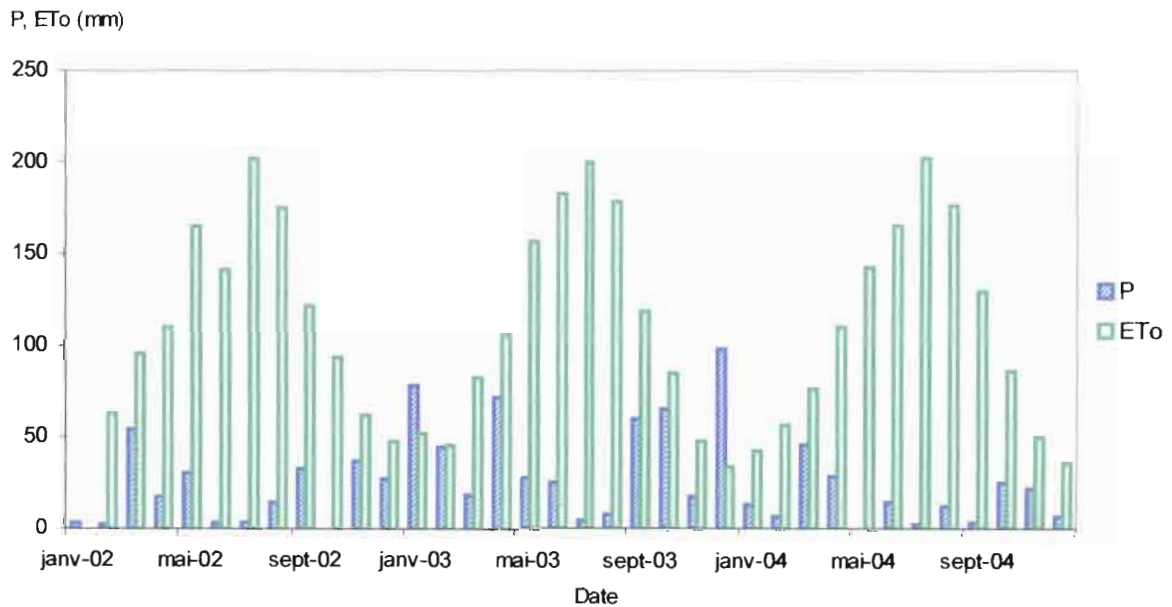


Figure IV.6. : Pluviométrie *P* et évapotranspiration de référence *ETo* pendant les 3 années d'étude à Chébika.

On remarque, d'après les données concernant l'*ETo* et les précipitations (*P*), que le bilan hydrique climatique calculé à l'échelle annuelle présente un déficit important, allant de 770 à 1050 mm, ce qui est très proche du déficit hydrique caractéristique de la région (1000 mm environ) (Bouzaiane et Lafforgue, 1986).

3-3- Conditions thermiques

Pendant les trois années d'étude, les températures maximales moyennes mensuelles (T_{max}) ont atteint les 40 °C en été (Figure IV.7), constituant des conditions thermiques extrêmes pour les cultures. Quant aux températures moyennes minimales (T_{min}), elles ont été assez faibles en hiver, avec des valeurs de l'ordre de 5 °C en février 2003 et 2004. Ces conditions thermiques constituent des limitations quant au choix des cultures et des périodes de leur mise en place.

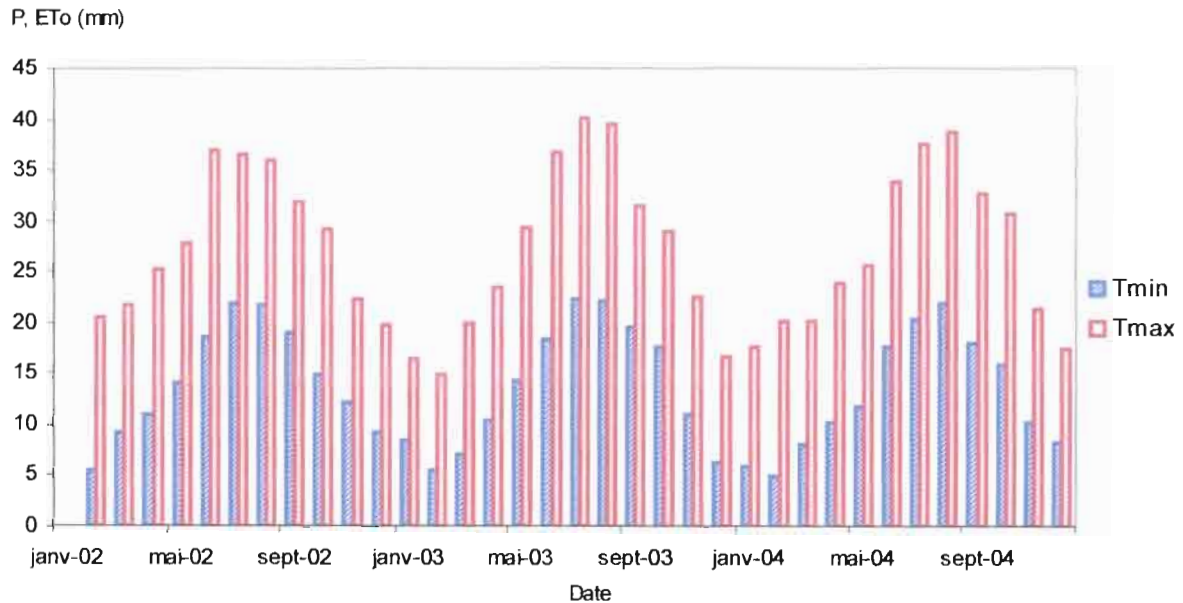


Figure IV.7. Evolution des températures moyennes mensuelles minimales T_{min} et maximales T_{max} pendant la période d'étude à Chébika.

4- Suivi des éléments du bilan hydrique du sol

4-1- Capacité au champ et point de flétrissement permanent

L'étude des propriétés de rétention d'eau du sol des différentes couches du sol a été réalisée au niveau de la fosse pédologique. Trois échantillons de chaque profondeur ont été pris afin de déterminer les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Nous avons évalué ces humidités au laboratoire au moyen de la plaque à pression. Le sol broyé et tamisé à 2 mm est disposé dans des anneaux posés sur une plaque poreuse mise à saturation durant 24 heures, ensuite ces échantillons sont placés dans l'appareil de Richards.

La pression appliquée dans le cas de la détermination de la capacité au champ est de 0.32 bar (pF 2.5) et celle pour le point de flétrissement est de 15 bars (pF 4.2). Le tableau IV.5 donne les humidités volumiques caractéristiques (θ en %).

Tableau IV.5. Valeurs des humidités du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent en fonction de la profondeur

Profondeur (cm)	Humidité à la capacité au champ (%)	Humidité au point de flétrissement permanent (%)
15	29	18
45	32	19
80	21	12
100	19	10
150	23	13
180	20	11

4-2- Densité apparente

La détermination de la densité apparente a été établie à partir de 3 échantillons pris au niveau de chaque horizon. Le prélèvement des échantillons du sol s'est effectué à l'aide des cylindres creux, inoxydables de volume intérieur (v) de 100 cm^3 . Les échantillons sont séchés dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à ce qu'ils aient atteint un poids stable puis pesés. En divisant le poids sec (P_s , g) de l'échantillon par le volume intérieur du cylindre (v), on obtient la densité apparente (Da , g cm^{-3}) selon l'équation (IV.1) :

$$Da = P_s/v \quad (\text{IV.1})$$

D'après l'analyse des différents échantillons par horizon, les résultats de la densité apparente du sol par horizon sont présentés dans le tableau IV.6. Le long du profil, les valeurs trouvées varient de 1.35 g cm^{-3} à 1.56 g cm^{-3} .

Tableau IV.6: Valeurs de la densité apparente (g cm^{-3}) de chaque horizon

Profondeur (cm)	10	20-30	40-60	70-130	140-160	170-220	230	240	250-260
Da	1.32	1.52	1.48	1.46	1.45	1.56	1.46	1.46	1.56

4-3- Mesure de la tension d'eau

Les mesures de la tension d'eau du sol sont faites quotidiennement à l'aide de l'ensemble des 10 cannes tensiométriques à détecteur de pression réparties au niveau de 5 sites de mesure. La

lecture de la pression se fait à l'aide d'un tensiomètre SMS 2500S (SDEC, France). Le principe d'utilisation de cet appareil consiste à le déplacer de canne en canne et effectuer la mesure en appliquant la sonde sur la canne tensiométrique, enfonçant ainsi une aiguille au travers du bouchon qui ferme la canne dans sa partie supérieure. L'aiguille va alors (ayant traversé le bouchon étanche) se trouver à la dépression qui règne à l'intérieur de la canne. Cette dépression, transmise à travers l'aiguille jusqu'au capteur, sera mesurée par la cellule située plus haut dans la sonde. Les tensiomètres utilisés ont un intervalle de mesure situé entre 0 et 999 millibars. Au-delà de cette limite, il y a vaporisation de l'eau et son utilisation n'est plus possible (Luc, 1978).

Le bon fonctionnement des tensiomètres implique un bon contact bougie-sol. Pour cela, lors de leur installation nous avons réalisé des trous de diamètre légèrement supérieur à celui de la bougie à l'aide d'une tarière manuelle à tensiomètre. Le trou dont la profondeur est égale à la profondeur d'implantation est rempli au 2/3 d'une boue très liquide, obtenue à partir du sol prélevé lors du forage et tamisée. Lors de l'enfoncement du tensiomètre, dont la bougie a été au préalable saturée d'eau, il est important de constater un reflux de la boue. Juste après que la mise en place est terminée, nous avons procédé au remplissage d'eau pour éviter le colmatage prématuré de la bougie par la boue.

Les mesures journalières du potentiel hydrique prises à différentes profondeurs sont transformées en charge hydraulique (H, cm) en considérant la surface du sol comme référence où le potentiel est pris égal à la pression atmosphérique. Pour des problèmes techniques, la plupart des tensiomètres, ont présenté des valeurs incohérentes rendant impossible une interprétation des mesures. Ceci a empêché l'étude des transferts latéraux qui auraient pu être observés entre les différents réservoirs du système. A la fin de la première campagne de culture de pomme de terre, tous les tensiomètres ont décroché.

4-4- Mesure de l'humidité du sol

4-4-1- Instruments de mesure et stock hydrique

Les mesures d'humidité du sol sont faites à l'aide d'une sonde à neutrons (Solo 25, Nardeux St-Avertin, France) équipée d'une source Am/Be de 40 mCi. L'humidité du sol est proportionnelle au comptage neutronique qui est affecté aussi par la porosité du sol, la présence de l'hydrogène dans la constitution organique et minéralogique (surtout des argiles)

et par d'autres composants chimiques du sol qui absorbent les neutrons thermiques (Jayawardane et al., 1983; Hillel, 1980).

La mesure hebdomadaire de l'humidité du sol consiste en un comptage en temps court (durant 25 secondes) des neutrons réfléchis par les atomes d'hydrogène des molécules d'eau. Les mesures sont faites tous les 10 cm sur toute la profondeur du tube d'accès de la sonde (2.6 m). Des mesures gravimétriques, près de l'emplacement du tube et pour deux états d'humidité du sol (humide et sec) ont été réalisées pour l'étalonnage de la sonde.

Les erreurs de mesures neutroniques proviennent de l'instrument (la sonde) et des étalonnages (Haverkamp et al., 1984). A cet effet, avant chaque série de mesures dans le sol, un étalonnage de la sonde a été effectué dans l'eau, pour corriger le phénomène de dérive électronique. Le tube est placé dans un fût de 100 l et 5 mesures sont effectuées à 30 cm du fond.

D'après le comptage racinaire effectué (III. 6-1.1), la profondeur maximale des racines de l'olivier est de 1.25 m. Pour la pomme de terre les valeurs communément utilisées indiquent une profondeur racinaire d'environ 0.65 m. De plus, les observations sur le terrain ont montré que les racines de pomme de terre n'ont pas dépassé cette valeur. La culture du petit pois présente un système racinaire plus profond que la pomme de terre allant jusqu'à 1 m de profondeur. Pour le sol nu, on considère une profondeur de 1.25 cm correspondant à celle de l'olivier puisque les pertes dans ce réservoir sont constituées essentiellement de l'évaporation de la surface du sol calculée à 0.15 m de profondeur et de la consommation directe de l'olivier. Ces profondeurs sont utilisées lors de l'établissement de l'évolution du stock hydrique pour chaque campagne de mesure.

4-4-2- Etalonnage des sondes

Dans notre expérimentation, nous avons utilisé un étalonnage expérimental réalisé à partir de corrélations entre comptage neutronique et humidités volumiques mesurées par la méthode gravimétrique. Cet étalonnage a été effectué pour les trois sondes (S1, S2 et S3) qui ont été utilisées tout au long de la période de mesure. Des pannes techniques sont à l'origine de l'utilisation de sondes différentes au cours de l'expérimentation. Le détail de cet étalonnage ainsi que les courbes obtenues sont détaillées dans l'annexe 2.

5- Dispositif expérimental de mesure du flux de sève sur olivier

En vue de quantifier la consommation hydrique de l'olivier, un suivi de sa transpiration a été réalisé. Nous avons effectué ce suivi à l'aide de capteurs de flux de sève utilisant la méthode de dissipation de chaleur de Granier (1985) modifiée par Do et Rocheteau (2002). Suite à un stage effectué à Montpellier à l'unité de recherche CLIFA de l'IRD en juin 2001, concernant le principe de la technique et la construction des capteurs, nous avons construit les capteurs dans le laboratoire de bioclimatologie de l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT). Les capteurs ont été ensuite installés sur les quatre arbres de la placette selon trois directions Nord (N), Sud Est (SE) et Sud Ouest (SO) protégés par un réflecteur.

5-1- Développement des capteurs

Le capteur de flux de sève Granier est composé de deux sondes cylindriques, rigides d'une longueur de 20 mm et de diamètre 2 mm. Ces sondes contiennent chacune un thermocouple cuivre-constantan ainsi qu'un bobinage d'un fil de constantan servant de résistance de chauffage calibrée à 10 Ω et relié à une tension d'alimentation. Celle-ci est réglée et stabilisée afin d'avoir une puissance de chauffage de 200 W (Granier, 1985). Les modèles disponibles sur le marché sont coûteux. Nous avons donc fait le choix de fabriquer localement les fluxmètres en utilisant des composantes disponibles avec un moindre coût.

Pour ce faire, des aiguilles hypodermiques en acier inoxydable ont été utilisées comme support de l'ensemble. Des fils de cuivre et de constantan ont servi à la construction du thermocouple, de la résistance de chauffage et de la connexion des sondes entre elles. Bien que seulement une des deux sondes du capteur soit chauffée, toutes les aiguilles sont conçues de la même manière. Ce choix a été fait pour s'assurer que le transfert de chaleur se fait dans les mêmes conditions pour les deux aiguilles du fluxmètre et pour éviter de biaiser l'écart de température mesuré. La sonde chauffée est connectée ultérieurement au boîtier de chauffage alors que l'aiguille de référence ne l'est pas.

Le développement des fluxmètres a lieu en quatre étapes : préparation du support, fabrication des thermocouples, bobinage de la résistance de chauffage et finition du capteur (Figure IV.8 a,b).

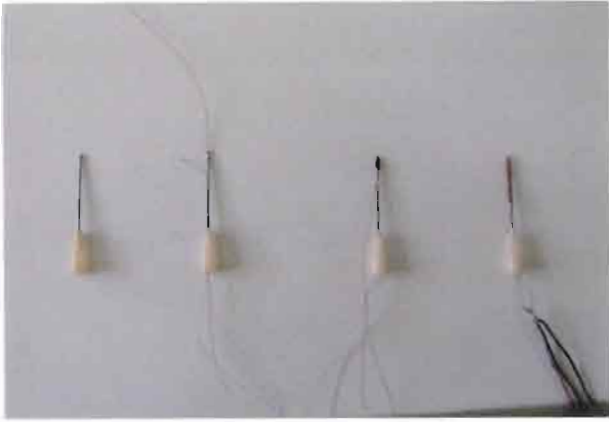


Figure IV.8.a. Sondes de fluxmètres à différentes étapes de la fabrication à **Figure IV.8.b. Fluxmètre assemblé**

5-1-1-Préparation du support

Des aiguilles hypodermiques de 20 mm de long et de 1.8 mm de diamètre externe ont été meulées pour éliminer la pointe. Une entaille est réalisée à un centimètre de l'extrémité. Cette entaille est prévue pour loger l'extrémité du thermocouple, partie effectivement sensible à la variation de température. Suite à ces opérations tous les bords tranchants ont été poncés pour éviter d'endommager les fils qui seront ultérieurement en contact avec l'aiguille.

5-1-2- Les thermocouples

Pour préparer les thermocouples, un fil de constantan et un fil de cuivre sont coupés à la longueur de 20 cm environ. Ils sont dénudés sur un centimètre de l'extrémité. Ces extrémités dénudées sont enroulées l'une sur l'autre et soudées formant ainsi le dit thermocouple cuivre-constantan. Il est important de surveiller la qualité de la jonction car la soudure doit servir seulement de fixation entre les deux fils et non pas d'intermédiaire. Une fois que la soudure est froide, une goutte de colle est versée dessus pour assurer une isolation ultérieure entre le thermocouple et l'aiguille.

5-1-3- Les résistances de chauffage

Un fil de constantan est coupé à la longueur de 45 cm. Le thermocouple et le fil de la résistance sont enfilés dans l'aiguille. Le thermocouple est placé au niveau de l'entaille prévue à cet effet. Puis il est fixé par une goutte de résine époxy. Lorsque la colle est bien sèche, elle est meulée pour uniformiser la section de la sonde.

A ce stade, le fil de la résistance est enroulé autour de l'aiguille sur une longueur de deux centimètres à partir de l'extrémité. Une fois le bobinage terminé, il est fixé par un nœud réalisé à l'aide d'un fil de cuivre et renforcé par une couche de résine époxy. Lorsque la résine s'endurcit, elle est poncée pour maintenir le diamètre externe de la sonde homogène. Une fine couche de colle est ensuite appliquée pour assurer l'isolation électrique de la résistance.

5-1-4- Finition des capteurs

Pour uniformiser la température de la sonde, l'aiguille est insérée et collée à un tube d'aluminium de longueur 22 mm et de diamètre externe 2 mm. A ce stade, les aiguilles obtenues comptent quatre sorties, deux fils de constantan appartenant à la résistance de chauffage, un fil de cuivre et un fil de constantan émanant du thermocouple.

5-2- Installation des capteurs et acquisition des données

5-2-1- Installation des sondes

Les deux sondes sont insérées radialement au niveau du tronc à environ 70 cm de la surface du sol (Figure IV.9). Pour ce faire, des trous d'un diamètre de 22 mm ont été effectués à l'emplacement prévu pour chaque capteur à l'aide d'une chignole manuelle. L'exécution des trous demande une dextérité et une orientation de la chignole toujours perpendiculaire au tronc car la moindre déviation cause la cassure de la mèche à l'intérieur du bois. Trois capteurs par arbre sont implantés radialement à 2.5 cm de profondeur dans le bois conducteur suivant les directions Nord (N), Sud Est (SE) et Sud Ouest (SO). En effet, des coupes fraîches de branches d'olivier ont permis d'effectuer une première approximation de la surface conductrice de l'olivier selon une distinction visuelle du bois conducteur par rapport

au bois de cœur et à l'écorce. Par la suite, la relation obtenue entre le diamètre externe et la profondeur de la surface conductrice a permis de déterminer la profondeur d'insertion des capteurs. Les capteurs sont par la suite isolés des perturbations thermiques induites par le rayonnement à l'aide d'une armature métallique recouverte d'une toile plastifiée blanche.



Figure IV.9. Capteurs de flux de sève installés au niveau de l'arbre selon trois directions

5-2-2- Traitement des données

Comme nous avons adopté la technique de dissipation de chaleur en chauffage alternatif pour un cycle de 15/15 mn (chauffage/non-chauffage) (II-3-3), les enregistrements des données sont effectués toutes les 15 minutes correspondant à la mesure de la 15^{ème} minute. L'acquisition et le stockage sont réalisés par deux centrales d'acquisition de données Campbell CR10X (une pour deux arbres). L'autonomie énergétique est assurée par 2 batteries pour chaque centrale. Les données brutes sont traitées et corrigées pour servir au calcul de la densité de flux de sève. Pour certaines périodes les flux ont été aberrants ou manquants. Ces flux ont été corrigés et reconstitués par corrélation linéaire entre les valeurs du capteur défectueux et celles d'un ou de plusieurs autres capteurs qui ont fonctionné (V.1).

5-3- Etalonnage des capteurs

Granier et al. (1990) suggèrent que les paramètres de l'équation d'étalonnage utilisée dans le calcul du flux de sève ne dépendent pas des caractéristiques des arbres ou de l'anatomie du bois et qu'il est possible donc de l'utiliser sans effectuer une nouvelle calibration sur l'espèce étudiée. Cependant, comme la calibration n'est pas basée sur des principes physiques mais plutôt empiriques, il est recommandé de la refaire à chaque fois que la méthode est appliquée à une nouvelle espèce (Smith et Allen, 1996). De même, l'équation d'étalonnage obtenue par

Do et Rocheteau (2002b) a été établie sur une colonne de sciure de bois et supposée valable pour différentes espèces arboricoles. Néanmoins, lors de l'utilisation de cette technique sur l'olivier, une nouvelle calibration est souhaitée (Do, communication personnelle).

Pour cela, nous avons utilisé trois capteurs construits selon la méthode de Granier avec différentes puissances de chauffage (de 0.113 à 0.230 W) afin de déterminer son influence sur les paramètres d'étalonnage. En effet, les capteurs utilisés pour les mesures au niveau des arbres ont des puissances de chauffage différentes à cause de différences entre les résistances des sondes suite à leur construction (voir ci-après).

5-3-1- Dispositif d'étalonnage des capteurs de flux de sève

Le dispositif utilisé pour cet étalonnage a été élaboré au laboratoire de Bioclimatologie de l'INAT (Masmoudi et al., 2004). Ce dispositif permet de faire passer de l'eau sous différentes pressions au niveau d'une branche d'olivier sur laquelle sont disposés des capteurs de flux de sève à étalonner. L'enregistrement du signal obtenu des capteurs et la mesure simultanée du débit d'eau à travers la branche permet d'établir une relation entre le débit obtenu et le signal électrique converti en flux hydrique. La branche utilisée mesure 30 cm de long avec un diamètre de 7 cm. Une bonbonne métallique renfermant une soupape et supportant de fortes pressions a été utilisée comme récipient pour contenir l'eau qui sera injectée sous pression au niveau de la branche. La pression de l'eau est obtenue grâce à une bouteille remplie sous pression de 200 bars d'azote gazeux (Figure IV.10). Un tuyau en plastique semi-rigide est employé pour relier la branche au récipient d'eau. Des colliers de serrage ont été utilisés pour assurer l'étanchéité et la résistance de la jonction branche-tuyau.

L'application de différentes pressions, allant de 0.2 à 4 bars, au niveau de la branche a permis d'obtenir une large gamme de flux qui couvrent les valeurs obtenues par les capteurs en plein champ. L'expérience s'est déroulée en continu du 28/11/2004 au 02/12/2004. Les enregistrements des signaux des capteurs sans débit d'eau ont permis de déterminer l'écart de température maximal (ΔT_{max}) correspondant au flux nul. Nous avons remarqué, au cours de l'expérience, que pour des pressions similaires, le débit de l'eau commençait à diminuer au bout de trois jours de mesure, ce qui pourrait être lié à des problèmes de conduction au niveau de la branche. En effet, à l'arrêt de l'expérience, l'observation de la surface de la coupe de la branche a montré une accumulation de moisissures qui obstruaient les vaisseaux conducteurs conduisant à la diminution du débit du flux, malgré l'ajout d'eau de javel à l'eau utilisée dans

la bonbonne à titre préventif. Il est donc conseillé d'effectuer les mesures le plus vite possible avant la détérioration de l'état physiologique de la branche.



Figure IV.10. Dispositif d'étalonnage des capteurs de mesure du flux de sève sur une branche d'olivier au laboratoire.

5-3-2- Equation d'étalonnage des capteurs de flux de sève

Les différentes pressions appliquées au niveau de la branche ont permis l'obtention de débits allant de 0.03 l h^{-1} pour une pression de 0.4 bar à 0.20 l h^{-1} à 3.6 bar mesurés sur un intervalle de temps de 15 mn. L'application de différentes puissances de chauffage (P) aux 3 capteurs utilisés lors de cette expérience a montré qu'il existe un effet de P sur la relation d'étalonnage (Figure IV.11).

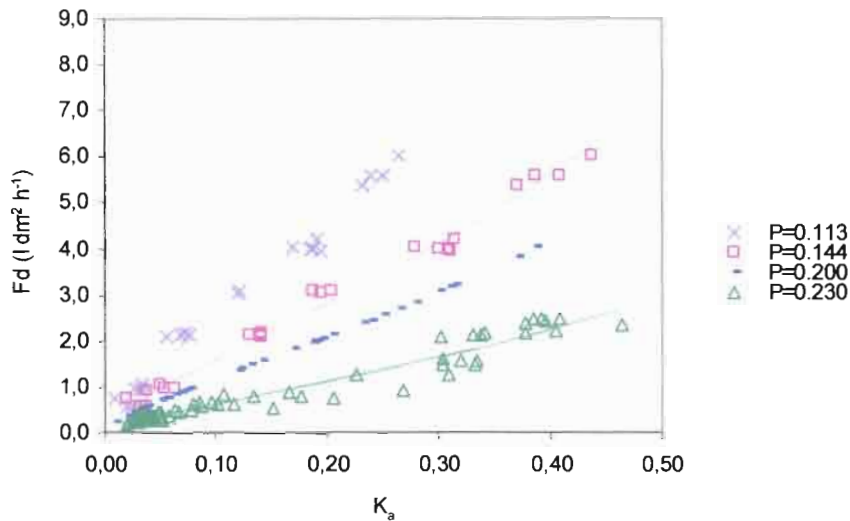


Figure IV.11. Relation entre la densité de flux de sève F_d ($l\text{ dm}^{-2}\text{ h}^{-1}$) et l'indice de température K_a (adimensionnel) pour différentes puissances de chauffage P (W).

La figure (IV.11) montre l'effet de la puissance de chauffage sur la relation entre F_d et K_a . Celle établie par Do et Rocheteau (2002b) pour une puissance de 0.200 W se trouve au milieu des autres courbes correspondant aux différentes puissances utilisées au niveau des capteurs lors de cette étude. Par conséquent, l'équation d'étalonnage (II.12) doit être modifiée pour tenir compte de l'effet de la puissance de chauffage:

$$F_d = \left[\frac{a \times K_a}{1 - K_a} \right]^{0.707} \quad (\text{IV.3})$$

Avec F_d est la densité du flux de sève, K_a est l'indice du flux en chauffage alternatif adimensionnel et a un paramètre relié exponentiellement à la puissance de chauffage (Figure IV.12) selon l'équation suivante avec P exprimé en W et F_d en $l\text{ dm}^{-2}\text{ h}^{-1}$:

$$a = 180.74e^{-15.231P} \quad (\text{IV.4})$$

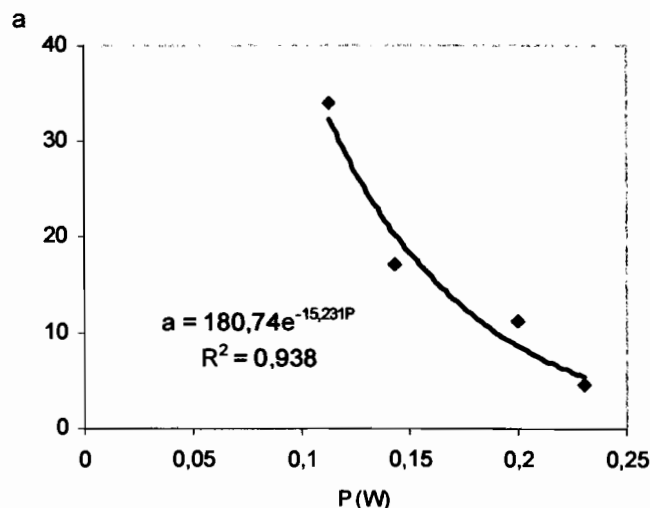


Figure IV.12. Relation entre le paramètre a et la puissance de chauffage P (W).

6- Détermination de certaines caractéristiques biologiques de l'olivier

6-1- Profondeur racinaire de l'olivier

La distribution du système racinaire est fonction de la texture et de l'aération du sol. Dans les sols aérés, l'angle formé par le système racinaire est relativement petit, et les racines peuvent atteindre une profondeur de 6-7 mètres ou même plus. Dans les sols moins aérés, l'angle augmente et la profondeur du système racinaire diminue. Le système racinaire de l'olivier peut également s'adapter à des sols très lourds non aérés, en développant un réseau de racines très superficiel et très étendu. Dans les cultures irriguées, le système racinaire est relativement peu profond. La plupart des racines se trouvent concentrées à une profondeur allant de 70 à 80 cm et seules quelques racines isolées peuvent descendre jusqu'à 1.5 m (COI, 1997).

Suite à cette grande variabilité de distribution racinaire en fonction des conditions locales de culture, il est apparu nécessaire de déterminer, sur la parcelle d'étude, la profondeur racinaire des arbres étudiés. La connaissance de la distribution racinaire de l'olivier représente une donnée importante pour l'étude du bilan hydrique. En effet, la profondeur racinaire est utilisée comme limite inférieure de la tranche de sol sur lequel le bilan hydrique sera calculé.

Nous n'avons pas fait un suivi du développement racinaire vu la lourdeur des mesures (Passioura, 1983). Par contre, nous avons effectué le dénombrement des racines de l'olivier, à l'aide d'une grille dimensionnée, sur la fosse qui a servi à la description du sol et à la

détermination de ses caractéristiques hydrodynamiques. D'après le comptage effectué au niveau de la fosse pédologique de 2.5 m de profondeur située à 0.5 m du tronc de l'olivier au niveau de l'interligne non cultivée, les racines se trouvent majoritairement au niveau de la couche 0-1 m de profondeur (93 %), avec quelques racines allant jusqu'à 1.75 m de profondeur. En effet, nous avons trouvé que 58 % des racines se trouvent dans la couche de 30 cm de profondeur. La zone de colonisation maximale semble être la couche de 50 cm de profondeur du sol (70 %) (Tableau IV.7-8).

Tableau IV.7 : Répartition des racines (%) en fonction de la profondeur

Profondeur (cm)	% des racines
0-10	24
10-20	15
20-30	19
60-70	6
90-100	4

Tableau IV.8. Répartition cumulée des racines par couche de sol

Profondeur de la couche (cm)	% cumulé des racines
0-30	58
0-40	65
0-50	70
0-80	86
0-100	93

Ces résultats sont en accord avec des mesures effectuées dans le sud tunisien par Ben Ruina et al. (1997) sur la même variété (Chemlali) mais sur des arbres plus âgés (entre 80 et 87 ans), donc supposés avoir un développement racinaire maximal sous le climat aride où la pluviométrie moyenne n'excède pas 200 mm. Ils ont trouvé que la répartition des racines en profondeur est fonction de la texture du sol. En sol sableux profond, à 6 m du tronc, 55 % des racines occupent l'horizon de surface (0-40 cm), 37 % l'horizon intermédiaire (40-100 cm) et 8 % au-delà de 100 cm. En sol argileux-gypseux peu profond, ces taux sont respectivement 8 %, 20 % et 0 %. La résistance mécanique opposée par le milieu, limite la profondeur d'installation des racines.

6-2- Surface conductrice de l'olivier

La surface conductrice de l'olivier est un paramètre important lors du passage de la densité du flux de sève au flux en litre par arbre. Fernández et al. (2001) ont trouvé que toute la surface du tronc était conductrice. Néanmoins, étant donné les caractéristiques morphologiques de l'olivier, il semble judicieux de vérifier le conduction de la surface du tronc sur l'arbre étudié. Pour cela, nous avons utilisé la méthode de coloration à la safranine. L'expérience a été conduite au laboratoire de Bioclimatologie de l'INAT. Une pompe à vide est reliée, par le biais d'un tuyau en plastique souple, à la branche étudiée et celle-ci est « plongée » dans la solution colorée. Le colorant est fixé au niveau de la zone conductrice lors de son passage à travers la branche. Différentes tailles de branches d'oliviers ont été utilisées (rayon allant de 0.5 à 5.3 cm) afin d'établir une relation entre le périmètre extérieur de la branche (calculé par ArcView) et la surface conductrice.

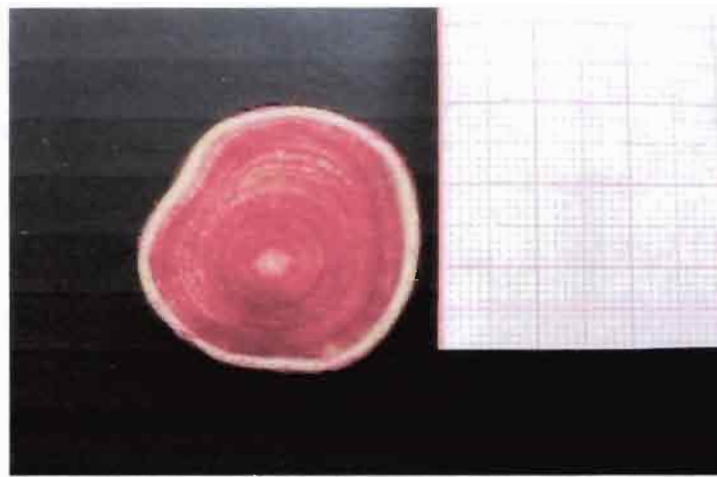


Figure IV.13. Coupe transversale d'une branche d'olivier colorée à la safranine montrant la partie conductrice du bois (couleur rouge)

Une différence nette est apparue, d'une part entre la partie conductrice qui constitue le xylème colorée en rouge et d'autre part une zone non-conductrice constituée de l'écorce et le bois de cœur qui n'ont pas été colorés (Figure IV.13.). Nous avons pu donc constater que seulement le bois de cœur et l'écorce n'étaient pas conducteurs de sève. Cependant, nous avons remarqué l'existence d'une certaine hétérogénéité quant à l'intensité de coloration des différentes zones au niveau du xylème indiquant une conduction plus ou moins variable à travers la section conductrice.

L'équation obtenue reliant la section conductrice de l'arbre i (S_{ai} , cm^2) au périmètre (P , cm) de l'échantillon est de la forme :

$$S_{ai} = 0.0526^{2.064P} \quad (\text{IV.5})$$

Cette équation est utilisée pour la détermination du flux total par arbre à partir de la densité de flux mesurée. En utilisant cette équation, la surface conductrice des 4 oliviers utilisés dans cette étude varie de 100 à 190 cm^2 .

Conclusion

Le dispositif expérimental présenté dans ce chapitre, combine une approche hydrologique (mesure du stock hydrique au niveau des différents réservoirs) avec une approche physiologique (mesure du flux de sève sur olivier). Les mesures obtenues sont utilisées pour la quantification des flux hydriques au sein du système olivier-cultures annuelles. Elles sont analysées dans les chapitres suivants V et VI.

CHAPITRE V

LES FLUX DE SEVE SUR OLIVIER : ANALYSE

Introduction

Les techniques de mesures du flux de sève permettent, quand elles sont combinées à d'autres méthodes (bilan hydrique, bilan d'énergie, ...) de séparer la transpiration des autres flux évaporatoires au niveau d'un verger ou d'un système de cultures associées. Les mesures du flux de sève ont été appliquées pour la première fois sur olivier par Moreno et al. (1996) et Fernández et al (1996), respectivement au niveau du tronc et des racines par la méthode d'impulsion de chaleur.

Dans ce chapitre, nous analysons les mesures du flux de sève effectuées par la méthode de Granier (1985) modifiée par Do et Rocheteau (2002 a,b). L'étude de la corrélation entre les capteurs du flux de sève permet d'extrapoler les mesures de l'échelle du capteur à celui de l'arbre puis au verger.

Par la suite, nous étudions l'évolution de la densité du flux de sève en fonction de la demande climatique et de l'humidité du sol. La transpiration saisonnière de l'olivier déterminée à partir de cette méthode est analysée en fonction des apports hydriques et de l'*ET_o*.

1- Etude de la variabilité entre capteurs et entre arbres

Les mesures de la densité du flux de sève (F_d) au niveau des 12 capteurs insérés au niveau des 4 arbres étudiés ont été analysées afin de chercher des relations entre capteurs et entre arbres pour identifier le nombre de capteurs nécessaire à l'étude de la transpiration au niveau de la parcelle (Vertessy et al., 1995 ; Giorio et Giorio, 2003).

La variabilité du flux de sève en fonction de la direction du capteur a été mise en évidence sur plusieurs espèces et avec différentes techniques de mesure. En effet, une hétérogénéité du flux a été observée, en utilisant la technique de pulsation de chaleur, sur *Eucalyptus regnans* et *Acacia dealbata* (Vertessey et al., 1995) et sur abricotier (*Prunus armeniaca*) (Nicolas et al.,

2005). Sur olivier également, une forte variabilité du flux a été détectée par la technique de pulsation de chaleur (Fernández et al., 2001 ; Giorio et Giorio, 2003).

1-1- Variabilité du flux entre capteurs à l'échelle horaire

1-1-1- Caractérisation de la variabilité du flux de sève

Le comportement de 12 capteurs installés au niveau des 4 arbres a été étudié sur un échantillon de 95 jours en 2003. Comme cela a été déjà mentionné (II.3-3), le pas du temps du calcul de la densité du flux de sève est de 30 mn. L'allure générale de la densité du flux de sève au cours d'une journée d'été (31/08/03) est donnée dans la figure V.1.

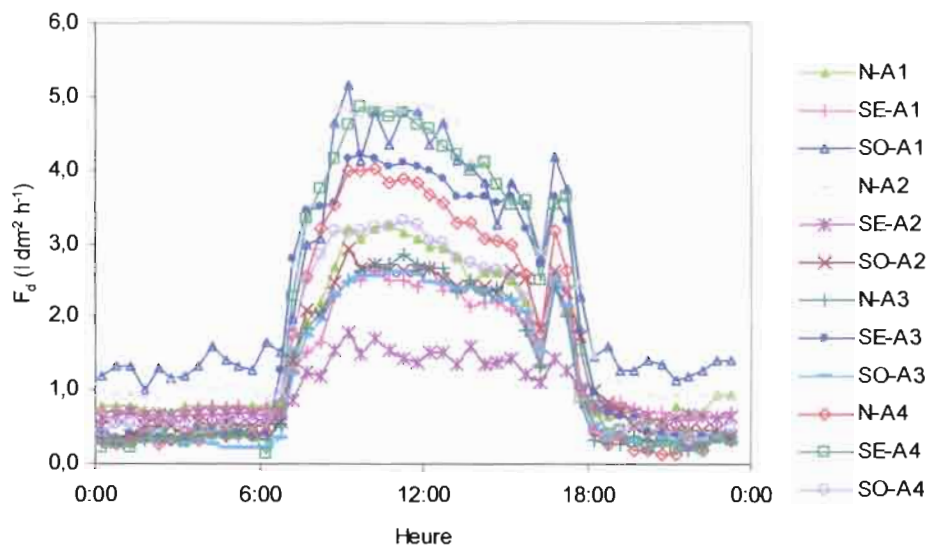


Figure V.1. La densité du flux de sève F_d ($l \text{ d}^{-2} \text{ h}^{-1}$) mesurée sur les quatre arbres (A1 à A4) dans les trois directions: Nord (N), Sud Est (SE) et Sud Ouest (SO) le 31/08/03.

L'observation de l'évolution horaire de la densité du flux de sève (F_d), au niveau des 12 capteurs, montre que celle-ci augmente rapidement le matin à partir de 7h15 pour atteindre un pic autour de 09h15 ; elle évolue par la suite suivant un plateau durant environ 5 heures et décroît à partir de 17h45 parallèlement à la diminution de la radiation solaire. L'allure de ces courbes montre de fortes variations des valeurs obtenues par les 12 sondes. Par exemple, un maximum de $1.5 \text{ l dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ est obtenu par la sonde orientée sud-est de l'arbre 2 (SE-A2), alors que la sonde orientée selon la direction nord du même arbre (N-A2) indique une valeur de 4.9

$1 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Cette variabilité a été déjà signalée par Fernández et al. (2001) sur olivier âgé de 12 ans qui l'ont attribuée à l'hétérogénéité de la surface conductrice. Des différences de densité du flux de sève allant de 30 % à 50 % ont été enregistrées à partir de mesures effectuées en différents points au niveau de troncs d'arbres forestiers (Cienciala et al., 1999).

1-1-2- Variabilité du flux de sève en fonction de l'humidité du sol

Nous avons remarqué que la variabilité du flux de sève entre les capteurs semble être accentuée par une hétérogénéité de l'humidité du sol. L'observation du comportement des capteurs au sein d'un même arbre avant et après un apport hydrique au niveau du bassin, montre que celui-ci génère une augmentation du rapport entre la densité du flux de sève de deux capteurs donnés. Cette augmentation est variable selon les capteurs. En effet, l'examen au niveau de l'arbre 4 du rapport entre la densité du flux de sève journalière du capteur de la direction N (F_{d-N}) et celle de la direction SO (F_{d-SO}) avant et après une irrigation de l'olivier (Ir) montre que F_{d-N}/F_{d-SO} est passé brusquement de 1.42 à 2.22 au moment où celui de F_{d-SE}/F_{d-SO} a varié de 1.41 à 1.87 alors que ce rapport est resté presque stable pour les directions N et SE (Figure V.2). Cette augmentation du rapport des densités des flux des capteurs est maintenue quelques jours après l'irrigation. La réaction des capteurs vis-à-vis de l'irrigation est variable. Etant donné que les racines de l'olivier s'étendent au-delà du bassin où est apportée l'eau, l'irrigation ne contribue pas à l'humidification de tout l'ensemble racinaire de l'arbre. Comme les capteurs sont insérés au niveau de vaisseaux conducteurs qui sont reliés à des faisceaux racinaires pouvant être aussi bien dans des zones humectées ou non, la détection de l'augmentation du flux au niveau du tronc dépend du point de mesure. Si un même ensemble de racines est relié à deux capteurs, alors la variation du rapport des flux entre ces deux capteurs sera moindre. Le degré d'humidification de la zone racinaire correspondant aux vaisseaux conducteurs où est inséré le capteur a donc un impact sur la densité du flux mesurée par ce capteur.

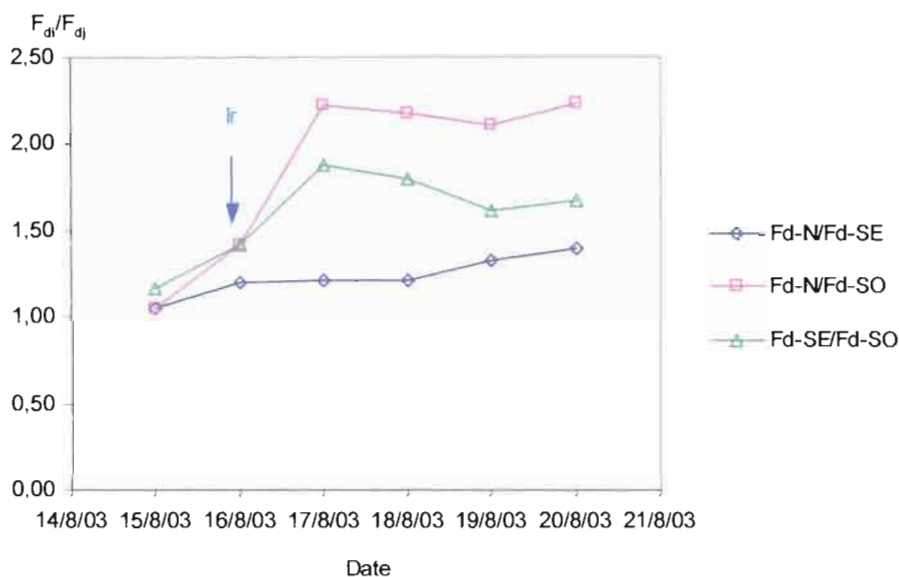


Figure V.2. Evolution du rapport entre les densités du flux moyenne du couple des capteurs selon les directions N-SE (F_d-N/F_d-SE), N-SE (F_d-N/F_d-SO) et SE-SO (F_d-5/F_d-6) du 14/08/03 au 21/08/03 avant et après irrigation (Ir).

Cet effet de l'humidité du sol a été déjà observé sur cerisier (Cabibel et Isbérie, 1997). Ce phénomène a aussi été signalé par Lu et al. (2000) sur manguier où le rapport entre les flux mesurés pour les directions Est et Ouest change après irrigation.

1-2- Variabilité du flux de sève entre les capteurs à l'échelle saisonnière

Dans le but de caractériser la variabilité trouvée entre les capteurs à l'échelle horaire et la représentativité relative de chaque capteur, nous avons comparé les valeurs journalières de la densité du flux de sève de chaque capteur (F_{di}) à la moyenne journalière de tous les capteurs (F_{dm}). Les données de 95 jours utilisées dans cette comparaison intègre une large gamme de valeurs transpiratoires observées sur l'olivier. La figure V.3 montre le comportement des différents capteurs pendant la période de mesure.

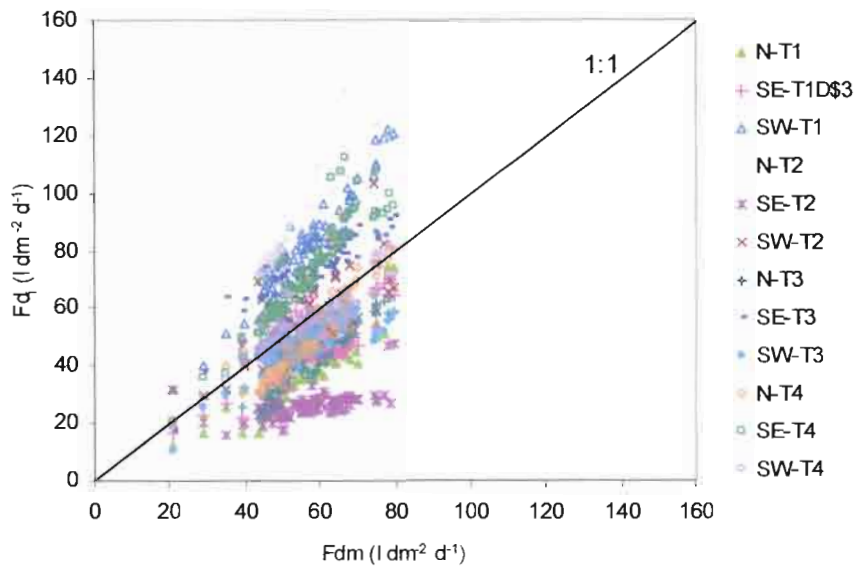


Figure V.3. Flux de sève journalier F_{di} mesuré par chaque sonde (1 à 12) en fonction de la moyenne journalière du flux de sève F_{dm} , données de 95 jours.

La variabilité enregistrée entre les différents capteurs semble être liée à l'orientation de la sonde ou à sa position ou encore aux conditions locales du flux de sève dans le tronc. La cohérence de la variabilité enregistrée par capteur pour différents niveaux transpiratoires exclut toute distribution au hasard. En effet, la position de F_{di} pour chaque capteur par rapport à la moyenne générale (F_{dm}) est plus ou moins stable pour des valeurs de densité du flux allant de 20 à 80 l dm⁻² j⁻¹ : certains capteurs surestiment et d'autres sous-estiment systématiquement la densité du flux de sève par rapport à la moyenne.

1-3- Effet de l'orientation des capteurs sur la variabilité journalière du flux

Comme la transpiration est liée à la radiation solaire, nous avons examiné s'il y a une orientation préférentielle du flux en fonction de la position du capteur par rapport au soleil. Pour cela, nous avons établi, pour chaque arbre, l'équation de la droite de régression en considérant la constante nulle, entre les valeurs du flux de sève de chaque direction (N, SE et SO) (F_{di}) et la moyenne du flux de sève de cet arbre (F_{dm-Aj}). La figure V.4 montre un

exemple obtenu sur l'arbre 3 concernant l'évolution de la densité du flux de sève au niveau des trois directions en fonction de la densité moyenne du flux de sève de cet arbre.

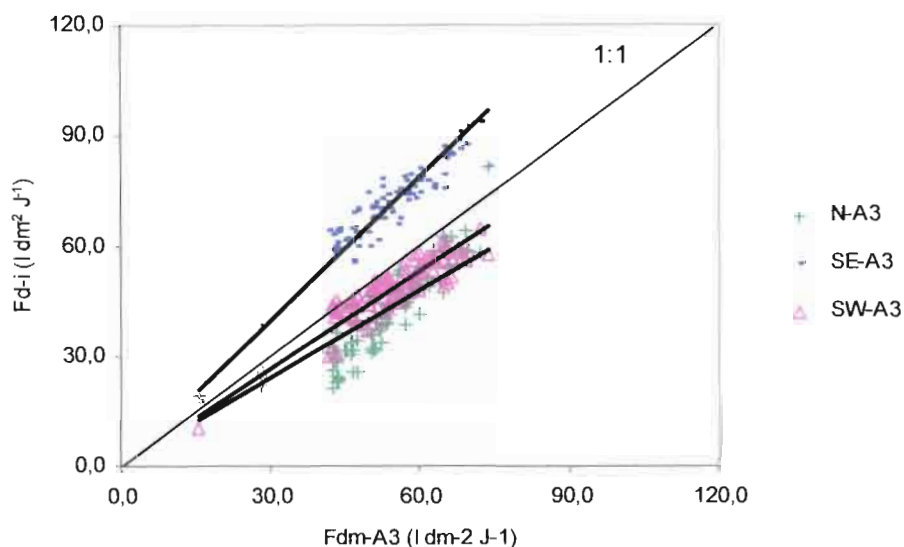


Figure V.4. La densité du flux de sève pour les trois directions : Nord (N), Sud Est (SE) et Sud Ouest (SO) pour l'arbre 3 F_{dir-A3} en fonction de la densité moyenne du flux de sève de l'arbre 3 F_{dm-A3}

Cette même corrélation a été testée pour tous les capteurs des 4 arbres afin de vérifier la stabilité des résultats obtenus sur un arbre pris comme exemple. Nous présentons dans le tableau (V.1) la pente (a) de la droite de régression (passant par l'origine) et le coefficient de détermination R^2 pour tous les arbres.

Tableau V.1. La pente a et R^2 des régressions entre la densité du flux de sève d'une direction donnée (Nord, SE et SO) et la densité moyenne du flux de sève de l'arbre correspondant (A1, A2, A3, A4)

	N		SE		SO	
	a	R^2	a	R^2	a	R^2
A1	1.35	0.61	1.25	0.83	0.67	0.87
A2	0.61	0.70	2.17	0.35	1.03	0.49
A3	1.22	0.29	0.76	0.87	1.12	0.77
A4	1.10	0.57	0.82	0.85	1.10	0.77

Nous observons qu'à l'exception des capteurs SE et SO l'arbre 2 (A2) et du capteur N de l'arbre 3 (A3), le coefficient R^2 entre les valeurs des sondes de chaque orientation et la moyenne de l'arbre correspondant dépasse 0.6. La variabilité de la pente de l'équation de régression indique que le poids relatif d'une direction donnée diffère selon les arbres: la

répartition directionnelle de la densité du flux est plutôt aléatoire et peut être due à la variabilité de la conductivité du flux de sève dans la section du tronc. Une expérience de coloration de la surface conductrice de l'olivier à la safranine a été conduite pendant cette étude (IV.6-2) et a montré une hétérogénéité de conduction au niveau du xylème. Celle-ci est déduite de la variabilité de l'intensité de la coloration obtenue au niveau la section conductrice. Cohen et al. (1981) ont montré que le flux de sève mesuré au niveau du tronc est indépendant de l'orientation mais qu'il est fonction de la structure xylémique de l'arbre. Nicolas et al. (2005) ont trouvé des densités du flux de sève statistiquement similaires entre les directions Nord et Sud qu'ils attribuent à une uniformité de distribution des vaisseaux conducteurs. Cependant, Steinberg et al. (1990) ont trouvé que sur pacanier (*Carya illinoensis*) la densité du flux mesurée au niveau de la direction sud du tronc est plus élevée que celle de la direction nord du fait d'une exposition plus importante au soleil. L'influence potentielle de l'effet de l'exposition par rapport au soleil peut être masquée par les pratiques agricoles. En effet, la position relative du capteur par rapport à une branche principale ou par rapport à une cicatrice d'une branche coupée exerce une très forte influence sur les mesures du flux de sève par ce capteur. Pour estimer le flux moyen sur olivier, Giorio et Giorio (2003) ont établi des régressions linéaires entre le flux moyen mesuré par 6 capteurs installés sur 3 arbres (2 capteurs par arbre) et le flux mesuré dans une direction donnée.

Alarcón et al. (2000) ont trouvé que l'estimation de la transpiration d'un abricotier en pot à partir des mesures du flux de sève en utilisant 4 capteurs selon 4 directions différentes est en accord avec celle obtenue par des mesures de la perte en eau du pot. Dans notre expérimentation, les mesures effectuées par les 3 capteurs au niveau de chaque arbre seront considérées représentatives d'une densité moyenne. Le nombre de trois sondes semble être un bon compromis entre la représentativité et la complexité des mesures.

1-4- Variabilité inter-arbre et extrapolation des mesures du flux de sève à l'échelle du verger

La variabilité de la densité du flux de sève qui existe entre les arbres est souvent due à une hétérogénéité microclimatique qui peut être créée à l'issue d'un éclaircissage des arbres ou à des tailles de frondaison différentes (Granier et al., 1996). Elle est généralement réduite dans le cas d'arbres de la même espèce, ayant le même âge et se trouvant dans des conditions

environnementales similaires. Pour estimer la variabilité du flux entre les arbres étudiés, nous avons cherché une relation entre le flux de sève moyen à l'échelle d'un arbre (F_{dm-Ai}) obtenu à partir de la moyenne des 3 capteurs insérés dans le même arbre et la densité du flux de sève calculée à partir de la moyenne des 4 arbres (F_{dm}) (Figure V.5).

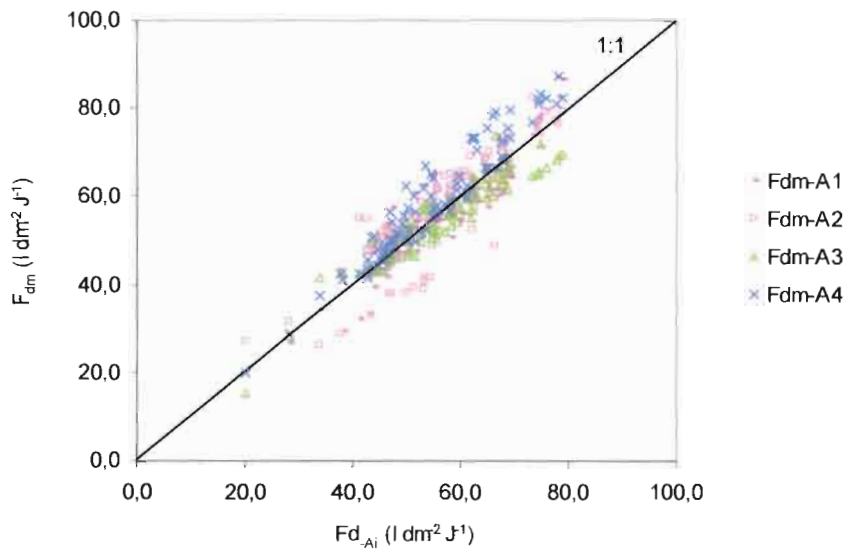


Figure V. 5. Variation de la densité moyenne du flux de sève des quatre arbres F_{dm} en fonction de la densité moyenne du flux de sève pour chaque arbre F_{dm-Ai} .

La densité du flux de sève moyenne mesurée par arbre (F_{dm-Ai}) est bien corrélée avec la moyenne des 4 arbres (F_{dm}). En effet, Granier (1987b) a montré que dans un verger homogène, un nombre de 5 arbres munis chacun d'un capteur de mesure du flux de sève semble être un nombre suffisant pour déterminer la transpiration au niveau d'un verger. Nous allons alors considérer, dans ce qui suit, comme densité du flux de sève moyen, la moyenne arithmétique des densités du flux de sève mesurées sur les 4 arbres.

Des régressions simples et multiples ont été recherchées entre la densité du flux de sève moyen d'un arbre ou d'une combinaison d'arbres (A1-A2, A1-A2-A3, ...) avec celle de la moyenne des 4 arbres en considérant à chaque fois que la constante de la régression est nulle. Les R^2 obtenus ont varié de 0.68 pour A2 à 0.99 pour la corrélation de A1-A2-A3, A2-A3-A4 et A1-A2-A4. Les pentes des droites ainsi que le R^2 des différentes régressions obtenues sont présentées dans l'annexe 3.

Les corrélations obtenues entre capteurs (Tableau V.1) et celles entre arbres (Annexe 3) sont utilisées pour la reconstitution des données manquantes ou aberrantes (éliminées) afin de pouvoir étudier la tendance générale de l'évolution du flux de sève durant la période expérimentale. Ces corrélations ont été déjà effectuées sur olivier par Giorio et Giorio (2003), utilisant la technique de pulsation de chaleur, pour minimiser le nombre de capteurs de mesure du flux de sève dans le cas du pilotage d'irrigation.

1-5- Importance du flux nocturne

1-5-1- Mesure du flux nocturne

L'existence d'un flux de sève nocturne (F_{dn}) est attribuée à deux processus. Le premier est l'occurrence, au coucher du soleil, d'une différence du potentiel hydrique entre le sol et les feuilles. Celle-ci génère une réhydratation de l'arbre à cause de l'épuisement relatif des réserves hydriques de l'arbre au cours de la journée. Le rétablissement du statut hydrique de la plante s'arrête quand celui-ci est en équilibre avec l'état hydrique du sol (Benyon 1999). Le deuxième processus engendrant un flux nocturne est l'incontrôlable transpiration cuticulaire durant la nuit. L'ampleur de cette transpiration est beaucoup plus faible que la transpiration à travers les stomates. Cependant, Green et al. (1998) ont mesuré des flux nocturnes avec la méthode des impulsions de chaleur allant de 15 % du cumul journalier sur pommier et jusqu'à 30 % sur l'actinidia (Arbre à kiwi).

Sur olivier, Fernández et al. (2001), utilisant la technique d'impulsion de chaleur, ont enregistré un flux nocturne au niveau des racines suite à une irrigation après une période sèche. Benyon (1999) a enregistré un flux nocturne important sur *Eucalyptus grandis* qu'il attribue à une transpiration nocturne à travers les stomates.

Dans notre étude, l'observation de situations qui suivent des événements d'apport hydrique sous forme de pluie ou d'irrigation a révélé la présence du flux nocturne. L'importance de ce phénomène dépend du niveau du stress hydrique subi par l'arbre et de la quantité d'eau apportée. Pour étudier l'amplitude des flux nocturnes, nous avons pris comme exemple la densité du flux de sève moyen des deux arbres A1 et A2 $F_{dm}(1,2)$ au cours de la période allant du 20/01/03 au 25/01/03 précédée par un événement pluvieux (22 mm du 16/01/03 au 19/01/03) (Figure V.6). Nous avons calculé leur somme sur l'intervalle du temps se situant

entre le coucher et le lever du soleil et exprimer leur valeur en pourcentage du cumul journalier. Nous avons enregistré une variabilité des flux nocturnes selon les capteurs qui a été déjà enregistrée sur bananier par Lu et al. (2002). Le pourcentage du flux nocturne a évolué donc, selon les jours, d'un minimum de 33 % jusqu'à un maximum de 45 % du cumul journalier qui correspond à des valeurs de 15.6 et 18.9 l. dm⁻² j⁻¹ respectivement. L'estimation de ces valeurs dépend de la sensibilité de la méthode aux faibles flux. Des valeurs du flux hydrique nocturne variant de 5 % à 17 % avec une moyenne de 11 % ont pu être enregistrées pendant des périodes où l'occurrence du flux nocturne est très faible. Ces valeurs, non négligeables, doivent être considérées avec précaution, puisqu'elles peuvent ne constituer, qu'un « bruit de fond » lié à la diminution de la précision des capteurs pour de faibles flux (Giorio et Giorio, 2003).

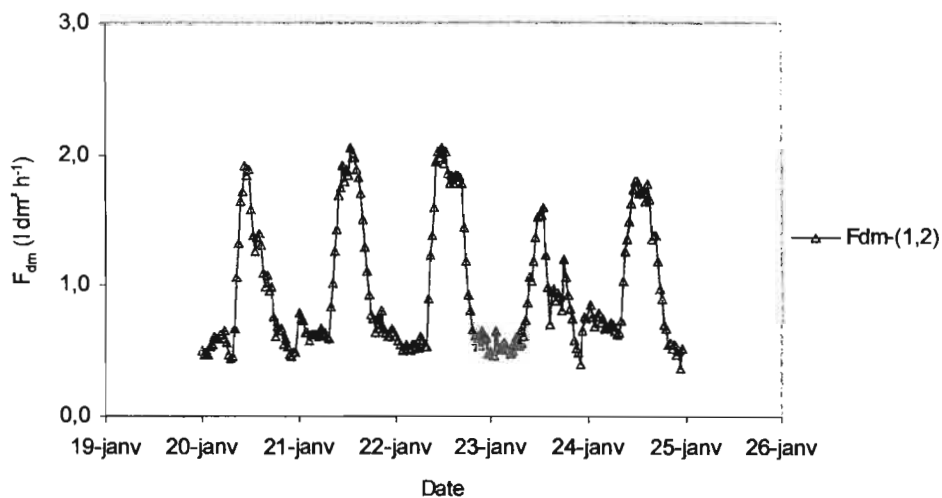


Figure V.6. Evolution de la densité moyenne du flux de sève des deux arbres A1 et A2 $F_{dm}(1,2)$ du 20/01/03 au 25/01/03.

De même, un flux nocturne (F_{dn}) a été mesuré suite à une irrigation de la culture intercalaire (Tableau V.2). Conjugué à une augmentation du flux journalier ($F_{dm}(1,2)$) après une irrigation de la pomme de terre effectuée le 20/09/02, le flux nocturne est passé de 13 à 17 % du flux journalier total. Parallèlement, une augmentation du flux journalier de 26 % a été observée 6 jours après l'irrigation pour une même demande climatique montrant le bénéfice apporté par la présence de la culture intercalaire sur la consommation hydrique de l'olivier.

Tableau V.2. Valeurs du flux de sève journalier des deux arbres A1 et A2 F_{dm} (1,2), du flux de sève nocturne correspondant F_{dn} et son pourcentage avec celles de l'ETo après une irrigation de la pomme de terre effectuée le 20/09/02

Date	$F_{dm}(1,2)$ ($l\ dm^{-2}\ j^{-1}$)	F_{dn} ($l\ dm^{-2}\ j^{-1}$)	% F_{dn}	ETo (mm)
19/09/02	50.6	6.7	13	3.2
20/09/02	69.2	9.5	14	4.1
21/09/02	76.3	11.4	15	4.7
22/09/02	62.9	9.3	15	3.7
23/09/02	71.3	10.0	14	3.9
24/09/02	72.0	10.5	15	3.9
25/09/02	72.5	11.2	15	3.5
26/09/02	67.7	11.7	17	3.0

1-5-2- Effet du flux nocturne sur l'estimation de la transpiration de l'olivier

L'importance relative du flux de sève nocturne chez l'olivier pose la question quant à son incorporation ou non lors de l'estimation de la transpiration totale. Pour cela, il faudrait s'assurer qu'il ne s'agit pas d'une simple réhydratation qui restitue les réserves hydriques mais un flux évaporatoire qui s'échappe de la surface transpirante quelle que soit sa nature : stomate ou cuticule. Cependant, pour des mesures sur de longues périodes, l'effet du flux nocturne est faible par rapport à celui calculé sur une échelle de temps journalière (Cienciala et al., 2000).

Par ailleurs, l'occurrence du flux nocturne peut induire une sous-estimation de la densité du flux de sève avec la méthode de dissipation de chaleur. En effet, le mode de calcul du flux de sève par cette méthode repose sur la détermination de la différence de température maximale (ΔT_{max}) entre les deux sondes enregistrée quand le flux est nul. Comme ΔT_{max} est généralement observée la nuit où l'on suppose un flux nul, l'occurrence d'un flux nocturne sous-estime cette différence de température et par conséquent le flux de sève calculé. Pour pallier ce problème, il faudrait déterminer ΔT_{max} sur une période de 7 à 10 jours, pour chaque capteur individuellement (Granier, 1987b). Une autre méthode de détermination de ΔT_{max} consiste à la mesurer juste après des pluies quand les feuilles sont encore mouillées, la radiation est faible et l'humidité forte (Allen et Grime, 1995).

2-Variations du flux de sève en fonction de paramètres climatiques et hydriques

L'évolution de la densité du flux de sève est influencée par des variables climatiques telles que le rayonnement, le déficit de saturation de l'air, la température, la vitesse du vent. Ces facteurs interagissent avec d'autres variables comme l'état hydrique de la feuille, la température ou l'humidité du sol, l'environnement microclimatique de la frondaison. Le mouvement de sève à l'échelle de l'arbre est la résultante de l'impact de ces différents paramètres (Benyon, 1999).

L'influence des facteurs environnementaux sur la transpiration a été conceptualisée par McNaughton et Jarvis (1983) qui ont montré que la transpiration selon Penman-Monteith (λE_{PM}) pourrait être considérée comme la résultante de 2 composantes : une composante fonction du VPD et régulée par la conductance stomatique (λE_{imp}) et une composante fonction du rayonnement (λE_{eq}). Ces deux composantes sont reliées entre elles par le facteur oméga (Ω) qui est un paramètre adimensionnel variant de 0 à 1 en fonction du rapport des conductances aérodynamiques et stomatiques :

$$\lambda E_{PM} = \Omega \lambda E_{eq} + (1 - \Omega) \lambda E_{imp} \quad (V.1)$$

Pour les végétations hautes et rugueuses Ω est proche de 0, la transpiration est dite couplée à l'atmosphère. Pour les cultures basses et peu rugueuses Ω est élevé et la culture est dite découplée.

2-1- Rayonnement global et déficit de saturation de l'air

Pour la majorité des espèces végétales, le maximum du flux de sève est enregistré vers midi correspondant au maximum de la radiation solaire (O'Brien et al., 2004). Toutefois, l'occurrence du pic peut varier en fonction des conditions climatiques, comme par exemple la pluie. D'une façon générale, en début de journée, le flux de sève croît rapidement presque de façon linéaire jusqu'au moment où le flux maximum est atteint. En fin de journée, la décroissance du flux suit une allure linéaire pour s'annuler ou devenir très faible à l'extinction de la radiation lumineuse.

Pendant la période allant du 16 au 20/11/03, l'alternance de journées à faible et fort rayonnement affecte directement l'évolution de la densité du flux enregistrée par les 12 capteurs (F_{dm}). Quand le rayonnement global est assez fort la densité du flux de sève mesurée au niveau de l'olivier, en condition de bonne alimentation hydrique, suit celle de R_g (Figure V.7).

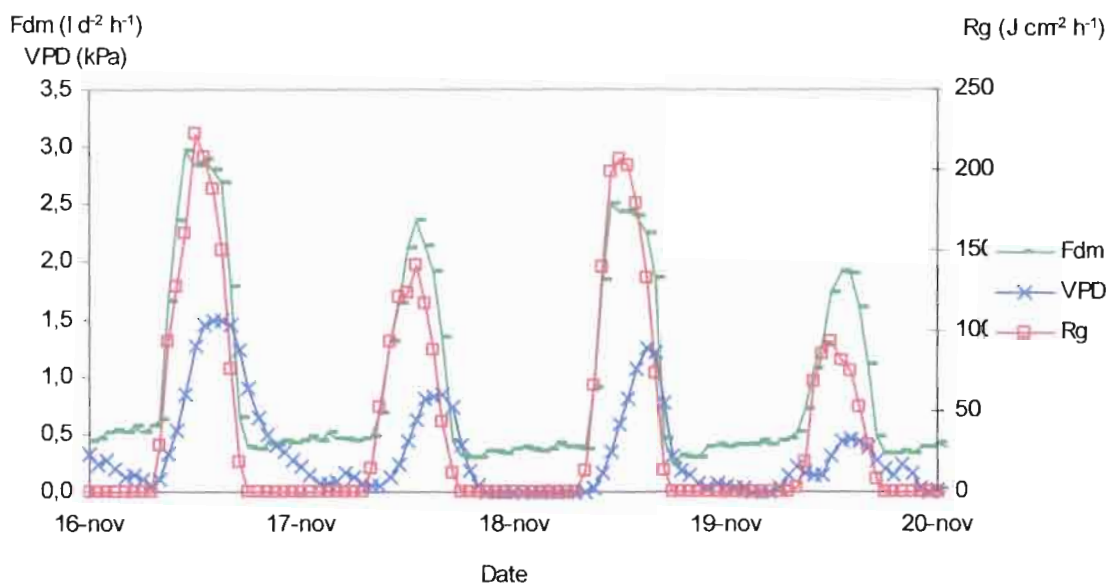


Figure V.7. Evolution de la densité de flux de sève moyenne des 12 capteurs F_{dm} (l dm⁻² h⁻¹), du rayonnement global R_g (J cm⁻² h⁻¹) et du déficit de saturation de l'air VPD (kPa) du 16/11/03 au 20/11/03.

Le maximum de la densité du flux a varié de 1.9 à 3.0 l dm⁻² h⁻¹ pour des rayonnements globaux (R_g) maximums variant de 94 à 223 J cm⁻² h⁻¹ et des déficit de saturation de l'air (VPD) allant de 1.48 à 0.44 kPa respectivement. La baisse générale du flux le 19/11/03 correspond à une journée nuageuse. Pour les différents jours observés, la baisse de la densité du flux de sève à partir de 14h 00 coïncide avec le maximum du VPD . Similairement, Villalobos et al. (2000) ont observé sur des oliviers irrigués à Cordoba en Espagne, que la chute de la conductance foliaire survient au moment où le VPD atteint son maximum.

Allen et Grime (1995) ont trouvé une forte corrélation entre la densité du flux de sève et le rayonnement net (R_n) sur l'arbuste de savane (*Guiera senegalensis*). Ces résultats comme les nôtres, semblent un peu en contradiction avec l'idée générale que la transpiration d'un arbre est plutôt reliée au VPD . De plus, Palliotti et al. (1994) ont observé que les trichomes présents à la surface des feuilles de l'olivier constituent des barrières à la diffusion du CO₂ et de l'eau

diminuant ainsi la conductance de la couche limite entourant les feuilles. Cela irait dans le sens d'une augmentation du facteur Ω et d'un découplage de l'atmosphère.

2-2- ETo et humidité du sol

L'évolution de la densité du flux de sève en fonction de la demande climatique (ETo) est liée, en partie, à la teneur en eau du sol. Ceci a été déjà démontré pour certaines espèces comme le *Pinus radiata* (Pin de Monterey) (Ruiter, 1987), l'*Eucalyptus nitens* et l'*E. delegatensis* (Honeysett et al., 1992). Sur l'olivier, nous avons étudié l'évolution de la densité du flux de sève horaire moyenne des 4 arbres (F_{dm} , $l\ dm^{-2}\ h^{-1}$) en relation avec l' ETo horaire ($mm\ h^{-1}$) avant et après irrigation.

Le flux de sève qui s'établit entre le système racinaire et les surfaces foliaires transpirantes dépend de l'état hydrique de la plante, de ses caractéristiques physiologiques (conductivité hydraulique) et de la disponibilité en eau du sol (Loustau et al., 1990). En effet, l'évolution du flux de sève pour une même demande climatique (exprimée par l' ETo) est fonction des conditions hydriques au sol (Cohen, 1991). Une différence entre des mesures du flux de sève pour deux journées caractérisées par une ETo similaire peut être attribuée à des conditions hydriques différentes (Figure V.8).

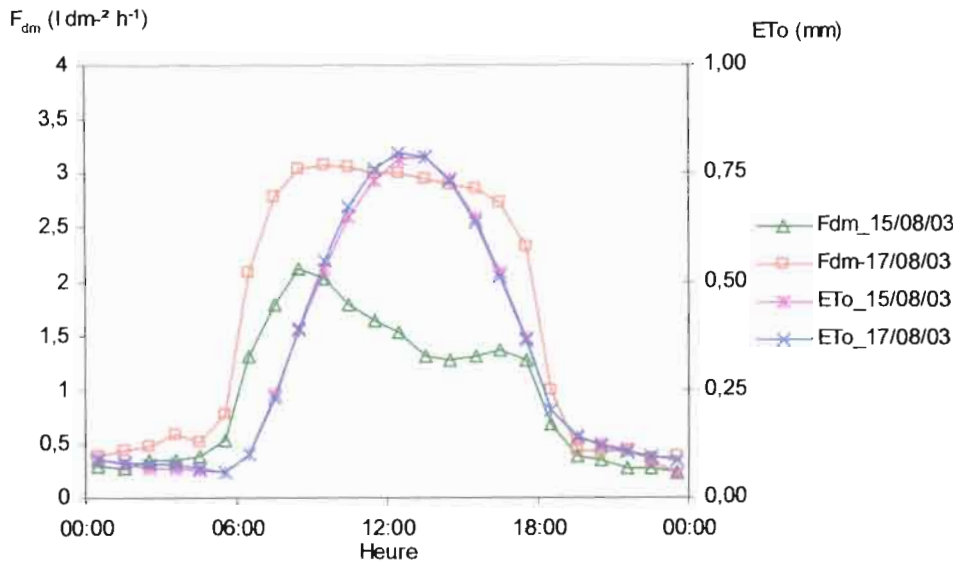


Figure V.8. Variation de la densité du flux de sève moyenne des 12 capteurs F_{dm} pour deux journées (le 15/08/03 et 17/08/03) ayant la même demande climatique ETo avant et après irrigation du 16/08/03.

En effet, la veille de l'irrigation de l'olivier (le 15/08/03) le stock hydrique moyen du sol était de 170 mm (calculé à la profondeur racinaire de l'olivier) correspondant à 10 % de la RU . Il a atteint, le lendemain de l'irrigation, les 205 mm (36 % de la RU). Par conséquent, le flux journalier cumulé mesuré le 15/08/03 était de 23.25 l j^{-1} par rapport à 40.1 l j^{-1} enregistré un jour après irrigation soit une augmentation d'environ 40 %. Cette augmentation s'est traduite aussi au niveau du maximum journalier puisqu'il est passé de 2.11 à 3.04 l h^{-1} . Similairement, Cohen (1991) a mesuré une augmentation de la transpiration de 30 % sur pamplemoussier (*Citrus grandis*) 13 jours après irrigation pour une même demande climatique.

La variation horaire du flux et celle de l' ETo dans l'exemple précédent montre l'importance du stock hydrique dans l'évolution de la densité du flux de sève en relation avec l' ETo . Pour vérifier la stabilité de cette relation, nous avons examiné l'évolution de la F_{dm} du 10 au 20/08/03 quelques jours avant et après l'irrigation du 16/08/03 (Ir) (Figure V.9). Nous avons constaté alors que tant que l'humidité du sol est faible (aux alentours de 10 % de la RU au niveau de l'olivier) la F_{dm} est minimale ($2 \text{ l dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$) et que l'accroissement de l'humidité du sol à une humidité de 36 % de la RU fait augmenter la F_{dm} à $3 \text{ l dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ pour une demande climatique (ETo) presque invariable.

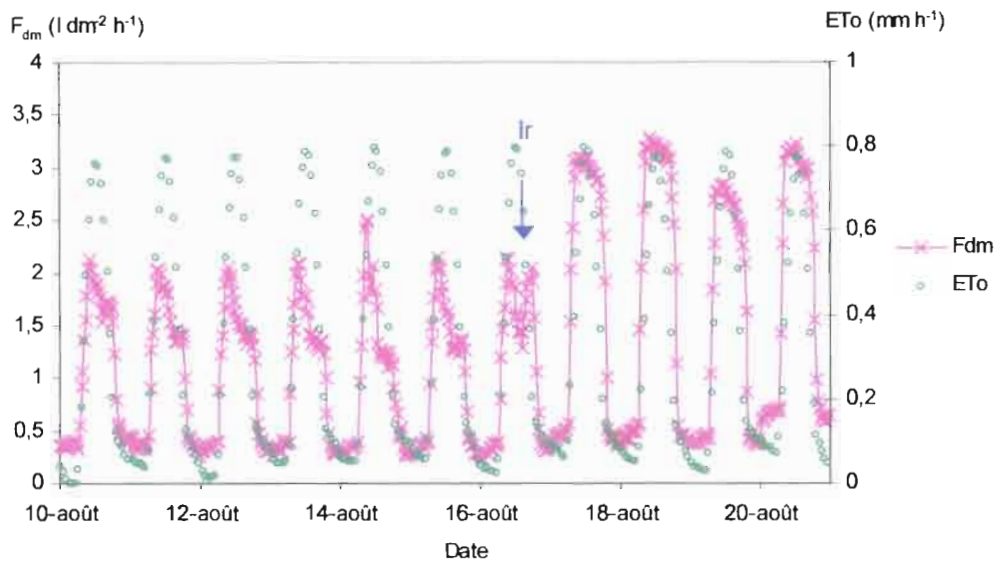


Figure V. 9. Evolution de la densité du flux de sève moyenne des 4 arbres F_{dm} ($l\ dm^{-2}\ h^{-1}$) et celle de l'ETo ($mm\ h^{-1}$) avant et après l'irrigation du 16/08/03.

Cette variation du flux a été aussi observé par Lu et al. (2002) sur bananier (*Musa 'Cavendish'*) pendant des cycles de dessèchement- hydratation notant la décroissance du flux de sève cumulé journalier en condition de stress hydrique. De même, des mesures du potentiel hydrique et de conductance stomatique au niveau d'oliviers âgés de 26 ans conduits en pluvial et en conditions irriguées ont montré que l'olivier peut restreindre sa consommation hydrique, dans le cas de faible disponibilité en eau, par une fermeture stomatique (Fernández et al., 1997).

3- Transpiration de l'olivier à l'échelle parcellaire

3-1- Changement d'échelle : arbre -parcelle

La hauteur de la lame d'eau transpirée par un arbre peut être exprimée de plusieurs façons. La première consiste à rapporter la densité du flux à la surface foliaire de l'arbre puis à l'extrapoler à l'échelle du verger (Cienciela et al., 1999). Pour cela, la connaissance de la surface foliaire est requise et peut être déterminée par différentes techniques plus ou moins laborieuses. Le flux de sève peut être aussi rapporté à la surface occupée par un arbre au

niveau d'un verger. Cela consiste alors à extrapoler la surface conductrice à l'échelle de l'hectare (Hatton et Wu, 1995 ; Do et Rocheteau, 2003).

Le calcul de la transpiration journalière des oliviers à l'échelle de la parcelle (τ , mm j⁻¹) consiste à déterminer la transpiration moyenne par arbre (τ_a , l j⁻¹) puis de l'extrapoler à l'échelle de la parcelle (Loustau et al., 1990 ; Hatton et Wu, 1995). τ_a est obtenue en multipliant la densité du flux de sève moyenne journalière de chaque arbre par la surface conductrice correspondante et en divisant par le nombre d'arbres (ici 4) :

$$\tau_a = \frac{\sum_{i=1}^4 F_{dmi} \times Sa_i}{4} \quad (\text{V.2})$$

F_{dmi} est la densité du flux de sève moyenne de l'arbre i (l dm⁻² j⁻¹) et Sa_i est la surface conductrice de l'arbre i en dm². La surface conductrice de chaque arbre a été déterminée en reliant le périmètre de l'arbre à la surface conductrice (IV.6-2). L'extrapolation de τ_a à l'échelle de l'olivieraie est effectuée sur la base de la surface occupée par chaque olivier au niveau de la parcelle (S_o , m²) selon la relation :

$$\tau = \frac{\tau_a}{S_o} \quad (\text{V.3})$$

S_o est égale à 121 m² correspondant à la surface d'occupation relative de chaque arbre au niveau de la parcelle déterminée en fonction de l'espacement entre les arbres (11 m × 11m).

3-2- Evolution saisonnière

La relation entre le flux de sève mesuré et les variables climatiques est fonction de l'état hydrique du sol. La plante peut réduire sa transpiration même en condition de forte demande climatique, signe d'adaptation à de faibles disponibilités en eau (Hogg et Hurdle, 1997 ; Margolis et Ryan, 1997). Dans ce cas, l'utilisation de l'eau n'est plus couplée avec la course de la demande évaporatoire. Le couplage étroit entre les variables climatiques et le flux de sève mesuré implique, en cas de bonne alimentation hydrique, que la variation du stock hydrique de l'arbre est faible et que son effet est limité.

3-2-1- Evolution saisonnière de la transpiration de l'olivier en relation avec l'*ET_o*

L'étude de l'évolution du flux de sève a montré une variabilité liée aux conditions climatiques et édaphiques (teneur en eau du sol). La figure (V.10) illustre la fluctuation de la transpiration de l'olivier enregistrée durant les 3 années d'étude en relation avec celle de l'*ET_o* journalier. La transpiration quotidienne moyenne de l'olivier (τ) a varié d'un minimum de 10 l j^{-1} à un maximum d'environ 70 l j^{-1} observés pour des *ET_o* de 8 et 0.8 mm j^{-1} respectivement. Fernández et al (2001), en utilisant la technique d'impulsion de chaleur, ont estimé la transpiration d'oliviers âgés de 29 ans à 55 l j^{-1} en conditions pluviales et à 70 l j^{-1} avec une bonne alimentation en eau, la demande climatique de l'essai n'étant pas spécifiée.

En période de faible demande climatique, la densité du flux de sève moyenne des oliviers a évolué d'une manière quasi parallèle avec celle de l'*ET_o*. En effet, dans ces conditions, la transpiration de l'olivier peut être optimale avec de faible teneur en eau du sol. Pendant les périodes de forte demande climatique, l'humidité du sol devient un facteur limitant. En effet, le décrochement de la densité du flux de sève par rapport à l'*ET_o* est observé chaque fois que la teneur en eau du sol est faible. En cas d'apport hydrique, τ rejoint l'évolution de l'*ET_o*. Un exemple de ce comportement sera détaillé dans le paragraphe (4-1). Une très faible demande climatique de l'ordre de 0.5 à 1 mm j^{-1} engendre une transpiration minimale de l'ordre de 10 l j^{-1} . En absence de culture intercalaire, en 2004, l'agriculteur a irrigué les oliviers à trois reprises (16/03/04, 28/05/04 et 06/08/04) ce qui a permis de maintenir, pendant cette période, une évolution du flux de sève qui suit celle de l'*ET_o*.

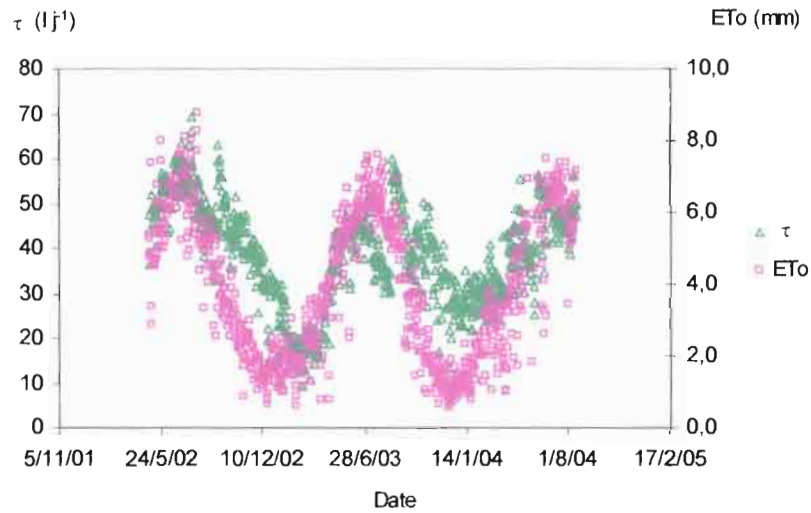


Figure V.10. Evolution saisonnière de la transpiration moyenne des 4 arbres τ ($l j^{-1}$) et celle de l' ETo du 30/04/02 au 16/08/04.

3-2-2- Variation du rapport de la transpiration et de l' ETo (τ/ETo)

La satisfaction de la demande évaporatoire est fonction de l'état hydrique du sol. L'évolution du rapport τ/ETo montre une cinétique qui est fonction de la saison et de la disponibilité en eau du sol. Le rapport τ/ETo entre la transpiration de l'olivier (τ , mm) et l' ETo (mm) est généralement maximal pendant la saison humide du fait de la teneur en eau du sol relativement satisfaisante conjuguée à une faible demande climatique. En effet, comme le montre la figure (V.11), ce rapport passe de 0.35 en période de faible demande climatique (en hiver essentiellement), à 0.04 quand l' ETo augmente (en été).

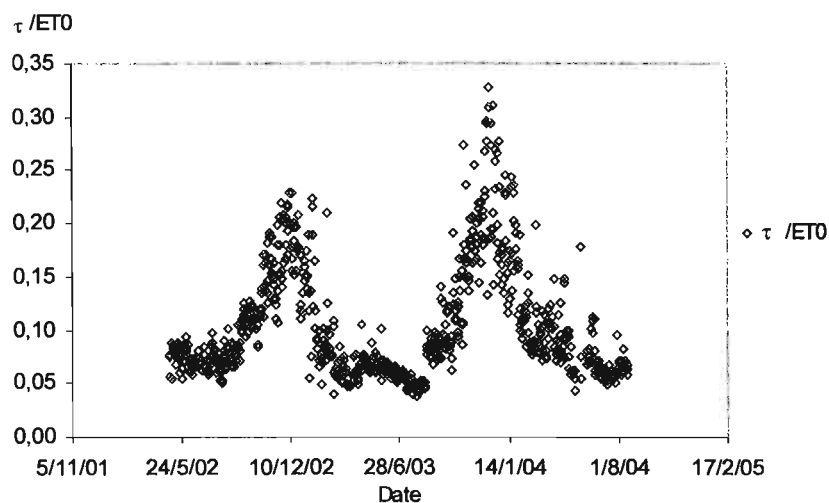


Figure V.11. Evolution du rapport $\tau/ET0$ du 30/04/02 au 16/08/04

D'une façon analogue, Cohen (1991) a étudié sur citrus le rapport du flux de sève à l'évapotranspiration potentielle, rapport qu'il a qualifié de paramètre sensible à la disponibilité en eau du sol. En effet, ce rapport n'est pas affecté par les conditions climatiques mais il est sensible aux variations de la teneur en eau du sol disponible pour la plante. Par conséquent, ce rapport peut être utilisé pour le pilotage de l'irrigation en choisissant la limite à laquelle il faut déclencher l'irrigation. Ceci est évidemment valable si la variabilité inter-arbre de la consommation hydrique a été prise en compte dans ce rapport.

4- Relation entre la transpiration de l'olivier et le stock hydrique

4-1- Evolution du rapport $\tau/ET0$ en fonction du stock hydrique

L'évolution du rapport $\tau/ET0$ du 04/05 au 31/08/03 est présentée dans la figure (V.12). Ce rapport a varié de 0.16 au début de la période, quand le stock hydrique calculé au niveau de la couche 0-35 cm est à la moitié de la réserve utile, jusqu'à un minimum de l'ordre de 0.10 quand l'humidité est descendue au-delà du point de flétrissement permanent, juste la veille de l'irrigation, pour remonter à 0.18 une semaine après irrigation.

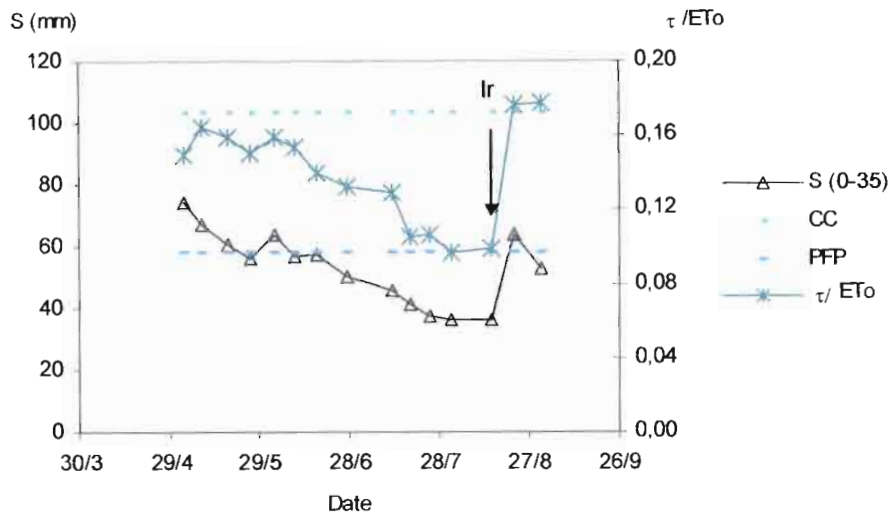


Figure V.12. Evolution du stock hydrique moyen sous olivier *S-Am*, du rapport entre la transpiration de l'olivier τ et l' ET_o (τ/ET_o) du 04/05/03 au 31/08/03. *CC* est la capacité au champ et *PFP* est le point de flétrissement permanent.

La décroissance générale du τ/ET_o à partir de mi-juin est reliée à la diminution progressive de l'humidité du sol qui a dépassé le point de flétrissement permanent à la moitié du mois de juin. La chute de τ/ET_o est probablement due à un ajustement stomatique effectué par l'olivier. L'hypothèse de la présence d'un signal originaire des racines qui contrôle l'ouverture stomatique en fonction de l'humidité du sol a été avancée par plusieurs auteurs. Bonghi et Palliotti (1994) ont observé ce phénomène sur de jeunes oliviers qui a été confirmé par Giorio et al (1999) sur des oliviers âgés de 7 ans. Ce rétrocontrôle a été aussi observé sur maïs par Zhang et Davis (1990). La reprise de la transpiration suite à l'irrigation de l'olivier est bien visible au niveau du rapport τ/ET_o qui est remonté à 0.18 et justifiée par l'augmentation du stock sous olivier. En effet, Fernández et al. (2003) ont montré qu'une irrigation par bassin, qui humidifie une zone racinaire relativement importante, fait augmenter rapidement la transpiration de l'olivier par rapport à une irrigation localisée qui n'humecte qu'une portion du volume racinaire total. Cette corrélation entre le rapport τ/ET_o et l'humidité du sol pourrait être utilisée pour détecter des périodes de stress hydrique car le suivi du stock hydrique est lourd dans un système dont l'humidité est hétérogène et où l'olivier peut s'alimenter au niveau des zones les plus humides

4-2- Paramétrisation de la transpiration de l'olivier

A travers l'étude de la variation du rapport τ/ET_0 en fonction de la variation du stock hydrique, nous avons pu établir la forte corrélation entre ces trois paramètres. Granier (1987b) a montré qu'en conditions de bonne alimentation en eau la transpiration d'un Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) déterminée par la mesure du flux de sève est linéairement corrélée à l' ET_0 . Cependant, l'occurrence d'un stress hydrique cause des déviations par rapport à cette linéarité.

Vu l'étroite corrélation trouvée entre le rapport τ/ET_0 et le stock hydrique du sol, nous avons essayé alors de trouver une relation entre ce rapport et l'humidité du sol. Comme le système a été subdivisé en 3 réservoirs correspondant à chaque composante du système (olivier, culture intercalaire et sol nu), une régression multi-linéaire a été recherchée entre l'humidité de chaque réservoir (θ_1 , θ_2 et θ_3) et le rapport τ/ET_0 . Pour cela, une humidité moyenne de chaque réservoir a été calculée à partir des sites de mesures (VI.2-1). La meilleure corrélation obtenue est donnée par l'équation suivante :

$$\tau = ET_0 \times [0.514.\theta_1 + 0.0156.\theta_2 + 0.00861] \quad (V.4)$$

τ est la transpiration de l'olivier en mm j^{-1} , θ_1 et θ_2 sont respectivement l'humidité du réservoir de la culture et de l'olivier. L'absence de l'humidité du réservoir 3 (sol nu) dans la relation retenue est due à ce que celle trouvée avec les 3 réservoirs est moins aboutie car le coefficient relatif à θ_3 apparaît négatif. Ceci est probablement dû au fait que ce type de relation statistique ne représente pas parfaitement la transpiration de l'olivier. D'autres formulations pourraient être envisagées.

La confrontation des valeurs mesurées de la transpiration de l'olivier à celles estimées par l'équation (V.4) est donnée dans la figure (V.13).

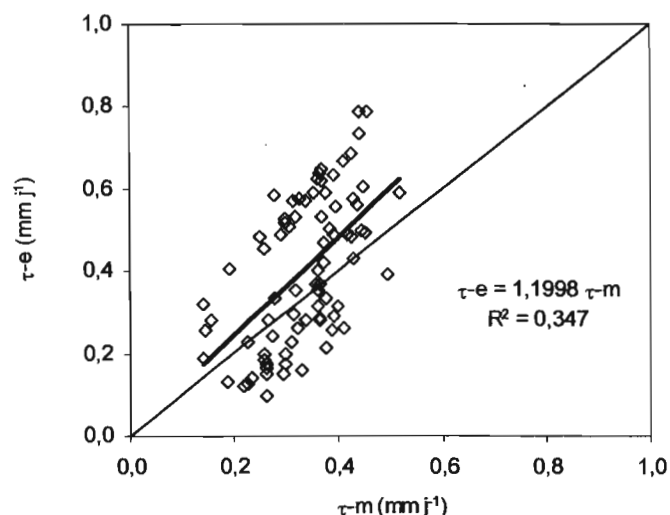


Figure V.13. Transpiration de l'olivier estimée $\tau-e$ par l'équation (V.3) en fonction de la transpiration mesurée $\tau-m$.

Par ailleurs, une meilleure estimation de la transpiration de l'olivier aurait été obtenue si certaines conditions avaient été prises en compte. En effet, à part la demande climatique et la teneur en eau du sol, la transpiration d'un végétal dépend de son stade phénologique et donc de son activité physiologique pendant une période donnée. Même avec une bonne alimentation en eau et une demande climatique importante si l'activité du végétal est ralentie (période de dormance), sa transpiration ne sera pas la même que lors d'une forte activité biologique pour des conditions environnementales équivalentes. De plus, la variation de la surface foliaire pourrait aussi perturber cette relation. En effet, la réduction de la surface foliaire suite à la taille ou son augmentation pendant la phase de croissance végétative perturbe la relation entre la transpiration, la demande climatique et la teneur en eau du sol. L'équation (V.3) sera utilisée comme entrée dans la mise en œuvre du modèle générale du fonctionnement hydrique décrit dans le chapitre III.

Conclusion

La méthode de dissipation de chaleur en chauffage alternatif paraît bien adaptée à l'olivier. En effet, la variabilité du flux de sève entre les capteurs est bien corrélée avec la moyenne pour différents niveaux transpiratoires indiquant la possibilité de l'utilisation d'une telle corrélation pour la reconstitution de données manquantes. Cependant, cette variabilité n'est pas attribuée à la direction d'insertion du capteur *per se*, mais à l'hétérogénéité de la surface conductrice. L'effet de l'orientation, s'il existe, semble être masqué par la variabilité de la conductivité du flux de sève au niveau de la section du tronc.

L'évolution saisonnière de la transpiration de l'olivier avec la demande climatique est en accord avec les corrélations trouvées entre la densité de flux de sève horaire et l' ET_0 pour différents états hydriques. La comparaison de l'évolution relative du rapport τ / ET_0 au cours de la période d'étude montre qu'il est élevé quand la demande climatique est faible, en hiver, période où généralement des épisodes pluvieux sont enregistrés. Cependant, en été et en dehors des saisons de cultures, ce rapport est très faible indiquant un stress hydrique subi par l'olivier.

La présence de la culture intercalaire irriguée permet à l'olivier de maintenir un flux transpiratoire assez important. Ceci montre l'intérêt pour l'olivier du système de cultures associées. Celui-ci peut profiter des eaux d'irrigation qui passent au-delà de la zone racinaire de la culture. Cependant, les quantités d'eau prélevées par l'olivier au niveau de la culture intercalaire restent indéterminées puisque la méthode du flux de sève ne permet qu'une mesure globale de la transpiration de l'olivier. D'où, l'intérêt d'une modélisation des transferts hydriques au niveau de chaque compartiment qui permet d'approcher la partition de la transpiration de l'olivier.

CHAPITRE VI

TRANSFERTS HYDRIQUES DANS LE SYSTEME OLIVIER-CULTURE ANNUELLE : RESULTATS ET VALIDATION DU MODELE

Introduction

Pour déterminer l'évolution des différents flux hydriques du sol dans le cas du système de cultures intercalaires olivier – culture annuelle, des mesures de l'humidité et de la tension de l'eau du sol ont été réalisées, sur 12 sites de mesures répartis au niveau des cultures et du sol nu. Le calcul du stock hydrique a été effectué à partir de la teneur en eau du sol sur la profondeur racinaire de chaque culture. L'évolution de celui-ci ainsi que de la charge hydraulique est analysée en fonction des différents apports hydriques et des cycles de cultures.

Nous présentons aussi dans ce chapitre l'évolution de la réserve disponible (*RD*) des différents réservoirs estimée à partir du modèle établi pour ce système de culture (Chapitre III). Les mesures effectuées pendant les campagnes de cultures de pomme de terre, du petit pois et au niveau de l'olivier en absence de culture ont servi de validation de ce modèle.

1- Analyse des conditions hydriques des différentes campagnes

1-1- Campagne de pomme de terre 2002

1-1-1- Conditions climatiques

Cette période a été caractérisée par un *ET_o* variant fortement : de 0.5 à 8 mm j⁻¹ et de faibles quantités pluviométriques : 110 mm. L'irrigation pendant cette première campagne de culture de pomme de terre de saison a été de type gravitaire effectuée à l'aide des rigoles. Les doses d'irrigation ont évolué entre 30 et 110 mm. Au début de la campagne, quand la demande climatique était faible, les irrigations ont été assez espacées: un mois environ séparait une irrigation d'une autre. A la fin de la campagne et avec le développement de la culture, les

quantités apportées ont augmenté et l'espacement d'une irrigation à l'autre a été réduit. Les faibles quantités de pluie enregistrées pendant cette campagne justifient la fréquence et l'importance des apports par irrigation (Figure VI.1). L'olivier a bénéficié d'une seule irrigation pendant cette période : une dose de 40 mm environ a été apportée le 02/07/2002 sous forme d'irrigation par bassins confectionnés autour des oliviers.

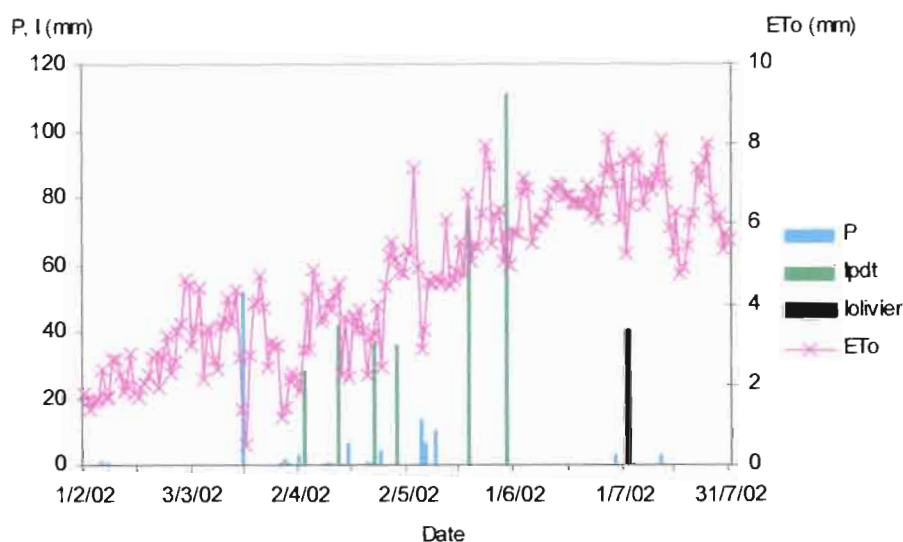


Figure VI.1. Evolution de l'ETo et des différents apports hydriques: pluie P, irrigation de la pomme de terre Ipdt et de l'olivier lolivier du 01/02 au 31/07/2002.

1-1-2 Evolution du stock hydrique

a) Au niveau de la culture de pomme de terre de saison, février- juin 2002

Cette première culture de la pomme de terre de saison a démarré le 19/02/02 et a duré 131 jours. Cependant, les mesures des humidités du sol n'ont débuté que le 31/03/02. Le stock hydrique moyen (S-Cm) est calculé à partir de la moyenne des trois sites C1, C2 et C3 se trouvant au milieu des lignes de la pomme de terre sur 0-65 cm correspondant à la profondeur racinaire maximale de la pomme de terre (Figure IV.4). Au début de la période de mesure, le stock hydrique a été à la capacité au champ (170 mm) suite à une forte précipitation enregistrée le 17/03/03 (52 mm) (Figure VI.2). La première irrigation effectuée le 03/04/02 a permis de maintenir cette humidité importante. La fréquence des irrigations et une demande climatique relativement faible au début de la campagne ont favorisé le maintien d'une humidité du sol à un niveau élevé. Ceci indique que la consommation en eau de la culture s'effectue essentiellement aux dépens des apports hydriques. En effet, ce n'est qu'à partir du

31/05/02, en absence de précipitation et d'irrigation, que le stock d'eau du sol a commencé à diminuer pour atteindre l'humidité du point de flétrissement permanent (90 mm) en fin de campagne.

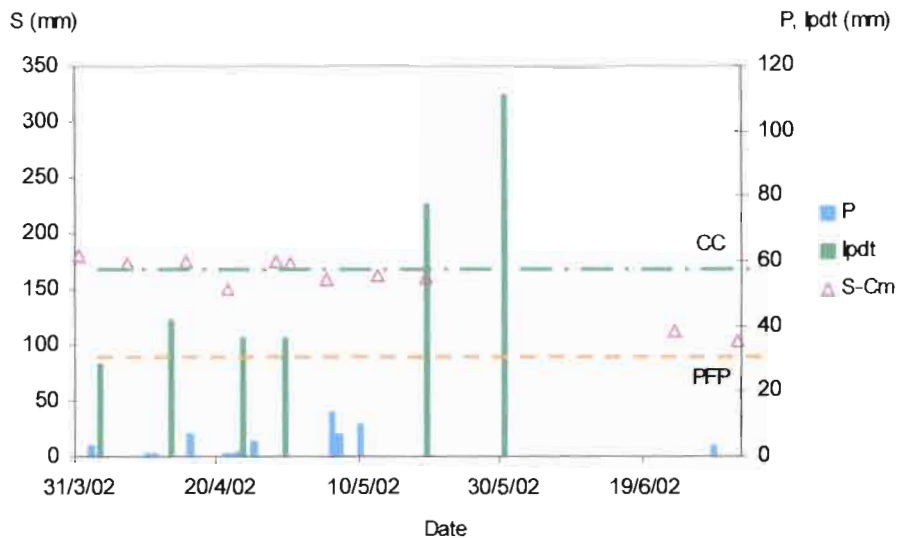


Figure VI.2. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de la culture intercalaire *S-Cm* (mm) en relation avec les précipitations *P* (mm), l'irrigation *Ipdt* (mm), la capacité au champ *CC* et le point de flétrissement permanent *PFP* du 31/03/02 au 02/07/02.

b) Au niveau de l'olivier

La variation moyenne du stock hydrique de l'olivier (*S-Am*) mesurée à 1.25 m de profondeur (correspondant à la profondeur racinaire maximale de l'olivier dans les conditions d'étude, IV.5.1) au niveau des sites A1 et A2 du 31/03 au 02/07/2002 (Figure VI.3) a été faible jusqu'à la fin du mois de mai. A partir de cette date, le stock a diminué progressivement pour atteindre, à la fin de la période de mesure, 190 mm correspondant au quart de la réserve utile (*RU*). Cette faible variation du stock, au début de campagne, peut être attribuée à une consommation hydrique préférentielle de l'olivier au niveau des deux autres réservoirs. Or, l'humidité au niveau du réservoir du sol nu a été faible alors que celui de la culture s'est maintenue pendant une longue période proche de la capacité au champ (*CC*) (grâce aux irrigations) ce qui suggère que l'olivier ait puisé au niveau de ce dernier du fait d'une humidité plus importante. En effet, la transpiration de l'olivier mesurée par la méthode du flux de sève pendant cette période montre une forte corrélation avec l'*ETo* indiquant qu'il n'y a pas eu de restriction de la transpiration ce qui appuie l'hypothèse d'une consommation hydrique sélective de l'olivier au niveau du réservoir de la culture.

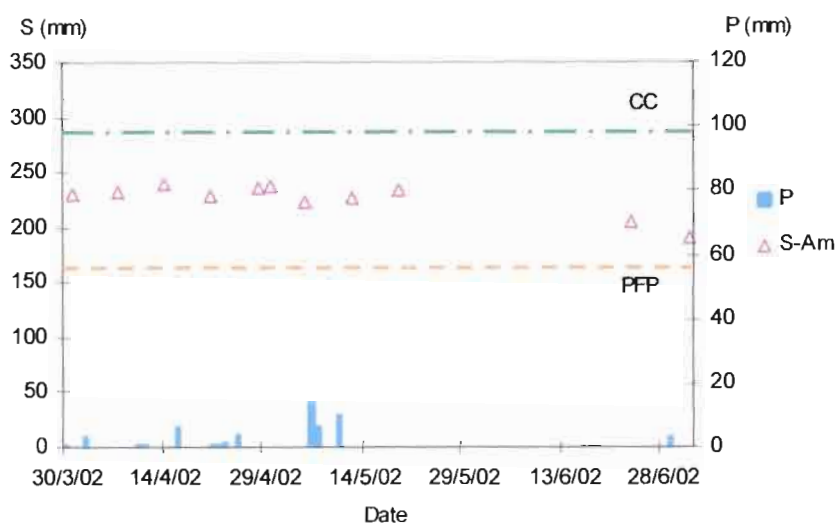


Figure VI.3. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de l'olivier *S-Am* (mm) en relation avec les précipitations *P* (mm), la capacité au champ *CC* et le point de flétrissement permanent *PFP* du 31/03/02 au 02/07/02.

c) Au niveau du sol nu

La figure (VI-4) montre la variation moyenne du stock hydrique (*S-Em*) mesurée au niveau du sol nu dans les sites E1 et E2 sur une profondeur de 125 cm. Un faible stock hydrique (aux alentours de 20 % de la RU) observé au niveau du sol nu pendant la quasi-totalité de la période de mesure est expliqué par les faibles quantités pluviométriques enregistrées pendant cette période (du 31/03 au 02/07/02). A cela s'ajoute, des pertes en eau par évaporation plus importantes qu'au niveau de l'olivier. En effet, l'énergie reçue au niveau de ce réservoir est plus importante que celle qui atteint celui de l'olivier à cause de l'effet de l'ombrage. Jackson et Wallace (1999) ont montré, pour une association agroforestière de *Grevellia robusta* –maïs, que l'évaporation du sol a été plus importante au niveau du sol nu que sous la frondaison des arbres. Comme le stock hydrique au niveau de ce réservoir est plus faible que celui de la culture, cela confirme l'hypothèse d'une alimentation en eau de l'olivier, pendant cette période en plus de son réservoir, dans celui de la culture vu sa forte humidité.

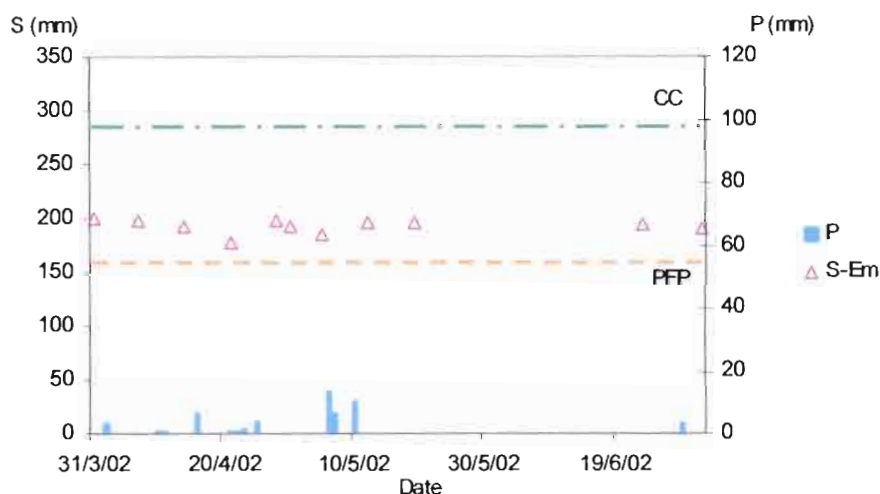


Figure VI.4. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau du sol nu $S-Em$ (mm) en relation avec les précipitations P (mm), la capacité au champ CC et le point de flétrissement permanent PFP du 31/03/02 au 02/07/02.

1-2- Campagne du petit pois 2003

1-2-1- Conditions climatiques

La demande climatique (ET_o) du 01/01 au 30/06/2003 a varié entre un minimum de 0.8 et un maximum de 7.6 mm j^{-1} (Figure VI.5). Les précipitations enregistrées (256 mm) ont été assez espacées pendant cette période. Le petit pois a été planté le 19/03/03, sa culture a duré 102 jours. Cette culture a été choisie comme relais après deux cultures de pomme de terre successives afin de permettre une rotation culturale, l'utilisation d'une profondeur du sol différente et pour rompre un éventuel cycle de maladie qui pourrait survenir à la suite de la succession de la même espèce sur la parcelle. Les irrigations ont été assez régulières et le dernier apport a été effectué le 14/05/03, un mois et demi avant la récolte.

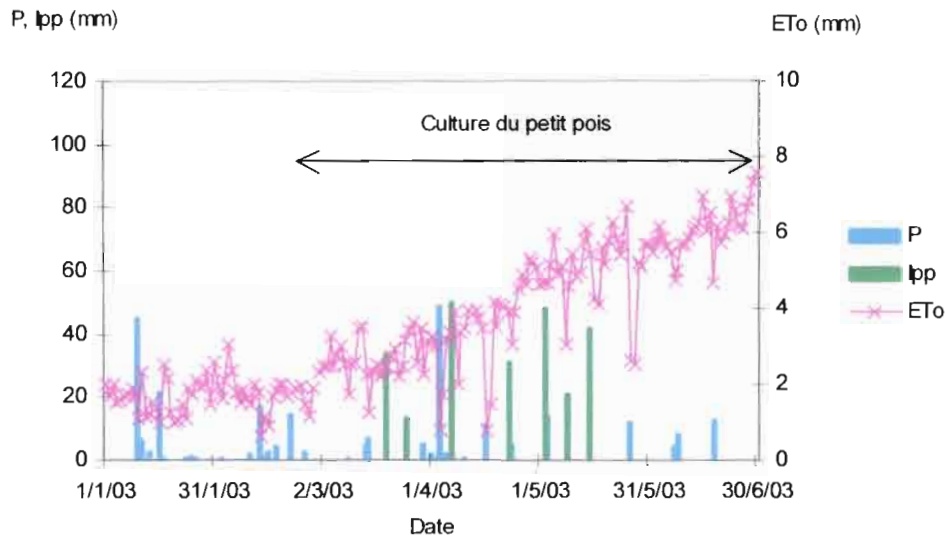


Figure VI.5. Evolution de l'ETo et des différents apports hydriques: pluie P et irrigation de la culture du petit pois I_{pp} du 01/01 au 30/06/2003.

1-2-2 Evolution du stock hydrique

a) Au niveau de la culture du petit pois, mars-juin 2003

En début de campagne, le stock hydrique calculé sur 100 cm (correspondant à la profondeur racinaire maximale du petit pois) a été de 232 mm, proche de la capacité au champ (250 mm) grâce à l'irrigation effectuée au moment de la plantation (32 mm) (Figure VI.6). La fréquence des irrigations conjuguée à l'occurrence de quelques événements pluvieux assez importants dans certains cas (48 mm le 03/04/02) ont contribué à maintenir un stock hydrique proche de la capacité au champ sur une longue période. Les prélèvements du petit pois se sont alors effectués aux dépens des irrigations et des pluies sans affecter le stock hydrique du sol. Néanmoins, après la dernière irrigation effectuée le 14/05/03, en absence de précipitations significatives et avec l'augmentation de l'ETo, il y a eu une phase de dessèchement qui s'est poursuivie jusqu'à la récolte.

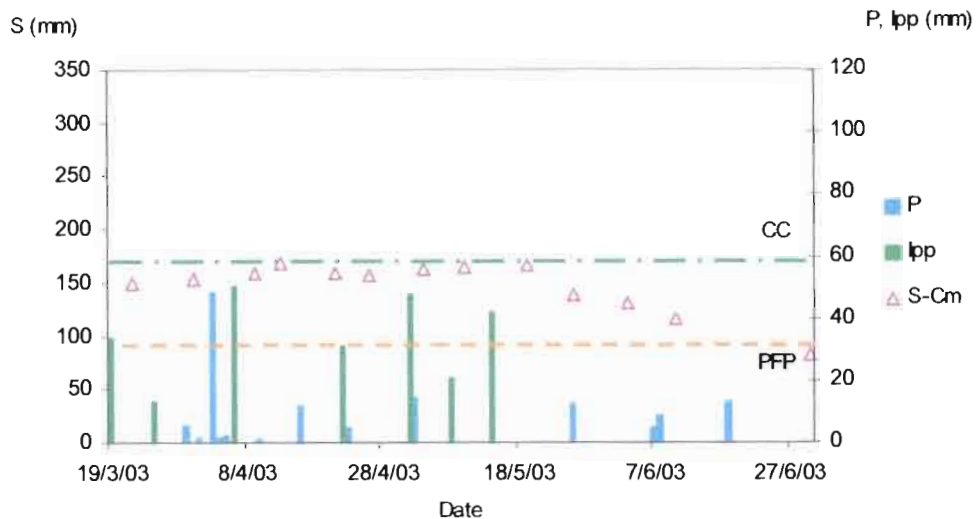


Figure VI.6. Evolution du stock hydrique moyen au niveau du petit pois *S-Cm* (mm) en relation avec la capacité au champ *CC* et du point de flétrissement permanent *PFP* et des apports hydriques sous forme de pluie *P* et d'irrigation de la culture *Ipp* du 19/03/03 au 30/06/03.

b) Au niveau de l'olivier, janvier-juin 2003

L'évolution du stock hydrique de l'olivier pendant ce premier semestre de 2003 a été essentiellement gouvernée par des événements pluviométriques importants (Figure VI.7). Les pluies du 10/01/03 et du 16/01/03 (respectivement 45 et 21 mm) et une faible demande climatique (ET_o variant entre 1 et 2 mm j^{-1}) ont contribué à maintenir le stock hydrique aux alentours de 90 % de la réserve utile. Après une diminution relative du stock pendant le mois de mars, une forte pluie de 48 mm enregistrée le 03/04/03 a ramené la réserve du sol au même niveau que celui du début de la campagne. De nouveau, à partir du mois de mai et parallèlement à l'augmentation de l' ET_o , les besoins hydriques de l'olivier ont cru ce qui a induit la diminution du stock hydrique sous l'olivier.

La consommation hydrique de l'olivier pendant cette campagne semble être essentiellement au dépens de ses réserves, contrairement à ce qui a pu être observé précédemment, ce qui peut être expliquée par deux hypothèses. Le niveau assez élevée du stock hydrique sous olivier (90 % de la *RU*) suggère que celui-ci n'aille pas « chercher » l'eau plus loin. A cela s'ajoute, la nature de la culture intercalaire qui est plantée pendant cette campagne. En effet, la profondeur du système racinaire du petit pois (1 m par rapport à 0.6 m pour la pomme de terre) peut aussi être à l'origine d'une certaine compétition pour l'eau qui fait que l'olivier va plutôt puiser au niveau de son réservoir ou celui du sol nu.

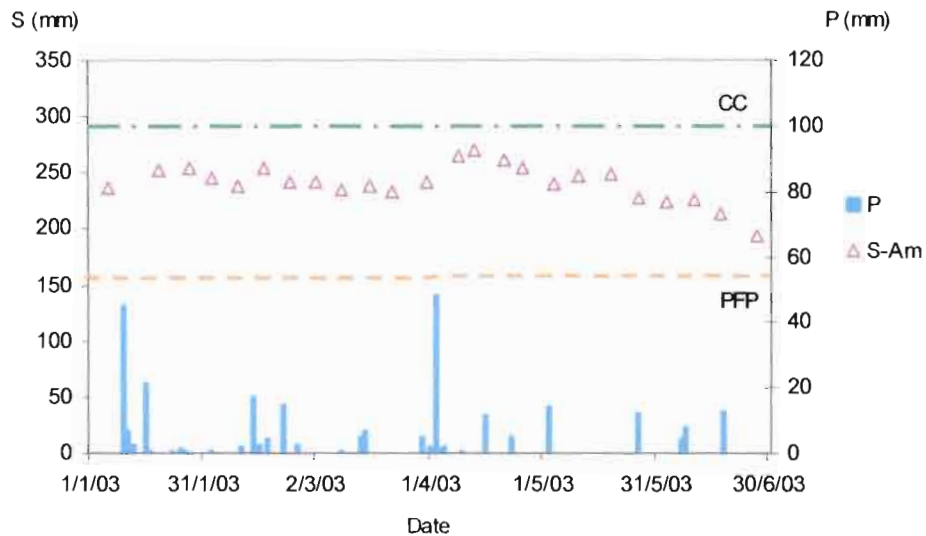


Figure VI.7. Evolution du stock hydrique moyen au niveau de l'olivier *S-Am* (mm) en relation avec les pluies *P* du 01/01 au 30/06/03, *CC* est la capacité au champ et *PFP* est le point de flétrissement permanent .

c) Au niveau du sol nu, janvier-juin 2003

Les différents évènements pluvieux enregistrés pendant cette période contribuant à une précipitation totale de l'ordre de 265 mm, ont permis de maintenir une humidité au niveau du sol nu variant entre 20 et 80 % de la *RU* (Figure VI. 8). Nous remarquons pendant cette période que l'allure de l'évolution du stock est similaire à celle observée au niveau de l'olivier. Nous pouvons en déduire que ceci est dû à l'utilisation par l'olivier de l'eau au niveau de ce réservoir. En effet, un épuisement a été enregistré au début du mois de mars simultanément à celui observé au niveau de l'olivier. De même, une deuxième phase de dessèchement analogue à celle observée au niveau de l'olivier a été observé au mois de mai. Sachant qu'il pourrait y avoir une compétition racinaire entre l'olivier et le petit pois, il est possible que l'olivier puise, en plus de son réservoir, dans celui du sol nu, préférentiellement à celui de la culture pendant cette campagne à cause de la concurrence racinaire de la culture du petit pois.

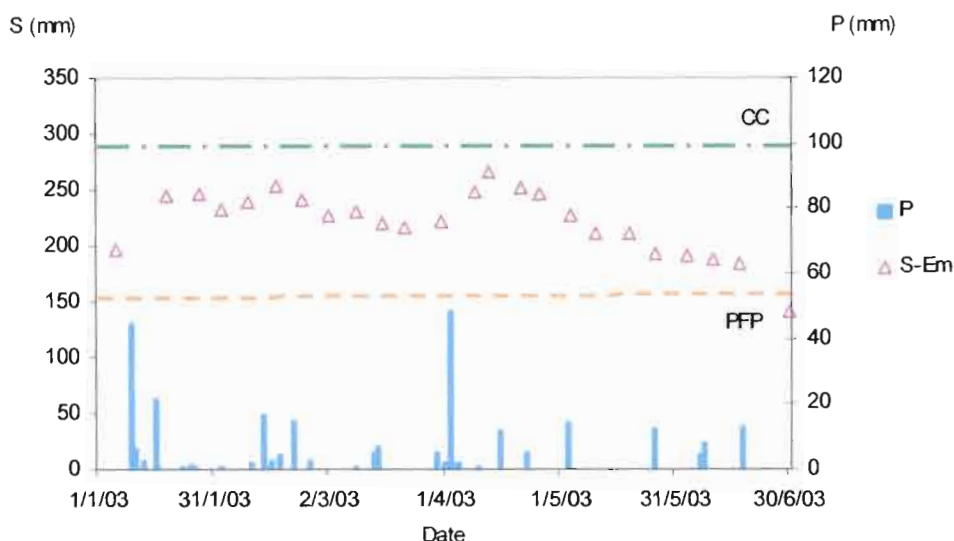


Figure VI.8. Evolution du stock hydrique moyen au niveau du sol nu *S-Em* (mm) en relation avec la pluie *P* du 01/01 au 30/06/03, *CC* est la capacité au champ et *PFP* est le point de flétrissement permanent .

1-3- Campagne de pomme de terre 2003-2004

1-3-1- Conditions climatiques

Pendant cette période, l'*ET_o* a été élevée au début de la campagne (de l'ordre de 7 mm j^{-1}) pour décroître et atteindre des valeurs de 1 mm j^{-1} à la fin de l'année (Figure VI.9). Les pluies sont presque inexistantes pendant la saison estivale et reprennent d'une façon significative au mois de septembre.

La campagne de mesure au niveau de la culture a concerné la pomme de terre d'arrière saison qui s'est déroulé du 23/09/03 au 15/01/04. A part deux pré- irrigations effectuées à la mi-septembre, la culture de pomme de terre n'a bénéficié que de seulement trois irrigations dont deux dépassants les 50 mm. Les pluies cumulées pendant cette campagne sont de l'ordre de 190 mm. Les apports hydriques totaux (320 mm) ont dépassé ceux des campagnes précédentes grâce à la forte pluviométrie du mois de décembre. Par ailleurs, les quantités totales apportées ne traduisent pas le stress hydrique subi par la culture en début de campagne suite à la forte demande climatique conjuguée à une forte demande climatique.

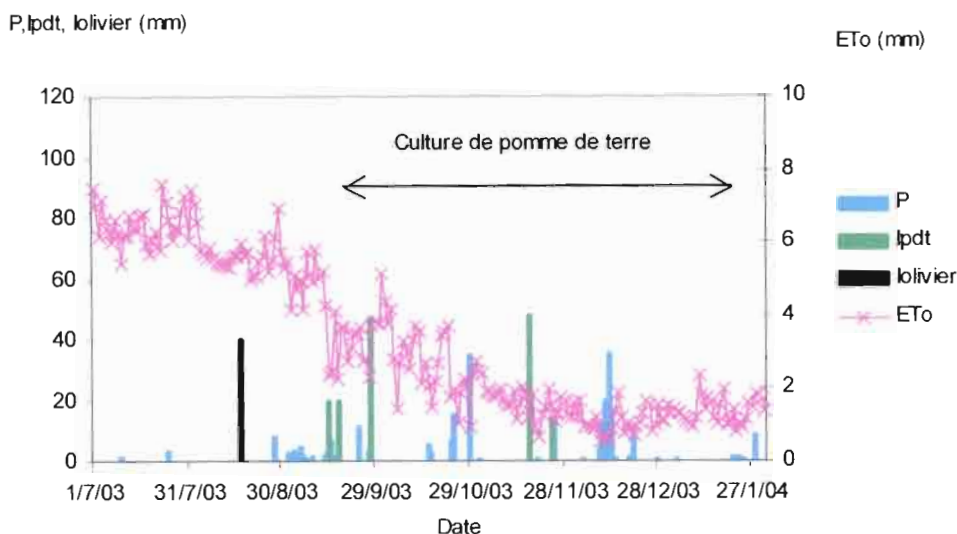


Figure VI.9. Evolution de l'ETo et des différents apports hydriques: pluie *P* et irrigation de la pomme de terre *Ipdt* et de l'olivier *lolivier* du 01/07/03 au 31/01/2004.

1-3-2- Evolution du stock hydrique

a) Au niveau de la culture de la pomme de terre, septembre 2003-janvier 2004

La teneur en eau du sol en début de cette campagne était de 90 mm correspondant au point de flétrissement permanent (*PFP*) ce qui est due à l'absence de précipitation pendant la saison estivale (Figure VI.10). L'irrigation du 27/09/03 a ramené le stock hydrique à la moitié de la réserve utile. Mais en absence d'apport supplémentaire, le stock s'est de nouveau épuisé au bout d'une semaine. Etant encore au stade initial de développement, la pomme de terre n'aurait pas puisé à elle seule le stock hydrique ce qui suggère l'occurrence de flux hydriques latéraux engendrés par les faibles humidités au niveau de l'olivier et du sol nu ou une consommation directe de l'eau par l'olivier au niveau de la culture ou encore la conjugaison des deux phénomènes. Les importantes précipitations survenues pendant la deuxième décennie d'octobre et la dose d'irrigation (55 mm) apportée le 17/11/03, en plus de la diminution de la demande climatique, ont permis de reconstituer les réserves hydriques du sol. La courte période de dessèchement qui a débuté vers la fin du mois de novembre a été aussitôt suivie par une période de réhydratation du sol suite aux fortes pluies enregistrées au mois de décembre (97 mm) qui l'a ramené à la capacité au champ.

Depuis le 18/12/03, la consommation hydrique de la culture de pomme de terre, importante pendant cette période pour le grossissement des tubercules, a engendré la diminution du stock d'eau qui a atteint la moitié de la réserve utile à la fin du cycle.

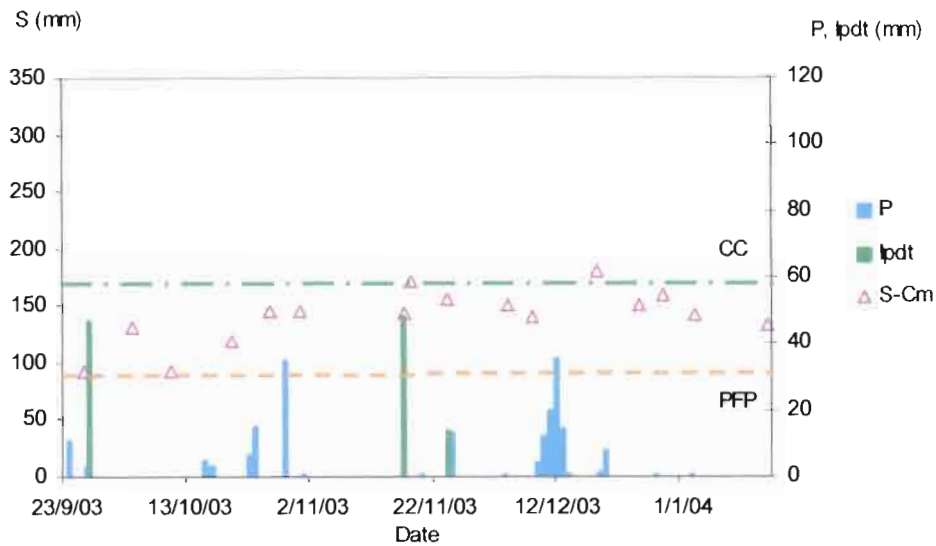


Figure VI.10. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de la culture intercalaire *S-Cm* (mm) en relation avec les apports hydriques sous forme de pluie *P* et d'irrigation *Ipdt* du 23/09/03 au 15/01/04, *CC* est la capacité au champ et *PFP* est le point de flétrissement permanent.

b) Au niveau de l'olivier, juillet-décembre 2003

L'hypothèse de base dans le cas de système de cultures intercalaires avec des cultures annuelles irriguées est le bénéfice que peut engendrer l'irrigation de la culture pour l'olivier. En effet, occasionnellement, en cas de fort déficit pluviométrique et en absence de la culture annuelle, les oliviers sont irrigués au niveau des bassins réalisés autour de chaque arbre, par des rigoles (séguia) confectionnées pour acheminer l'eau. Pendant cette période, une seule irrigation a été appliquée à l'olivier le 16/08/03 (Figure VI.11).

Débutant ce semestre avec un stock hydrique faible, celui-ci a continué à baisser suite à la forte demande évaporative en été, conjuguée à un déficit hydrique, jusqu'à atteindre le point de flétrissement permanent au début du mois d'août. L'irrigation appliquée à l'olivier le 16/08/03 a apporté environ 40 mm qui se sont aussitôt épuisés par consommation directe de l'olivier et évaporation du sol. De plus, vu que le sol aux alentours de l'olivier est sec (au niveau de l'inter-rang et de l'intra-rang), il est très probable que des pertes par des flux latéraux ont contribué à l'épuisement rapide du stock sous olivier. La reprise des précipitations en automne a fait augmenter de nouveau le stock hydrique pour atteindre la capacité au champ (290 mm) suite aux fortes pluies de mi-décembre.

Nous pouvons observer à partir de cette campagne automnale de pomme de terre, que celle-ci a été profitable à l'olivier qui a pu bénéficier des irrigations appliquées au début de la campagne vu le retard des pluies automnales conjugué à un stock hydrique au *PPF* dans les différents réservoirs enregistré à la fin de la saison estivale. De plus, cette période correspond au grossissement du fruit et à l'initialisation florale, phases très sensibles au déficit hydrique.

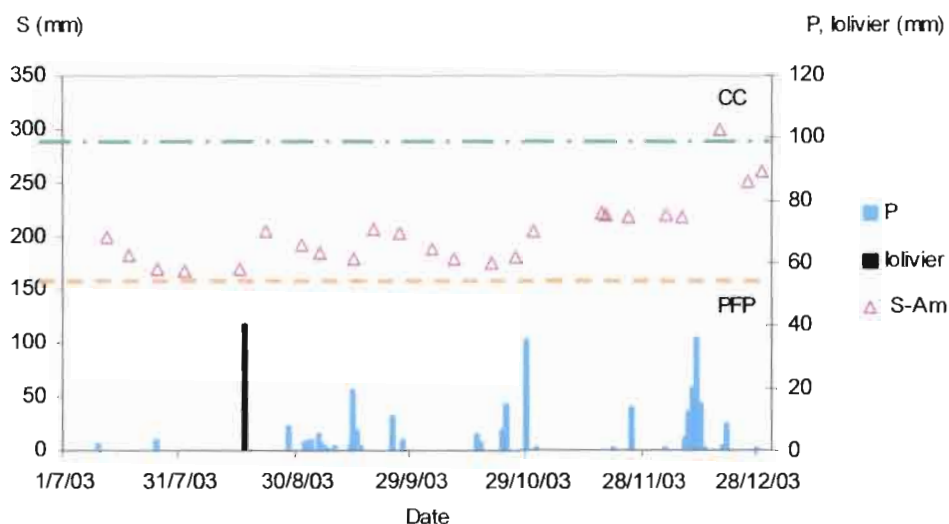


Figure VI.11. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau de l'olivier *S-Am* (mm) en relation avec les apports hydriques sous forme de pluie *P* et d'irrigation *Iolivier* du 01/07 au 31/12/03, *CC* est la capacité au champ et *PPF* est le point de flétrissement permanent.

c) Au niveau du sol nu, juillet-décembre 2003

Pendant la période allant du 01/07 au 31/12/03, le stock hydrique au niveau du sol nu, mesuré à 125 cm de profondeur, a été la plupart du temps proche du *PPF* (Figure VI.12). Ce faible stock du réservoir observé au début de l'été jusqu'à la fin de septembre est dû à une faible réserve hydrique enregistrée à la fin de la campagne du petit pois conjuguée à l'absence des pluies pendant la saison estivale. Ce n'est qu'à l'arrivée des pluies automnales d'octobre et hivernales de décembre que le stock a augmenté pour atteindre, à la fin de cette période, la capacité au champ.

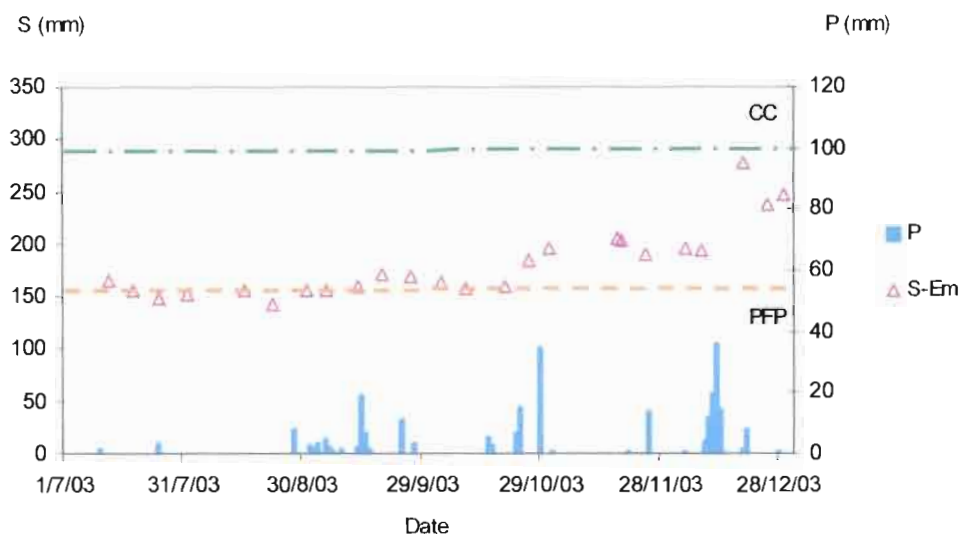


Figure VI.12. Evolution du stock hydrique moyen mesuré au niveau du sol nu $S-Em$ (mm) en relation avec les apports hydriques sous forme de pluie P du 01/07 au 31/12/03, CC est la capacité au champ et PFP est le point de flétrissement permanent.

1-4- Quelques aspects du fonctionnement hydrique

1-4-1- Evolution de la charge hydraulique du sol

Les mesures de la charge hydraulique du sol à différents sites permettent d'identifier la dynamique des flux horizontaux et verticaux à partir des mesures dans les différents sites ou à des profondeurs différentes d'un même site. Pour illustrer l'évolution de la charge hydraulique au niveau de la culture sous l'effet des irrigations, nous allons considérer la période correspondant à la culture de pomme de terre printanière de 2002 (du 10/05/02 au 08/06/02). Sont prises en considération les mesures des tensiomètres placés à 30 et 60 cm (60 étant la profondeur racinaire de la pomme de terre) au niveau du site C1 se trouvant au milieu des rangs de la culture et du site B1 se trouvant au niveau de la dernière ligne de la culture, à la limite avec le réservoir de l'olivier (Figure IV.13).

a) Au niveau du site C1

Au début de cette période de mesure, la charge hydraulique au niveau du site C1 à 30 cm de profondeur a été plus élevée que celle à 60 cm et a continué à augmenter parallèlement à celle à 60 cm indiquant un processus d'évaporation (Figure VI.13). A la veille de l'irrigation du 19/05/02, elle a atteint la valeur de 534 cm. Suite à l'irrigation, la charge hydraulique aussi bien à 30 qu'à 60 cm a chuté pour atteindre celle de la capacité au champ. Dès que une différence de potentiel hydrique est apparue entre les deux tensiomètres, un processus de

drainage est observé qui s'est inversé en évaporation 2 jours avant l'irrigation du 30/05/02 indiquant des prélèvements de la culture au dépend du réservoir. De même que précédemment, la deuxième irrigation appliquée a engendré la chute des charges hydraulique au niveau des deux profondeurs considérées de 250 et 223 cm respectivement aux profondeurs 30 et 60 cm pour atteindre celle à la CC le lendemain des irrigations. Cette chute rapide, contrairement à la première irrigation, est due aux faibles charges hydrauliques enregistrées à la veille de cette irrigation.

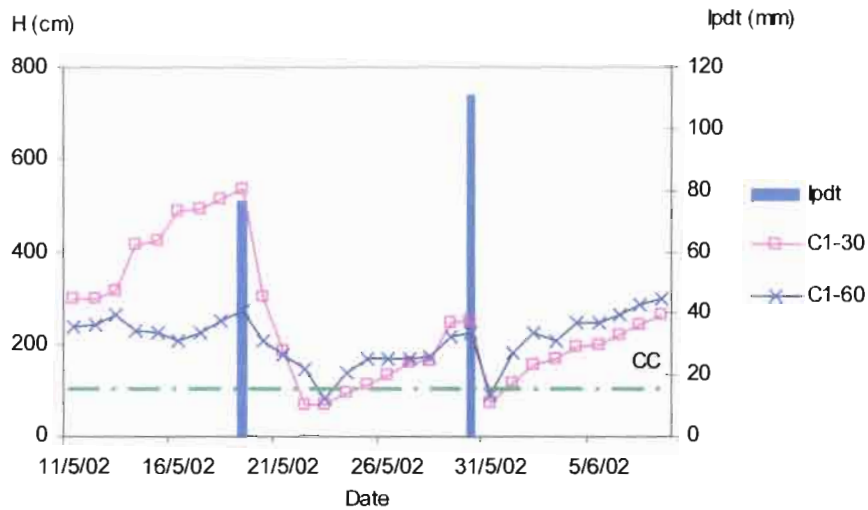


Figure VI.13. Evolution de la charge hydraulique H (cm) au niveau du site C1 pour les profondeurs 30 et 60 cm en relation avec les irrigations de la pomme de terre $Ipdt$ du 11/05/02 au 08/06/02, CC est la charge hydraulique correspondant à la capacité au champ.

b) Au niveau du site B1

Bien que l'allure générale de l'évolution des charges hydraulique (H) du site B1 (Figure VI.14) soit similaire à celle de C1, il existe certaines différences surtout au niveau de la profondeur 30 cm. En effet, au début de la période de mesure et jusqu' à la veille de la première irrigation, la charge hydraulique au niveau du tensiomètre placé à 30 cm a atteint 648 cm qui est plus élevée que celle mesurée en C1 pour la même profondeur. Ceci est en faveur de prélèvements plus importants dans cette zone par rapport au milieu de la culture. Etant à la limite entre la culture et l'olivier, le site B1 pourrait enregistrer des flux latéraux entre ces deux réservoirs suite à la différence de charge hydraulique créée par l'irrigation de la culture. De plus, l'olivier prélève certainement dans cette zone plus humide que son réservoir. De même qu'au niveau du site C1, un processus de drainage suivi d'évaporation a été enregistré suite à l'irrigation. L'irrigation du 30/05/02 a fait chuter les charges hydrauliques

des deux tensiomètres à la CC pour poursuivre en drainage par la suite qui s'est aussitôt inversé en évaporation à l'opposé du site C1. En effet, comme cela a été observé plus haut après la première irrigation, la proximité de la sous-unité de l'olivier serait à l'origine d'une part de la création de flux latéraux et d'autre part de la possibilité de prélèvement direct de l'olivier au niveau du réservoir de la culture.

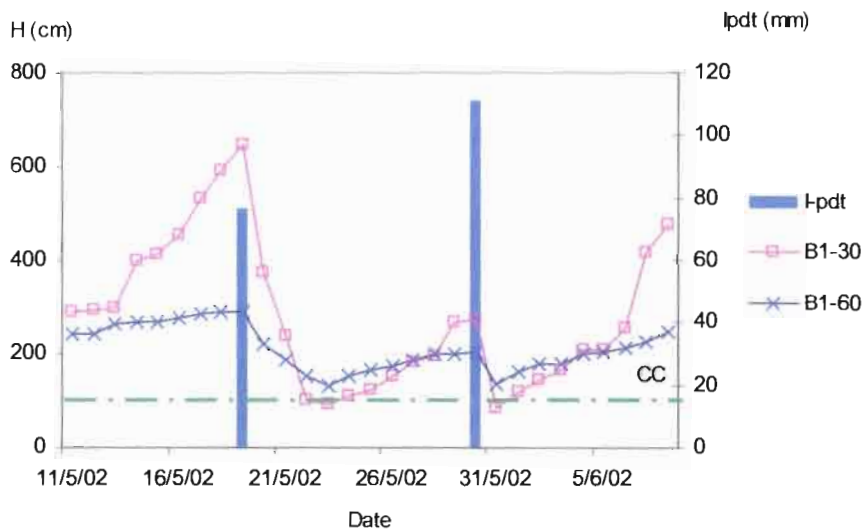


Figure VI.14. Evolution de la charge hydraulique H (cm) au niveau du site B1 pour les profondeurs 30 et 60 cm en relation avec les irrigations de la pomme de terre (I_{pdt}) du 11/05/02 au 08/06/02, CC est la charge hydraulique correspondant à la capacité au champ.

1-4-2- Evolution des profils hydriques

L'examen des profils hydriques au niveau de la culture ou de l'olivier ou encore du sol nu montre une allure caractérisée par une hétérogénéité entre les couches du sol. En effet, l'humidité de chaque horizon est liée à sa texture. Par exemple, la forte humidité enregistrée à l'horizon 30-60 cm correspond à une texture argilo-sableuse qu'on retrouve au niveau de la couche 160-220 cm.

a) Au niveau de la culture du petit pois

Le profil hydrique au niveau de la culture du petit pois (mars –juin 2003) montre une variation de l'humidité liée à deux apports hydriques. L'effet de l'irrigation du 08/05/03 (20 mm) observé le 12/05/03 n'est enregistré qu'au niveau de la couche 30-60 cm de profondeur (Figure VI. 15). Ceci nous amène à émettre l'hypothèse qu'il pourrait s'agir d'un dessèchement rapide de la surface du sol. Par ailleurs, l'état du profil le 19/05/03 a montré

que l'irrigation appliquée le 14/05/03 avec une dose double de la précédente (41 mm) a engendré une augmentation de l'humidité de la surface du sol jusqu'à 50 cm de profondeur. Une semaine après, un dessèchement a concerné le profil jusqu'à une profondeur de 160 cm.

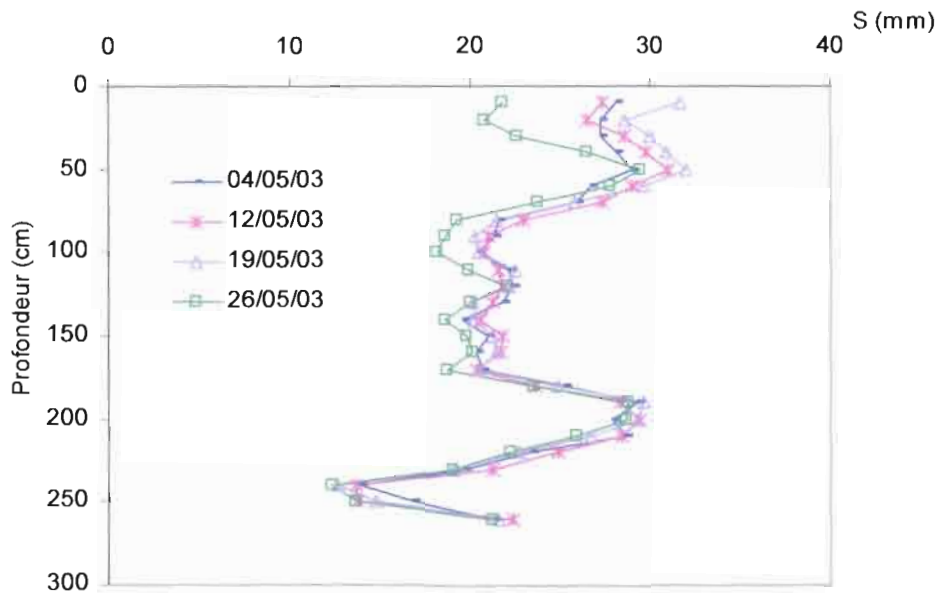


Figure VI.15. Evolution du profil hydrique au niveau de la culture du petit pois *S-Cm* du 04/05 au 26/05/03 suite aux irrigations du 08/05/03 et 14/05/03.

b) Au niveau de l'olivier

L'irrigation du 16/08/03 de l'olivier (40 mm) a engendré la création d'un front d'humectation à une profondeur de 50 cm environ (le 22/08/03) (Figure VI.16). En effet, un stock hydrique proche du *PPF* enregistré pendant cette période est à l'origine de la faible profondeur humidifiée suite à l'irrigation. Une phase de dessèchement a été enregistrée le 31/08/03 concernant uniquement la couche 0-30 cm. L'examen du profil le 05/09/03 a montré la continuité de cette diminution de l'humidité toujours sur la même profondeur.

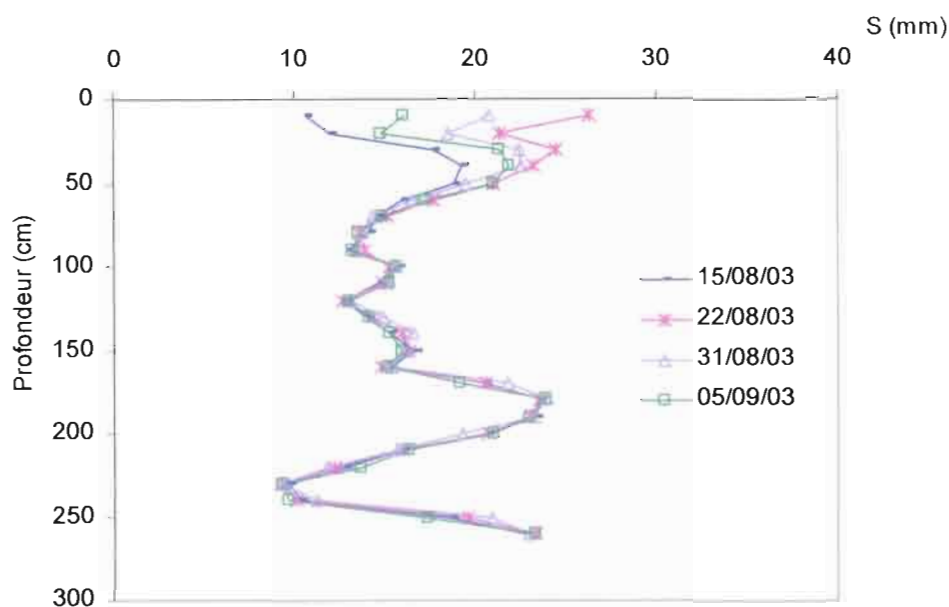


Figure VI.16. Evolution du profil hydrique au niveau de l'olivier *S-Am* du 15/08 au 05/09/03 suite à l'irrigation du 16/08/03.

2- Validation du modèle de transferts hydriques

Le modèle présenté dans cette étude a été mis en œuvre pour estimer les différentes composantes du bilan hydrique. Pour chaque sous-unité, le modèle simule avec un pas de temps journalier, la variation de la réserve disponible (*RD*) et les autres termes associés au bilan hydrique. Les hypothèses formulées pour le calcul des différents paramètres et sorties du modèles seront présentées au fur et à mesure de la présentation des résultats.

La validation du modèle a été faite sur 3 campagnes de culture : 2 cultures de pomme de terre : de printemps (2002) et d'automne (2003-2004) et une culture printanière du petit pois (2003), en plus d'une période sans culture intercalaire comportant seulement une irrigation de l'olivier. Les valeurs des paramètres d'entrée du modèle (caractéristiques du sol, des cultures et dimensions du système) sont données dans l'annexe 4.

2-1- Distribution des sites de mesure

Les 12 sites de mesures distribués au niveau des composantes du système (Figure IV.4) ont été utilisés pour le calcul du stock hydrique moyen de chaque réservoir. La réserve disponible (*RD*) est calculée au niveau de chaque site comme la somme des réserves disponibles de

chaque couche de 10 cm en allant de la surface jusqu'à la profondeur maximale du réservoir (1.25 m). *RD* moyenne d'un réservoir est prise comme la moyenne arithmétique des réserves ainsi calculées. La répartition des sites de mesure pour le calcul de la réserve disponible moyenne au niveau de chaque sous-unité est donnée dans le tableau (VI-1).

Tableau (VI.1) Répartition des sites de mesures utilisés dans le calcul de la réserve disponible moyenne de chaque sous-unité

Sous-unité/Réservoir	Sites
Culture annuelle (R1)	B1, B2, B3, C1, C2 et C3
Olivier (R2)	A1, A2, D1 et D2
Sol nu (R3)	D1, D2, E1 et E2

Les sites D1 et D2 figurent dans les deux sous-unités de l'olivier et du sol nu car ils se situent juste à la limite des deux sous-unités. De plus, l'intégration des sites D1 et D2 dans la sous-unité de l'olivier représente mieux l'humidité au niveau de ce réservoir. En effet, les mesures dans les sites A1 et A2 peuvent surestimer la teneur en eau moyenne du réservoir de l'olivier puisque ces sites se trouvent à seulement 0.75 m de la sous-unité de la culture intercalaire : leur humidité est certainement influencée par l'irrigation de la culture. La profondeur commune de ces réservoirs est de 1.25 m. Cette profondeur correspond à l'extension verticale maximale du système racinaire de l'olivier qui peut s'alimenter dans les trois réservoirs.

2-2- Estimation de la transpiration de l'olivier

La transpiration de l'olivier (τ) mesurée par la méthode du flux de sève a été paramétrée en fonction de la demande climatique (ET_0) et de l'humidité dans chaque réservoir (V.5-2). Comme l'olivier peut puiser dans les trois réservoirs du système, la partition de sa transpiration au niveau du système est a priori inconnu, vu que nous ne disposons pas d'information expérimentale concernant la densité racinaire de l'olivier et sa répartition dans chaque réservoir. La modélisation développée peut conduire à cette estimation si nous cherchons à caler les coefficients de partition de la transpiration (α_i) pour chaque réservoir.

La détermination des coefficients (α_i) a été effectuée à partir de la campagne de mesure de pomme de terre de saison de 2002. Les deux autres campagnes (pomme de terre et petit pois) ainsi que la période sans culture ont servi de validation. Celle-ci a d'abord concerné la campagne du petit pois (pour les raisons expliquées ci-dessous) puis celle de pomme de terre d'arrière saison. L'obtention de ces coefficients a reposé sur la recherche de la meilleure

adéquation des simulations par rapport aux mesures. Les valeurs retenues sont 0.5, 0.2 et 0.3 respectivement pour les réservoirs R1, R2 et R3.

Comme nous avons effectué deux campagnes de mesures printanières et une automnale, nous avons jugé qu'une meilleure calibration des coefficients de partition de la transpiration de l'olivier serait obtenue sur des périodes similaires du point de vue de la surface foliaire et de la phénologie de l'olivier. De ce fait, les coefficients choisis peuvent ne pas convenir parfaitement à la campagne de mesure de pomme de terre d'arrière saison vu la différence qui peut exister quant à la frondaison de l'olivier pendant cette période par rapport à celle au printemps. Cette procédure de calage des coefficients α_i ne tient pas compte de l'humidité de chaque réservoir, ce qui constitue évidemment un élément important lors des prélèvements hydriques de l'olivier au niveau de chaque réservoir.

2-3- Comparaison des réserves disponibles

Les réserves disponibles (*RD*) simulées par le modèle sont comparées aux mesures effectuées pendant les différentes campagnes. Pour évaluer l'importance des échanges latéraux entre les différents réservoirs du système, nous avons aussi fait tourner le modèle sans tenir compte de ces flux. Pour chaque campagne, les résultats du modèle seront discutés avec et sans flux latéraux afin de mettre en évidence leur importance dans l'estimation du bilan hydrique du système.

2-3-1- Campagne de pomme de terre de saison (Février-juin 2002)

a) Sans tenir compte des flux latéraux

La réserve disponible simulée pendant cette campagne au niveau des 3 réservoirs, sans tenir compte des flux latéraux, est présentée dans la figure VI.17.

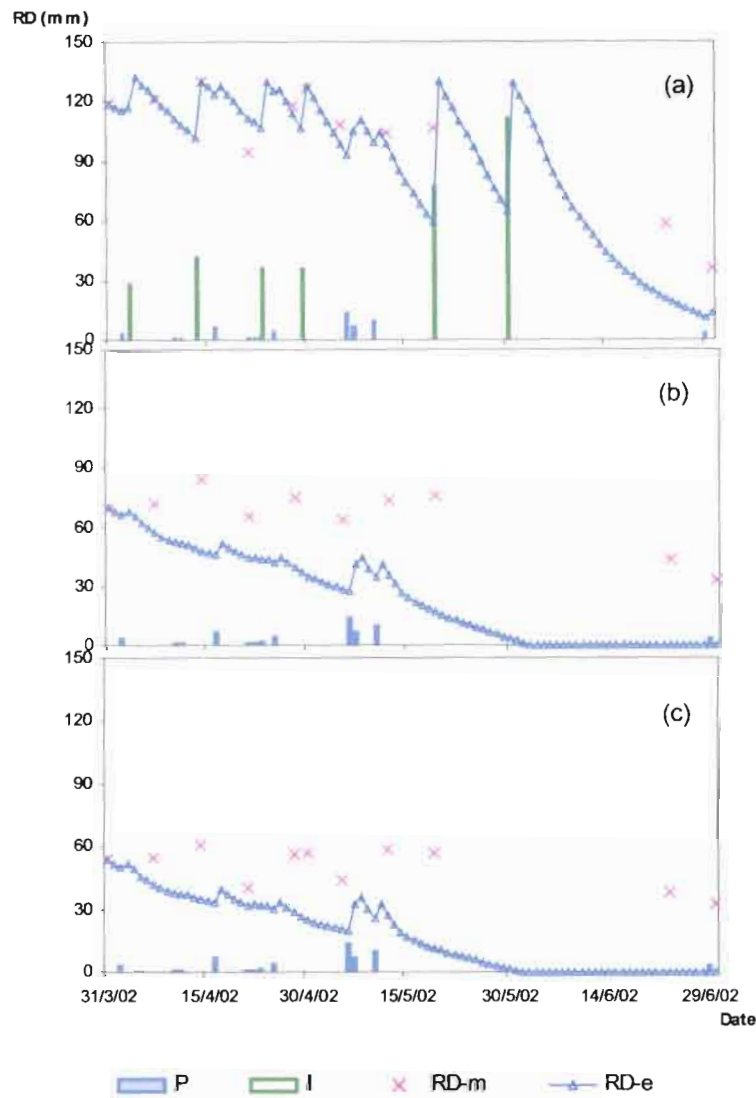


Figure VI.17. Campagne de pomme de terre de saison 2002. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 31/02 au 30/06/02, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pdt} et les précipitations P .

Nous remarquons que seulement au niveau du réservoir R1 de la culture que les valeurs simulées sont proches de celles mesurées. Une nette sous-estimation apparaît au niveau des réservoirs R2 et R3 tout au long de la campagne avec un écart de plus en plus important vers la fin de la campagne. Nous pouvons supposer que la non prise en compte des flux latéraux provenant du réservoir de la culture est à l'origine de cet écart entre les valeurs. En effet, la sous-estimation de la RD du R2 et R3 est assez nette tout au long de la campagne et d'une façon plus marquée à la fin de la saison de culture juste au moment où il y a eu les deux dernières irrigations et où les transferts latéraux peuvent être conséquents. De ce fait, l'origine

de ce décalage pourrait aussi être dû à des fuites d'eau à travers les rigoles qui sont peu contrôlables avec ce type d'irrigation et surtout avec de fortes doses.

b) En tenant compte des flux latéraux

La figure VI.18 montre qu'en intégrant les flux latéraux dans le calcul de la *RD* on obtient une certaine amélioration de l'adéquation de la simulation avec les mesures. Le décalage systématique qui persiste entre les mesures et la simulation, au niveau de l'olivier et du sol nu enregistré aux alentours des périodes d'irrigation de la culture, peut être expliqué par les fuites d'eau d'irrigation de la culture causées par le type d'irrigation utilisé pour cette campagne. En effet, même au début de la campagne, nous remarquons une augmentation de la *RD* au niveau de l'olivier au moment des irrigations de la culture (le 14/04/02 suite à l'irrigation du 13/04/02).

Une question qui peut surgir concerne le réservoir de la culture qui n'a pas vu son stock changer en tenant compte des flux latéraux contrairement à ceux des deux autres réservoirs. L'explication réside dans l'importance relative de chaque surface du réservoir. Comme les transferts au niveau du système sont normalisés par la surface du réservoir considéré, les changements au niveau de la *RD* de la culture dont la surface représentative est de 70 m² ne seraient pas perçus de la même manière que pour une superficie de 27 m² qui est celle du sol nu ou encore au niveau de celle de l'olivier qui est de seulement 13 m².

Pendant cette campagne, l'olivier et le sol nu ont pu recevoir chacun par l'intermédiaire de ces flux latéraux jusqu'à 1.0 mm j⁻¹ correspondant à une perte de seulement 0.56 mm j⁻¹ pour le réservoir de la culture. Ces flux ont permis à l'olivier de recevoir, pendant cette campagne une quantité totale d'eau de 27 mm ce qui constitue une quantité non négligeable à l'échelle d'une campagne dans les conditions de l'expérience.

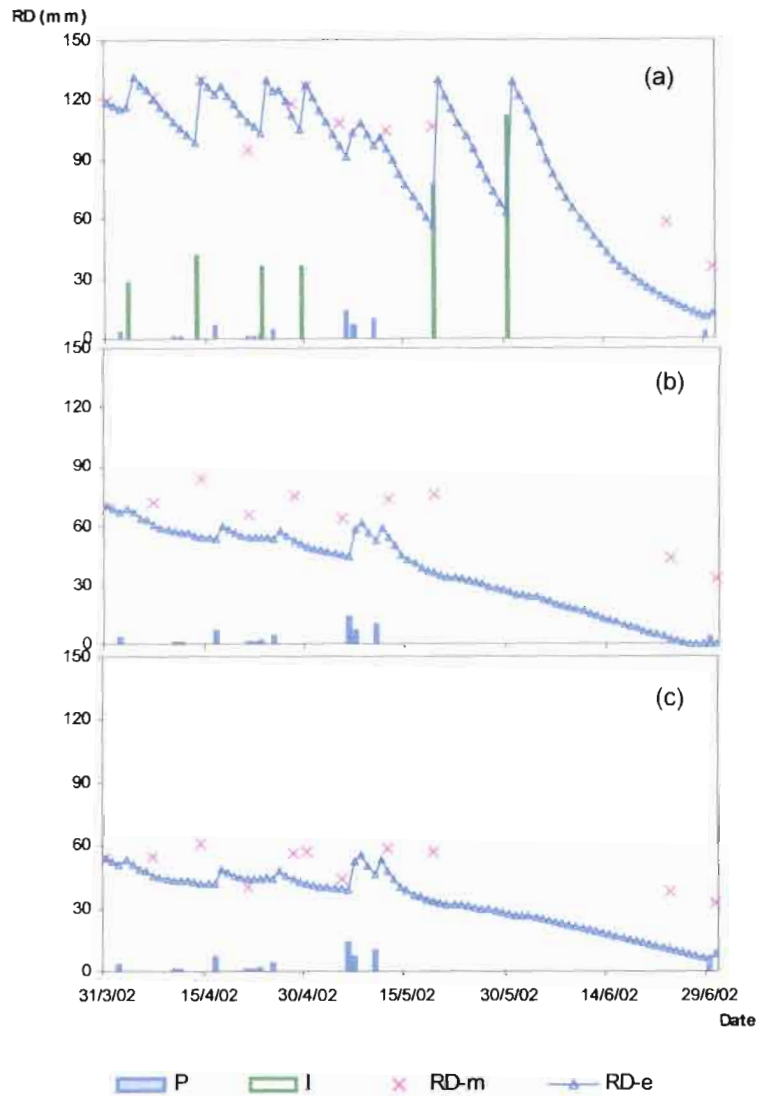


Figure VI.18. Campagne de pomme de terre de 2002. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 31/02 au 30/06/02, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pdt} et les précipitations P .

2-3-2- Campagne du petit pois (mars-juin 2003)

a) Sans tenir compte des flux latéraux

Pendant cette campagne du petit pois, la RD simulée au niveau du réservoir correspondant à cette culture semble être proche de celle mesurée sauf à la fin de la saison avec cependant une légère sous-estimation de la RD au niveau de l'olivier et du sol nu (Figure VI.19). Ce décalage est encore plus prononcé au niveau de l'olivier où la RD simulée s'annule vers la fin de la campagne. Comme les flux hydriques latéraux représentent le seul apport hydrique non

pris en compte dans cette simulation, il semble que leur rôle est important pour une estimation adéquate de la RD pour cette campagne.

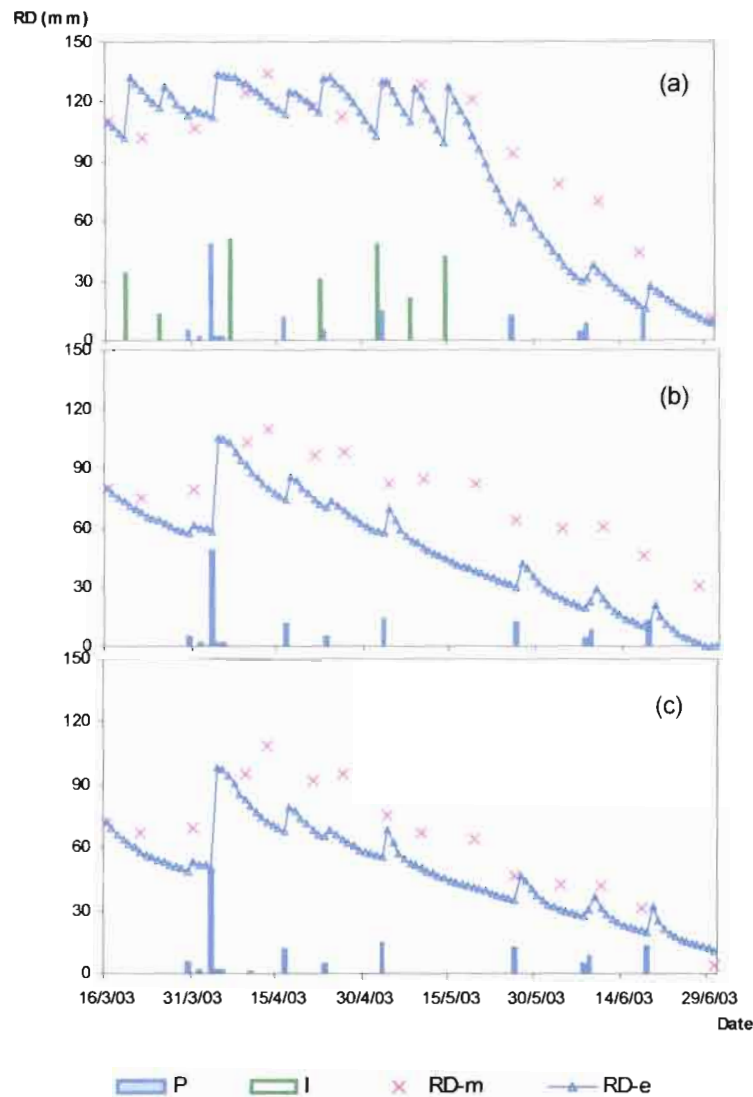


Figure VI.19. Campagne du petit pois 2003. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 19/03 au 30/06/03, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir du petit pois (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pp} et les précipitations P .

b) En tenant compte des flux latéraux

Bien que de faibles différences semblent affecter le réservoir de la culture, la simulation de la réserve en eau disponible en intégrant le calcul des flux latéraux semble mieux représenter les mesures effectuées au niveau des réservoirs de l'olivier et du sol nu (Figure VI. 20). Pendant cette campagne, grâce à ces flux latéraux, le R2 (olivier) a pu bénéficier d'un apport hydrique total estimé à 22 mm.

Cependant, une légère sous-estimation en fin de campagne de la *RD* demeure dans le réservoir R1. A ce niveau, une surestimation de l'évapotranspiration de la culture, qui représente la source la plus importante des prélèvements au niveau de ce réservoir, pourrait être à l'origine de cette différence. En effet, le calcul de l'*ETR* de la culture ne prend en compte que la demande évaporative, le stade de développement de la culture et un éventuel stress hydrique lié à la réserve en eau du sol. Cependant, il n'est pas sûr que la culture serait dans des conditions optimales de fertilisation ce qui n'est pas pris en compte lors des calculs de l'*ETR*. Peuvent aussi contribuer à cette réduction de l'*ETR* d'autres stress environnementaux qui n'ont pas été comptabilisés dans cette étude (degré de salinité, température optimale de croissance...).

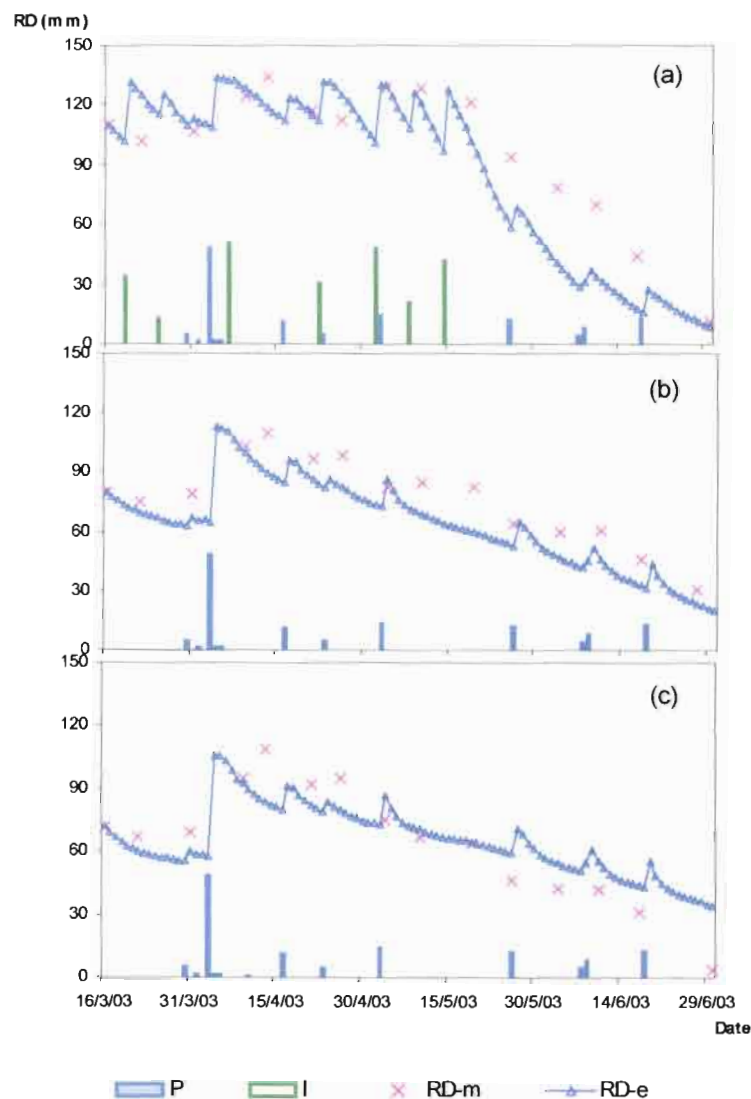


Figure VI.20. Campagne du petit pois 2003. Evolution de la réserve disponible mesurée *RD-m* et estimée *RD-e* du 19/03 au 30/06/03, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir du petit pois (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations *Ipp* et les précipitations *P*.

2-3-3- Campagne de la pomme de terre d'arrière saison (septembre 03-janvier04)

a) Sans tenir compte des flux latéraux

A la différence des précédentes, cette campagne automnale a été caractérisée par une demande climatique décroissante (ET_0 variant entre 5.1 et 0.5 mm) et des précipitations enregistrées essentiellement durant la deuxième moitié de la campagne (Figure VI.21).

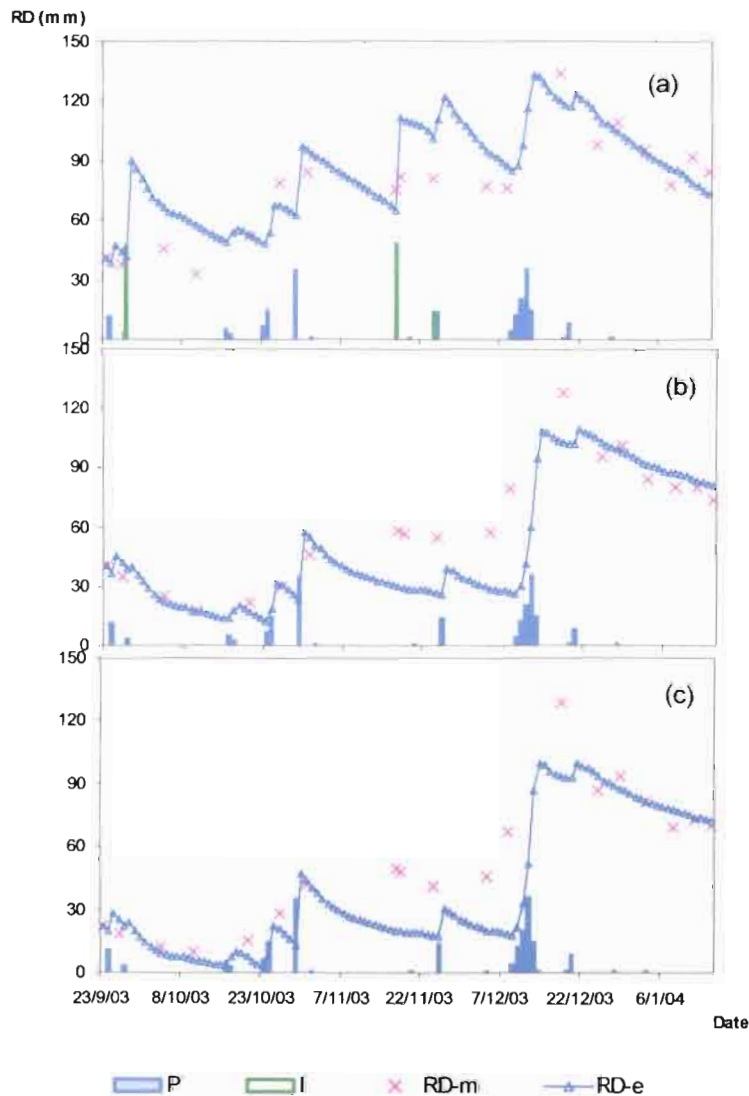


Figure VI.21. Campagne de pomme de terre (2003-2004). Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$ du 23/09/03 au 15/01/04, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations I_{pdt} et les précipitations P .

Comme précédemment, dans le cas où nous ne tiendrions pas compte des flux latéraux, les réserves disponibles simulées au niveau du réservoir de la culture sont proches de celles

mesurées alors que celles des réservoirs R2 et R3 sous-estiment les mesures essentiellement pendant le mois de novembre.

b) En tenant compte des flux latéraux

La figure (VI 22.) représente les *RD* des différents réservoirs en tenant compte des flux latéraux.

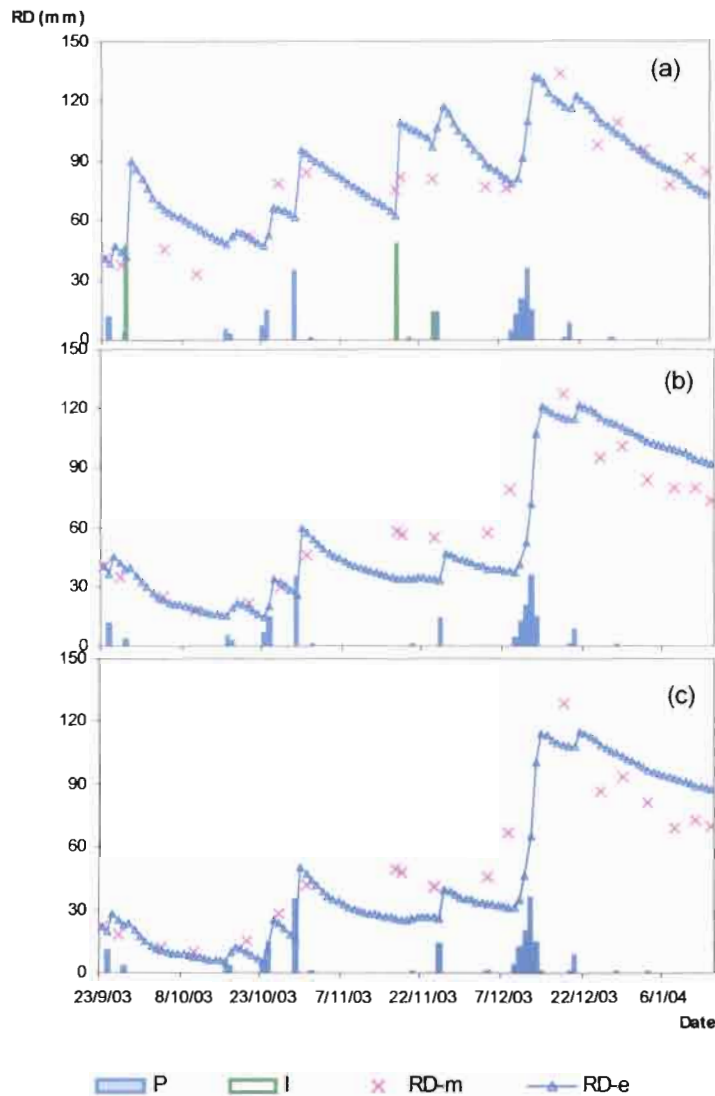


Figure VI.22. Campagne de pomme de terre (2003-2004). Evolution de la réserve disponible mesurée *RD-m* et estimée *RD-e* du 23/09/03 au 15/01/04, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la pomme de terre (a), de celui de l’olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec les irrigations *Ipp* et les précipitations *P*.

Dans ce cas, nous remarquons une amélioration de la simulation obtenue au niveau du réservoir de l’olivier et du sol nu après la comptabilisation des flux latéraux qui ont été de l’ordre de 0.4 mm j^{-1} reçus par les réservoirs de l’olivier et du sol nu suite aux irrigations de la

culture du 17 et du 24/11/03. Une meilleure simulation de la *RD* pourrait être obtenue avec d'autres coefficients de partition de la transpiration de l'olivier entre les différents réservoirs calés sur cette même campagne. En effet, comme il a été mentionné auparavant (paragraphe du même chapitre), les coefficients utilisés ont été déterminés à partir de la campagne de pomme de terre de saison pendant laquelle la réserve disponible au début de la campagne pour le réservoir R1 a été proche de la *RU* tout au long de la campagne pour ne chuter qu'à la fin. Cependant, pendant cette campagne automnale, la *RD* a été plutôt faible au début pour augmenter à la fin de la campagne. Cette différence d'évolution de la *RD* entre les campagnes peut affecter la détermination des coefficients. D'où, une moindre adéquation des simulations par rapport aux mesures.

2-3-4- Cas de l'absence de culture intercalaire avec une irrigation de l'olivier

a) Sans tenir compte des flux latéraux

En absence de culture et dans le cas d'un déficit hydrique important (absence de pluie et/ou forte demande évaporative) l'olivier est généralement irrigué par bassin. Au cours de la saison estivale de 2002, une dose d'environ 40 mm a été apportée à l'olivier le 02/07/2002. L'analyse de l'évolution de *RD* pendant cette période (Figure VI. 23) sans la prise en compte des flux latéraux montre une assez bonne concordance des mesures avec les simulations au niveau des réservoirs R1 et R3 et une légère sous-estimation au niveau du réservoir R2. Nous pouvons alors émettre l'hypothèse suivante : les flux latéraux ne sont pas importants pendant cette période. Pour vérifier cette hypothèse, nous examinons les *RD* en présence de ce type de flux.

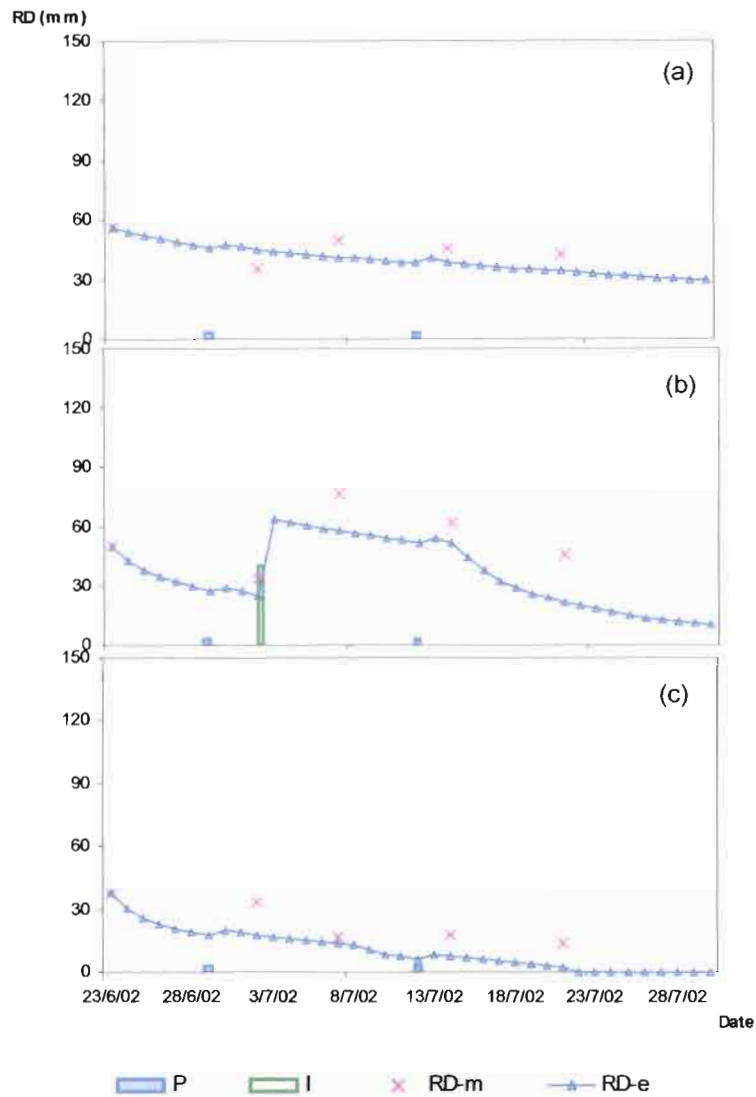


Figure VI.23. Période de mesure en absence de culture intercalaire du 23/06 au 30/07/02. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$, sans tenir compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la culture (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec l'irrigation de l'olivier *Iolivier* et les précipitations P .

b) En tenant compte des flux latéraux

L'évolution de la RD dans les différents réservoirs en intégrant les flux latéraux dans le calcul du stock hydrique (Figure VI. 24) n'a pas beaucoup modifié les simulations obtenues précédemment (Figure VI. 23). L'analyse de ces flux a montré que vu leur faible importance (flux maximal L_2 de 0.07 mm j^{-1}), à cause d'une faible réserve disponible initiale (25 % de la RU), leur répercussion est peu significative sur la RD des autres réservoirs et ce d'autant plus que leurs surfaces sont plus grandes.

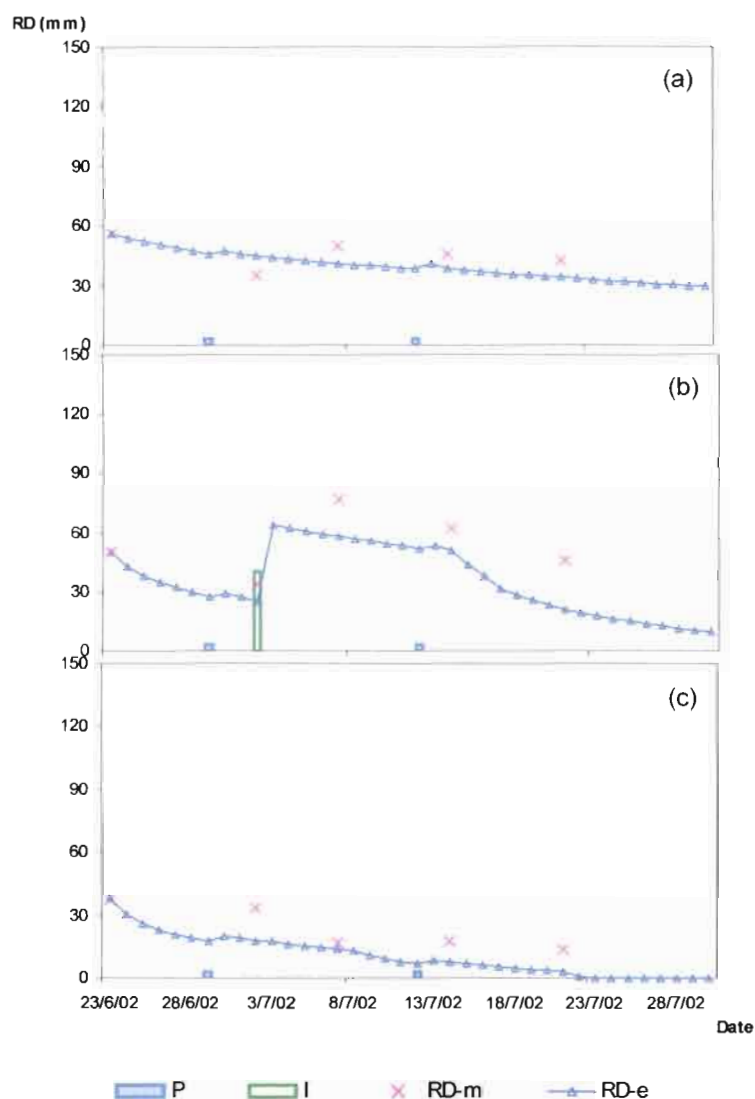


Figure VI.24. Période de mesure en absence de culture intercalaire du 23/06 au 30/07/02. Evolution de la réserve disponible mesurée $RD-m$ et estimée $RD-e$, en tenant compte des flux latéraux, au niveau du réservoir de la culture (a), de celui de l'olivier (b) et du sol nu (c) en relation avec l'irrigation de l'olivier *Iolivier* et les précipitations P .

2-4- Importance des flux hydriques latéraux

Les avantages attribués aux systèmes de cultures intercalaires sont souvent liés à une complémentarité d'utilisation de l'eau par les deux cultures à l'échelle spatiale. En effet, l'olivier puise dans les autres réservoirs, et nous avons trouvé, par calage, que le coefficient de partition de sa transpiration dans le réservoir de la culture a été le plus élevé montrant cette complémentarité spatiale vis à vis de l'utilisation de l'eau réalisée par ce système.

Cependant, peu d'études ont mis l'accent sur l'apport hydrique de la culture annuelle à la culture pérenne quand cette première est irriguée. Cet apport peut être important lors d'une

irrigation excédentaire et/ou quand des pluies surviennent après une irrigation. En effet, ce mouvement horizontal d'eau peut atteindre 1 mm j^{-1} . L'importance des flux et donc leur impact sur le bilan hydrique du système est lié à trois facteurs : les apports hydriques (essentiellement l'irrigation), les conditions initiales de teneur en eau du réservoir et les dimensions du réservoir. D'après l'équation (III.40), les flux latéraux des trois réservoirs (L_1 , L_2 et L_3) sont reliés entre eux par leur surfaces respectives de façon à ce que :

$$A_1 L_1 = -(A_2 L_2 + A_3 L_3) \quad (\text{VI.1})$$

A_1 , A_2 et A_3 sont respectivement les surfaces des sous-unités de la culture intercalaire, de l'olivier et du sol nu. L'application numérique de l'équation (VI.1) permet d'obtenir:

$$L_1 = -(0.19L_2 + 0.38L_3) \quad (\text{VI.2})$$

Nous remarquons que dans le cas de ce système, 1 mm reçu par les réservoirs 2 et 3 correspond à seulement une perte de 0.57 mm pour le réservoir R1. L'importance relative des flux latéraux et leur occurrence peuvent être illustrés par leur évolution simulée au cours d'une campagne. Nous avons pris l'exemple de la pomme de terre de printemps de 2002, où les flux ont atteint des maxima de 1 mm j^{-1} (Figure VI. 25).

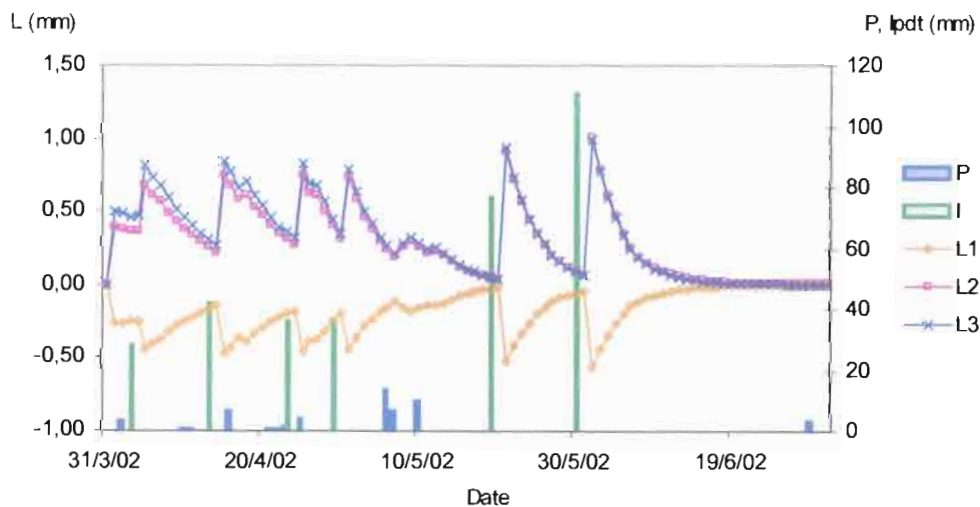


Figure VI.25. Evolution des flux latéraux simulés au niveau des 3 réservoirs (L_1 , L_2 et L_3 , (mm) en relation avec les précipitations P (mm) et les irrigations $Ipdt$ (mm) du 31/03/02 au 02/07/02.

Nous remarquons au niveau de cette campagne que les flux latéraux simulés sont liés essentiellement aux irrigations apportées à la culture et que leur importance est fonction des doses appliquées. Cependant, certains flux d'une importance plus faible (de l'ordre de 0.3 mm j^{-1}) ont pu être simulés suite à des pluies. Bien que les précipitations engendrent a priori des

augmentations parallèles du stock hydrique au niveau de chaque réservoir, la variation correspondante de la charge hydraulique n'est pas linéaire, ce qui peut générer des différences du potentiel hydrique plus importantes et induire ainsi des flux latéraux.

Conclusion

L'analyse de l'évolution des fluctuations du stock hydrique, au niveau de la culture, de l'olivier et du sol nu pendant les différentes campagnes de mesures a montré des interactions temporelle et spatiale entre les réservoirs du système. En effet, la dynamique de l'évolution du stock dans les différents réservoirs en fonction des apports suggère que l'olivier puise dans le réservoir de la culture ou du sol nu. Cette consommation hydrique est conditionnée par les besoins en eau de l'olivier et le niveau de l'humidité de chaque réservoir du système. En effet, les racines de l'olivier prélèveraient d'une manière sélective dans les zones les plus humectées. L'analyse de l'évolution de la charge hydraulique de l'eau du sol au niveau de la culture montre que des flux hydriques latéraux pourraient être créés à la suite des irrigations apportées à la culture quand les teneurs en eau dans les deux réservoirs sont différentes.

La réserve disponible (RD) de chaque réservoir simulée par le modèle a montré une assez bonne adéquation aux mesures si les flux latéraux sont pris en compte. La modélisation des transferts hydriques dans ce système nous a permis de répartir la transpiration totale de l'olivier dans chaque réservoir moyennant des coefficients de partition fixes qui ont été obtenus par calage par rapport aux mesures. Cependant, comme il est très probable qu'il y a une consommation préférentielle de l'olivier dans le réservoir le plus humide, les termes de transpirations doivent varier en fait en fonction de l'humidité du réservoir. D'où, une autre approche possible serait de relier la transpiration de l'olivier au niveau du réservoir i (τ_i) à son l'humidité (θ_i) et à l' ET_0 et de caler un coefficient α_i tel que $\tau_i = \alpha_i \theta_i ET_0$. La transpiration totale obtenue de cette façon devait redonner celle mesurée par la méthode du flux de sève (τ).

Nous pouvons alors conclure que l'olivier dans ce système peut bénéficier d'une augmentation de la disponibilité en eau soit directement à travers l'exploration d'horizons humides au niveau de la culture intercalaire ou du sol nu, soit indirectement à travers les flux latéraux qui se créent à la suite de la différence de teneur en eau entre les réservoirs du système.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a concerné l'utilisation de l'eau par le système de cultures intercalaires (olivier-culture maraîchères) en région semi-aride. Le développement d'une méthodologie expérimentale appropriée, basée sur une combinaison de mesures de l'eau du sol et du flux de sève sur olivier, ainsi qu'une approche de modélisation constituent les composantes majeures du travail.

La démarche adoptée repose sur une quantification des flux transpiratoires de l'olivier et du stock hydrique des différentes composantes du système pour en déduire les interactions entre les cultures en association en fonction des apports hydriques et de la demande évaporatoire (ET_o). Pour cela, trois sous-unités ont été délimitées à l'intérieur du système : une première occupée par la culture intercalaire (R1), une deuxième occupée par l'olivier (R2) et une troisième correspondant à l'inter-rang des oliviers non cultivé et maintenu en sol nu (R3). Trois campagnes de cultures ont été suivies expérimentalement: deux cultures printanières (pomme de terre et petit pois) et une culture automnale (pomme de terre). La modélisation des transferts hydriques du système a permis d'estimer les différents flux hydriques relatifs à chaque compartiment du système pour les différentes campagnes de cultures.

L'approche de modélisation des transferts hydriques développée dans cette étude repose sur le bilan hydrique de chaque réservoir. La paramétrisation des flux latéraux entre les réservoirs constituent l'originalité de cette modélisation. En effet, la plupart des études concernant ce système de culture, se sont intéressées à la répartition spatiale des racines comme moyen permettant à l'arbre de bénéficier des irrigations de la culture annuelle. Les flux latéraux permettent de tenir compte d'un autre moyen d'alimentation en eau de la culture pérenne à travers un apport hydrique direct.

L'analyse de l'évolution du stock hydrique au niveau des 3 réservoirs du système (olivier, culture intercalaire et sol nu) pendant les différentes campagnes de mesure est en accord avec l'idée émise au départ : l'olivier consomme de l'eau au niveau du réservoir de la culture et de celui du sol nu. Une culture intercalaire automnale semble être bénéfique à l'olivier surtout dans le cas d'un retard des premières pluies de la saison humide et un épuisement général des réserves hydriques des différents compartiments à la fin de l'été. Cet avantage serait d'autant

plus important que cette période correspond pour l'olivier à une phase sensible au déficit hydrique (grossissement du fruit et initialisation florale).

Ces résultats révèlent les conditions dans lesquelles le système de cultures intercalaires serait le plus approprié. En effet, l'analyse de ces campagnes de mesure montre que l'olivier a pu bénéficier des irrigations apportées à la culture par absorption directe au niveau du réservoir R1 mais qu'il est pourrait être concurrencé par une culture dont le système racinaire est profond. D'autre part, l'épuisement du stock hydrique au niveau de la culture à la fin de la campagne printanière peut induire un stress hydrique de l'olivier en été, vu que cette campagne est suivie par une saison sèche. Cela suggère qu'en absence d'irrigation de l'olivier, une culture estivale irriguée à système racinaire peu profond puisse être envisagée d'autant plus qu'on cultive traditionnellement, dans la zone d'étude, la tomate et le piment en été. Cependant, ceci reste tributaire de la quantité d'eau dont dispose l'agriculteur pendant cette saison.

La technique utilisée pour la détermination de la transpiration de l'olivier est celle de la méthode de dissipation de chaleur de Granier (1985) en chauffage alternatif (Do et Rocheteau, 2002), appliquée sur quatre oliviers. Les résultats obtenus ont permis de dégager un certain nombre de conclusions. Les signaux de 12 capteurs répartis sur les 4 arbres, selon trois directions Nord, Sud Est et Sud Ouest, ont présenté une forte variabilité intra et inter-arbre. Des différences de densité du flux de sève entre les capteurs ont été enregistrées à l'échelle horaire (de 1.5 à 5 l dm⁻² h⁻¹) et journalière (de 20 à 80 l dm⁻² j⁻¹). L'investigation de cette variabilité a révélé que son origine réside dans l'hétérogénéité de la surface conductrice de l'olivier plutôt que dans un effet de direction de capteurs dont l'impact pourrait être masqué ou de moindre importance. De plus, ces différences sont accentuées par des différences d'humidité du sol entre les trois réservoirs : comme chaque capteur mesure la densité du flux au niveau d'un ensemble de vaisseaux conducteurs relié à un groupement de racines, l'humectation partielle des racines (en cas d'irrigation de l'olivier ou de la culture) induit des réponses variables de chaque capteur.

La prise en compte de la variabilité du flux au sein de l'arbre est réalisée par l'utilisation de 3 capteurs, ce qui constitue un bon compromis entre la précision des mesures et la complexité des équipements. De même, l'étude de la représentativité de la densité du flux de sève d'un arbre (F_{di}) par rapport à la moyenne arithmétique des flux mesurés au niveau de 4 arbres (F_{dm})

a montré une bonne corrélation entre F_{di} et F_{dm} . La moyenne des densités des flux (F_{dm}) représente donc la densité de flux moyenne au niveau du verger.

L'existence de flux nocturnes a été mise en évidence. Des flux nocturnes variant entre 33 et 45 % du flux total journalier, selon les capteurs, ont été détectés suite à des apports hydriques survenant après une période sèche. L'occurrence de ces flux chez l'olivier peut être induite par l'irrigation de la culture intercalaire.

L'influence des paramètres climatiques sur la densité du flux de sève a été étudiée. La densité du flux de sève horaire présente une forte corrélation avec le rayonnement global (R_g) et la demande climatique (ET_o). Le maximum de la densité du flux de sève est obtenu simultanément avec celui du R_g alors que F_{dm} commence à diminuer quand la VPD atteint son maximum. Par ailleurs, l'évolution journalière de la densité du flux de sève semble mieux suivre celle du rayonnement global que du VPD suggérant l'importance du premier comme moteur de la transpiration de l'olivier.

Le rapport de la transpiration journalière de l'olivier (τ , mm) sur l' ET_o (τ/ET_o) a évolué entre 0.05 et 0.33 selon les saisons avec une variabilité intra-saisonnière fonction de la teneur en eau du sol. Ce rapport renseigne sur la disponibilité en eau pour l'olivier. Une relation a été élaborée entre le rapport (τ/ET_o) et l'humidité des réservoirs du système. Comme la relation trouvée n'inclut pas l'humidité du réservoir R3 (sol nu), elle ne semble pas parfaitement adaptée et pourrait alors être améliorée.

La question qui se pose après la détermination de la transpiration de l'olivier concerne sa partition entre les différents réservoirs du système. En effet, si le but de l'introduction des cultures intercalaires est certes de valoriser le sol et les quantités d'eau disponibles au niveau de la parcelle, faire bénéficier l'olivier de cette ressource constitue la pierre angulaire de ce système. D'où, la nécessité d'une quantification des prélèvements de l'olivier dans chaque compartiment. Ceci est difficile à déterminer sans des mesures laborieuses de la dynamique racinaire de l'olivier. La modélisation peut apporter une réponse à la question de la répartition de ce flux. A partir de la relation reliant le rapport τ/ET_o à l'humidité des réservoirs, des coefficients de partition ont été déterminés par calage du modèle aux résultats expérimentaux. Cependant, vu que la dynamique d'absorption de l'olivier est fonction de l'humidité du sol, ces paramètres constants ne donnent certainement pas la meilleure partition pour toutes les périodes de l'année. De plus, la variation saisonnière de la surface foliaire (surtout avant et

après la taille) et les stades phénologiques (dormance, croissance active) peut influencer ces coefficients.

Une modélisation des transferts hydriques horizontaux et verticaux dans chaque réservoir a permis d'estimer les flux hydriques en fonction des apports et des conditions climatiques. La confrontation des mesures effectuées au niveau du sol et du végétal par rapport aux simulations a montré une assez bonne adéquation dans le cas où les flux hydriques latéraux entre les réservoirs sont pris en compte. Les flux latéraux maximaux estimés ont été de 1 mm j^{-1} contribuant, dans le cas de la campagne de pomme de terre de printemps (février-juin 2003), à un apport hydrique total estimé de 27 mm vers le réservoir de l'olivier.

Le travail présenté apporte des éléments tant sur le plan méthodologique que sur celui du fonctionnement hydrique d'un système de cultures intercalaires hétérogènes. La modélisation simple des différents flux hydriques spécifiques à ce système en fonction des paramètres hydrodynamiques et climatiques est transposable à d'autres types d'association: le modèle proposé peut être utilisé pour tester d'autres cultures en association dans la région ou ailleurs. Cependant, de meilleures estimations des flux hydriques au niveau des différents réservoirs pourraient être obtenues si :

- la paramétrisation des flux transpiratoires de l'olivier tenait compte de l'humidité du réservoir, du stade phénologique de l'olivier et de l'évolution de la surface foliaire des arbres,
- les flux latéraux étaient estimés en fonction des humidités de chaque couche du sol et de ses caractéristiques hydrodynamiques.

Les résultats montrent qu'au niveau de ce système de culture, l'olivier peut bénéficier d'une alimentation en eau plus avantageuse, par rapport à sa culture pure, grâce à une meilleure exploitation des ressources hydriques au niveau du réservoir de la culture et aux flux latéraux créés principalement par les irrigations de la culture annuelle. Bien que la culture intercalaire concurrence l'olivier au niveau des précipitations, l'apport qu'elle offre à la culture pérenne grâce à l'irrigation peut être plus important.

Comme ce système semble bénéfique à la culture pérenne tout en assurant une meilleure valorisation des eaux d'irrigation et des revenus supplémentaires à l'agriculteur, il serait intéressant de tester la productivité de l'eau de chaque culture et de la comparer à celles en

monoculture. En effet, "la quantification de l'avantage" que peut apporter ce système par rapport aux monocultures réside dans l'augmentation de la productivité de l'eau. Ceci peut être vérifié en conduisant les mêmes cultures selon les deux modes : cultures pures et intercalaires dans les mêmes conditions environnementales et en suivant le même itinéraire technique. La comparaison de l'efficacité de l'utilisation de l'eau des deux systèmes peut renseigner sur l'efficacité du système.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abid Karray J., Masmoudi M.M., Luc J.P. et Ben Mechlia N., 2005. Système de cultures intercalaires: développement méthodologique de l'étude du bilan hydrique d'une association: olivier –pomme de terre. Séminaire International "Water land and food security in arid and semi-arid regions". Bary , Italie, 6-11 septembre.
- Adiku S.G.K., Carberry P.S., Rose C.W., McCown R.L. et Braddock R., 1995. A maize (*Zea mays*) –cowpea (*Vigna unguiculata*) intercrop model. In Sinoquet H., Cruz P. (Eds), Ecophysiology of tropical intercropping, INRA, Paris, 396-406.
- Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S.R., Sánchez-Blanco, M.J., Rodríguez, P. et Torrecillas, A., 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant Soil*, vol 227, p.77-85.
- Albergel J., Nasri S. et Lamachère J.M. 2004. HYDROMED Programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. *Revue des sciences de l'eau*, vol 17, p. 133-151.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. et Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, p.300.
- Allen S.J. et Grime V.L., 1995. Measurement of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges. *Agric. For. Meteorol.*, vol 75, p.23-41.
- Azam-Ali S.N., 1995. Assessing the efficiency of radiation use by intercrops. In: Sinoquet, H., Cruz, P. (Eds.), *The Ecophysiology of Tropical Intercropping*. INRA Editions, Paris, p.305-317.
- Azam-Ali S.N., Nageswara Rao R.C., Craigon J., Wadia K. D. R. et Williams J.B., 1993. A method for calculating the population/yield realtions of groundnut (*Arachis hypogaea*) in semi-arid climates. *J. Agric. Sci.*, vol 121, p.213-222.
- Baldy Ch., 1963. Cultures associées et productivités de l'eau. *Ann. Agro.*, vol 14, n° 4, p 489-534.
- Black C. R. et Ong C. K., 2000. Utilisation of light and water in tropical agriculture. *Agric. For. Meteorol.*, vol 104, p.25-47.
- Ben Hamouda N., 1999. Stratégies des agriculteurs irrigants confrontés à une situation de pénurie d'eau. Cas d'un périmètre irrigué privé dans le bassin du Merguellil en Tunisie Centrale. Master of Science. CIHEAM-IAM, Montpellier, 188p.
- Ben Rouina B., Taamallah H. et Trigui A., 1997. L'enracinement de l'olivier et ses variations en fonction de la nature du sol en milieu aride. Actes du Séminaire International « Acquis scientifiques et perspectives pour un développement durable des zones arides ». *Revue des régions arides*, N.S, p.173-181.
- Benyon R. G., 1999. Nighttime water use in an irrigated *Eucalyptus grandis* plantation. *Tree Physiol.*, vol 19, p.853-859.
- Bongi G. et Palliotti A., 1994. Olive in « Handbook of environmental physiology of fruit crop. Eds. Schaffer B. et Anderson P.C., CRC Press Inc., p165-187.
- Bouzaiane S. et Lafforgue A., 1986. Monographie des oueds Zéroud et Merguellil. Tunis, 1037 p.
- Cabibel B. et Isbérie C., 1997. Flux de sève et alimentation hydrique de cerisiers irrigués ou non en localisation. *Agronomie*, vol 17, p 97-112.
- Cabibel B. et Do F. 1991. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des

- flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. *Agronomie*, n° 11, p. 669-678.
- Caldwell R.M., 1995. Simulations models for intercropping systems. In: Sinoquet H., Cruz P (Eds) *The ecophysiology of tropical intercropping*, INRA, Paris, 353-368.
- Campbell G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, vol 117, p.311-314.
- Cannel M. G. R., Van Noordwijk M et Ong C.K., 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must require resources that the crop would otherwise acquire. *Agroforest. Syst.*, vol 34, p.27-31.
- Celette F., Wery J., Chantelot E., Celette J. et Gary C., 2005. Belowground interactions in a vine (*Vitis vinifera* L.)-tall fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system : water relations and growth. *Plant Soil*, n° 276, p.205-217.
- Čermák J., Deml M et Penka M., 1973. A new method of sap flow determination in trees. *Biol. Plant.*, vol 15, p.171-178.
- Čermák J. et Kučera J., 1981. The compensation of natural temperature gradient at the measuring point during the sap flow rate determination in trees. *Biol. Plant.*, vol 23, p. 469-471.
- Cienciala E., Kučera J. et Lindroth A., 1999. Long-term measurements of stand water uptake in Swedish boreal forest. *Agric. For. Meteorol.*, vol 98-99, p.547-554.
- Cienciala E., Kučera J. et Malmer A., 2000. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *J. Hydrol.*, vol 236, p.109-120.
- Clapp R.B. et Hornberger G.M., 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Wat. Resou. Res.*, vol 14, p.601-604.
- Clearwater M.J., Meinzer F.C., Andrade J. L., Goldstein G. et Hlobbrook M., 1999. Potential errors in measurements of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiol.*, vol 19, p.681-687.
- Cohen Y., 1991. Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap flow and meteorology approach. *Irrig. Sci.*, vol 12, p. 93-98.
- Cohen Y., Fuchs M. et Green C.C., 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell Environ.*, vol 4, p.391- 397.
- Conseil Oléicole International (COI), 1997. *Encyclopédie Mondiale de l'olivier*. Edt. Plaza et Janès, 479p.
- Corlett J.E., Ong C.K. et Black C.R., 1987. Microclimate modification in intercropping and alley cropping systems. In : Reifsnnyder W.S. et Darnhofer T.O. (Eds), *Meteorology and Agroforestry*. ICRAF, Neiroubi, Kenya, p.419-430.
- Couchat Ph., 1977. Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols. *Annales Agronomiques*, vol 28, p.477-488.
- Cooper P.J.M., Keatinge J.D.H. et Hughes G., 1983. Crop evapotranspiration - a technique for calculation of its components by field measurements. *Field Crop Res.*, vol 7, p.299-312.
- Crookston R.K., 1976. Intercropping, a new version of an old idea. *Crops Soils*, vol 28, p7-9.
- Daudet F.A. et Vachaud G., 1977. La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, vol 28, p.503-519.
- Daum C.R., 1967. A method or determining water transport in trees. *Ecology.*, vol 48, p.425-431.
- De Lorenzi F. et Rana G., 2000. Sap flow transpiration measurements in a table grape vineyard growing in southern Italy. *Acta Hort.*, vol 537, p.69-75.
- Dichio B., Xiloyannis C., Celano G., Arcieri M et Palese A.M., 1998. Flussi xilematici e consumi idrici in olivo in condizioni di diversa disponibilita idrica. *Proc of The*

- Convegno Nazionale "Irrigazione e Ricerca : Progressi nell'uso della risorsa acqua".
Bari, 1-2 october, p.84-90.
- Do F., Rocheteau A., Diagne A. L. et Grouzis M., 1998. Flux de sève et consommation en eau d'*Acacia tortillis* dans le Nord Ferlo. Dans "L'acacia au Sénégal » Orstom-Isra, 3-5 Décembre 1996, Dakar (Sénégal). Collection Colloques et Séminaires, Paris, p63-80.
- Do F. et Rocheteau A. 2002 a. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes.1. Field observations and possible remedies. *Tree Physiol.*, vol 22, n°9, p 641-648.
- Do F. et Rocheteau A. 2002 b. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes.2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiol.*, vol 22, n°9, p 679-654.
- Do F., 1987. Caractérisation spatiale de l'extraction racinaire par la mesure de flux de sève brute en conditions initiales d'humectation homogène du sol. DEA Option Sciences du sol, ENSA Montpellier- USTL Montpellier-INRA Montfavet, 41 p.
- Droppelemann K.J., Ephrat J.E. et Berliner P.R., 2000. Tree/crop complementarity in an arid zone runoff agroforestry system in northern Kenya. *Agroforest. Syst.*, vol 50, p.1-16.
- Dupraz C., Simorte V., Dauzat M., Berton G., Bernadac A. et Masson P., 1999. Growth and nitrogen status of young walnuts as affected by intercropped legumes in a Mediterranean climate. *Agroforest. Syst.*, vol 43, p.71-80.
- El Amami S., 1984. Les aménagements hydrauliques traditionnels de Tunisie. Ed. Centre de Recherche du Génie Rural, 69p.
- Evelt S.R. et Steiner J.L., 1995. Precision of neutron probe scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc Am. J.*, vol 59, p. 961-968.
- Ewel J.J. et Hagggar J.P., 1997. Primary productivity and resource partitioning in model tropical ecosystem. *Ecology*, vol 78, p.1211-1221.
- Ewers, B.E. et Oren, R., 2000. Analyses of assumption and errors in the calculation of stomatal conductance from sap flux measurements. *Tree Physiol.*, vol 20, p.579-589.
- Fayesse N., 2001. L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs. Des petits périmètres irrigués tunisiens aux prélèvements en rivière dans le bassin de l'Adour. Thèse Univ. Paris X Nanterre, 258p.
- Fernández J.E. et Moreno F., 1999. Water use by the olive tree. *J. Crop Prod.*, vol 2, n°2, p. 101-162.
- Fernández J.E., Moreno F., Giron I.F. et Blazquez O.M., 1997. Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant Soil.* vol 190, p.179-192.
- Fernández J.E., Palomo M.J., Diaz-Espejo A., Clothier B.E., Green S.R., Giron I.F. et Moreno F., 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnosis of water stress. *Agric. Water Manag.*, vol 51, p.99-123.
- Fernández J.E., Moreno F., Clothier B.E. et Green S.R., 1996. Aplicacion de la técnica de compensacion de pulso de calor a la medida del flujo de savia en olivo Proc of the XIV Congreso Nacional de Riegos. Aguadulce (Almeria), 11-13 juin, 1-7.
- Fernández J.E., Palomo M.J., Diaz-Espejo A., Giron I.F. et Moreno F., 1998. Measuring sap flow in olive trees: potentialities and limitations of the compensation heat pulse technique. Proc. of The 4th Workshop on Measuring Sap flow in intact plants. Zidlochovice, 3-4, November, 16p.
- Feuillette S., 2001. Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : Exploration des interactions Ressources/Usages par les systèmes Multi-Agents. Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, pp 344.
- Gardner W.R. et Kirkham F.J., 1952. Determining of soil moisture by neutron scattering method. *Soil Sci.*, vol 73, p.391-401.

- Giller K. E. et Wilson K. J., 1991. Nitrogen fixation in tropical cropping systems, C.A.B. International, Wallingford, U.K.
- Giorio P. et Giorio G., 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse by continuous of a single gauge. *Environ. Exp. Botany.*, vol 49, n° 1, 9-20.
- Giorio P., Sorrentino G. et D'Andria R., 1999. Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environ. Exper. Bot.*, vol 42, p.95-104
- Granier A., 1987a. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.*, vol 3, p.309-320.
- Granier A., 1987b. Mesure de flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Ann. Sci. For.*, vol 44, n°1, p.1-14
- Granier A., Bobay V., Gash J.H.S., Gelpe J., Saugier B. et Shuttleworth W.J., 1990. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les landes forest. *Agric. For. Meteorol.*, vol 51, p.309-319.
- Granier A., Biron P., Bréda N., Pontailier J.Y. et Saugier B., 1996. Transpiration of trees and forest stands : short and long-term monitoring using sapflow methods. *Global Change Biol.*, vol 2, p.265-274.
- Granier A., Biron P. et Lemoine. D., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in tow beech stands. *Agric. For. Meteorol.*, vol 100, p.291-308
- Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, vol 42 , n°2, p.193-200.
- Green S.R., McNaughton K.G. et Clothier B.E., 1998. Observations on night-time water use in kiwifruit vines and apple trees. *Agric. For. Meteorol.*, vol 48, p.251-261.
- Gutiérrez M.V., Harrington R.A., Meinzer F.C et Fownes J.H., 1994. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiol.*, vol 14, p.179-190.
- Hatton T. J. et Wu H. I., 1995. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use. *Hydrol. Proc.*, vol. 9, p.527-540.
- Hauggaard-Nielsen H., Andersen M.K., Jørnsgaard B. et Jensen E.S., 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field Crops Res.*, vol 95, p.256-267.
- Haverkamp R., Vauclin M, et Vachaud G., 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurement. 1. Local standpoint. *Soil Sci.*, vol 137, n°2, p.78-90.
- Hiebsch C.K. et McCollum R.E.,1987. Area-x-Time Equivalency Ratio: A method for evaluating the productivity of intercrops. *Agron. J.*, vol 79, p.15-22.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. New York, NY: Academic Press pp 413.
- Hogg E.H., et Hurdle P.A., 1997. Sap flow in trembling aspen : implications for stomatal responses to vapour pressure deficit. *Tree Physiol.*, vol 17, p.501-509.
- Holmes J.W., 1984. Measuring evapotranspiration by hydrological methods. *Agric. Water Manag.*, vol 8, p.29-40.
- Honeysett J.L., Beadle C.L., Turnbull C.R.A., 1992. Evapotranspiration and growth of two contrasting species of eucalyptus under non-limiting and limiting water availability. *For. Ecol. Manag.*, vol 50, p.203-216.
- Huber B. et Schmidt B., 1937. Eine Kompensationmethod zur thermoelektrischen Messung langsame Saftstroeme. *Dtsch. Bot. Ges. Ber.*, vol 55, p.514- 529.
- Huber B., 1932. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftstromme. *Dtsch. Bot. Ges. Ber.*, vol 50, p. 89-109.
- Huda A.K.S. et Ong C.K., 1989. Crop simulation models and some implications for agroforestry systems. In. *Meterology and Agroforestry* (Eds. W.E. Reifsnnyder et T.

- Darnhofer). Proceedings of ICRAF/WMO/UNEP Workshop on Application of Meteorology to agroforestry systems Planning and Management. ICRAF, Nairoubi, 115-124.
- Hulugalle N. R. et Lal R., 1986. Soil water balance of intercropped maize and cowpea grown in a tropical hydromorphic soil in western Nigeria. *Agron. J.*, vol 77, p.86-90.
- Huxley P.A., Pinney A., Akunda E. et Muraya P., 1994. A tree/crop interface orientation experiment with a *Grevillea robusta* hedgerow and maize. *Agroforest. Syst.*, vol 26, p. 23-45.
- Huxman T.E., Cable J.M., Ignace D.D., Eilits J.A., English N.B., Weltzin J. et Williams D.G., 2004. Response of hole ecosystem-and component CO₂ and H₂O exchange to an irrigation pulse in a semi-aride grassland: contrasting geomorphic surfaces and native/non native species communities, *Oecologia* doi: 10.1007/S00442-03-1389Y.
- IPCC, 2001. Climate Change : Synthesis Report, Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai Y., Maskel K. et Johnson C.A., Editors, 204p.
- Jackson N.A. et Wallace J.S., 1999. Soil evaporation measurements in an agroforstry system in Kenya. *Agric. For. Meteorol.*, vol 94, p.203-215.
- Jackson N.A., Smith D.M., Roberts J.M., Wallace J.S. et Ong C. K., 1998. Water balance of agroforestry systems on hillslopes-Phase II. Final technical report, 64 p.
- Jaillard B. et Luc J.P., 1979. Comparaison de la dynamique de l'eau entre trois parcelles à enracinement différents. *Bulletin du GFHN*, N°5, p.73-99.
- Jayawardane N.S., Meyer W.S. et Barrs H.D., 1983. Moisture measurement in a swelling clay soil using neutron moisture meters. *Aust. J. Soil Res.*, vol 22, p.109-117.
- Jensen M.E., Burman R.D. et Allen R.G. (Eds), 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. *ASCE Manuals n° 70*, 332p.
- Katerji N., Daudet F.A., et Valancogne C., 1984. Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance. *Agronomie*, vol 4, p.779-787.
- Kiniry J.R., Willilams J.R., Gassman P. W. et Debaeke P., 1992. A general, process-oriented model for two competing plant species. *Transactions of The ASAE*. 35., p.801-810.
- Köstner B., Granier A. et Čermák J., 1998. Sap flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. *Ann. Sci. For.*, vol 55, p.13-27.
- Lafolie F., Bruckler L., Ozier-Lafontaine H., Tournebize R. et Mollier A., 1999. Modeling soil-root water transport and competition for single and mixed crops. *Plant Soil*, vol 210, p.127-143.
- Leduc C., Beji R. et Calvez R., 2003. Les ressources en eau du barrage d'el Houareb et des nappes adjacentes, vallée du Merguellil, Tunisie Centrale. Actes de l'atelier du PCSI "Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant", 2 -3 décembre 2003, Montpellier, France.
- Lehmann J., Weigl D., Peter I., Goldbach, H., Gebauer G. et Zech W., 1999. Nutrient interactions of allay-cropped *Sorghum bicolor* and *Acacia saligna* with runoff irrigation in northern Kenya. *Plant Soil*, vol 210, p.249-262.
- Liu Y. et Zhang L., 2006. The quantitative evaluation of output efficiency in different cropping patterns. *Agricultural science in China*, vol 5, p.98-102.
- Loustau D., Granier A. et El Hadj Moussa F. 1990. Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. *Ann. Sci. For.* n° 21, p.599-618.
- Lu P. et Chacko E., 1998. Evaluation of Granier's sap flow sensor in young mango trees. *Agronomie*, vol 18, p. 461-471.
- Lu P., Muller W. et Chacko E., 2000. Spatial variations in xylem sap flow density in the trunk of orchard -grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiol.*, vol 20., p. 683-692.

- Lu P., Urban L. et Zhao P., 2004. Graniers's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, vol 46, n° 6, p. 631-646.
- Lu P., Woo K-C. et Liu Z-T., 2002. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *J. Exp. Bot.*, vol 53, n° 375, p.1771-1779.
- Luc J.P., 1978. Caractérisation hydrique des sols: utilisation des mesures d'humidité et de charge in situ, comparaison avec les mesures de laboratoire. Thèse de Docteur de Spécialité en Agronomie, option Pédologie, Université Des Sciences et Techniques du Languedoc, 169 p + Annexes.
- Lundblad M., Lagergren F. et Lindroth A., 2001. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce. *Ann. For. Sci.*, vol 58, p.625-638.
- Margolis H.A. et Ryan M.G., 1997. A physiological basis for biosphere -atmosphere interactions in the boreal forest: an over-view. *Tree Physiol.*, vol 17, p.491-499.
- Martin T.A., Hinckley T.M., Meinzer F.C. et Sprugel D.G., 1999. Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of *Abies amabilis* branches. *Tree Physiol.* vol 19, p.435-443.
- Masmoudi M.M., Abid Karray J., Charfi-Masmoudi C., 2004. Dispositif d'étalonnage des capteurs de flux de sève. Rapport interne, INAT, 6 p.
- Masmoudi M.M., Mahjoub I., Charfi-Masmoudi C., Abid Karray J. et Ben Mechlia N., 2004. Mise au point d'un dispositif de mesure du flux de sève xylémique chez l'olivier. *Revue Des Régions Arides, NS.*, p.242-251.
- Massai R., Remorini D., Ferreira M.I et Paco T.A., 2000. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. *Acta Hortic.*, n° 537, p.351-355.
- McNaughton, K. G. et Jarvis P. G., 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: *Water deficits and plant growth*, Academic Press, New York, 7, p.1-47.
- Michelakis N., 1995. Effet de la disponibilité en eau sur la croissance et le rendement des oliviers. *Olivae* n° 56, p.29-39.
- Monteith J.L., Ong C.K. et Corlett J.E., 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *For. Ecol. Manage.*, vol 45, p.31-44.
- Moreno F., Fernández J. E., Clothier B.E. et Green S.R., 1996. Transpiration and root uptake by olive trees. *Plant soil*, n° 184, p.85-96.
- Morris R. A. et Garrity D.R., 1993. Resource capture and utilization in intercropping : water. *Field Crops Res.*, vol 34, p.303-317.
- Mott K.A., Dene F. et Powell J., 1997. Interactions among stomata in response to perturbations in humidity. *Plant, Cell Environ.*, vol 20, p.1098-1107.
- Nadezhdina N., Čermak J., et Ceulmans R., 2002. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species : scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree physiol.*, vol 22, p.907-918.
- Nasr Z., 1987. Une nouvelle technique de pilotage de l'irrigation des arbres : mesure du flux de sève par des méthodes thermiques. *Mémoire de Fin d'étude*, 46p.
- Nicolas E., Torrecillas A., Ortuno M.F., Domingo R. et Alarcon J.J., 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agri. Water Manag.*, vol 72., p.131-145.
- O'brien J.J., Oberbauer S.F. et Clark D.B., 2004. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest. *Plant, Cell Environ.*, vol 27, p.551-567.

- Ong C. K., 1995. The 'dark side' of intercropping: manipulation of soil resources. In: Sinoquet, H., Cruz, P. (Eds.), *The Ecophysiology of Tropical Intercropping*. INRA Editions, Paris, pp 29-43.
- Ong, C. K., Black, C.R., Marshall, F.M., Corlett, J.E., 1996. Principles of resources capture and utilization of light and water. In : Ong, C.K., Huxley, P.A. (Eds.), *Tree-crop Interactions: a physiological approach*. CAB International, Wallingford, UK, p.73-158.
- Ong C.K., Black C.R., Wallace J.S., Khan A.A.H., Lott J.E., Jackson N.A., Howard S.B. et Smith D.M., 2000. Productivity, microclimate and water use in *Grevillea robusta*-based agroforestry systems on hillslopes in semi-arid Kenya. *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol 80, p.121-141.
- Ong C. K., Corlett J.E., Singh R. P. et Black C.R., 1991. Above and belowground interactions in agroforestry systems. *For. Ecol. Manage.*, vol 45, p.45-58.
- Ong C.K. et Swallow B.M., 2003. Water productivity in Forestry and Agroforestry. In "Water productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement". Edt. Kijne J.W., Barker R et Molden D., Sri Lanka, 352p.
- Ozier-Lafontaine H., Bruckler L., Lafolie F., Cabidoche Y.M., 1999 - Modelling root competition in mixed crops: A basic approach. In: H. Sinoquet et P.Cruz (Eds), *Ecophysiology of Tropical Intercropping*. INRA Editions, Paris, p.205-234.
- Ozier-Lafontaine H., Lafolie F., Bruckler L., Tournebize R. et Mollier A., 1998 - Modeling competition for water in intercrops : theory and comparison with field experiments. *Plant Soil*, vol 204, p.183-201.
- Osier-Lafontaine H., Bruckler L., Lafolie F., Tournebize R. et Mollier A. 2000. Modélisation de la compétition pour l'eau dans une association culturale : influence de la distribution des racines, des propriétés physiques du sol et de la répartition de la demande climatique. Dans « Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales ». Paris (France), 20-21 janvier 1998, p.459-480.
- Palliotti A.G., Bonghi G. et Rocchi P., 1994. Peltate trichomes effects on photosynthetic gas exchange of *Olea europea* L. leaves. *Plant Physiol.*, vol 13, p.35-44.
- Passioura J.B., 1983. Roots and drought resistance. *Agric. Water Manag.*, vol 7, p 265-280.
- Rana G. et Katerji N., 2000. Measurements and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *Eur. J. Agron.*, vol 13, p.125-153.
- Rose C.W., Sharma M.L., 1984. Summary and recommendation of the workshop on "Evapotranspiration from plant communities". *Agricult. Wat. Mang.*, vol 8, p.325-342.
- Ruiter, J.H., 1987. Growth, crop conductance and prediction of stem volume increment of irrigated and non-irrigated young radiate pine in non weighing lysimeters. *For. Ecol. Manage.*, vol 20, p.79-96.
- Sakuratani T., 1979. Apparent thermal conductivity of rice stems in relation to transpiration stream. *Jap. Agr. Meteorol.*, vol 34, p177-187.
- Sakuratani T., 1990. Measurement of the sap flow rate in stem of rice plant. *J. Agric. Meteorol.*, vol 45, p.277-280.
- Sillon J.F., Ozier-Lafontaine H., Brisson N., 2000 - Modeling daily root interactions for water in a tropical shrub and grass alley cropping system. *Agroforest. Syst.*, vol 49, p.131-152.
- Smith D.M. et Allen S.J., 1996. Measurement of sap flow in plant stems. *J. Exp. Bot.*, vol 47, n° 305, p.1833-1844.
- Stigter C.J. et Baldy Ch., 1995. Manipulation of the microclimate by intercropping: making the best of services rendered. In: Sinoquet, H., Cruz, P. (Eds.), *The Ecophysiology of Tropical Intercropping*. INRA Editions, Paris, pp 29-43.
- Steinberg S.L., McFarland M.J. et Worthington J.W., 1990. Comparison of trunk and brunch sap flow with canopy transpiration in Pecan. *J. Exp. Bot.*, vol 41, n° 227, p.653-659.

- Swanson R. H., 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agric. For. Meteorol.* n° 72 , p113-132.
- Teskey R.O. et Sheriff D.W., 1996. Water use by *Pinus radiata* trees in a plantation. *Tree Physiol.*, vol 16, p.273-279.
- Thornwaite C.W., 1948,. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr.Rev.*, vol 38, p.55-94.
- Thornwaite C.W. et Mather J.R., 1957. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. *Publications in Climatology*, X(3):185-198.
- Tuzet A., Perrier A., Castell J.F et Zurfluh O., 1995. Energy and water vapour transfers in a particular shrub-grass intercrop: the fallow savanna. In: Sinoquet, H., Cruz, P. (Eds.), *The Ecophysiology of Tropical Intercropping*. INRA Editions, Paris, p.137-152.
- Vertessy R.A., Benyoune R.G., O'Sullivan S.K. et Gribben P.R., 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiol.*, vol 15, p559-567.
- Villalobos F. J., Orgaz F., Testi L. et Fereres E., 2000. Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.*, vol 13, p.155-163.
- Wallace J.S., 1991. The measurement and modelling of evaporation from semi-arid land. In: *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. Proc.Niamey Workshop, February 1991. Ed. By Sivakumar M.V.K., Wallace J.S., Reanard C. et Giroux C., IAHS Pub n°199, p.131-148.
- Wallace J.S., 1995. Towards a coupled light partitioning and transpiration model for use in intercrops and agroforestry. In: Sinoquet, H., Cruz, P. (Eds.), *The Ecophysiology of Tropical Intercropping*. INRA Editions, Paris, p.153-162.
- Wallace J.S., Jackson N.A. et Ong C.K., 1995. Water balance of agroforestry systems on hillslopes. Research Project R4853, Final Report, 39p.
- Wallace J.S., Jackson N.A. et Ong C.K., 1999. Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya. *Agric. For. Meteorol.*, vol 94, p.189-202.
- Willey R.W., 1979. Intercropping- Its importance and research Needs. Part1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstracts.*, vol 32, n°1, p.1-10.
- Yunusa I.A.M., Wlaker R.R., Loveys B.R. et Blackmore D.H., 2000. Determination of transpiration in irrigated grapevines: comparison of the heat -pulse technique with gravimetric and microclimatological methods. *Irrig. Sci.*, vol 20, p.1-8.
- Zahar Y., 1997. Eléments d'hydrologie pour l'aménagement. Modélisation spatiale et temporelle des précipitations extrêmes et érosives en Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, Université Tunis I, 280 p.
- Zhang J. et Davies W.J., 1990. Changes in the concentration of ABA in the xylem sap as a function of changing soil water status can account for changes in leaf conductance and growth. *Plant Cell Environ.*, vol 13, p. 277-285.

ANNEXE 1

Formulation des transferts latéraux en absence de la culture intercalaire

1- Calcul du transfert latéral concernant le réservoir R1 (L_1)

Dans le cas d'une irrigation de l'olivier, le transfert latéral du réservoir R2 vers le réservoir R1 est défini par :

$$L_{2 \rightarrow 1} = 2k_{2,1}(l_t Z_r)(H_2 - H_1) \quad (\text{A1.1})$$

$L_{2 \rightarrow 1}$ est par la suite normalisé par la surface A_1 :

$$A_1 = w_c \times (l_t + l_s) \quad (\text{A1.2})$$

On obtient alors :

$$L_1 = \left[\frac{2l_t Z_r}{w_c (l_t + l_s)} \right] k_{2,1} (H_2 - H_1) \quad (\text{A1.3})$$

$$k_{2,1} = k_{1,2} = K(\theta_{1,2}) / \Lambda_{1,2} \quad (\text{A1.4})$$

2- Calcul du transfert latéral concernant le réservoir R3 (L_3)

En absence de pluie, le réservoir R3 est généralement plus sec que R2, ce qui crée un transfert latéral du réservoir R2 vers le réservoir R3 à travers la surface de ce dernier :

$$L_{2 \rightarrow 3} = 2k_{2,3}(w_t Z_r)(H_2 - H_3) \quad (\text{A1.5})$$

Le coefficient de transfert hydrique entre les réservoirs R2 et R3 étant :

$$k_{2,3} = K(\theta_{2,3}) / \Lambda_{2,3} \quad (\text{A1.6})$$

La teneur en eau moyenne sera pondérée de la façon suivante :

$$\theta_{2,3} = (l_t \theta_2 + l_s \theta_3) / (l_t + l_s) \quad (\text{A1.7})$$

Comme pour les cas précédents on aura :

$$\Lambda_{2,3} = (l_t + l_s) / 4 \quad (\text{A1.8})$$

Le flux latéral L_3 sera calculé alors par :

$$L_3 = 2k_{2,3}(Z_r / l_s)(H_2 - H_3) \quad (\text{A1.9})$$

3- Calcul du transfert latéral concernant le réservoir R2 (L_2)

Le transfert latéral d'eau quittant le réservoir R2 pour les réservoirs R1 et R3 peut exister suite à une irrigation. Le flux L_2 est défini par l'équation :

$$L_2 = -(L_{2 \rightarrow 1} + L_{2 \rightarrow 3}) / A_2 \quad (\text{A1.10})$$

avec :

$$L_{2 \rightarrow 1} = 2k_{2,1}(Z_r l_t)(H_2 - H_1) \quad (\text{A1.11})$$

$$L_{2 \rightarrow 3} = 2k_{2,3}(Z_r w_t)(H_2 - H_3) \quad (\text{A1.12})$$

Avec $A_2 = w_t \times l_t$, on obtient alors :

$$L_2 = -2Z_r \left[k_{2,1}(H_2 - H_1) / w_t + k_{2,3}(H_2 - H_3) / l_t \right] \quad (\text{A1.13})$$

ANNEXE 2

Étalonnage des sondes à neutrons

Les figures A2.1.a,b ; A2.2.a,b et A3.3.a,b montrent les courbes d'étalonnage : comptage corrigé par mesure "point eau" en fonction de l'humidité volumique pour les 3 sondes utilisées (S1, S2 et S3) dans cette étude. L'humidité volumique est calculée à partir des mesures de l'humidité pondérale effectuées sur des échantillons prélevés à la tarière à deux reprises : en conditions sèches et humides (obtenues avec des apports d'eau pratiqués sur les lieux de prélèvement). La régression linéaire entre le comptage neutronique corrigé (Nc) et l'humidité volumique (θ en %) est de la forme :

$$\theta = aNc + b \quad (A2.1)$$

Pour tous les sites, nous avons séparé les étalonnages de l'horizon de surface (0-20 cm) de ceux des horizons plus profonds. D'où, deux relations linéaires sont obtenues pour chaque sonde : une pour l'horizon de surface et une deuxième pour les horizons plus profonds.

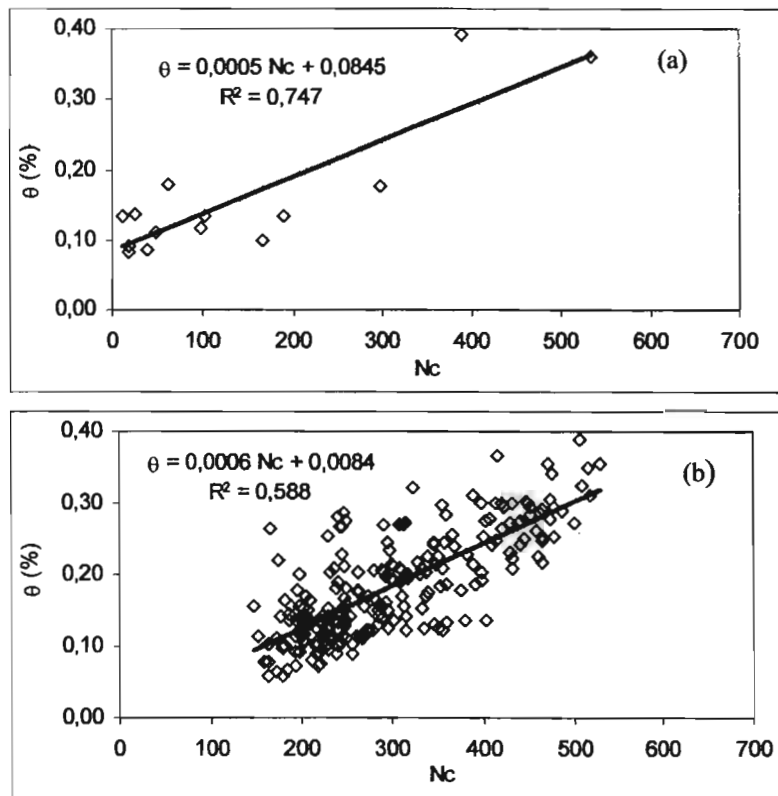


Figure A2.1. Etalonnage gravimétrique de la sonde à neutrons S1 (a) en surface (de 10 à 20 cm) et (b) en profondeur (20 à 260 cm).

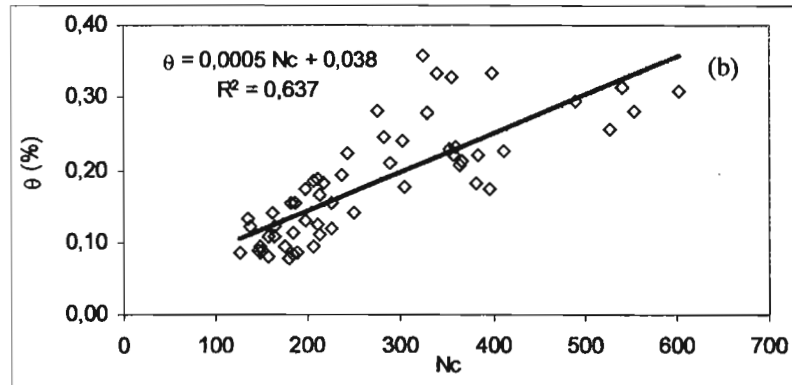
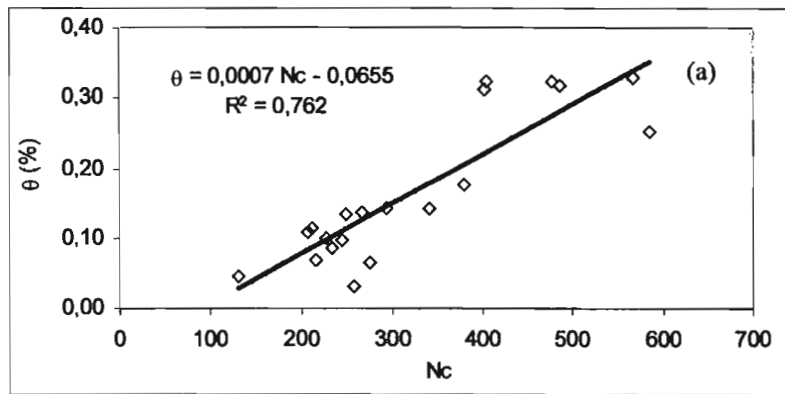


Figure A2.2. Etalonnage gravimétrique de la sonde à neutrons S2 (a) en surface (de 10 à 20 cm) et (b) en profondeur (de 20 à 260 cm)

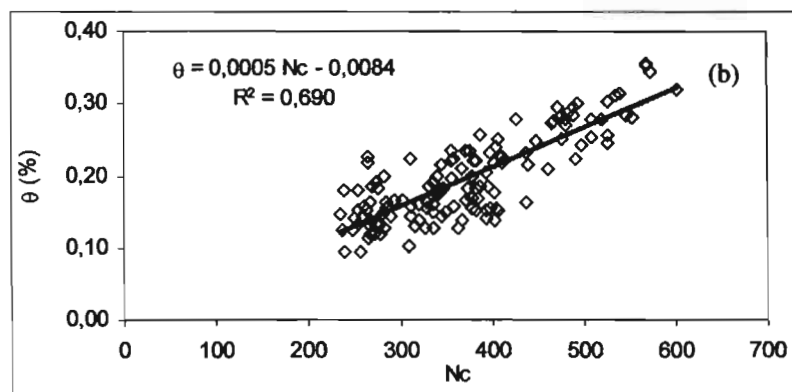
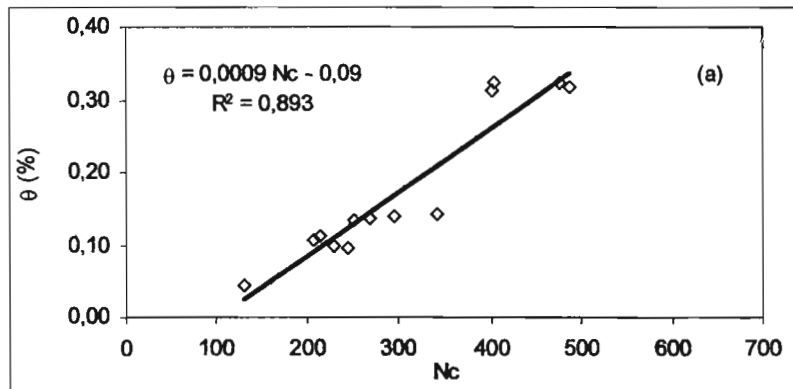


Figure A2.3. Etalonnage gravimétrique de la sonde à neutrons S3 (a) en surface (de 10 à 20 cm) et (b) en profondeur (de 20 à 260 cm).

ANNEXE 3

Estimation de la densité du flux de sève moyenne de l'olivier

Les régressions linéaires simples et multiples (avec coefficient constant égal à zéro) présentées dans les tableaux A3.1, A3.2 et A3.3 ont été utilisées pour l'estimation de la densité du flux de sève moyenne de l'olivier (4 arbres) à partir d'un arbre ou plus.

Tableau A3.1. Coefficients (a) et R² des régressions simples entre le flux de sève moyen et le flux de sève mesuré par un arbre : $F_{dm} = a F_{d-Ai}$

	a	R ²
A1	1.02	0.88
A2	0.98	0.68
A3	1.04	0.89
A4	0.94	0.90

Tableau A3.2. Coefficients (a, b) et R² des régressions multiples entre le flux de sève moyen et le flux de sève mesuré sur deux arbres : $F_{dm} = aF_{d-Ai} + bF_{d-Aj}$

	a	b	R ²
A1, A2	0.67	0.34	0.96
A1, A3	0.49	0.55	0.96
A1, A4	0.45	0.53	0.94
A2, A3	0.32	0.71	0.95
A2, A4	0.34	0.62	0.98
A3, A4	0.50	0.49	0.94

Tableau A3.3. Coefficients (a, b, c) et R² des régressions multiples entre le flux de sève moyen et le flux de sève mesuré sur trois arbres : $F_{dm} = aF_{d-Ai} + bF_{d-Aj} + cF_{d-Ak}$

	a	b	c	R ²
A1, A2, A3	0.39	0.24	0.40	0.99
A2, A3, A4	0.29	0.26	0.43	0.99
A3, A4, A1	0.43	0.21	0.38	0.97
A1, A2, A4	0.26	0.29	0.42	0.99

ANNEXE 4

Paramètres d'entrée du modèle

Les paramètres d'entrée du modèle ont été mesurés ou tirés de la bibliographie (Clapp et Hornberger, 1978 ; Allen et al., 1998). Ceux concernant le sol et la géométrie des trois réservoirs du système sont donnés dans les tableaux A4.1. et A4.2 Les valeurs du coefficient cultural K_c de la culture de pomme de terre et du petit pois ainsi que les durées des phases phénologiques sont présentées dans le tableau A4.3.

Tableau A 4.1. Caractéristiques du sol du système

θ_{CC} ($m^3 m^{-3}$)	θ_{PFP} ($m^3 m^{-3}$)	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	b	H_s (m)	K_s ($m j^{-1}$)	EFE (mm)
0.23	0.125	0.41	4.38	0.018	13.507	8

Tableau A 4.2. Dimensions du système

l_t (m)	l_s (m)	w_t (m)	w_c (m)	Z_r (m)
3.6	2.7	3.7	6.5	1.25

Tableau A 4.3. Valeurs du K_c et de la durée des phases de chaque culture (j)

Culture	$K_{c,i}, K_{c,m}, K_{c,e}$	L_i, L_d, L_m, L_e
Pomme de terre de printemps	0.5 ; 1.15 ; 0.75	25 ; 30 ; 36 ; 30
Pomme de terre d'automne	0.5 ; 1.15 ; 0.75	20 ; 25 ; 30 ; 30
Petit pois de printemps	0.5 ; 1.15 ; 1.1	15 ; 30 ; 30 ; 17

$K_{c,i}$: K_c de la phase initiale, $K_{c,m}$: K_c de la phase de développement, $K_{c,e}$: K_c de fin de culture
 L_i : durée de la phase initiale, L_d : durée de la phase de développement, L_m : durée de la phase mi-saison,
 L_e : durée de la phase fin de saison

RESUMÉ

Le système de cultures intercalaires est généralement utilisé afin d'assurer une utilisation efficace de l'eau. Cette étude, conduite en Tunisie Centrale au niveau d'une association olivier-culture maraîchère, a pour objectif la quantification et la modélisation des transferts hydriques entre les différentes composantes de ce système se basant sur la méthode du bilan hydrique. Le système étudié a été subdivisé en 3 sous-unités occupées respectivement par la culture intercalaire, l'olivier et l'inter-rang maintenu en sol nu. Trois campagnes de cultures ont été suivies: deux cultures printanières (pomme de terre et petit pois) et une culture automnale (pomme de terre). L'approche de modélisation, basée sur l'équation du bilan hydrique, tient compte des flux latéraux entre les sous-unités. L'évolution du stock hydrique montre que l'olivier puise dans le réservoir de la culture et dans celui du sol nu. Des mesures du flux de sève sur quatre arbres munis chacun de 3 capteurs ont montré une variabilité intra et inter-arbre. La moyenne des densités des flux représente la transpiration de l'olivier à l'échelle du verger. Les résultats de la modélisation des transferts hydriques ont montré une assez bonne adéquation aux mesures dans le cas où les flux hydriques latéraux entre réservoirs sont pris en compte. Ce travail apporte des éléments tant sur le plan de l'expérimentation que sur celui de la modélisation du fonctionnement hydrique d'un système de cultures intercalaires. Ces approches sont transposables à d'autres associations.

ABSTRACT

Intercropping system is usually adopted to improve water use efficiency. This study, was conducted in Central Tunisia and concern the intercrop olive/annual crop. Its objective is to quantify and to model water transfers between the system components using water balance method. The system was divided into 3 subunits occupied respectively by the annual crop, olive tree and the inter-alley kept as bare soil. Three crop cycles were studied: two spring crop (potatoes and peas) and one fall crop (potatoes). The modeling approach is based on water balance takes into account lateral flows between subunits. Water content evolution indicates that olive tree takes water from crop reservoir and also from bare soil to a lesser extent. Sap flow measurements on 4 trees each one equipped with 3 probes have shown inter and intra variability. Mean sap flow density was used to estimate stand transpiration. Model outputs agreed rather well with measurements when lateral flow are taken into account. This study provides new elements on modeling water transfer in intercropping system which can be transposable to other intercropping system.