

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département: Génie Civil et Hydraulique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدينة و الري
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : HYDRAULIQUE
Spécialité (Option) : Sciences HYDRAULIQUES

**Gestion de la contrainte de l'irrigation en
goutte à goutte avec la double gaine enterrée
sur un verger de pommier de type Gala**

Présentée par :

CHENAFI Azzeddine

Soutenue publiquement le 15 Février 2017

Devant le jury composé de :

Dr. BOUZIANE Mohamed Toufik	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. BOUDOUKHA Abderrahmane	Professeur	Rapporteur	Université de Batna
Dr. CARLEN Christoph	Directeur de recherche	Co-Rapporteur	IPV Conthey Suisse
Dr. HOUICHI Larbi	Professeur	Examineur	Université de Batna
Dr BEDJAOUI Ali	Maître de conférences	Examineur	Université de Biskra
Dr. BOUZERZOUR Hamena	Professeur	Examineur	Université de Sétif

المخلص

تتناول هذه الدراسة تأثير السقي الناقص المنظم (س ن م) بتطبيقات سقي الماء بالتنقيط على مردود وزن و جودة الفواكه ايضا على العلاقة بين الماء والتربة والنبات. اربعة معالجات تم تطبيقها على شجرة التفاح (نوع Gala) في عامي 2010 و 2011. المعالجة الأولى عينة من الأشجار غير مسقية لمدة ثلاث مراحل من فترة نمو الثمار (ف ن ث I, II و III). المعالجة الثانية سقي الكامل في (ف ن ث I, II و III), المعالجة الثالثة السقي الكامل في (م ن ف I و III) وعدم السقي في (ف ن ث II), المعالجة الرابعة السقي الكامل اثناء (ف ن ث I و III) و (س ن م) اثناء (ف ن ث II). إن نظم السقي لم يكن لها تأثير نوعي على مردود الفواكه وعليه مقارنة للسقي الكامل في المعالجة الثانية و (س ن م) في المعالجة الرابعة فإن عدم السقي في الصيف للمعالجة الأولى والثانية يؤدي قدرة امتصاص ضعيفة في لحاء الشجر ($\Psi_x < -1,2 \text{ MPa}$) ونقص في وزن الفواكه بالمقابل زيادة في نسبة السكر في الفاكهة. إن عملية (س ن م) في المعالجة الرابعة توفر 47% من المياه مقارنة بالسقي الكامل في المرحلة الثانية, بدون اثار سلبية على مردود وجودة الفواكه. إن تطبيق السقي الناقص المنظم يعتبر استراتيجية ناجحة في المناطق ذات الأماكن ذات الإمكانيات المائية المحدودة.

الكلمات المفتاح: Aquapro, التفاح شجرة, الوضعية المائية للتربة, المردود, حجم الفاكهة.

Résumé

Cette étude examine l'effet de l'irrigation déficitaire régulée (IDR), avec des applications d'eau en goutte à goutte enterré, sur le rendement en fruits, le poids des fruits, et la qualité des fruits, ainsi que sur les relations hydriques entre sol et plante. Quatre traitements ont été appliqués aux pommiers (cv. 'Gala') en 2010 et 2011. T1, témoin non irrigué durant les trois périodes de croissance du fruit (PCF I, II et III); T2; irrigation de confort durant PCF I, II et III, T3; irrigation de confort durant PCF I et III et non irrigué en PCF II, T4; irrigation de confort durant PCF I et III et IDR durant PCF II. Les régimes d'irrigation n'ont eu aucun impact significatif sur le rendement en fruits. Toutefois, par rapport à l'irrigation de confort T2 et IDR (T4), l'absence d'irrigation en été (T1, T3) induit des potentiels du xylème bas ($\Psi_x < -1,2 \text{ MPa}$) et une diminution du poids des fruits. Par contre, les teneurs en sucre, sont tendanciellement augmentées. Le procédé IDR T4 a économisé 47 % d'eau par rapport à l'irrigation de confort T2, sans effets négatifs sur le rendement et la qualité des fruits. Dans des vergers de pommiers, l'application de l'irrigation déficitaire régulée pendant la deuxième phase de croissance des fruits peut être considérée comme une stratégie utile dans les zones où les ressources en eau sont limitées.

Mots clés: Aquapro, pommier, statut hydrique du sol, rendement, calibre des fruits.

Abstract

This study examines the effect of regulated deficit irrigation (RDI) on fruit yield, fruit weight and fruit quality parameters, as well as soil-plant water relations, in apple orchards under subsurface drip irrigation. Four irrigation treatments were applied in 2010 and 2011 to apple trees (cv. 'Gala'): T1, no irrigation during the three growth period (FGP I, FGP II and III); T2, comfort irrigation during (FGP I, FGP II and III); T3, comfort irrigation during (FGP I and III) and no irrigation during FGP II; T4; comfort irrigation during (FGP I and III) and RDI during FGP II. The irrigation treatments had no significant impact on fruit yield. However, compared with optimal irrigation (T2) and RDI (T4), the absence of irrigation in summer (T1, T2) induced low $\Psi_x (< -1.2 \text{ MPa})$, decreased fruit size and slightly increased the soluble solid. The RDI treatment saved 47% water compared with comfort irrigation without negative impacts on yield and fruit quality. In apple orchards, the application of regulated deficit irrigation during the second fruit growth period can be considered a useful strategy in areas where water resources are limited.

Keywords: Aquapro, apple, soil water status, yield, fruit weight.

REMERCIEMENTS

Une thèse, bien qu'elle soit individuelle, est avant tout un travail de réflexion collective, donc au terme de ce travail, il m'est à la fois un plaisir et un devoir de remercier sincèrement toutes les personnes ayant participé à sa réalisation.

Je tiens tout d'abord, à remercier mon directeur de thèse Mr Abderrahmane BOUDOUKHA, professeur à l'université de Batna pour ses conseils très constructifs et pour l'aide qu'il m'a apporté pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier beaucoup le Dr Christoph CARLEN, Responsable de division de recherche de l'Institut des sciences en production végétale IPV Conthey (Suisse) qui a bien voulu accepter la charge de co-diriger cette thèse; sa rigueur, ses nombreuses suggestions et ses conseils éclairés m'ont été d'un précieux concours pour valoriser les résultats obtenus ainsi qu'a la rédaction des articles. Je ne dois pas oublier sa grande disponibilité, son accueil chaleureux, son savoir faire et que grâce à lui j'ai pu effectuer ce stage dont de meilleures conditions. Je le remercie aussi pour sa contribution à la rédaction du présent manuscrit, ainsi que les articles en anglais et en français. Sans oublier surtout la prise en charge financière du matériel de l'expérimentation et de mon bon séjour au Centre de Recherche de Conthey, qui m'ont été d'une précieuse aide et qu'il trouve ici le témoignage de mon grand respect.

J'adresse mes vifs remerciements à monsieur Jean-Philippe Mayor, Chef suppléant Agroscope et Responsable de l'institut des sciences en production végétale (Suisse) pour m'avoir accepté en stage et de co-financer ma thèse de doctorat.

Je dois remercier et exprimer ma plus sincère reconnaissance et toute ma sympathie à Philippe MONNEY chercheur à l'IPV (Suisse) pour ses conseils très constructifs le long de mon stage. Il a su me guider dans un sujet riche tout en m'accordant sa confiance. Ses compétences et son enthousiasme scientifiques ont été des sources permanentes de soutien et de motivation. Je ne dois pas oublier sa disponibilité avec moi en permanence sur le terrain, ses orientations scientifiques grâce à lui, j'ai pu faire l'expérimentation et finaliser le travail de ma thèse de doctorat.

Mes remerciements les plus sincères pour Dr ARIGONI Eva pour sa contribution dans les deux articles tout le temps qu'elle a consacré sur les analyses des polyphénols, Je remercie vivement Maria CEYMANN pour les essais sur les polyphénols et Martin HEIRI pour la vitamine C.

Je remercie vivement Danilo CHRISTEN responsable à l'Institut des sciences en production végétale IPV Conthey (Suisse) pour tout ce qu'il m'a apporté lors de nos discussions scientifiques. Son goût profond pour une science claire et rigoureuse et son dynamisme époustouflant m'ont beaucoup marqué.

Je ne peux oublier Dr Cédric CAMPS de l'IPV Conthey (Suisse), pour ses conseils avisés et la pertinence de ses analyses m'ont permis de faire avancer ce travail. Son approche des questions scientifiques restera pour moi un exemple. Je le remercie très chaleureusement.

Mes plus vifs remerciements vont également au Dr ZUFFEREY Vivian physiologiste pour ses conseils très constructifs, son soutien moral et scientifique m'été d'un apport bénéfique pour la réalisation de mon travail. Un grand merci aux différents collaborateurs de l'Institut des sciences en production végétale IPV Conthey (Suisse) qui ont pu m'apporter leur aide quant j'en ai eu besoin. Je pense plus particulièrement à Pierre-Yves Cotter et à Jean-Pierre Siegrist pour l'analyse des fruits.

Merci également à Fabienne, Véronique, Pierre Jeltsch, Emmanuel Chassot et Gérard Devènes de l'IPV Conthey (Suisse) pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportés lors de la récolte des fruits et le traitement de la parcelle sans oublier Jonathan El Assad pour le potentiel foliaire. Mes vifs remerciements à l'équipe du laboratoire des analyses des sols d'Agroscope Changins-Wädenswil ACW (Suisse).

Je tiens à remercier très sincèrement Isabelle AVIOLAT et Chantal CHASSOT de l'IPV Conthey (Suisse) de mettre à ma disposition toute la documentation nécessaire se trouvant à la bibliothèque.

J'adresse également mes remerciements à tout le personnel de l'IPV Conthey (Suisse).

Je suis très honoré que Monsieur BOUZIANE Mohamed Toufik, Professeur à l'Université de Biskra qu'il ait voulu accepter de présider mon jury et je l'en remercie.

Je suis très honoré que Mr BOUZERZOUR Hamena, professeur à l'Université de Sétif, Mr HOUICHI Larbi, professeur à l'Université de Batna et Mr BEDJAOUI Ali Maître de conférences à l'université de Biskra qu'ils aient bien voulu accepter d'être les examinateurs. Leurs compétences dans le domaine me sont d'un concours précieux pour améliorer et valoriser les résultats obtenus.

Enfin, à ma femme et à mes parents pour leur soutien toujours inconditionnel. Je ne crois pas leurs avoir déjà dit à quel point ils me sont précieux.

AVANT PROPOS

Cette thèse de doctorat délivrée par l'Université Mohamed Khider – Biskra-Algérie a été réalisée à l'Institut des Sciences en Production Végétale IPV Conthey, Station de Recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW (Suisse), sous la direction du professeur Abderrahmane BOUDOUKHA et du directeur de recherche Christoph CARLEN. Ce travail a été rendu possible grâce à un co-financement du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique (Algérie) dans le cadre d'une bourse de longue durée et de l'Institut des Sciences en Production Végétale IPV Conthey, Station de Recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW (Suisse).

Valorisation scientifique des résultats obtenus :

Communication nationale sous forme orale

Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Danilo Christen, Abderrahmane Boudoukha, Christoph Carlen. (2012, Mai 29, 30). Effets des différentes stratégies d'irrigation du pommier (Gala) sur le statut hydrique du sol et de la plante. *Séminaire national, L'irrigation en Algérie Enjeux et Perspectives, Chlef*, p. 32.

Communications internationales présentées sous forme orale

1. Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Danilo Christen, Abderrahmane Boudoukha, Christoph Carlen. (2012, Octobre 10-12). Impact de l'irrigation déficitaire du pommier sur le statut hydrique du sol et de la plante. *6^{ème} Conférence Internationale. Ressource en eau dans le bassin méditerranéen. Sousse, Tunisie*,
2. Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Danilo Christen, Abderrahmane Boudoukha, Christoph Carlen. (2012, Novembre 14-16). Réponse du pommier (gala) à l'irrigation déficitaire régulée durant la deuxième période de croissance du fruit. *"1^{er} colloque international REZAS'12", Ressources en eau dans les zones arides et semi-arides. Enjeux et perspectives. Cas du continent africain, Béni-Mellal, Maroc*, volume 141.
3. Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Danilo Christen, Abderrahmane Boudoukha, Christoph Carlen. (2013, Février 24-25). Seuils limites du potentiel hydrique du xylème du tronc en irrigation déficitaire du pommier. *5^{ème} colloque international, Ressources en eau et Développement Durable, Alger, Algérie*, pp 330-334.

4. Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Danilo Christen, Abderrahmane Boudoukha, Christoph Carlen. (2013, Avril 8-9). L'irrigation déficitaire régulée du pommier: une stratégie utile dans les pays pauvre en eau. *Rencontre des Sciences Géomatiques. Rabat Maroc.* p 50.
5. Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Danilo Christen, Houria Chennafi, Abderrahmane Boudoukha, Christoph Carlen. (2013, Novembre 13-15). La réponse du pommier a l'irrigation déficitaire en goutte a goutte souterraine sur le rendement et l'économie de l'eau. *7ème Edition des Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement - JIGE7- Béni-Mellal, Maroc.*
6. Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Danilo Christen, Houria Chennafi et Abderrahmane Boudoukha, Christoph Carlen. (2013, Novembre 13-15). L'irrigation déficitaire régulée: une stratégie prometteuse utile dans les pays ou les ressources en eau sont limitées. *7ème Edition des Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement - JIGE7- Béni-Mellal, Maroc.*

Publications internationales

1. Azzeddine CHENAFI, Philippe MONNEY, Maria CEYMANN, Eva ARRIGONI, Abderrahmane BOUDOUKHA et Christoph CARLEN. (2013). Influence de l'irrigation déficitaire sur le rendement, qualité de pommes 'Gala' et l'économie en eau. *Revue Suisse de viticulture arboriculture horticulture (RSVAH)*, 45 (2), 92-101.
2. A. Chenafi, C. Carlen, A. Boudoukha, A. Hofer and P. Monney. (2014). Evaluation of Regulated Deficit Irrigation for Apple Trees cv. Gala based on Midday Stem Water Potential and Soil Matrix Potential. *Acta Horticulturae (ISHS)* 1038:137-144.
3. Azzeddine Chenafi, Philippe Monney, Eva Arrigoni, Abderrahmane Boudoukha et Christoph Carlen. (2016). Influence of irrigation strategies on productivity, fruit quality and soil-plant water status of subsurface drip irrigated apple trees. *Fruits*, 2016, vol. 71(2), p. 69-78.

Distinction : Prix publications 2013 Suisse.

Azzeddine CHENAFI, Philippe MONNEY, Maria CEYMANN, Eva ARRIGONI, Abderrahmane BOUDOUKHA et Christoph CARLEN. (2013). Influence de l'irrigation déficitaire sur le rendement, qualité de pommes 'Gala' et l'économie en eau. *Revue Suisse de viticulture arboriculture horticulture*, 45 (2), 92-101.

L'article ci-dessus classée 2^{ème} à l'échelle de la Suisse dans la "catégorie technico-scientifique

Sommaire

Résumé.....	i
REMERCIEMENTS	ii
AVANT PROPOS.....	iv
Liste des abréviations	x
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xv
Introduction Générale.....	1
Plan du manuscrit	3
CHAPITRE I REVISION BIBLIOGRAPHIQUE ET OBJECTIFS.....	5
I. 1 Eau en agriculture	5
I. 1. 1 Problématique de l'eau à travers le monde.....	5
I. 1. 2 Importance de l'eau en agriculture	6
I. 2 Impact du changement climatique sur les ressources en eau	6
I. 3 Gestion de l'eau en agriculture.....	8
I. 4 Réponse des cultures au stress hydrique	8
I. 5 Botanique et importance du pommier.....	10
I. 5. 1 Présentation générale du pommier.....	10
I. 5. 2 Importance du pommier.....	11
I. 5. 3 Variétés du pommier.....	12
I. 6 Origines et caractéristiques du pommier (Gala)	13
I. 6. 1 Origine du pommier.....	13
I. 6. 2 Caractéristiques du pommier (Gala)	13
I. 6. 3 Principaux ennemis du pommier	14
I. 7 Cycle de développement du pommier.....	14
I. 7. 1 Différentes phases de croissance du fruit.....	14
I. 7. 1. 1 Première phase de croissance du fruit.....	15
I. 7. 1. 2 Deuxième phase de croissance du fruit.....	16
I. 7. 1. 3 Troisième phase de croissance du fruit	16
I. 7. 1. 4 Quatrième phase de croissance du fruit	17
I. 7. 1. 5 Cinquième phase de croissance du fruit.....	17
I. 8 Structure et croissance du pommier	17
I. 8. 1 Structure des inflorescences :.....	17
I. 8. 2 Système racinaire et porte-greffe	18
I. 8. 3 Stades phénologiques du pommier	18

I. 9 Pollinisation et production en fruit	21
I. 10 Éclaircissage des arbres fruitiers:.....	21
I. 10. 1 Éclaircissage chimique.....	21
I. 10. 2 Éclaircissage mécanique	22
I. 10. 3 Éclaircissage manuel.....	22
I. 11 Les besoins en eau du Pommier	22
I. 11. 1 Détermination de l'évapotranspiration potentielle.....	22
I. 12 L'arboriculture suisse	24
I. 13 Appréciation de l'état hydrique du pommier	24
I. 14 Bilan hydrique	25
I. 14. 1 Expression du bilan hydrique et rôle des différents termes	25
I. 15 Déficit de pression de vapeur.....	26
I. 15. 1 Déficit de pression de vapeur actuel DPV	27
I. 16 Le déficit hydrique des plantes	28
I. 17 L'irrigation en goutte à goutte souterraine (IGGS)	28
I. 18 Les différentes stratégies d'irrigation	29
I. 18. 1 L'irrigation de confort	29
I. 18. 2 L'irrigation déficitaire	30
I. 18. 3 L'irrigation déficitaire régulée (IDR)	31
I. 18. 4 Le séchage partiel de la zone des racines (SPR).....	33
I. 19 Les indicateurs du stress hydrique	33
I. 19. 1 Statut hydrique du sol.....	33
I. 19. 1. 1 La teneur en eau du sol.....	34
I. 19. 1. 2 Le potentiel hydrique du sol.....	34
I. 19. 2. Statut hydrique de la plante.....	34
I. 19. 2. 1 Le potentiel hydrique foliaire.....	34
I. 19. 2. 2 Les échanges gazeux.....	35
I. 19. 2. 3 La Dendrométrie et la circulation de la sève.....	36
I. 20 Les effets du stress hydrique sur la qualité physico-chimique des fruits.....	36
I. 21 Synthèse bibliographique et objectifs de la thèse	37
Chapitre II Statut hydrique du sol	39
II. 1 Caractéristiques physiques d'un sol	39
II. 2 Le sol et les éléments fertilisants pour les arbres fruitiers.....	39
II. 2. 1 Besoins en éléments nutritifs des arbres fruitiers	40
II. 2. 1. 1 Éléments majeurs en éléments nutritifs des arbres fruitiers.....	40
II. 2. 1. 2 Carences en éléments nutritifs des arbres fruitiers	41
II. 3 État de l'eau dans le sol.....	41

II. 4 État hydrique du sol	42
II. 4. 1 Potentiel hydrique du sol	43
II. 4. 1. 1 Mesure du potentiel hydrique du sol par les tensiomètres.....	43
II. 4. 1. 2 Mesure du potentiel hydrique du sol	44
II. 4. 2 Teneur en eau du sol.....	44
II. 4. 2. 1 Méthode détermination de la teneur en eau du sol	45
II. 4. 2. 1. 1 Mesure de la teneur en eau du sol par les sondes capacitives	45
II. 5 Matériels et méthodes:.....	46
II. 5. 1 Caractéristiques pédologique de la parcelle	46
II. 5. 2 Caractérisation du système racinaire et réserve en eau du sol.....	47
II. 5. 2. 1 Profil racinaire	47
II. 5. 3 Conditions de l'expérimentation	48
II. 5. 4 Matériel végétal	48
II. 5. 5 Différentes stratégies d'irrigation.....	49
II. 5. 6 Technique d'irrigation.....	49
II. 5. 7 Station de tête et réseau d'irrigation.....	50
II. 5. 7. 1 Programmateur d'arrosage	50
II. 5. 7. 2 Réseau d'irrigation	51
II. 5. 8 Planning des irrigations	52
II. 5. 9 Mesure du statut hydrique du sol.....	53
II. 5. 9. 1 Potentiel hydrique du sol	53
II. 5. 9. 2 Mesure de la teneur en eau du sol par la sonde Aquapro.....	55
II. 6 Résultats et discussion	56
II. 6. 1 Caractéristiques physico-chimiques du sol et régime d'irrigation	56
II. 6. 2 Evapotranspiration potentielle et déficit de pression de vapeur	58
II. 6. 3 Déficit pluviométrique cumulé	60
II. 6. 4 Statut hydrique du sol	61
II. 6. 4. 1 Potentiel hydrique du sol	61
II. 6. 4. 2 Teneur en eau du sol	63
Conclusion.....	68
Chapitre III Statut hydrique de la plante	70
III. 1 État hydrique de la plante.....	70
III. 2 Potentiel hydrique du xylème du tronc du pommier	70
III. 3 Matériels et méthodes.....	71
III. 3. 1 Site de l'expérimentation	71
III. 3. 2 Matériel végétal et type de sol.....	72
III. 3. 4 Mesure des paramètres physiologiques	73

III. 3. 4. 1 Potentiel hydrique du xylème du tronc des arbres fruitiers.....	73
III. 4 Procédés et dispositif expérimental.....	74
III. 5 Suivi du grossissement du diamètre du tronc des arbres fruitiers	75
II. 6 Différentes stratégies d'irrigation.....	75
III. 7 Analyse des données	75
III. 8 Résultats et discussion.....	75
III. 8. 1 Statut hydrique de la plante.....	75
III. 8. 2 Relation entre le déficit de pression de vapeur et l'ETP	80
III. 8. 3 Relation entre le potentiel hydrique du xylème du tronc et le déficit de pression de vapeur d'eau	81
III. 8. 4 Relations entre la teneur en eau du sol le potentiel hydrique du sol et le potentiel hydrique de base.....	83
III. 8. 5 Relation entre la TES, le potentiel hydrique du sol et le potentiel hydrique du xylème....	85
Conclusion.....	87
Chapitre IV Qualité physico-chimique des fruits.....	89
IV. 1 Différentes qualités physico-chimique des fruits.....	89
IV. 2 Effets de l'irrigation déficitaire régulée sur la qualité physico-chimique des pommes	89
IV. 3 Influence de l'irrigation déficitaire régulée sur la fermeté, la teneur en sucre, l'acidité et la couleur du fruit	91
IV. 3. 1 Fermeté du fruit.....	91
IV. 3. 2 Teneur en sucre du fruit	91
IV. 3. 3 Acidité des fruit.....	91
IV. 4 Détermination des dates de cueillettes	92
IV. 4. 1 Maturation du fruit.....	92
IV. 4. 2 Phase de maturation du fruit	92
IV. 5 Matériels et méthodes	93
IV. 5. 1 Evaluation de la maturité du fruit par le test amidon (pré-récolte).....	93
IV. 5. 2 Qualité physico chimique du fruit.....	94
IV. 5. 3 Suivi du grossissement du fruit.....	95
IV. 5. 4 Rendement des arbres fruitiers (Gala) des différents traitements	95
IV. 6 Résultats et discussions.....	95
IV. 6. 1 Suivi du grossissement du fruit.....	95
IV. 6. 2 Evaluation de la maturité du fruit	96
IV. 6. 3 Qualité physico-chimique du fruit à la récolte.....	98
IV. 6. 3. 1 Qualité physico chimique du fruit à la récolte	98
IV. 6. 3. 2 Qualité physico chimique du fruit après stockage	102
IV. 6. 3. 3 Qualité gustative du fruit.....	102
IV. 6. 4 Rendement des arbres fruitiers (Gala) des différents traitements	103

Conclusion.....	105
Conclusion générale	107
Perspectives de recherches	109
Bibliographie.....	110

Liste des abréviations

Arg	: Argile
° B	: Degrés brix
Ca	: Calcium
CC	: Capacité au champ
CEC	: Conductivité électrique en méq/100g
DPV	: Déficit de pression de vapeur en kPa
da	: Densité apparente g/cm ³
e _a	: Pression de vapeur actuelle (kPa)
e _s	: Pression de vapeur saturante (kPa)
ET ₀	: Evapotranspiration potentielle de la culture de référence en mm.j ⁻¹
ET	: Evapotranspiration (mm)
ETP	: Evapotranspiration potentielle du pommier en (mm)
F	: Force de rétention par les particules du sol MPa
FDR	: Fréquence radio dans le sol
FDT	: Fluctuation du diamètre du tronc en mm
FS	: Flux de sève en CO ₂ cm ³ /h
G	: Flux de chaleur du sol en MJ.m ² jour ⁻¹
GGs	: Goutte à goutte souterrain
g _s	: Conductance stomatique mmol m ⁻² s ⁻¹
H	: Hydrogène
H _{cr}	: Humidité à la capacité de rétention en %
H _{pf}	: Humidité au point de flétrissement en %
IGGS	: Irrigation en goutte à goutte souterraine
I	: Irrigation en mm
ID	: Irrigation déficitaire
IDR	: Irrigation déficitaire régulée
JAPF	: Jour après la pleine floraison
k	: Fraction utilisée de la RFU
K _C	: Coefficient cultural
K	: Potassium en %
Lim	: Limon en %
Mg	: Magnésium en %
Mo	: Matière organique en %
Na	: Sodium en %
F _g	: Force de gravitation en N
P	: Photosynthèse μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
P _e	: Pluie efficace en mm

PAR : Radiation photosynthétique active $\mu\text{mol photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$

PCF : Période de croissance du fruit en jour

PFP : Point de flétrissement permanent

Prof : Profondeur en m

R_n : Radiation nette à la surface de la culture en $\text{MJ.m}^2 \text{ jour}^{-1}$

RAC : Racines

RFU : Reserve facilement utilisable en mm

RU : Reserve utile en mm

S : Force de succion par les plantes en MPa

SPR : Séchage partiel de la zone des racines

T_m : Température moyenne quotidienne de l'air à 2 m de hauteur en $^{\circ}\text{C}$

T : Transpiration $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$

T_1 : Traitement T_1

T_2 : Traitement T_2

T_3 : Traitement T_3

T_4 : Traitement T_4

TS : Teneur en sucre en $^{\circ}\text{B}$

TDR : Impulsion électrique à haute fréquence

TES : Teneur en eau du sol en %

U : Vitesse du vent à 2 m de hauteur m.s^{-1}

DPV : Déficit de pression de vapeur d'eau en mm

Z : Profondeur en m

α : Fraction de la réserve utile

γ : Constante psychométrique en $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$

Δ : Pente de la courbe de la tension de vapeur saturante en $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$

Ψ_{abs} : Potentiel hydrique des poils absorbants en MPa

Ψ_{B} : Potentiel hydrique de base en MPa

Ψ_{os} : Potentiel osmotique en MPa

Ψ_{m} : Potentiel matricielle en MPa

Ψ_{S} : Potentiel hydrique du sol en MPa

Ψ_{X} : Potentiel hydrique du xylème du tronc en MPa

Ψ_{b} : Potentiel hydrique de base MPa

ϕ : Diamètre en mm

Liste des tableaux

Tableau II.1 Caractéristiques du sol de la parcelle expérimentale à quatre profondeurs.....	43
Tableau II.2 Différentes stratégies d'irrigation en fonction des différentes périodes de croissance du fruit.....	46
Tableau II.3 Caractéristiques des goutteurs et des conduites d'alimentation de la parcelle expérimentale.....	48
Tableau II.4 Programme journalier des séquences d'irrigation du pommier (Gala).....	50
Tableau III.1 Statistiques descriptives des moyennes du potentiel hydrique de base (MPa) des différentes stratégies d'irrigation (TRT) du pommier (Gala). Les lettres différentes de la même colonne indiquent des différences significatives entre les traitements d'irrigation (Tukey, $P < 0,05$). Paramètres significatifs sont indiqués comme suit : * $p < 0,05$. ** $p < 0,01$. *** $p < 0,001$	70
Tableau IV. 1. Effet des différents traitements (TRT) sur le grossissement des fruits : T1, arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point est l'ensemble de six mesures. Les moyennes obtenues dans les colonnes suivies par les différentes lettres. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements d'irrigation (Tukey, $P < 0,05$).....	103
Tableau IV. 2. Résultats des essais de la maturité des fruits de la variété (Gala) suivant les différents traitements (TRT) : T1, arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II)....	104
Tableau IV. 3: Statistiques descriptives des moyennes de la qualité physico-chimique des fruits avant et après stockage des différents traitements du pommier (Gala). T1, arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Les différentes lettres de la même colonne indiquent des différences significatives entre les traitements d'irrigation (Tukey, $P < 0,05$). Paramètres significatifs sont indiqués comme suit: * $p < 0,05$. ** $p < 0,01$. *** $p < 0,001$..	106

Tableau IV. 4. Effet des différentes stratégies d'irrigation (TRT) sur le rendement, nombre et poids de fruit et diamètre du tronc du pommier (Gala). "Col.": signifie les différentes colorations des pommes: 1 (0-10 %), 2 (10-33 %), 3 (33-50 %), 4 (> 50 %). Les moyennes obtenues dans les colonnes suivies par les différentes lettres. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitement d'irrigation (Tukey, $P < 0.05$).....**111**

Liste des figures

Figure I. 1. Répartition globale de l'eau à travers le monde.....	5
Figure I.2. Différentes phases de croissance du pommier.....	15
Figure I.3. Cycle phénologique du pommier d'après Fleckinger.....	20
Figure II.1. Physique du sol, point de flétrissement permanent, point de ressuyage.....	39
Figure II.2. Profil pédologique de la parcelle expérimentale.....	44
Figure II.3. Profil racinaire de la parcelle expérimentale.....	44
Figure II.4. Positionnement des sondes Watermarks [®] et Aquapro dans la parcelle expérimentale.....	51
Figure II.5. Evolution des apports d'eau cumulés suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (Δ), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).	55
Figure II.6. Evolution journalière du déficit de pression de vapeur (DPV en mm par jour), (-) et de l'évapotranspiration potentielle journalière du pommier (ETP en mm par jour (○) partir du premier jour de la pleine floraison (JAPF).....	56
Figure II.7. Déficit pluviométrique cumulé (mm), (-); précipitations (mm), (■) depuis la pleine floraison jusqu'à 1 mois après la récolte, JAPF: jour après la pleine floraison, années (2010 et 2011).....	57
Figure II.8. Medianes du potentiel hydrique du sol à 0.3 m (fig. A) et 0.6 m (fig. B) de profondeur suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (Δ), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point est l'ensemble de six mesures.....	58
Figure II.9. Teneur en eau du sol exprimée en %Aquapro (avec la valeur de 100% à la capacité de rétention et 40% humidité au point de flétrissement) à différentes profondeurs du sol (A: 0.15, B: 0.3, C: 0.45, D:0.6, E: 0.75 and F: 0.9 m) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (Δ), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).	

Chaque point est la moyenne de quatre mesures. Jours après la pleine floraison (JAPF): 6-36 correspond au mois de Mai , 37-66, Juin, 67-97 le mois de Juillet et 98-128 le mois d'Août..61

Figure II.10. Relations entre le potentiel hydrique du sol (Ψ_{soil}) et la teneur en eau du sol exprimée en % Aquapro (avec la valeur de 100% à la capacité de rétention et 40% humidité au point de flétrissement) à 0.30 m de profondeurs (A) et 0.60 m (B) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).....64

Figure III.1. Schéma du protocole expérimental suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1, arbres non irrigués; T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Trois Blocs: bloc (A), bloc (B) et bloc (C).....68

Figure III.2. Potentiel hydrique du xylème (Ψ_x) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1, (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point correspond à la moyenne de 12 mesures. Jours après la pleine floraison (JAPF): 6-36 correspond au mois de Mai , 37-66, Juin, 67-97 le mois de Juillet et 98-128 le mois d'Août.....72

Figure III.3. Relation entre l'évapotranspiration potentielle du pommier en mm et le déficit de pression de vapeur d'eau DPV en kPa.....74

Figure III.4. Relation entre le potentiel hydrique du xylème (Ψ_x) et le déficit de pression de vapeur (DPV) durant la deuxième phase de croissance du fruit suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1, (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point correspond à la moyenne de 12 mesures. Jours après la pleine floraison (JAPF): 6-36 correspond au mois de Mai , 37-66, Juin, 67-97 le mois de Juillet et 98-128 le mois d'Août..76

Figure III.5. Relations entre le potentiel foliaire hydrique de base (Ψ_b) et la teneur en eau du sol à 0.30 m de profondeurs (A) et 0.60 m (B); Relations entre le potentiel foliaire hydrique de base (Ψ_b) et le potentiel hydrique du sol (Ψ_{soil}) à 0.30 m de profondeurs (C) et 0.60 m (D) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres

non irrigués (PCF II); T4 (Δ), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).....**78**

Figure III.6. Relation entre le potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_X et le potentiel hydrique du sol Ψ_S à 0.30 m et 0.60 m de profondeur (Fig. E et F); relation entre le potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_X et la teneur en eau du sol TES à 0.30 m et 0.60 m de profondeur (Fig. G et H), suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (\circ), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (\bullet), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (\square), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (Δ), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).....**80**

Figure IV.1. Préviation de la récolte par le test de maturité des pommes (Gala).....**100**

Figure IV.2. Mesure des paramètres physico-chimiques des pommes (Gala) à l'aide de l'automate (Robot Pimprenelle, Setop-Giraud Setop Giraud Technology, France).....**100**

Introduction Générale

Compte tenu de l'accroissement de la population mondiale et le changement climatique, l'eau peut devenir un facteur limitant pour l'agriculture (Ashraf, 2010). L'utilisation efficace de l'eau est une question vitale pour le développement socio-économique dans de nombreuses régions, elle est possible avec des améliorations dans la sélection végétale pour permettre aux cultures de se développer avec succès dans des environnements de sécheresse et dans la gestion de l'irrigation, ainsi que dans les systèmes d'irrigation tels que l'irrigation souterraine en goutte à goutte (Ashraf, 2010; Thompson et al., 2009).

Ce système fournit de l'eau directement à la zone racinaire et minimise l'évaporation du sol en surface, les eaux de ruissellement et la percolation profonde (Thompson et al. 2009; Hoffman and Martin, 1993; Heard et al., 2012; Ayars et al., 1999). Une autre approche prometteuse, en particulier pour les cultures fruitières, est l'irrigation déficitaire régulée (IDR), qui vise à réduire l'irrigation au cours des stades phénologiques spécifiques, sans risque de perte de rendement et en qualité des fruits tels que l'abricotier (Torrecillas et al., 2000; Pérez-Pastor et al., 2009), le pêcher (Girona et al., 2005) et le pommier (Ebel et al., 1995; Mpelasoka et al., 2001; Leib et al., 2006; O'Connell et al., 2007; Naor et al., 2008).

Le concept de l'IDR a été d'abord proposé pour contrôler la croissance végétative dans les vergers de pêchers sans influencer la production en fruits (Chalmers et al., 1981; Mitchell and Chalmers., 1982). Les études sur les pêchers et l'abricotier ont révélées que le rendement, la taille des fruits et la qualité du fruit peuvent être maintenus dans des conditions de stress léger à modéré de la plante lorsqu'elle l'irrigation déficitaire est appliquée au cours de certains stades phénologiques des arbres fruitiers (Torrecillas et al., 2000; Girona et al., 2005; Pérez-Pastor et al., 2009). L'IDR a également été appliquée avec succès aux arbres fruitiers tels que le pommier (Leib et al., 2006; O'Connell et al., 2007; Naor et al., 2008; Mpelasoka et al., 2001; Ebel et al., 1995), les agrumes (González-Altozano et al., 1999), l'amandier (Romero et al., 2004) et le néflier (Cuevas et al., 2007), sans indiquer d'une part, le seuil de référence du potentiel hydrique du xylème du tronc des arbres fruitiers pour gérer l'irrigation déficitaire et d'autre part, son impact sur la qualité physico-chimique, notamment la vitamine C du fruit du pommier ainsi que le diamètre du tronc des arbres fruitiers. Peu d'études référencées dans ce domaine incitent, de nouvelles recherches sur le pommier de la variété Gala s'imposent.

Le stress hydrique modéré peut influencer les paramètres de la qualité physico-chimique des fruits. Les études sur les pêchers et les pommiers ont montré que le stress hydrique modéré

augmente la teneur de ces derniers (Crisosto et al., 1994; Mills and Behboudian, 1996). Toutefois, aucune étude n'a été effectuée sur le pommier de la variété Gala et son impact sur la qualité physico-chimique avant et après stockage.

L'état hydrique du sol a longtemps été utilisé pour la planification des irrigations (Campbell and Campbell, 1982), est l'une des méthodes de gestion les plus utiles, en raison de sa praticabilité et à faible coût (Silva et al., 2005). Afin de mieux gérer l'irrigation, différentes méthodes ont été utilisées pour contrôler la teneur en eau du sol et identifier le statut hydrique du sol y compris les sondes tels que : les tensiomètres (Li et al., 1989), les sondes Watermark® (Intrigliolo and Castel, 2006), les sondes à neutron (Goldhamer et al., 1999) et des sondes capacitatives (Abrisqueta et al., 2012).

L'utilisation de mesures basées sur le sol pour l'irrigation déficitaire régulée IDR présuppose l'existence d'un indicateur à base de plantes fiable et un seuil qui peut être utilisé pour prédire l'absence d'impact sur le rendement et la qualité des fruits. Des études ont montré que le potentiel hydrique du xylème est un indicateur pertinent et fiable du stress hydrique dans les arbres fruitiers (Naor, 2006). Le potentiel hydrique du xylème du tronc a été utilisé avec succès pour les arbres fruitiers (McCutchan and Shackel, 1992; Naor, 2000; Lampinen et al., 2001; Romero et al., 2004; De Swaef et al., 2009; García-Tejero et al., 2010). Bien que l'application de l'IDR en arboriculture ait été étudiée, peu d'études sur le pommier de la variété Gala a été faite, notamment en irrigation en goutte à goutte enterré et son impact sur la qualité physico-chimique des pommes avant et après stockage. Aucune étude n'a été faite aussi sur les relations entre le statut hydrique du sol et celui du pommier de la variété Gala à différentes profondeurs.

De plus, nous avons peu d'information sur le statut hydrique du sol et de la plante en goutte à goutte enterré à haute fréquence. La relation entre l'état hydrique du sol et de la plante à différentes profondeurs a été évaluée afin de définir des méthodes de mesure précises mettant en exergue avec leurs valeurs seuils correspondantes pour le pilotage de l'irrigation déficitaire en goutte à goutte enterré, dans les vergers de pommier. Aucune information dans la littérature sur le suivi du diamètre du tronc du pommier de la variété Gala.

Face à la rareté des travaux récents sur le pommier, une démarche scientifique s'avère nécessaire. Ceci, dans le but d'étudier l'influence de l'irrigation déficitaire régulée en goutte à goutte avec la double gaine enterrée sur le statut hydrique du sol et celui de la plante. Il serait intéressant d'élargir ce travail au rendement des arbres fruitiers, au poids des fruits et à la qualité physico-chimique des pommes avant et après stockage surtout que les consommateurs

sont de plus en plus exigeants, non seulement sur la qualité gustative, mais aussi sur la qualité physico-chimique des fruits. Les relations entre le potentiel hydrique du sol, la teneur en eau du sol, le potentiel hydrique du xylème du tronc des arbres fruitiers et le potentiel de base feront l'objet de ce travail. Nous illustrerons l'impact de l'irrigation déficitaire sur le grossissement du fruit durant toutes les différentes phases de croissance du pommier d'une part et d'autre part, le suivi du diamètre du tronc des arbres fruitiers sur deux années d'expérimentation. Les résultats des deux années d'essais sont présentés et discutés.

Plan du manuscrit

Afin de répondre à l'objectif de la thèse qui est l'influence de l'irrigation déficitaire en goutte à goutte avec la double gaine enterrée sur le statut hydrique du sol-plante, du rendement des arbres fruitiers ainsi que sur la qualité physico-chimique des fruits avant et après stockage du pommier de la variété (Gala), le manuscrit de la thèse s'articule autour des axes suivants :

- Nous présenterons une introduction générale ou nous décrirons l'importance de l'eau et de l'irrigation en goutte à goutte souterraine en agriculture, l'irrigation déficitaire régulée des arbres fruitiers, suivi du pilotage de l'irrigation en goutte à goutte par le biais des différentes sondes ainsi que la réponse des arbres fruitiers au stress hydrique. Nous décrivons l'objectif du travail.
- La revue bibliographique qui sera présentée dans le chapitre I sera consacrée à la problématique de l'eau à travers le monde, l'impact du réchauffement climatique sur les ressources en eau et sur les cultures ainsi que le concept de l'irrigation déficitaire et les différentes stratégies d'irrigation des arbres fruitiers en goutte à goutte enterré. Ce premier chapitre sera consacré aussi, d'une part, à l'impact de l'irrigation déficitaire du pommier sur le rendement des arbres fruitiers, au calibre et la qualité physico-chimique des fruits, et d'autre part, à l'étude des différents indicateurs de détection du stress hydrique sur les arbres fruitiers. Nous utiliserons dans notre travail que les indicateurs les plus utilisés, liés beaucoup plus aux arbres fruitiers, révélateurs du stress hydrique.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de la botanique et à l'importance du pommier comme espèce modèle. Il comportera aussi le cycle de développement du pommier, le porte greffe, les différentes méthodes d'éclaircissage des arbres fruitiers, ainsi que les principaux ennemis du pommier.

- Dans le troisième chapitre, nous étudierons le statut hydrique du sol et exécuterons, en faisant intervenir de nombreuses étapes (profil pédologique et racinaire) servant au calibrage des sondes utilisées durant l'expérimentation, ainsi que l'analyse physico-chimique du sol étudié. Nous étudierons aussi les conditions de l'expérimentation, les différents traitements adoptés, ainsi que la partie matériels et méthodes du statut hydrique du sol de la parcelle d'essai. Les résultats obtenus sont présentés et discutés au sein de ce même chapitre.
- Le quatrième chapitre aura pour objectif, l'étude du statut hydrique du pommier (Gala) soumis aux différentes stratégies d'irrigation par le biais de mesures durant tout le cycle végétatif des arbres fruitiers, du potentiel hydrique du xylème du tronc et du potentiel hydrique foliaire de base. Nous étudierons respectivement aussi, les relations entre le potentiel hydrique du xylème du tronc et le potentiel hydrique du sol à différentes profondeurs ainsi que les relations entre le potentiel hydrique du xylème du tronc et la teneur en eau du sol mesurée par la sonde Aquapro, ceci à différentes profondeurs du sol. La partie matériels et méthodes, ainsi que les résultats obtenus seront présentés et discutés dans ce présent chapitre.
- Le cinquième chapitre sera consacré à l'analyse physico-chimique des pommes (Gala). Dans ce chapitre, figurera l'analyse physico-chimique des pommes, à savoir, la fermeté, la jutosité, la teneur en sucre des fruits et la vitamine C des fruits. Ces analyses seront effectuées avant et après stockage. Dans ce chapitre, nous trouverons aussi le suivi du grossissement des pommes durant les différentes phases de croissance du fruit, le rendement des arbres fruitiers (par taille et par couleur) et la méthodologie adoptée. Les mesures de la variation du diamètre du tronc durant les deux années d'expérimentations feront l'objet dans ce chapitre. Les résultats et discussion seront présentés à la fin de ce présent chapitre.

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion générale, les perspectives de recherches ainsi que la bibliographie.

CHAPITRE I REVISION BIBLIOGRAPHIQUE ET OBJECTIFS

I. 1 Eau en agriculture

I. 1. 1 Problématique de l'eau à travers le monde

L'importance de l'eau pour le bien-être des communautés et des écosystèmes dans lesquels nous opérons n'est plus à démontrer. L'eau est la ressource la plus précieuse sur terre, c'est la principale substance qui sépare notre planète de toutes les autres et qui rend la vie possible. Chaque année, les sources d'eau douce deviennent de plus en plus épuisées et de plus grandes exigences sont placées sur elles. Ces demandes croissantes, avec des années de sécheresse, ont fait de l'eau une denrée plus précieuse que jamais. Cependant, les ressources globales en eau sont stationnaires par contre la population mondiale est en nette croissance. L'approvisionnement du bien être en produits alimentaires et en eau potable est devenu une équation assez complexe suite aux exigences variables d'une année à l'autre par les différents utilisateurs.

L'eau semble la ressource la plus disponible sur terre. En réalité 97.5 % de l'eau totale correspond à de l'eau salée (Fig. I. 1) dont 2.5 % du volume total est une eau douce.

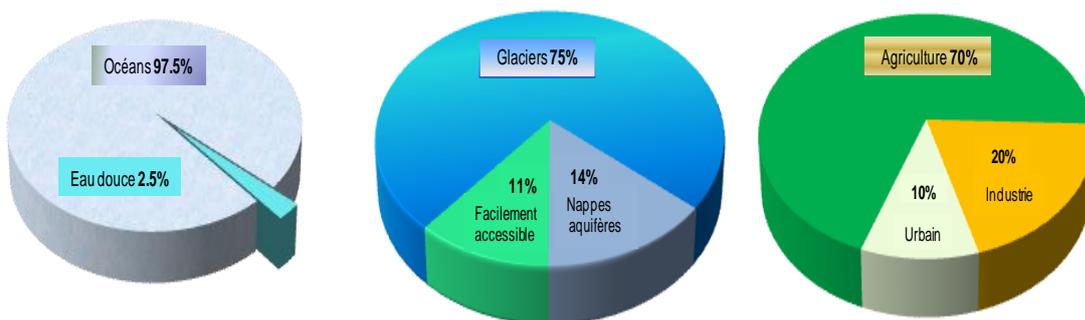


Figure I. 1. Répartition de l'eau à travers le monde

Mais là encore cette eau n'est pas facilement accessible à l'humanité; 75% de cette eau non salée est présente à l'état de neige et d'icebergs tandis que 14 % se trouve encore dans les nappes aquifères (CSD, 2002), soit finalement 11% seulement est facilement accessible. Le bilan total est que 0.27 % du volume total du globe terrestre est facilement accessible à l'humanité.

I. 1. 2 Importance de l'eau en agriculture

L'eau est un élément essentiel pour les plantes : elle constitue la plus grande partie de leur masse (en moyenne 60%) et c'est le milieu où s'effectuent toutes les réactions chimiques conduisant à la production de matière végétale. En fait, l'essentiel de l'eau transite dans le végétal et seule une faible quantité entre dans la constitution de la matière verte. Cette ressource, qui répond aux besoins fondamentaux du bien être est un élément à multiples enjeux, à savoir: économique, environnemental et agronomique. Mais plus encore, l'eau agricole apparaît comme un des leviers majeurs de développement.

Devenu rare, cet "or bleu" pourrait être l'une des principales causes de conflits entre les différents utilisateurs notamment le secteur de l'agriculture, qui constitue la source d'approvisionnement en produits alimentaires pour la population. L'agriculture est la plus consommatrice en eau douce comparativement aux autres secteurs avec 70 % (Calzadilla et al., 2010) de l'eau utilisable dans le monde. Cependant, dans les zones aride et semi-aride, il existe une assez grande compétition en eau douce entre l'agriculture et les autres secteurs (De Fraiture and Wichelns, 2010).

En outre, l'eau douce est vitale et rare; dans les faits, nous faisons face à une crise mondiale de l'eau. Par ailleurs, avec les changements climatiques liés aux gaz à effet de serre, la répartition dans le temps et dans l'espace semble subir des modifications, ce qui augmente le conflit entre les différents utilisateurs.

Pour garantir les produits alimentaires de la population mondiale, la production par le biais de l'agriculture devra augmenter (Howell, 2001), mais la part de l'eau douce actuellement disponible pour l'agriculture (72%) est en baisse (Cai and Rosegrant, 2003). Par conséquent, des méthodes durables doivent être mises en place, surtout dans les zones où les ressources en eau sont limitées afin de faire face à cette situation.

Cependant, sans une meilleure gestion de l'eau en agriculture, les objectifs actuels et à long terme pour le développement et un environnement durable ne peuvent être atteints. A cet effet, il est impératif de mieux raisonner l'eau d'irrigation et trouver de nouvelles stratégies afin de pouvoir assurer d'une part, des économies d'eau et d'autre part, une production qualitative et quantitative des fruits ainsi que la sécurité alimentaire.

I. 2 Impact du changement climatique sur les ressources en eau

Bien qu'il existe des variations à travers le monde, il est clair que le changement climatique va accentuer la pénurie d'eau dans de nombreuses régions. L'augmentation spectaculaire de la demande de cette ressource et les conséquences du changement climatique ont fait de l'eau la

ressource la plus précieuse de notre planète. L'eau est un aspect essentiel de notre vie et de notre planète. C'est une source de richesse et de développement pour la quasi-totalité de nos activités économiques, pour les régions, les gouvernements et pour toutes les cultures.

Les changements climatiques auront un impact positif sur les ressources en eau et l'agriculture dans plusieurs régions du monde (IPCC, 2007; Glosais et al., 2007). Le changement climatique s'est déjà fait sentir; l'été 2008 avait déjà illustré ces contrastes, avec une sécheresse prolongée en Espagne et des inondations catastrophiques en Grande-Bretagne. L'eau sera un motif de préoccupation pour tous. Neuf pays sont déjà considérés comme souffrants de stress hydrique: Chypre, l'Espagne, l'Italie, mais aussi la Belgique, la Bulgarie et le Royaume-Uni (Angleterre et Pays de Galles) (IPCC, 2007).

Ce changement climatique va certainement exacerber la pression sur les régions déjà en difficulté. Devant cette situation, nous serons dans l'obligation de réduire la consommation d'eau non seulement pour l'agriculture mais aussi pour l'alimentation en eau potable de la population, l'industrie et autres. En agriculture, des stratégies d'irrigations doivent se mettre en place pour faire face au stress hydrique causé par le climat afin de bien mener une bonne gestion de l'eau d'irrigation, tout en garantissant un bon rendement qualitatif et quantitatif (Chenafi et al., 2013).

Devant cette situation et suite à d'autres facteurs liés à la démographie et aux intensificateurs des terres agricoles, les ressources en eau doivent impérativement être utilisées d'une façon rationnelle, en évitant son gaspillage et sa dégradation. Face au changement climatique, afin d'assurer la sécurité alimentaire, l'utilisation de l'eau en agriculture passera impérativement par une utilisation efficiente (Molden, 2003).

Dans certaine région du monde, la production agricole est limitée suite aux limites des ressources en eau dont la cause principale est l'effet des changements climatiques (Anderson et al., 2008; Steffen, 2008). Cependant, des études espagnoles prévoient en 2050 une augmentation des besoins en eau de 25-34 % dû au changement climatique (Rodriguez-Dial et al., 2007). En effet, l'utilisation non rationnelle de l'eau en agriculture entraîne des conséquences néfastes aussi bien au niveau de l'environnement que sur le plan économique et social. La performance des réseaux d'adductions, tout en favorisant les techniques d'arrosages les plus performantes telles que l'irrigation en goutte à goutte avec des gaines enterrées, et avec une bonne gestion raisonnée, demeure aussi d'un intérêt important (Lemarchand and Radi, 1996). Ainsi la connaissance de tous ces facteurs contribuant aux gains économiques de l'eau, sont des éléments clés du développement durable.

I. 3 Gestion de l'eau en agriculture

L'utilisation de l'eau par l'agriculture a longtemps été caractérisée par une faible efficacité, en raison des importantes pertes (Costa et al., 2007). De manière globale, la gestion de l'eau en tant que ressource est un point capital dans la problématique environnementale. Les conséquences du changement climatique qui se traduit par l'augmentation des besoins en eau d'irrigation et une forte pression sur les ressources en eau, impose une méthodologie de gestion de cette ressource. Dans ce contexte, il est important de trouver une méthodologie de gestion raisonnée de l'eau d'irrigation pour préserver cet "or bleu", en agissant de manière cohérente. Cette ressource essentielle est cependant fragile, stratégique mais rare et, dans la majorité des cas, offerte en quantité limitée et faisant l'objet d'une demande croissante. Pour cette raison, il est nécessaire de la gérer dans un souci d'efficacité et de durabilité et l'agriculture, plus concrètement l'irrigation, ne peut ignorer cette exigence. L'arboriculture fruitière en irrigué s'est considérablement développée durant les dix dernières années et constitue un des plus gros consommateurs d'eau d'irrigation (Lemarchand and Radi, 1996). Devant cette situation, de nouvelles stratégies d'irrigation doivent s'impliquer pour répondre à cette problématique. L'irrigation en goutte à goutte souterraine IGGS est l'un des éléments de réponse de cette gestion. Cependant, la combinaison de cette technique avec la réduction des apports d'eau à la plante tel que l'irrigation déficitaire, constitue un des leviers majeurs de la gestion de l'eau en agriculture (Chenafi et al., 2013).

I. 4 Réponse des cultures au stress hydrique

La pénurie et la demande en eau qui varient d'une année à une autre dans de nombreux secteurs, notamment l'agriculture, est devenue une préoccupation mondiale. Les effets néfastes du changement climatique conduit à une concurrence croissante de la consommation d'eau par les différents utilisateurs. Parmi les nombreux enjeux du programme de la conférence internationale sur les changements climatiques qui s'est tenue à Copenhague en décembre 2009 même à Paris 2015, l'eau est l'une des ressources les plus menacées.

Aujourd'hui, les effets du changement climatique sont perceptibles dans le monde entier (North et al., 2007). Des preuves incontestables montrent que les systèmes naturels sont touchés par la modification du climat et plus particulièrement par l'augmentation de la température (North et al., 2007). Devant cette situation, l'agriculture irriguée, qui joue un rôle important dans le développement socio-économique et qui fournit à l'humanité un large éventail de produits agricoles, y compris les fruits et les légumes (Howell, 2001) et d'autres cultures, doit relever le défi dans les prochaines années. L'utilisation de l'eau en agriculture a

augmenté ces dernières décennies en raison de la croissance démographique de la population mondiale et du changement dans le type d'aliments nécessitant plus d'eau que les aliments traditionnels (Molden, 2007).

Dans les zones aride et semi-aride, l'eau est un facteur limitant la production agricole (Gamo, 1999; Cattivelli et al., 2008). Ces zones sont généralement caractérisées par de faibles précipitations et par de rares ressources en eau. Dans ces régions, l'eau constitue un problème de convoitise et rentre en compétition entre l'agriculture et d'autres usagers (De Fraiture and Wichelns, 2010). Cependant, pour l'irrigation, qui consomme 85 % de l'eau douce du globe terrestre (Van Schilfgaarde, 1994) et face aux faiblesses des ressources en eau qui sont limitées à travers le monde et peuvent ne pas être suffisantes pour la production alimentaire d'ici à 2025 (Postel, 1998), la recherche de nouvelles stratégies d'irrigation devient une question incontournable en agriculture irriguée.

La réponse des cultures à la sécheresse est très complexe car les conditions varient selon le degré de sécheresse et le moment du stress hydrique ainsi que le type de sol et le déficit hydrique de l'atmosphère (Deng et al., 2006; Boutraa, 2010). Pour assurer une utilisation de la ressource en eau aussi économique et efficace que possible, une approche plus rationnelle en matière de gestion de l'irrigation est inévitable. De ce fait, la fiabilité des équipements d'irrigation a considérablement progressé. Inconcevable avec des techniques moins évoluées comme l'aspersion, la distribution homogène et régulière de l'eau sur l'ensemble de la culture devient possible avec l'irrigation localisée, en particulier le goutte à goutte et les goutteurs à faibles débits proposés actuellement, ainsi que les appareils permettant le déclenchement programmé des irrigations (Monney, 2011).

A cet effet une gestion efficace et rationnelle de la consommation d'eau est la seule façon de faire des économies d'eau pour l'agriculture irriguée. Cependant différentes stratégies ont été adoptées pour réduire les dommages causés par la sécheresse sans incidence sur le rendement des cultures.

La gestion de l'eau dans un verger nécessite une surveillance périodique de l'état hydrique de la plante (Shackel et al., 1977). Par conséquent, la gestion de l'eau par des mesures en plein champ dans le but de contrôler les calendriers des irrigations dans les vergers, devient une question incontournable. Dans de telles conditions restrictives, il est impératif de trouver de nouvelles stratégies d'irrigation afin de réduire la consommation d'eau et appliquer une gestion plus efficace des ressources en eau disponibles en se concentrant sur la maximisation des économies d'eau et l'amélioration de sa productivité finale.

Pour répondre à cette problématique, de nouvelles perspectives d'économie sont ainsi envisageables à moyen terme dans la pratique. Une des approches est l'irrigation déficitaire régulée IDR (Goodwin and Boland, 2002), recommandée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en considérant les trois phases de développement du fruit: La première correspond à la division cellulaire, soit une durée de 30 à 40 jours depuis la pleine floraison (Ferree and Warrington, 2003). Suit une deuxième phase avec le début du grossissement cellulaire, variable selon l'époque de maturité de la variété et enfin, une troisième phase, comprenant la période terminale de développement du fruit durant approximativement 4-5 semaines avant la récolte. Une des méthodes prometteuse est l'irrigation déficitaire régulée IDR, qui est l'une de ces stratégies qui pourra faire face aux aléas climatiques, sans incidence sur la production qualitative et quantitative des cultures. Additionnellement, l'irrigation déficitaire réduit les apports d'eau à la plante (Mariana et al., 2003; Iniesta et al., 2009; Martín-Vertedor et al., 2011).

S'il est généralement admis qu'aucune restriction dans l'alimentation hydrique ne devrait être appliquée durant la phase 1, la consigne varie selon les espèces pour les deux phases suivantes. Dans le cas du pommier, (Naor, 2006) juge ces frontières arbitraires. Le grossissement quasi linéaire des fruits durant la plus grande partie de leur développement empêche toute distinction sur la base de critères physiologiques. Il en résulte que les termes de «déficit précoce» pour l'IDR appliquée durant PCF II et de «déficit tardif» pour l'IDR durant PCF III qui sont utilisés par de nombreux auteurs, ne recouvrent pas toujours les mêmes périodes et surtout, qu'elles divergent quant aux résultats obtenus. En l'absence de données décisives concernant l'époque la plus appropriée pour l'application du IDR, c'est le déficit précoce, selon la stratégie recommandée pour le poirier et le pêcher qui a été adopté dans ce projet. Cette option a été renforcée par les résultats positifs obtenus avec ce modèle au Tyrol du Sud par (Thalheimer and Paoli, 2004), dans des conditions pédoclimatiques relativement proches du Valais. La valeur seuil pour la gestion de l'irrigation déficitaire régulée IDR a été fixée à -1,2 MPa selon quelques expérimentations réalisées à ce jour sur le pommier (Naor et al., 2006).

I. 5 Botanique et importance du pommier

I. 5. 1 Présentation générale du pommier

La pomme est le plus ancien fruit cultivé du monde. C'est l'un des fruits les plus consommés dans le monde, avec une production totale de 52 millions de tonnes en 2001 selon les chiffres

de la FAO (Mehinagic, 2004). De toutes les cultures, le pommier possède les plus grandes superficies irriguées dans le monde après la vigne (FAO, 2009).

La production mondiale de pommes est d'environ 60 millions de tonnes dont 9 millions pour la Chine, 9.8 pour l'Europe et 5.5 pour l'Amérique du nord (Lespinasse and Leterme, 2005). Le pommier a une large capacité d'adaptation à des conditions de sol, de température et de pluviométrie très variable (Lespinasse and Leterme, 2005). Son aptitude à la conservation en fait un fruit facile à conserver et à consommer tout le long de l'année (Lespinasse and Leterme, 2005). Les pommes sont souvent consommées crues, mais peuvent également être trouvées dans de nombreux aliments (surtout les desserts) et des boissons. En effet, elle est le quatrième fruit le plus consommé après les légumes et la banane. On considère dans le monde qu'il existe environ près de 6000 variétés de pommes (Tonelli and Gallouin, 2013), on trouve sur le marché 20 variétés sélectionnées sur des critères agronomiques que sur leur qualité gastronomique. Les critères retenus sont l'aptitude à la conservation au froid, résistance au transport, aptitude au mûrissement et qualité gustative (Tonelli and Gallouin, 2013).

I. 5. 2 Importance du pommier

L'intérêt du choix du pommier est lié à son importance dans notre vie quotidienne, c'est l'un des fruits le plus consommé dans le monde (Mehinagic, 2004). En effet, la pomme qui est un fruit santé par excellence est sensible à la sécheresse (Behboudian and Mills, 1997; Lakatos 2004; Nemeskéri, 2007).

La pomme est le fruit possédant des vertus de santé par excellence. Son apport énergétique ne vient pas de graisses mais du fructose et des glucides qu'elle contient. De par sa richesse en fibres, les pommes facilitent le transit intestinal. Consommées régulièrement (2 à 3 par jour), elles permettent d'abaisser de 5 à 15 % le taux de cholestérol sanguin (Aprifel, 2008) et participent également au bon équilibre de l'alimentation en fournissant notamment des minéraux et des vitamines essentiels.

Cependant, les pommes possèdent une action diurétique reconnue, due à sa richesse en eau, en potassium et la présence de sorbitol qui favorise l'élimination urinaire des déchets. Ce bénéfice est à sa richesse en fibres, 2,5 % en moyenne, mais aussi à ses micronutriments (magnésium, vitamines C et E). Les polyphénols de ce fruit lui assurent, par ailleurs, un fort potentiel antioxydant (Eberhardt et al., 2000). La composition moyenne pour 100 g de fruit est: 12.6 % de glucides, 0.3 % de lipides, 0.3 % de protides, 84.3 % d'eau et 2.5 % de fibres. La pomme est bien dotée en vitamine C notamment grâce à sa peau (4 à 5 fois plus de

vitamine que dans le reste du fruit). C'est pour cette raison qu'il vaut mieux la manger avec la peau après l'avoir bien lavée afin de ne pas perdre cet apport vitaminique.

Les glucides, composés de fructose, en moindre partie le saccharose et le glucose sont la principale source de calories de la pomme (Berüter, 1989; Ackermann et al., 1992; Marguery, 1992; Fuleki et al., 1994; Berüter et al., 1997; Azevedo and Rodrigues, 2000). La pomme est pauvre en lipides mais sa teneur en eau et en fructose en font un aliment précieux au cours des efforts dépensés durant la journée.

Cependant, les secrets de la bonne santé qu'elle confère s'expliquent, entre autres, par sa grande richesse en antioxydants (Eberhardt et al., 2000, Chenafi et al. 2013), par sa teneur en fibres et son faible apport calorique, ainsi que par ses vitamines qui constituent un vrai trésor de santé pour l'être humain. Par conséquent, la pomme est le fruit de santé par excellence dont les effets protecteurs sont connus depuis l'origine de l'homme.

I. 5. 3 Variétés du pommier

Le pommier est une espèce très rustique. Sa capacité d'adaptation, tant aux hivers rigoureux qu'aux hivers doux, lui permet de s'étendre sur une zone immense. On le cultive dans tous les pays entre 25° et 60° de latitude nord et dans l'hémisphère sud, en Nouvelle Zélande, Australie, Afrique australe, Argentine, Chili et sud du Brésil (Gallais and Bannerot, 1992).

Le pommier cultivé comprend 6000 variétés. La principale variété cultivée dans le monde est le Golden Délicieux. Cette dernière semble légèrement décliner aux profits de deux autres groupes « Granny Smith » et des variétés à épiderme bicolore. Parallèlement à l'augmentation de Granny Smith au Chili, en Nouvelle Zélande, en France et aux USA, la grande nouveauté des années 80 est le véritable engouement pour les variétés à épiderme bicolore (Gallais and Bannerot, 1992) à savoir:

1. 5. 3. 1 Jonagold et Elstar dans les pays de l'Europe du nord

Arrivant à maturité fin septembre, Jonagold à la même époque que Golden, le pommier Jonagold produit de grosses pommes juteuses, très sucrée et très parfumée. Jonagold est une variété mieux adaptée aux zones septentrionales ou de moyenne altitude. La qualité gustative est bonne dès la récolte (Sturmo and Stamparo, 1999).

La variété de pommier Elstar est sélectionnée au Pays-bas, c'est une variété arrivant à maturité, le fruit possède une très bonne qualité gustative sucrée, acidulée et parfumée (Sturmo and Stamparo, 1999). La variété Elstar est proche de la variété Gala mais possède une durée de conservation un peu plus courte. Elstar a un meilleur comportement en moyenne

altitude ou en zones septentrionales car elle peut craindre les fortes chaleurs estivales. La productivité est bonne avec parfois une tendance à l'alternance, après une saison de forte production. Enfin les variétés Royale Gala, Braeburn et Fuji en Nouvelle Zélande, au Brésil, aux États Unis et dans le l'Europe du sud (Arnoux, 1990). Cependant ils existent d'autres variétés mais nous nous intéresserons qu'à la variété Gala.

I. 6 Origines et caractéristiques de la variété (Gala)

I. 6. 1 Origine du pommier

L'origine de la variété Gala est dûe à un croisement de Kidd's Orange x Golden Delicious sélectionnée par H.J.Kidd à Greytown, Nouvelle-Zélande, et multipliée depuis 1960 (Aeppli et al., 1983). La grosseur du fruit est de 60-75 mm de largeur et de 55-68 mm de hauteur. Sa forme est un peu élevée, ventrue à la base avec de larges cotes moyennement prononcées. La cavité du pédoncule est moyennement large et profonde. Sa peau est lisse, légèrement rugueuse ou légèrement cireuse, jaune striée à marbrée de rouge lumineux. La végétation du pommier est moyennement vigoureuse semi-érigée, bien garnie, semblable au pommier de la variété Golden Delicious et forme un feuillage modérément dense.

I. 6. 2 Caractéristiques du pommier (Gala)

La variété de pommier de type Gala est une culture capable de croître et de produire du fruit dans une gamme de sols aux caractéristiques physiques et chimiques très variables. La variété Gala apparait comme une espèce particulièrement plastique vis-à-vis des conditions du milieu. Le pommier préfère les sols de limon profond, fertiles et bien drainés. Pour les sols argilo-limoneux et argilo-sableux un système de drainage lui est indispensable.

Le pommier est assez tolérant vis-à-vis du pH élevé et au calcaire actif. Les sols à pH acide sont ceux qui conviennent le mieux aux arbres fruitiers à pépins et particulièrement le pommier (Robin et al., 1966). Très sensible aux manques d'eau; le pommier est un arbre à cime arrondie s'étalant un peu avec l'âge, et peut atteindre 10 m de hauteur et plus. Il pousse naturellement en Europe et réussit partout en Suisse. La floraison blanche à blanc rosé intervient en avril, et la récolte intervient, selon les variétés, de fin juillet à octobre selon les variétés. La fructification intervient 2 à 4 ans après la plantation. Les variétés sont autostériles et nécessitent la plantation d'autres variétés pollinisatrices afin d'obtenir une bonne production.

I. 6. 3 Principaux ennemis du pommier

Vis-à-vis des maladies, le pommier est peu sensible à la tavelure et à l'oïdium et montre parfois des nécroses sur le feuillage, sensible au chancre (Aeppli et al., 1983). Les maladies les plus importantes du pommier sont la Tavelure, l'Oïdium, le Feu bactérien, le chancre (Aeppli et al., 1983) et les maladies de conservations (Hullé, 1998). Le pommier est souvent confronté à plusieurs attaques de ravageurs occasionnant des dégâts à l'échelle de l'arbre. Les plus fréquentes sont le carpocapse, les acariens, les pucerons et quelques lépidoptères xylophages (Hullé, 1998).

I. 7 Cycle de développement du pommier

Le pommier appartient, au sein de la famille des Rosacées à pépins, à la tribu des Pomoidés (Delanghe et al., 1983). Au cours d'une année, l'activité des végétaux fruitiers passe par différentes phases: La levée de la dormance et la floraison.

La floraison est le stade phénologique qui annonce, après la dormance, l'entrée en activité reproductive. Sa période s'étale généralement sur 2 à 3 semaines. La floraison blanche à blanc rosé intervient en début du mois d'avril et la récolte, selon les variétés, de fin Aout à début septembre pour la variété Gala.

La croissance annuelle du pommier débute au printemps, après la levée de la dormance des bourgeons et se déroule sur cinq mois environ. Au cours d'une année, l'activité des végétaux fruitiers passe par différentes phases: La levée de la dormance, la floraison, nouaison et maturité. La saison se termine avec la tombée de feuilles et le début du repos hivernal.

I. 7. 1 Différentes phases de croissance du fruit

Il est important de comprendre les différentes étapes de croissance des arbres fruitiers et particulièrement le pommier qui est sensible à la disponibilité de l'eau, de sorte que l'irrigation peut être adaptée et optimisée tout au long de la saison végétative. Afin d'appliquer l'irrigation déficitaire sur les arbres fruitiers, la connaissance du moment de pulvérisation des insecticides et des engrais sur les pommiers est importante. Le moment opportun de ces divers application est défini par les différentes phases de croissances des arbres. Ces étapes ne sont pas des mesures standardisées dans l'horticulture, mais ils définissent différents moments dans la plupart des arbres fruitiers. Les trois phases de développement du fruit: la première (P1) correspond à la division cellulaire, durant 30 à 40 jours depuis la pleine floraison (Ferree and Warrington, 2003), suivie de la phase du début du grossissement cellulaire (P2), variable selon l'époque de maturité de la variété, et d'une troisième phase (P3) couvrant la fin du

développement du fruit durant quatre à cinq semaines avant la récolte. Il est généralement admis qu'aucune restriction dans l'alimentation hydrique ne devrait être appliquée durant P1. Les stades de croissance pour le pommier sont décrits dans la figure I. 2

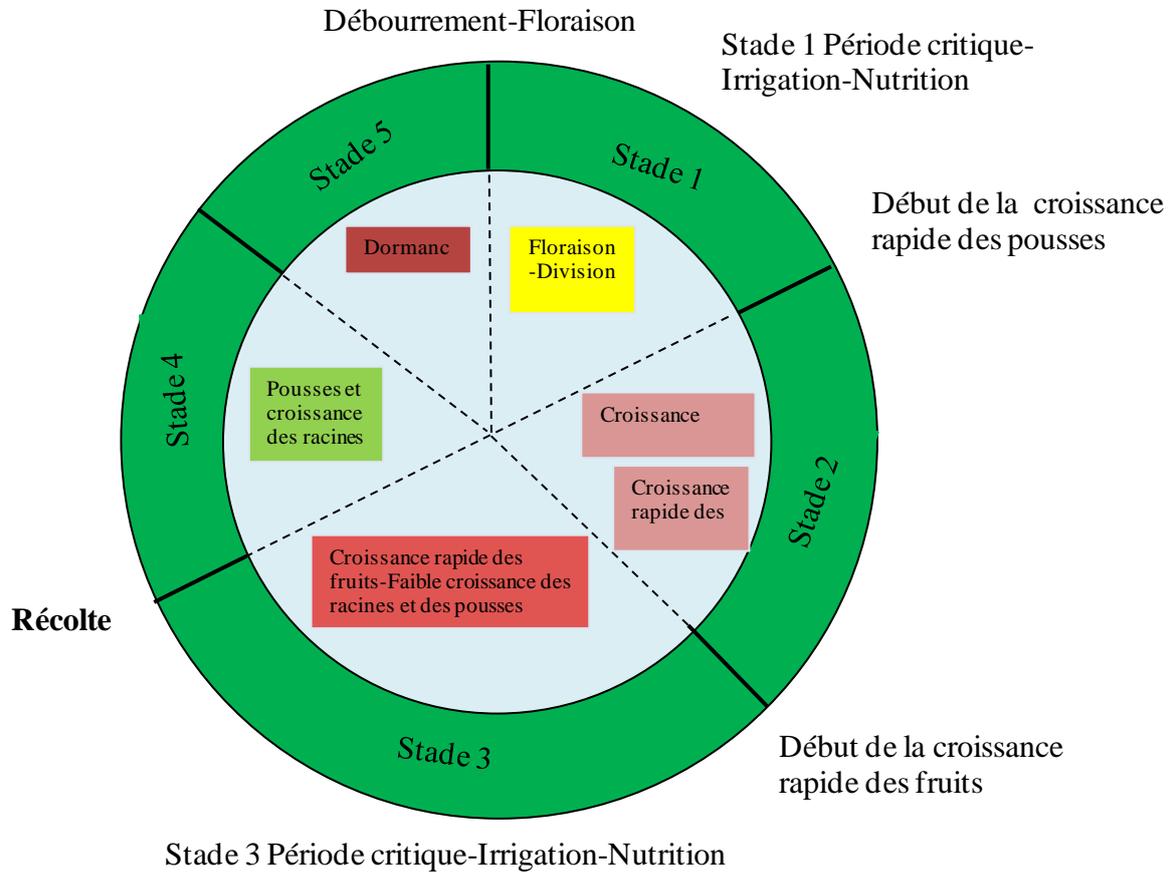


Figure I. 2. Différentes phases de croissances du pommier

La durée de la phase de croissance du pommier varie considérablement suivant les différentes variétés. Pour la majeure des variétés, la période de croissance est au voisinage de 105 à 145 jours (Boland et al., 2002).

I. 7. 1. 1 Première phase de croissance du fruit

Le débourrement floral est le début de la floraison et peut se produire avant ou après le débourrement végétatif (où les extrémités des bourgeons deviennent vertes et les feuilles commencent à se développer) en fonction de la variété de l'arbre. Lorsque la floraison est terminée, les jeunes fruits commencent à se former. Cette première phase de croissance des fruits est une phase critique caractérisée par la division cellulaire et la formation du fruit, il est recommandé que la réserve facilement utilisable RFU soit disponible pour les arbres fruitiers. Dans la plupart des cas, la pluie du printemps fournira une humidité adéquate du sol. Pour

l'arboriculture fruitière, l'observation des stades de développement végétatif des cultures est d'une grande utilité. Elle permet de planifier les travaux tels que la lutte contre le gel, traitements phytosanitaires, application des fumures, éclaircissage des fruits, etc.

L'évolution d'un fruit passe nécessairement par trois phases physiologiques : la multiplication cellulaire, le grossissement cellulaire et la maturation du fruit. Différents auteurs ont décrit le cycle de développement du pommier qui se caractérise par trois périodes de croissance du fruit PCF I II et III et s'étend de la pleine floraison à la récolte (Gillaspy et al., 1993; Mpelasoka et al., 2001).

Le pommier commence l'année dans un état de dormance. Au cours de cette phase, les bourgeons à fruits sont inactifs durant leur hibernation. En fin du printemps s'annonce la levée de la dormance et débute l'activité végétative par la floraison. Après la pleine floraison, la croissance du futur fruit fait intervenir à la fois les processus de multiplication cellulaire et de grandissement cellulaire (Mac Arthur and Wetmore, 1941; Tukey and Young, 1942; Marguery, 1992). La durée de cette période varie d'une saison à l'autre (Denne, 1960), ceci est lié à l'intervalle de temps entre la pollinisation et la fécondation chez le pommier (Modlibowska, 1945). Au cours de cette période PCF I, la surface des espaces intercellulaires augmente rapidement (Marguery, 1992). Cette période PCF I s'interrompt après six à sept semaines suivant les variétés. La fin de la phase de division cellulaire PCF I s'accompagne, d'une part, par une diminution de la vitesse de croissance des fruits et d'autre part, par les chutes des pommes dites « chutes physiologiques de juin ».

I. 7. 1. 2 Deuxième phase de croissance du fruit

La deuxième étape implique à la fois la croissance rapide des pousses et la croissance des racines. La croissance de la pomme est stable d'environ 6-7 semaines après débournement floral à la récolte. Durant cette deuxième phase PCF II, seule la taille des cellules augmente (Tukey and Young, 1942; Marguery, 1992).

I. 7. 1. 3 Troisième phase de croissance du fruit

Cette phase est caractérisée par le grossissement rapide des fruits, phase qui peut durer entre quatre à huit semaines avant la récolte. Durant cette période, la croissance des racines est lente et la formation des bourgeons pour la saison suivante commence. L'irrigation est essentielle à ce stade et l'humidité du sol devrait correspondre à la réserve facilement utilisable. Cette troisième phase PCF III est consacrée à la maturation et au grossissement des fruits ; c'est la phase la plus courte et la croissance des fruits est rapide. Durant cette période aucune

application de l'irrigation déficitaire n'est recommandée (Naor, 2008). Afin d'assurer une production qualitative et quantitative en fruits, les arbres fruitiers doivent être soumis à un régime de confort.

I. 7. 1. 4 Quatrième phase de croissance du fruit

A la fin de la récolte des fruits, les fruits mûrs cueillis (généralement basé sur la couleur et la maturité). Ceci termine la troisième phase de croissance et mène à la chute des feuilles. Pour les variétés précoces, la croissance des pousses commence souvent durant cette quatrième phase de croissance ainsi que la croissance des racines qui se produit à la fois. Dans cette dernière étape de la croissance après la récolte, la quantité d'eau appliquée peut être réduite.

I. 7. 1. 5 Cinquième phase de croissance du fruit

Cette période correspond à l'arrêt total de la végétation. Les arbres fruitiers rentrent dans la phase de dormance et à ce stade les feuilles tombent de l'arbre et l'irrigation n'est généralement pas nécessaire. Cependant, l'humidité du sol devra être surveillée au début du printemps pour déterminer quand la première irrigation est nécessaire pour la prochaine période de croissance.

I. 8 Structure et croissance du pommier

I. 8. 1 Structure des inflorescences :

L'inflorescence du pommier est un corymbe où sont regroupées 5 à 6 fleurs portées à l'extrémité de rameaux courts, nommés brindilles couronnées (Coutanceau, 1962). Lors de l'éclosion, des boutons apparaissent en premier lieu, une série de 5 à 6 feuilles vert-grisâtres, puis l'inflorescence qui compte en moyenne 0 à 8 fleurs disposées en corymbe, un axe principal porte des fleurs insérées à différents niveaux. La détermination des stades repères des arbres fruitiers est différente d'un auteur à l'autre. La phénologie dépend d'une variété à l'autre.

La floraison du pommier est de la forme centrifuge. Un même bouquet fleurit pendant environ une semaine. Chaque fleur présente cinq sépales triangulaires velus, de teinte grise. La corolle compte cinq pétales arrondis à bord ondulé, de teinte rose. La fleur comporte 15 à 20 étamines à anthère jaune et filet blanchâtre, l'ovaire est velu. Le calice, les étamines et les styles sont persistants; ils formeront la mouche de la pomme. Toutes les fleurs de même bouton ne s'épanouissent pas en même temps ; la floraison débute par la fleur centrale du bouquet, puis les autres fleurs s'ouvrent successivement.

I. 8. 2 Système racinaire et porte-greffe

Selon les espèces et le mode multiplication, on rencontre trois formes principales d'enracinement: Pivotante, oblique et traçante. Le pommier fait partie de la deuxième catégorie ; ses racines les plus fortes partent en oblique et se ramifient en profondeur.

Chez les arbres fruitiers, notamment le pommier, le porte-greffe, par le biais de ses racines assure plusieurs fonctions, tel que: le stockage des réserves d'eau et d'éléments nutritifs mais beaucoup plus contrôlant la vigueur de l'arbre, la fructification précoce et la qualité des fruits (Jackson, 2003). L'arbre fruitier est composé d'un système aérien appelé "le greffant" et d'un système souterrain constituant la partie racinaire de l'arbre appelée "le porte-greffe". Cependant ils existent plusieurs types de porte-greffe qui diffèrent chacun de l'autre par les exigences hydriques et le développement racinaire. Les aptitudes hydriques des différents porte-greffes dépendent principalement de la profondeur d'enracinement (Trillot et al., 2002). Les porte-greffes à caractère nanisant et ayant un système racinaire restreint, demandent une irrigation pendant les périodes sèches. Les porte-greffes M9 et M26, par exemple, ne sont pas tolérants à la sécheresse et exigent un suivi attentif de l'irrigation. Le porte greffe a une grande influence sur le système d'implantation des arbres fruitiers dans un verger. Ainsi, si le porte greffe est vigoureux la distance de plantation peut aller jusqu'à 9 m (Pesson and Louveaux, 1984), au contraire si le porte greffe est faible le verger devient très dense avec un système de plantation de 3.5x1.5 m (Pesson and Louveaux, 1984). Les porte-greffes les plus fréquemment utilisés dans le monde sont du M1 au M16 (Masseron, 1989). Le M9 est le porte-greffe le plus utilisé en Europe mais le plus utilisé encore est M9 EMLA, défini comme semi-nanisant ; le M9 EMLA lui est défini comme vigoureux (Monney and Riesen, 1996). Avec un enracinement superficiel et traçant, ce porte-greffe est relativement sensible à la sécheresse (Trillot et al., 2002).

I. 8. 3 Stades phénologiques du pommier

Le volume et la qualité de production fruitière sont liés à plusieurs facteurs: La lumière (Monney and Henriot, 2004), la nutrition de la plante en éléments fertilisants, le gel printanier des fleurs, l'alternance et la pollinisation. Une pollinisation insuffisante est souvent la cause du faible taux de nouaison et par conséquent un faible rendement des arbres fruitiers ayant pour cause principale les chutes de fruits avant maturité et de déformation des fruits (Pesson and Louveaux, 1984). Chez le pommier, le premier signe d'activité au printemps se manifeste dans les bourgeons contenant des fleurs.

En arboriculture, plusieurs systèmes de description accompagnés de dessins représentatifs des principaux stades repères des arbres fruitiers ont été proposés.

La phénologie est l'étude des événements annuels périodiques des plantes. Il apparaît important de bien connaître les différentes phases qui gouvernent celles phénologiques des arbres fruitiers et notamment le pommier. En arboriculture, plusieurs systèmes de codification des stades repères des arbres fruitiers ont été proposés (Bloesch and Viret, 2013 ; Fleckinger, 1948).

La définition des stades repères des arbres fruitiers proposée par les différents auteurs n'est pas toujours la même. Les phénomènes végétatifs décrits ou leur période d'apparition peuvent d'ailleurs différer d'une espèce fruitière ou d'une variété à l'autre. L'établissement d'une correspondance entre les différents systèmes a donc été nécessaire (Bloesch and Viret, 2013). Des études très récentes effectuées par (Bloesch and Viret, 2013) en Suisse sur des fruits à pépins, spécialement le pommier de la variété Gala et William's pour le poirier présentant une nouvelle présentation, harmonisant les données actuellement reconnues.

Cependant, de nouvelles recherches effectuées par (Bloesch and Viret, 2013) sur les stades phénologiques repères des fruits à pépin et notamment le pommier de la variété Gala ont montré que ce dernier possède cinq stades principaux subdivisés en stades secondaires servant au codage du développement des fruits:

Le 1^{er} stade est le "stade 0", correspondant au repos hivernal, c'est la phase de la dormance,

Le 2^{ème} stade appelé "stade 5" apparaît l'inflorescence en passant par le gonflement des bourgeons (premier gonflement visible du bourgeon floral; les écailles ont des taches claires et s'allongent.) jusqu'au bouton vert (les fleurs encore fermées commencent à se séparer), puis apparition de l'inflorescence du bouton rose (Les sépales s'ouvrent légèrement, les pétales s'allongent et deviennent visibles) jusqu'au ballonnets (La plupart des fleurs forme avec leurs pétales un ballon creux.)

Le 3^{ème} stade "stade 6" correspond au début de la floraison (Environ 10 % des fleurs sont ouvertes)- pleine floraison (plus de 50 % des fleurs sont ouvertes, les premiers pétales tombent)- floraison déclinante (la plupart des pétales est tombé et enfin, la fin de la floraison (Tous les pétales sont tombés)

Le 4^{ème} stade "stade 7" correspond au développement des fruits en débutant par la nouaison (diamètre des fruits jusqu'à 10 mm, chute physiologique des jeunes fruits) - taille noisette (diamètre des fruits jusqu'à 20 mm.) - stade T (fruits dressés, la base du fruit et sa tige

forment un T, diamètre des fruits jusqu'à 40 mm) et le dernier stade secondaire correspond à la croissance des fruits (Les fruits ont atteint 70 % de leur taille finale).

Le 5^{ème} et dernier stade "stade 8" période réservée à la maturation des fruits ayant comme stades secondaires : début maturation (les fruits ont atteint leur taille finale, la couleur spécifique de la variété apparaît) - maturité avancée (intensification de la coloration spécifique de la variété) et récolte, pleine maturité gustative (goût et consistance des fruits typiques de la Variété).

La durée de floraison varie beaucoup d'une année à l'autre en fonction des conditions météorologiques. La figure I. 3 montre clairement le cycle phénologique du pommier (Fleckinger, 1948) depuis la phase de dormance "code A" jusqu'au grossissement des fruits "J".

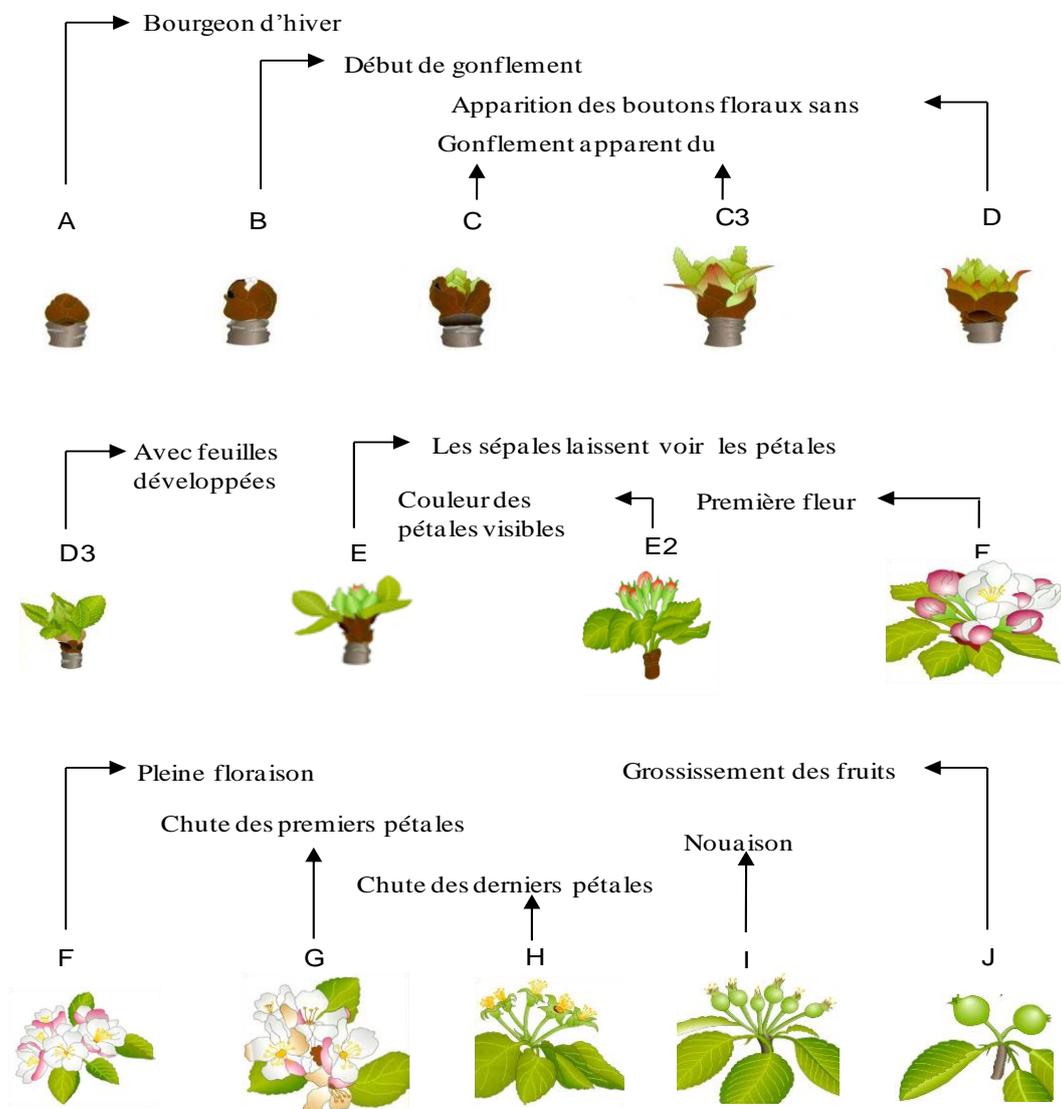


Figure I. 3. Cycle phénologique du pommier d'après Fleckinger.

I. 9 Pollinisation et production en fruit

La plupart des arbres fruitiers ne peuvent être pollinisés par leurs propres espèces. C'est le cas du pommier dont les fleurs, hermaphrodites sont porteuses à la fois d'organes reproducteurs males et femelles. A cet effet la reproduction ne pourra pas se faire au sein d'une même fleur. Les organes femelles ne peuvent être fécondés que par le pollen d'un pommier d'une autre variété. C'est pourquoi il est nécessaire de planter dans un verger de pommier des arbres pollinisateurs provenant d'une autre variété autre que celle destinée à la production du fruit. La densité des pollinisateurs dans le champ est à raison d'un arbre pour 7 à 10 arbres fruitiers. Le pollinisateur et les arbres fruitiers doivent avoir des périodes de floraison synchrone (Lespinasse and Leterme, 2005). La pollinisation est faite par les abeilles si les conditions de l'endroit ne soient pas trop ventées. Cependant la majorité des fruits mal fécondés tombe par terre.

I. 10 Éclaircissage des arbres fruitiers:

Tout au long de la formation de l'arbre, puis à l'âge adulte, il faudra veiller à ne pas avoir une charge en fruits trop importante par rapport à la capacité de production des branches fruitières (Lespinasse and Leterme, 2005). Un nombre en fruit, trop important pénalise également leurs calibres et leur qualité (Lespinasse and Leterme, 2005). Ainsi, pour préserver le calibre et la qualité des fruits, l'éclaircissage est la seule méthode pouvant faire face à cette situation. L'éclaircissage est une technique qui sert à supprimer un certain nombre de fruits dans le but d'éviter la concurrence entre elle, ce qui conduit à améliorer le calibre des fruits et donc la qualité de production. En effet, un éclaircissage précoce des arbres favorise la multiplication cellulaire et, par conséquent, la croissance des fruits (Gautier, 1993a). La réalisation de cette technique se fait généralement de trois manières, éclaircissage chimique, mécanique et manuel.

I. 10. 1 Éclaircissage chimique

Dans le but d'obtenir des fruits de qualité et d'assurer une production régulière l'éclaircissage chimique est l'une des stratégies principales permettant d'influencer les arbres fruitiers afin de favoriser la formation des bourgeons floraux pour l'année suivante et ainsi empêcher l'alternance (Widmer et al., 2008).

Il existe plusieurs substances d'éclaircissage chimique tel que le NAD (naphthylacétamide), l'ANA (acide naphthylacétique) et l'éthéphon (Widmer et al, 2008). Les deux premiers produits chimiques sont efficaces mais dépendent particulièrement des conditions

météorologiques et le déroulement de la floraison (Widmer et al., 2008). Par contre L'éthéphon, produit chimique destiné aux cultures difficilement éclaircissable, est subordonné aux conditions météorologiques et notamment à la température de l'air qui doit être comprise entre 18 et 22 °c (Widmer et al., 2008). Une des caractéristiques de ce produit est qu'il rend meilleure la formation de bourgeons floraux de l'année suivante (Wertheim, 1997). Le dosage de l'éthéphon à l'hectare est de 0.3-0.5 l. Son application est possible au stade ballon (fig. I.4B), chutes des pétales ou au moment de la formation des fruits ayant un diamètre de 8-12 m (Widmer et al., 2008).

I. 10. 2 Éclaircissage mécanique

Les interventions proches de la pleine floraison entraînent une augmentation de l'efficacité de l'éclaircissage. Le temps d'utilisation à l'hectare est très rapide, de 1 à 3 h/ha (Roche et al., 2009). Le rendement de l'intensité d'éclaircissage est généralement plus élevé à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'arbre (Roche et al., 2009). Il existe plusieurs machines servant à l'éclaircissage mécanique, nous citons celle de Darwin, la plus utilisée, conçue en 1990 en Allemagne par Hermann Gessler pour améliorer le potentiel floral. Les fleurs sont détachés par des fils en plastique ayant une longueur de 60 cm (Widmer et al., 2009). Cette machine possède la rapidité d'exécution, le climat n'a pas d'influence sur l'éclaircissage (Dorigoni et al., 2010). La contrainte majeure de cette machine est l'éclaircissage au cœur de l'arbre qui est difficile (Dorigoni et al., 2010).

I. 10. 3 Éclaircissage manuel

L'éclaircissage manuel est réalisé à la fin de la chute physiologique (fin Mai-début juin). Il consiste à éliminer tous les fruits de petit calibre (fig. I.4B) et de moindre qualité (mal formé) puis les fruits en surnombre (Lespinasse and Leterme, 2005). Les premiers travaux réalisés sur l'équilibre en fruit avec un indice de charge de 3 à 4 fruits par cm² permet d'obtenir des fruits de gros calibre (Lespinasse and Leterme, 2005).

I. 11 Les besoins en eau du Pommier

I. 11. 1 Détermination de l'évapotranspiration potentielle

Les besoins en eau des plantes se composent de l'évaporation et de la transpiration. Vu que ces deux processus sont influencés par les mêmes facteurs climatiques et qu'il est difficile de les séparer quantitativement, on les regroupe sous le terme « Evapotranspiration » (ET). Suivant les auteurs (Allen et al 1998., Allen et al., 2005) l'ET est définie comme étant le

processus par lequel l'eau est perdue à partir de la surface du sol et de la plante sous forme d'évaporation et de transpiration.

Tous les deux composants de l'évapotranspiration sont limités par l'eau disponible dans le sol. S'il n'est pas nécessaire d'avoir de limitation, la valeur maximale dépend du climat et des conditions atmosphérique et géographique, et est dénommé « évapotranspiration potentielle » (ETP) ou ET_0 .

L' ET_0 représente la quantité maximale d'eau consommée par une culture de référence (gazon) couvrant totalement le sol et présentant une hauteur uniforme de quelques centimètres, dans la double hypothèse:

- stade de développement végétatif maximal
- sol suffisamment pourvu en eau (capacité de rétention).

Selon (Penman, 1948), l'évapotranspiration potentielle est définie comme étant la quantité d'eau transpirée dans un temps donné par une culture courte et verte couvrant bien le sol et que l'approvisionnement en eau ne constitue pas un facteur limitant de son développement. L'ETP est affectée par un certain nombre de facteurs lié à la météorologie (le rayonnement solaire, la température, l'humidité relative et vitesse du vent) et à la culture (type de culture, stade de croissance) (Allen et al., 1998).

La mesure de l'ETP peut être effectuée par le bilan hydrique du sol en utilisant des lysimètres ou bien des formules semi-empirique. La méthode de Penman-Monteith très recommandée par la FAO (Allen et al., 1998; méthode FAO-56) est celle que nous utiliserons dans notre étude.

A cet effet, pour prendre en considération l'influence des caractéristiques culturelles sur les besoins en eau du pommier, la FAO propose des coefficients cultureux K_c qui permettent de déterminer les besoins réels de la culture par la relation suivante:

$$ETP = ET_0 K_c \quad (I. 1)$$

ETP est l'évapotranspiration potentielle du pommier en mm ;

ET_0 est l'évapotranspiration potentielle de la culture de référence en mm ;

K_c est le coefficient cultural.

Les coefficients cultureux de la même culture dépendent des différentes périodes de croissance du fruit PCF. Pour la culture du pommier, les coefficients cultureux varient de 0.7-

1 (Bonany and Camps, 1998): Avril-Mai (0.7), Juin (0.85), Juillet-10 Août (1) et 10 Août-Sept. (0.7).

I. 12 L'arboriculture suisse

La Suisse est un pays arboricole par tradition (Kellerhals, 2008) et a été pendant plus d'un siècle le pays d'Europe le plus riche en arbres fruitiers, que ce soit par rapport à la population ou à la surface cultivée. L'agriculture suisse connaît donc peu de problèmes avec l'approvisionnement en eau; la surface irriguée est exiguë et se limite pour l'essentiel aux régions touchées par la sécheresse, ce qui est le cas du Canton de Valais. Dans les conditions relativement sèches du Valais (≤ 600 mm de précipitations/an), selon la réserve hydrique du sol, il s'avère parfois nécessaire de recourir à un apport d'eau ponctuel durant la saison estivale. La Suisse a un verger de pommiers de 5200 ha situé dans plusieurs zones : Lémanique, Valais, Suisse centrale et orientale. Sa production moyenne est de 150000 tonnes. Les principales variétés cultivées sont: Golden Delicious, Idared, Jonagold et Gala (Trillot et al., 2002).

I. 13 Appréciation de l'état hydrique du pommier

De nombreux facteurs influent sur l'état hydrique du pommier. L'offre naturelle (sans irrigation) est assurée essentiellement par la réserve en eau utilisable du sol (RU) qui dépend, entre autre, de la profondeur du sol exploré par les racines, de sa texture et de sa structure (éventuellement de la présence d'une nappe d'eau perchée, du ruissellement, etc.), et par le mésoclimat (pluviométrie sur la parcelle) (Zufferey et al., 2006) .

La demande découle principalement de l'évapotranspiration de la plante et du sol; elle est étroitement dépendante de la dimension du couvert végétal (densité de plantation, surface foliaire, etc.), de la couverture du sol et de la pression d'évaporation de l'atmosphère (température, hygrométrie et rayonnement) (Zufferey et al., 2006).

Le pilotage de l'irrigation des cultures par le suivi du statut hydrique du sol à été longtemps utilisé pour apprécier l'état hydrique de la plante (Campbell and Campbell., 1982; Hanson et al., 2000). Cependant il existe plusieurs indicateurs de stress hydrique pour évaluer le régime hydrique des arbres fruitiers. Certaines sont basées sur la mesure de la quantité d'eau se trouvant dans le sol ou de sa disponibilité pour la plante (tensiométrie), alors que d'autres sont basées sur la physiologie de la plante (Naor et al., 2008).

1. 14 Bilan hydrique

Le bilan hydrique est un outil de gestion permettant de faire le suivi et l'analyse des besoins en eau d'irrigation des cultures. Ce dernier se fait par un pas de temps bien défini. Il peut être décennaire, à la semaine ou bien au jour le jour particulièrement pour les cas les plus sensibles (sols sableux ou à faible réserve) en fonction du sol et de la météorologie. Le bilan hydrique est nécessaire pour établir le planning des irrigations, il dépend essentiellement des données agronomiques telles que la réserve utile du sol RU et la réserve facilement utilisable RFU) et des données météorologiques notamment les pluies et l'évapotranspiration de référence ainsi que des apports d'eau de la nappe souterraine. Toute la mise en œuvre du bilan hydrique en plein champ est une opération complexe, dans sa forme simplifiée le bilan hydrique ne permet pas de prendre en compte les apports d'eau par la nappe souterraine ou les pertes par ruissellement qui peuvent être importantes (cas d'orage, par exemple).

Le bilan hydrique, rigoureux dans son principe, pose d'énormes problèmes dans son application, en particulier :

La réserve utile est difficile à déterminer, car elle dépend de la profondeur des racines contribuant à l'alimentation des cultures. La profondeur des racines, elle-même, est difficile à estimer. Par conséquent, la réserve facilement utilisable devient aussi difficile à évaluer (Rieul and Ruelle, 2003).

Pour établir des bilans hydriques à la parcelle de nombreux logiciels ont été réalisés. La mise en œuvre de ces outils nécessitant d'une part des données météorologiques et d'autre part des données agronomiques (Rieul and Ruelle., 003). Les données météorologiques concernent essentiellement les pluies et l'évapotranspiration de référence et les données agronomiques concernent (le sol et la plante).

I. 14. 1 Expression du bilan hydrique et rôle des différents termes

$$B_h = P_{\text{eff}} + I_{\text{irr}} - ETP - D_{\text{dr}} - R_{\text{ruis}} \quad (\text{I. 2})$$

Avec :

B_h , variation du stock de l'eau dans le sol sur la profondeur d'action du système racinaire en mm;

P_{eff} , pluie efficace stockée dans le sol et réutilisable par la plante en mm ;

I_{irr} , dose d'irrigation en mm ;

ETP , évapotranspiration potentielle en mm ;

D_{dr} , drainage correspondant à une évacuation de l'eau excédentaire en mm ;

R_{ruis} , ruissellement en mm.

La formulation du bilan hydrique suppose que la pluie sera stockée dans le sol est réutilisée par la plante. La comptabilisation de la pluie mesurée au pluviomètre n'est pas donc suffisante. Dans la pratique, il est nécessaire d'éliminer toute pluie inférieure à 10 mm, ou tout épisode où la somme sur trois jours n'atteint pas 15 mm; de même de très grand volumes stockés hors des horizons accessibles aux racines ne peuvent être comptabilisés (Tiercelin and Vidal, 2006).

En irrigation en goutte à goutte, toute eau stockée à l'extérieur est pratiquement inaccessible à la végétation et ne peut être comptabilisée dans le bilan hydrique, la mise en œuvre des modèles existant dans la pratique reste très complexe vu qu'il est difficile de séparer le sol en deux compartiments à fonctionnement différent (Tiercelin and Vidal, 2006).

I. 15 Déficit de pression de vapeur

Le déficit de pression de vapeur d'eau est la différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur dans la masse d'air considérée (Jones, 1992), une expression similaire est la différence de contenu en eau de l'air. C'est à ce déficit de vapeur que la plante réagit. La réponse de la conductance stomatique des arbres fruitiers est étroitement liée au déficit de pression de vapeur ainsi lorsque le DPV est faible ou modéré, la conductance stomatique du pommier est proche du maximum (Watson et al., 1978; Dragoni et al., 2004 ; Massonnet et al., 2007). La réponse stomatique au DPV devient un facteur limitant au valeur supérieur du DPV (Dragoni et al., 2004).

Le calcul de la pression de vapeur d'eau saturante est comme suit :

$$e^0(T) = 0,6108 + e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)} \quad (I. 3)$$

Avec :

$e^0(T)$, pression de vapeur à la température T en kPa,

T, température de l'air en C°,

I. 15. 1 Déficit de pression de vapeur actuel DPV

Le déficit de pression de vapeur actuel (e_s) se calcule de différentes manières en fonction de la disponibilité des données, à partir des observations maximales, minimales et maximales ou moyennes de l'humidité relative. Ils existent différentes équations pour calculer le DPV suivant la disponibilité des données. Dans notre présent travail nous utiliserons l'humidité relative:

$$e_a = \frac{e^0(T_{\min})\frac{HR_{\max}}{100} + e^0(T_{\max})\frac{HR_{\min}}{100}}{2} \quad (I. 4)$$

Avec :

e_a , déficit de pression actuel en kPa ;

$e^0(T_{\min})$ et $e^0(T_{\max})$, pression de vapeur saturante pour les températures maximales et minimales de la période de calcul en kPa ;

HR_{\max} et HR_{\min} , humidité relative maximale et minimale en %

Lorsque la pression de vapeur de saturation est liée la l'humidité relative moyenne de l'air, l'expression du DPV est donnée par la relation suivante:

$$e_a = \frac{HR_{\text{moy}}}{100} \left[\frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \right] \quad (I. 5)$$

Avec :

La pression de vapeur d'eau saturante e_s est fonction des températures maximale T_{\max} et minimale T_{\min}

$$e_s = \left[\frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \right] \quad (I. 6)$$

Pression de vapeur d'eau actuel à partir de l'humidité de l'air maximale et minimale

$$e_a = - \left[\frac{e^0(T_{\min})\frac{HR_{\max}}{100} + e^0(T_{\max})\frac{HR_{\min}}{100}}{2} \right] \quad (I. 7)$$

Le déficit de pression de vapeur d'eau : $VPD = e_s - e_a$

$$\text{Finalement : } VPD = \left[\frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \right] - \left[\frac{e^0(T_{\min})\frac{HR_{\max}}{100} + e^0(T_{\max})\frac{HR_{\min}}{100}}{2} \right] \quad (I. 8)$$

I. 16 Le déficit hydrique des plantes

La variabilité du climat est la principale contrainte à laquelle est confrontée l'agriculture et particulièrement les arbres fruitiers en milieu-aride et semi-aride. La faiblesse et l'irrégularité des précipitations, associées à l'aridité du climat, impose le déficit hydrique qui est à l'origine de la faiblesse des rendements et leurs variations. L'eau est aussi un facteur important limitant la production agricole (Evenhuis and Alblas, 2002; Kirnak et al., 2003), et affecte aussi le rendement qualitatif (Kirnak et al., 2003; Ostrowska and Chelpinski, 2003).

Le déficit hydrique est l'un des facteurs les plus importants limitant la production des cultures dans le monde (Akram et al., 2007; Ashraf, 2010). En verger, le premier rôle de l'irrigation est d'apporter aux arbres les doses d'irrigation nécessaires à leur développement, durant les différentes périodes de croissance du fruit PCF. La gestion de l'irrigation inclut les objectifs de production en termes de rendement et de qualité, ainsi que le maintien de l'équilibre végétatif des arbres. Cependant, les conditions climatiques, le type de sol, la technique d'entretien du sol, le porte-greffe, la charge des arbres et la fréquence d'irrigation sont des facteurs qui influencent la consommation en eau d'un verger. L'utilisation efficace de l'eau est le déficit principal dans les pratiques agricoles mondiales où les problèmes du manque d'eau sont répandus. Dans ce contexte, l'efficacité de l'utilisation de l'eau de l'agriculture doit être optimisée. Le déficit en eau est l'un des facteurs les plus importants limitant la production des cultures dans le monde (Akram et al, 2007; Ashraf, 2010).

I. 17 L'irrigation en goutte à goutte souterraine (IGGS)

Face à la sécheresse qui touche plusieurs régions dans le monde, une meilleure utilisation de l'eau n'est possible que grâce à l'amélioration de la manière dont on apporte l'eau à la plante. A cet effet, une gestion rationnelle avec des stratégies raisonnée passe obligatoirement par la performance des apports d'eau à la plante. L'irrigation en goutte à goutte étant la meilleure stratégie du point de vue efficience. Cette technique améliore l'utilisation de l'eau et conduit à une gestion rationnelle de la ressource en eau (Lamm et al., 2006). L'irrigation en goutte à goutte s'est développée ces dernières années avec l'emploi des gaines enterrées qu'on appelle "Irrigation en Goutte à Goutte Souterraine" (IGGS) (Camp et al., 2000; Thompson et al., 2009). L'IGGS est l'un des systèmes d'irrigation le plus efficace utilisé aujourd'hui (Camp et al., 2000). Il entraîne une gestion de l'eau optimale dans le but d'augmenter la productivité agricole. Ce système fournit de l'eau directement à la zone racinaire des plantes et minimise l'évaporation à la surface des sols, le ruissellement et la percolation profonde, (Phene et al.,

1993; Ayars et al 1999; Thompson et al., 2009), ce qui conduit à réduire la pollution (Camp et al., 2000).

L'application de l'irrigation en goutte à goutte souterraine sur des arbres fruitiers n'a pas eu d'impact négatif sur le rendement des arbres fruitiers. De nombreuses études ont montré que IGGS est très efficace et maintient le même rendement comparativement aux autres techniques d'irrigation (Camp et al., 2000).

Devant, la rareté des ressources en eau notamment dans les zones aride et semi aride ou l'eau est strictement limitée, l'irrigation des arbres fruitiers doit passé impérativement par l'IGGS, comparativement aux autres techniques d'irrigation, celle en goutte à goutte souterraine est une méthode prometteuse fortement recommandée pour les arbres fruitiers et pourra faire face aux aléas climatiques (Chenafi et al., 2013).

I. 18 Les différentes stratégies d'irrigation

I. 18. 1 L'irrigation de confort

Le pilotage de l'irrigation de confort IC est l'une des stratégies consistant à maintenir le sol proche de la capacité de rétention. Cette technique est utilisée par les agriculteurs dans les zones où l'eau n'est pas un facteur limitant à la plante. Par cette méthode, les cultures reçoivent l'évapotranspiration potentielle complète dans le but d'atteindre le rendement maximale (Kang and Zhang, 2004). Pour les arbres fruitiers et le cas du pommier, les doses d'irrigation sont calculées depuis la pleine floraison jusqu'à la récolte en fonction de l'évapotranspiration potentielle ETP, de la pluviométrie efficace et de la réserve facilement utilisable RFU. C'est à travers l'évolution du stock d'eau contenu dans le sol qu'on pourra appréhender les conditions hydriques des arbres fruitiers. Cette évolution du stock d'eau du sol est régie par l'équation du bilan hydrique "I" s'écrivant de la façon suivante :

$$I = K_c ETP - P_e - kRFU \quad (I. 9)$$

Avec :

I, irrigation en mm ;

K_c , coefficient cultural ;

ETP, évapotranspiration potentielle du pommier en mm ;

P_e , précipitations efficaces en mm ;

K, fraction utilisée de la RFU ;

RFU, réserve facilement utilisable en mm.

Sur des profondeurs variables, la réserve utile correspond aux réserves utiles des différents horizons dont les bornes variant de zéro à la variable z et s'exprime par l'intégrale suivant:

$$RU = \sum (H_{cr} - H_{pf}) \Delta z_i da \quad (I. 10)$$

RU , réserve utile en mm ;

H_{cr} , humidité à la capacité de rétention en % ;

H_{pf} , humidité au point de flétrissement en % ;

Z , profondeur des racines en m ;

α , fraction de la réserve utile égale à 0.66 ;

da , densité apparente du sol g/cm^3 .

Le bilan hydrique permet d'évaluer avec une précision relative les besoins en eau d'irrigation de la culture. Il est fondé sur un système d'équation « entrée-sortie ». Le pilotage de l'irrigation par le biais du bilan hydrique est peu précis, mais il renseigne juste sur la disponibilité de l'eau dans le sol. L'irrigation de confort des arbres fruitiers n'est pas du tout la bonne stratégie optimale, car contre un léger stress leurs s'avère nécessaire (Feres and Evans, 2006).

I. 18. 2 L'irrigation déficitaire

La tendance actuelle de l'irrigation des vergers s'oriente vers un certain rationnement, car un léger stress hydrique peut avoir un impact positif sur la qualité du fruit (Costa et al., 2007). Mais à quel moment et durant quelle période faut-il intervenir? et quelle dose d'irrigation faut-il appliquer? tout en maintenant un bon rendement qualitatif et quantitatif. Il ya donc un intérêt à déterminer pour maintenir l'optimum des rendements des cultures en conditions de déficit hydrique sans qu'il y ait un impact négatif sur la qualité physico-chimique des fruits.

Une autre approche pour augmenter l'efficience de l'eau en agriculture est l'irrigation déficitaire ID. Plusieurs auteurs ont utilisé cette technique sur des arbres fruitiers tel que: le pommier (Mpelasoka et al., 2001; Leib et al., 2006; O'Connell and Goodwin., 2007; Naor, 2008; Talluto et al., 2008; Swaef et al., 2009, Girona et al., 2010), l'abricotier (Torrecillas et al., 2000; Pérez-Pastor et al., 2009), le pêcher (Girona et al., 2005) et les agrumes (García-Tejero et al., 2011), sans incidence sur le rendement.

L'irrigation déficitaire est l'une des approches pouvant réduire les apports d'eau à la plante sans qu'il y ait une diminution des rendements (Chenafi et al., 2013). Cette stratégie ID est

une approche qui peut faire face au changement climatique, en réduisant les apports d'eau, ce qui conduit à augmenter l'efficacité de l'irrigation. La restriction des apports pendant des périodes de croissance du fruit PCF bien spécifiques peut avoir un impact minimal sur le rendement des cultures (Paly and Zell, 2009).

Différentes stratégies de l'irrigation déficitaire sur pommier ont été étudiées dans le but de contrôler le rendement qualitatif et quantitatif du fruit et la croissance végétative des arbres fruitiers (Ebel et al., 1995; Mpelasoka et al., 2000; Ro, 2001; Caspari et al., 2004; Leib et al., 2004; Lombardini et al., 2004). Des études similaires ont été menées sur d'autres arbres fruitiers à savoir la vigne (Marsal et al., 2008), pêcher (Mitchell and Chalmers, 1982; Girona et al., 2005). L'application de l'irrigation déficitaire exige la connaissance des périodes de croissance des fruits les plus sensibles au stress hydrique.

I. 18. 3 L'irrigation déficitaire régulée (IDR)

Une autre méthode utilisée est l'irrigation déficitaire régulée IDR, une méthode prometteuse pour une bonne utilisation rationnelle et efficace de l'eau douce. Cette technique conserve l'eau sans toute fois avoir une influence sur le rendement et la qualité des fruits (Chalmers, 1989; Naor, 2006). La stratégie de IDR repose sur la réduction des doses d'irrigation au cours d'une phase spécifique de la période de croissance des fruits PCF de la culture et, par conséquent en menant différents scénarios d'irrigation, on améliore l'utilisation judicieuse de l'eau afin d'augmenter l'efficacité de celle-ci et de maintenir les rendements qualitatif et quantitatif des fruits.

L'objectif de l'irrigation déficitaire régulée est d'augmenter l'efficacité de l'eau et de maintenir le rendement des cultures du point de vue qualitatif et quantitatif. Des essais sous l'IDR sur des arbres fruitiers tels que l'abricotier et le pêcher ont montré que le rendement et le calibre des fruits restent les mêmes comparativement à l'irrigation de confort (Torrecillas et al., 2000; Girona et al., 2005; Pérez-Pastor et al., 2009).

Le concept de l'IDR fût proposé par (Chalmers et al., 1981; Mitchell and Chalmers., 1982), dans le but de contrôler la croissance végétative des pêchers en plein champ sans qu'il y ait une influence sur le rendement des arbres fruitiers. En terme d'efficacité, l'IDR est une stratégie pouvant conserver l'eau d'irrigation jusqu'à 25 %, sans effet sur le rendement (Goldhamer, 1999).

L'irrigation déficitaire régulée IDR est actuellement employée pour améliorer l'apport d'eau sur de nombreuses cultures dans différentes parties du monde et particulièrement les arbres fruitiers. Des études menées par différents auteurs, tels que pour les arbres fruitiers: pêcher

(Girona et al., 2005). Des études menées par différents chercheurs ont montré que l'application de l'IDR n'a eu aucun effet sur le rendement des arbres fruitiers tels que: pommier (Ebel et al., 1995 ; Chenafi et al., 2013), l'amandier (Goldhamer et al., 2000a), pistachier (Goldhamer and Beede, 2004), citronnier (Goldhamer and Salinas, 2000b), abricotier (Ruiz-Sánchez et al., 2000), vignes (McCarthy et al., 2002; Intrigliolo and Castel, 2009) et l'olivier (Moriana et al., 2003; Iniesta et al., 2009).

Généralement l'IDR est une stratégie appliquée seulement durant des périodes de grossissement des fruits peu sensibles à l'eau (Chalmers et al., 1981; Girona et al., 1993; Marsal and Girona, 1997). Cette stratégie offre plusieurs avantages: réduit les apports d'eau, maintient le rendement et la qualité des fruits tels que: pommier (Van Hoojdonk et al., 2004; Naor and Cohen 2003; Girona et al., 2009; Chenafi et al. 2013), agrumes (González and Castel, 2000; García-Tejero et al., 2010a, García-Tejero et al., 2010b), amandier (Goldhamer et al., 2006), pêcher (Girona et al., 2005), et vignes (Girona et al., 2006).

Certains auteurs ont montré que l'irrigation déficitaire régulée appliquée durant la seconde période du grossissement des fruits PCF II, maintient le rendement, la taille des fruits ainsi que leurs qualités, au même titre que l'irrigation de confort (Girona et al., 2005; Pérez-Pastor et al., 2009; Torrecillas et al., 2000).

Certains auteurs ont trouvé le contraire; l'application de l'IDR durant PCF III diminue la taille des fruits (Intrigliolo and Castel, 2005; Torrecillas et al., 2000).

Par contre parmi les effets négatifs de l'IDR, elle réduit la croissance de la végétation, particulièrement dans les branches et le diamètre des troncs (Girona et al., 2005; Intrigliolo and Castel, 2005; Romero et al., 2004).

Selon des études espagnoles (Girona et al., 2009) et israéliennes (Naor et al., 2008), un rationnement de l'irrigation est possible depuis la fin de la division cellulaire jusqu'à 3-4 semaines avant la récolte. Durant cette période, Thalheimer and Paoli, 2004 proposent d'utiliser un seuil de 50 cbar correspondant à un stress hydrique modéré de la plante, sans conséquence pour le calibre des fruits. Un rationnement bien maîtrisé favorise généralement la qualité des fruits (sucres, fermeté). La réponse de l'abricotier à l'irrigation déficitaire régulée IDR en goutte à goutte (Pérez-Pastor et al., 2009) a montré la sensibilité de la culture au stress sévère, marquée par la réduction des feuilles de l'arbre, sans toute fois qu'il y ait vraiment un effet négatif sur le rendement.

L'étude des différentes stratégies de l'IDR, menée sur l'abricotier en vue de toutefois déterminer sa réponse sur la croissance et le rendement de l'arbre fruitier (Pérez-Pastor et al., 2009), a révélé le maintien du rendement, sans aucune influence sur la croissance des feuilles.

La rationalisation de ces apports en fonction des besoins réels de la plante reste encore mal définie et il n'y a pas des seuils limites fixes de l'irrigation déficitaire régulée trouvés pour le pommier à ce jour car cela dépend de plusieurs facteurs à savoir le type de climat, la culture, la nature du sol, la qualité de l'eau et la technique d'irrigation.

Le stress hydrique appliqué durant la période de la division cellulaire a diminué la croissance végétative du poirier (Mitchell et al., 1984; Chalmers et al., 1986). Le stress hydrique pendant PCF I réduit aussi la taille du fruit des pêchers (Mitchell and Chalmers, 1982) et de l'abricotier (Ruiz-Sanchez et al., 2000; Torrecillas et al., 2000). Les arbres fruitiers et notamment le pommier sont très sensibles au stress hydrique depuis la pleine floraison jusqu'à la récolte (Behboudian and Mills, 1997). Des études ont montré que certains arbres fruitiers tels que les pêchers, poiriers et l'oliviers, soumis à l'irrigation déficitaire, n'ont pas les mêmes rendements et calibres du fruit, comparativement au pommier (Leib et al., 2006).

I. 18. 4 Le séchage partiel de la zone des racines (SPR)

Le séchage partiel de la zone des racines SPR est une forme modifiée de l'irrigation déficitaire (Intrigliolo and Castel., 2009), qui consiste à irriguer une partie seulement de la zone des racines, laissant une autre partie racinaire sans irrigation, pendant que l'autre est en irriguée (Zegbe et al., 2011). Le SPR est une nouvelle stratégie de l'irrigation déficitaire développée ces dernières années à travers le monde testée sur plusieurs arbres fruitiers et notamment le pommier notre matériel végétal (Caspari et al., 2004; O'Connell and Goodwin., 2007; Talluto et al., 2008; Zegbe et al., 2008; 2011; Leib et al., 2006; Einhorn and Caspari, 2004). Des études effectuées par (Intrigliolo and Castel, 2009) sur les vignes ont montré que l'application de la SPR n'a pas eu d'influence sur le rendement et la qualité des fruits des arbres fruitiers.

I. 19 Les indicateurs du stress hydrique

Les indicateurs du stress hydrique du végétal sont devenus précieux pour conduire des stratégies d'irrigation en cas de contrainte hydrique et économiser l'eau sans préjudice sur le rendement des arbres fruitiers et la qualité physico-chimique du fruit (Durán Zuazo et al., 2011). Les mesures s'effectuent généralement par le biais du suivi du statut hydrique du sol et celui de la plante.

1. 19. 1 Statut hydrique du sol

Le suivi du statut hydrique du sol se fait deux manières par des mesures du potentiel hydrique du sol et par des mesures de la teneur en eau du sol.

I. 19. 1. 1 La teneur en eau du sol

Le suivi de la teneur en eau du sol en plein champ a été longtemps utilisé comme outil de suivi du planning des irrigations (Campbell and Campbell, 1982). Le contrôle de l'irrigation basée sur le statut hydrique du sol est l'une des méthodes pratiques de la programmation des déclenchements des irrigations (Silva et al., 2005). C'est une méthode qui ne demande pas beaucoup d'investissements comparativement aux autres techniques (Silva et al., 2005). Un des outils de suivi de la teneur en eau du sol est les sondes (Abrisqueta et al., 2012). Le suivi de la teneur en eau du sol par des sondes pour la programmation des irrigations est important (Girona et al., 2005), il permet le contrôle de la teneur en eau du sol à différentes profondeurs, exploités par les racines (Girona et al., 2005). Différentes sondes sont utilisées pour le suivi du statut hydrique du sol, nous citerons les sondes à neutron (Caspari et al., 1994; Romero et al., 2004a) et sondes capacitatives ont été utilisées par certains auteurs (Fares and Alva, 2000; Fares and Polyakov, 2006; Thompson et al., 2007; Bonet et al., 2010).

I. 19. 1. 2 Le potentiel hydrique du sol

Pour la gestion de l'irrigation, différentes sondes qui mesurent le potentiel hydrique du sol ont été utilisées pour suivre la teneur en eau du sol et ainsi identifier le statut hydrique de la plante (Merot et al., 2008; Monney, 2011). Le potentiel hydrique du sol est un des indicateurs du stress hydrique de la plante. Cependant ce paramètre est très compliqué sur le terrain car il dépend de plusieurs facteurs (textures, profondeur, densité racinaire etc.). Le suivi du statut hydrique du sol par le biais de mesure du potentiel hydrique du sol se fait soit par les tensiomètres soit par les sondes Watermark® pour une bonne gestion de l'irrigation sans contrainte d'exploitation, c'est la dernière sonde qui est recommandée sur le terrain.

I. 19. 2. Statut hydrique de la plante

La détection du stress hydrique de la plante se fait par des indicateurs permettant des mesures du potentiel hydrique foliaire de midi et de base (mesuré à l'aube (fin de nuit), par des mesures des échanges gazeux (la photosynthèse et la transpiration) ainsi que la conductance stomatique et par des mesures de la variation journalière du diamètre du tronc (dendrométrie) et enfin la circulation de la sève.

I. 19. 2. 1 Le potentiel hydrique foliaire

Les indicateurs physiologiques constituent une autre approche qui évalue l'état hydrique de la plante elle-même. Parmi ces indicateurs, la mesure du «potentiel hydrique du feuillage» permet d'estimer la disponibilité en eau pour la plante. Cette opération, effectuée au moyen

d'une chambre à pression, permet de mesurer la force avec laquelle l'eau est retenue dans le végétal. Plus les valeurs enregistrées sont basses ou négatives, plus l'eau est retenue fortement à l'intérieur de la plante (Zufferey et al., 2006).

Le potentiel hydrique, mesuré le long du tronc de l'arbre, appelé potentiel hydrique du xylème du tronc, a toujours été un indicateur physiologique fondamental du stress hydrique dans les plantes (Naor, 2000; Naor, 2008). Le comportement physiologique du pommier et son régime hydrique, en particulier évalué au moyen d'indicateurs physiologiques (potentiels hydriques foliaires, échanges gazeux) à été étudié par différents auteurs (O'Connell Goodwin, 2007; Talluto et al., 2008; Naor et al., 2008; Naor et al., 2009; Swaef et al., 2009).

Le potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_x a été proposé comme un bon indicateur du stress hydrique aux arbres fruitiers tels que le pommier (Naor et al., 2008), le pêcher (Girona et al., 2005) et le prunier (McCutchan and Shackel, 1992). Cependant plusieurs auteurs suggèrent que le potentiel du xylème du tronc est un indicateur sensible au stress hydrique des arbres fruitiers tels que, le pommier (Swaef et al., 2009; Naor et Cohen., 2003; Naor and Cohen., 2008), les agrumes (García-Tajero et al., 2010), le grenadier (Rodríguez et al., 2012), la vigne (Girona, 2006; Zufferey et al., 2006) et le prunier (McCutchan and Shackel, 1992).

Le suivi du potentiel hydrique en fin de nuit (potentiel hydrique de base) reflète bien l'évolution de la disponibilité de l'eau dans le sol (Zufferey et al. 2006).

I. 19. 2. 2 Les échanges gazeux

Un autre moyen de détection du stress hydrique des arbres fruitiers est l'emploi des indicateurs physiologiques comme la photosynthèse, la transpiration et la conductance stomatique.

L'état hydrique du pommier, l'environnement extérieur des arbres fruitiers l'humidité de l'air et le déficit de pression de vapeur DPV conditionnent les échanges gazeux du feuillage. L'assimilation chlorophyllienne est maximale quand la plante est mise dans une situation de confort hydrique. La photosynthèse diminue progressivement quand la contrainte hydrique s'accroît et impose la fermeture progressive des stomates. Des études effectuées sur le pommier ont montré que la photosynthèse est très sensible au stress hydrique (Lombardini et al., 2004; Swaef et al., 2009; Zhang et al., 2010).

La photosynthèse qui est un processus physiologique important pour la plante, est très sensible au stress hydrique et affecte directement la croissance des fruits et le rendement des arbres fruitiers (Cui et al., 2009). D'autres études effectuées par (Ma et al., 2006; Ahmed et al., 2007) ont montré que le stress hydrique diminue légèrement la photosynthèse du poirier et

de l'olivier. Par contre la transpiration est réduite d'une manière remarquable, ce qui montre que les arbres fruitiers s'adaptent au stress hydrique en maintenant leurs turgescences par la réduction de la transpiration, par le biais du contrôle de l'ouverture des stomates.

I. 19. 2. 3 La Dendrométrie et la circulation de la sève

La dendrométrie qui est une technique de mesure de la fluctuation du diamètre du tronc (FDT), est l'un des outils de détection du stress hydrique (Bonet et al., 2010). Plusieurs études ont montré que le diamètre du tronc des arbres fruitiers est sensible au stress hydrique chez l'olivier (Fernández et al., 2001; Moriana et al., 2010). L'amélioration récente des capteurs pour la mesure du flux de sève (FS) et la fluctuation du diamètre du tronc (FDT) rend ces derniers des outils intéressants pour l'indication de l'état hydrique des arbres fruitiers tels que le pommier (Green and Clothier, 1988; Ferrara and Flore, 2003; Swaef et al., 2009), l'olivier (Fernández et al., 2001) et le citronnier (Ortuño et al., 2005).

I. 20 Les effets du stress hydrique sur la qualité physico-chimique des fruits

La qualité physico-chimique est un paramètre fondamental des cultures irriguées, la présence d'un stress hydrique au cours de la période de croissance des fruits PCF peut avoir un impact négatif sur la qualité physico-chimique des fruits. Plusieurs auteurs ont étudié cette problématique ainsi, Mpelasoka et al., (2001) a montré que l'irrigation déficitaire a un effet sur la maturation des fruits et dépend du temps d'application. Des études similaires sur le pommier (Mpelasoka et al., 2000) et l'abricotier (Perez-Pastor, 2007) ont montré que la fermeté était très élevée pendant l'application des restrictions hydriques comparativement à l'irrigation de confort (Mpelasoka et al., 2000). Par contre aucune différence n'a été observée entre l'IDR et l'irrigation de confort IC sur le poids et la fermeté des fruits. D'autres études effectuées par (Perez Sarmiento et al., 2010) sur l'abricotier ont montré une augmentation de certaines caractéristiques des fruits à savoir la teneur en sucre, le goût et la couleur des fruits sous l'IDR. Des résultats similaires ont été obtenus sur l'oranger (García-Tejero, 2010a).

Plusieurs auteurs ont montré que l'application de l'IDR sur les arbres fruitiers tels que: le pommier (Ebel et al., 1995; Van Hoojdonk et al., 2004; Naor et al., 1995; Naor and Cohen, 2003), le citronnier (Ginestar and Castel, 1996; Muriel et al., 2006; García-Tejero et al., 2008) n'a pas eu d'influence sur la qualité physico chimique. Des études effectuées sur des arbres fruitiers tels que le pêchers (Behboudian et al., 1994) ont montré que le déficit hydrique augmente le taux de sucre des pêchers.

I. 21 Synthèse bibliographique et objectifs de la thèse

L'étude bibliographique réalisée sur la croissance démographique qui fait croître la demande en produits alimentaires, le réchauffement climatique et la faiblesse des ressources en eau a permis de préciser que l'eau en agriculture doit passer impérativement par de nouvelles stratégies d'irrigation afin d'assurer une bonne sécurité alimentaire sur les plans quantitatif et qualitatif des arbres fruitiers. La technique d'irrigation des arbres fruitiers par le biais du goutte à goutte souterrain GGS demeure un intérêt inévitable.

Par ailleurs, l'intérêt du suivi de la détection du stress hydrique du pommier par le statut hydrique du sol, le potentiel hydrique du xylème du tronc et le potentiel de base est d'un intérêt fondamental. Peu d'étude sur l'irrigation en goutte à goutte souterraine du pommier de la variété "Gala" ont été réalisées. La recherche sur des relations liant les paramètres du sol et les paramètres physiologiques du pommier demeure incontournable, surtout que le pouvoir d'absorption racinaire des arbres fruitiers diffère d'un arbre à l'autre. Dans le but d'interpréter les résultats du statut hydrique du sol-plante, des profils du sol ont été réalisés sur un comptage racinaire afin de pouvoir déterminer la zone d'absorption maximale des racines.

Face à la rareté des travaux sur la variété Gala, une approche de suivi de la qualité physico-chimique des fruits avant et après stockage obtenue par le biais des différentes stratégies d'irrigation en goutte à goutte souterraine est donc à la fois pertinente et originale. Bien que l'application de l'irrigation déficitaire régulée en arboriculture ait été étudiée, aucune étude n'a été faite sur la qualité productive du pommier de la variété "Gala", l'économie en eau et le comportement physiologique des arbres fruitiers lorsqu'il s'agit de l'irrigation en goutte à goutte souterraine (IDGGS).

Cependant, face à la faiblesse de la littérature et à la rareté des travaux concernant l'influence de l'irrigation déficitaire régulée en goutte à goutte souterraine sur le rendement des arbres fruitiers et la qualité physico-chimique des fruits du pommier de la variété (Gala) et les relations entre le statut hydrique du sol et de la plante, une démarche scientifique apparaît nécessaire et incontournable. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui a pour objectifs d'entreprendre de nouvelles recherches sur:

- Le pilotage de l'irrigation par les différentes sondes à savoir : Watermark[®] à 30 et 60 cm de profondeur, Aquapro à 15, 30, 45, 60, 75 et 90 cm de profondeur et par la bombe Scholander en suivant le potentiel hydrique du xylème du tronc et du potentiel hydrique de base des arbres fruitiers mesuré en fin de nuit.

- L'impact de l'irrigation déficitaire en goutte à goutte souterrain du pommier (Gala) sur la production du point de vue rendement des arbres fruitiers sur le poids et la taille des fruits, la qualité physico-chimique des fruits avant et après stockage et l'économie en eau surtout que les ressources en eau sont de plus en plus limitées et face à la rude concurrence entre les différents utilisateurs.
- Les relations entre le potentiel hydrique du sol Ψ_S mesuré par les Watermark® et la teneur en eau du sol TES mesurée par la sonde Aquapro à 30 et 60 cm de profondeur.
- Les relations entre le potentiel hydrique de base Ψ_B et celui du sol Ψ_B mesuré par la sonde Watermark® à 30 et 60 cm de profondeur et le potentiel hydrique de base Ψ_B et la teneur en eau du sol TES mesurée par la sonde Aquapro à différentes profondeurs du sol.
- Les relations entre le potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_X du pommier avec d'autres paramètres Ψ_S et TES à différentes profondeurs du sol.
- Le suivi du grossissement des fruits depuis la chute physiologique de juin des fruits jusqu'à la récolte ainsi que le suivi des diamètres du tronc des arbres fruitiers sur deux années d'expérimentation.
- La période efficace sur l'application de l'irrigation déficitaire régulée ainsi que les différentes relations entre les trois paramètres fondamentaux de gestion et de détection du stress hydrique de la plante: le potentiel hydrique du sol- la teneur en eau du sol et le potentiel hydrique du xylème du tronc surtout que l'irrigation est le goutte à goutte avec la double gaine enterrée.

Chapitre II Statut hydrique du sol

II. 1 Caractéristiques physiques d'un sol

Le sol est un milieu vivant complexe et dynamique. Il comprend une phase solide formée de particules ([Chossat, 2005](#)) issues des roches mères et une phase liquide faite de l'eau ou de la solution du sol et de l'air. L'eau se présente sous trois états principaux dans le sol: L'eau hygroscopique est fortement retenue par les particules du sol par des forces d'adhésion moléculaires et électriques, l'eau de capillarité adhère aux particules solides du sol grâce aux forces capillaires, l'eau libre ou gravitaire est celle qui est drainée rapidement du sol après saturation de celui-ci, elle se déplace sous l'effet de la gravité. L'eau libre existe dans les sols que dans les heures ou les jours qui suivent les précipitations ou dans le cas de nappe phréatique permanente. Quand les forces dues à la gravitation s'équilibrent avec celles de la rétention du sol, le point de ressuyage est atteint, l'eau restante constitue la capacité de rétention ([Gobat et al., 2010](#)).

La phase solide, en particulier la partie minérale, constitue la source principale des éléments nutritifs. Au cours de la décomposition de la roche divers éléments sont libérés dans la solution du sol, puis constitue une source de nutriments qui seront absorbés par la plante. Le sol est le seul principal milieu nutritif pour les plantes, il doit fournir non seulement un support physique mais aussi, et en permanence, les éléments inorganiques, ainsi que de l'eau en quantité suffisante et un milieu gazeux favorable au développement du système racinaire.

II. 2 Le sol et les éléments fertilisants pour les arbres fruitiers

Le sol est la partie superficielle de l'écorce terrestre, il est constitué de couches principalement composées de minéraux qui diffèrent de leurs matériaux d'origine dans leur texture et structure ainsi que d'autres caractéristiques ([Eric, 2013](#)). Le sol qui est composé de trois phases est considéré comme la plus importante ressource naturelle pour la production agricole ([FAO, 1999](#)). La phase solide est le réservoir nutritif principal des arbres fruitiers, cette phase contient des nutriments tels que le potassium (K), le sodium (Na), le magnésium (Mg), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn) et le cuivre (Cu), tandis que la phase liquide facilite le transport des nutriments dans le sol. Le comportement des nutriments minéraux dans le sol est étroitement dépendant des interactions nutriments entre les phases solides, liquides et gazeux ([Bassiri, 2005](#)).

Les besoins minéraux des arbres fruitiers sont particulièrement difficiles à évaluer (Gautier, 1987). Un nombre considérable de facteurs interfèrent dans la nutrition de l'arbre, nous citons que le climat du lieu, variation saisonnière de la croissance, mobilisation des réserves et l'état hydrique du sol (Gautier, 1987). Les arbres fruitiers sont capables de stocker les substances nutritives et de vivre momentanément sur ces réserves. Ainsi chez le pommier sur 100 kg d'azote absorbés 35 kg participent à la formation des feuilles et 55 kg se retrouvent dans les parties pérennes de l'arbre (Gautier, 1987).

II. 2. 1 Besoins en éléments nutritifs des arbres fruitiers

Les éléments nutritifs des arbres fruitiers sont multiples: Les éléments majeurs ou macroéléments ce sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. Les trois premiers sont puisés dans l'air et dans l'eau. Le dernier, dans le sol (forme minérale), a ces éléments s'ajoutent le soufre, le phosphore, le calcium, le potassium et le magnésium. Outre les éléments fertilisants majeurs, les arbres fruitiers ont encore besoin d'autres éléments nutritifs, parfois en très faibles quantités. Ces autres éléments, appelés oligo-éléments ou micro-éléments nutritifs, sont le manganèse (Mn), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le bore (B) et le molybdène (Mo). Par ailleurs, le sodium (Na), le silicium (Si), le cobalt (Co) et le nickel (Ni) sont également des éléments utiles à la croissance végétale (Bertschinger et al. 2003).

II. 2. 1. 1 Éléments majeurs en éléments nutritifs des arbres fruitiers

L'azote est l'un des macronutriments que les arbres fruitiers ont besoin en grande quantité et est un constituant de nombreux composants de cellules végétales (Bretaudeau, 1975). Le besoin en azote pour la croissance optimale des plantes est fonction de l'espèce et des phases de croissances des plantes (Marschner, 2012). L'azote est l'élément de base pour la formation des rameaux, les feuilles et les bourgeons, il est indispensable aussi à la croissance des arbres fruitiers (Bretaudeau, 1975). Le phosphore joue un rôle majeur dans le processus de mise à fruit (nouaison). Il assure une bonne maturité ainsi que la saveur du fruit.

Afin d'assurer une bonne teneur en sucre des fruits, les arbres fruitiers ont besoin du calcium qui joue un rôle très important dans la vie du végétal et du potassium qui joue aussi un rôle important dans la bonne formation de la fleur (Bretaudeau, 1975). Des études effectuées par (Aksoy et al., 1995., Chatzitheodorou et al., 2004) ont rapporté que l'azote et le phosphore ont l'effet le plus élevé sur le rendement, l'acidité des fruits d'abricot; alors que le potassium a prouvé son efficacité sur l'augmentation de la dureté de la texture et la teneur en sucre.

II. 2. 1. 2 Carences en éléments nutritifs des arbres fruitiers

Les carences des tissus végétaux en éléments fertilisants essentiels et en oligo-éléments sont des troubles de la gestion de ces éléments dans les tissus, qui peuvent également être qualifiés de troubles physiologiques (Bretonneau, 1975). Ils peuvent être la cause d'un apport trop faible ou trop important d'un élément fertilisant. Les arbres carencés présentent une réduction de leur activité végétative : faible vigueur des pousses annuelles de printemps et d'automne. A la floraison, le nombre de fleurs formées est moindre et on peut avoir une chute de fleurs et de jeunes fruits noués anormalement élevés induisant une réduction du rendement. Un vergé carencé en azote ralentit la croissance de l'arbre, la surface foliaire (Trubat et al., 2006). La carence en calcium retarde la coloration des fruits alors qu'une carence en potassium défavorise la conservation des fruits.

Pour le pommier, l'effet de l'insuffisance du phosphore se manifeste premièrement au niveau des fruits ensuite les feuilles et puis les bourgeons des arbres fruitiers qui ont tendance à se dessécher. Des études effectuées en Australie par (Taylor and Goubran, 1975) ont montré que les effets des insuffisances du phosphore au niveau des feuilles sont rarement observés en plein champ, par contre les feuilles des arbres fruitiers ont une teinte violette en automne. D'autres études effectuées par (Benson and Covey, 1979) sur du pommier de la variété Golden ont montré que le déficit en phosphore est caractérisé par la réduction de la taille des feuilles et des racines.

II. 3 État de l'eau dans le sol

L'eau est à la fois une force essentielle au maintien de la vie et une force érosive. Pour considérer la disponibilité de l'eau aux plantes, on se réfère plutôt au trois états de l'eau dans le sol, selon la force avec laquelle il l'a retient et selon aussi sa disponibilité pour les plantes (Gobat et al., 2010). L'eau de gravité comprise entre la capacité au champ et la saturation, l'eau utilisable contenue entre la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement permanent et enfin l'eau inutilisable qui est fortement retenue par les particules de sol et que la plante ne peut utiliser. Sa limite supérieure en teneur en eau est le point de flétrissement permanent (PFP).

Lorsque la teneur en eau du sol atteint le point de flétrissement permanent le potentiel hydrique du sol correspondant est au voisinage du seuil de -1.5 MPa (Raven et al., 2000). Cependant, d'autres auteurs considèrent que dans les mêmes conditions ce potentiel hydrique est compris entre -1.2 à -2 MPa (De Parceveaux and Huber, 2007). Par contre le potentiel

hydrique du sol à la capacité de rétention se situe généralement entre -0.01 et -0.05 MPa (De Parceveaux and Huber, 2007).

L'eau du sol se trouve ainsi soumise à trois forces qui lui sont appliquées (Fig. II.1): La force de gravitation P due à l'attraction terrestre, la force de rétention par les solides F et la force de succion des plantes S (Gobat et al., 2010).

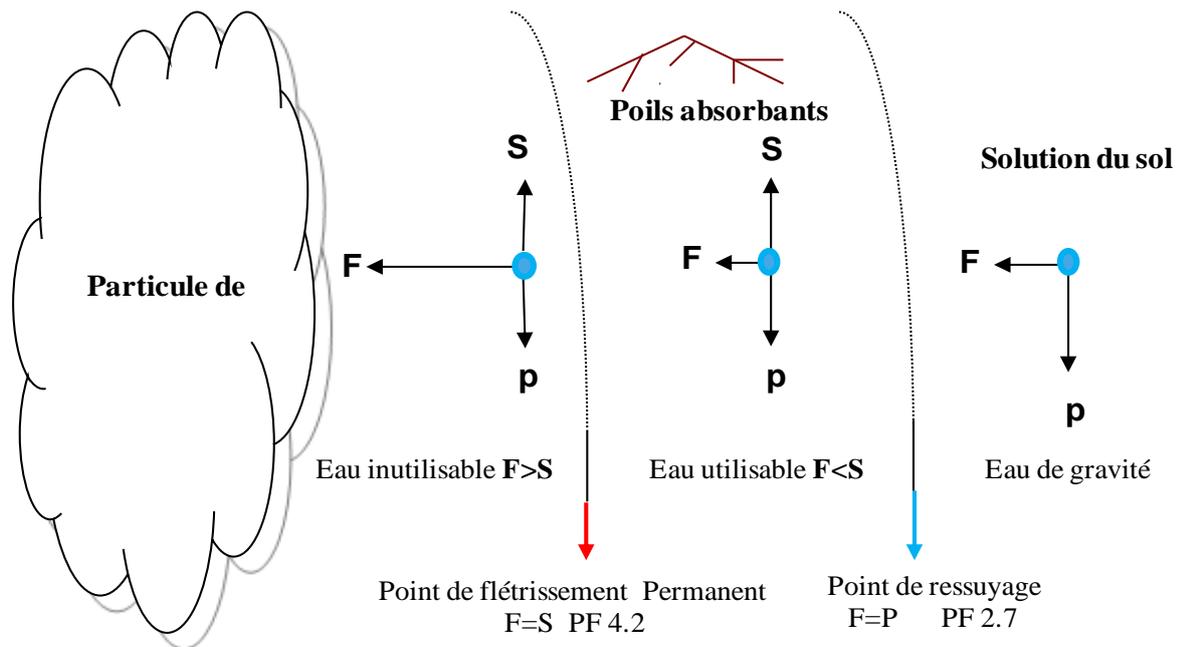


Figure II. 1. Physique du sol, point de flétrissement permanent, point de ressuyage.

II. 4 État hydrique du sol

L'état hydrique du sol peut être caractérisé soit par le potentiel hydrique du sol, soit par la teneur en eau du sol qui définit le travail requis pour déplacer l'eau de sa situation.

La connaissance de l'état hydrique du sol permet d'appréhender le niveau de disponibilité de l'eau pour la culture ainsi le contrôle des irrigations (Rieul and Ruelle, 2003). L'état hydrique du sol peut être caractérisé soit par le potentiel hydrique du sol qui définit le travail requis pour déplacer l'eau de sa situation initiale vers sa situation libre.

Le pilotage de l'irrigation des cultures par le suivi du statut hydrique du sol a été longtemps utilisé pour détecter le stress hydrique de la plante (Campbell and Campbell, 1982; Campbell and Mulla, 1990; Hanson et al., 1999). Les outils de mesure, tels que, les tensiomètres ou les sondes Watermark[®] sont conçus pour mesurer le potentiel hydrique du sol, alors que la teneur en eau du sol est mesurée par d'autres sondes, à savoir, la sonde à neutron et les sondes capacitatives (Aquapro...Aquachek).

II. 4. 1 Potentiel hydrique du sol

Le potentiel hydrique du sol Ψ_s permet de savoir la disponibilité de l'eau pour les plantes et son unité de mesure est l'unité de pression (cbar ou, MPa). Le Ψ_s est la somme du potentiel osmotique Ψ_{OS} qui intègre les forces de liaison entre l'eau et les solutés de la solution du sol, du potentiel hydraulique Ψ_h , du potentiel gravitaire Ψ_g et du potentiel matriciel Ψ_m qui intègre les forces matricielles:

$$\Psi_s = \Psi_{OS} + \Psi_h + \Psi_g + \Psi_m \quad (\text{II. 1})$$

Le potentiel Ψ_{OS} intègre les forces de liaison entre l'eau et les solutés de la solution du sol, il est négligeable sauf en cas de forte salinité. Le potentiel hydraulique Ψ_g correspond à l'eau perdue par percolation profonde avant ressuyage. Dans un sol normal, le potentiel matriciel Ψ_m est le seul véritable déterminant de la disponibilité de l'eau dans le sol.

II. 4. 1. 1 Mesure du potentiel hydrique du sol par les tensiomètres

La mesure du potentiel hydrique du sol s'effectue à l'aide des tensiomètres et des Watermarks[®]. Les tensiomètres sont des appareils simples, précis et très utilisés mais la gamme de potentiels qu'ils permettent de mesurer est limitée, ils ne fonctionnent plus à $\Psi_s > 0.1$ MPa. En effet, lorsque le potentiel hydrique du sol atteint cette valeur, le tensiomètre se désamorçe. Suivant des études effectuées par (Peyremorte et al., 1990), les racines par contre peuvent absorber de l'eau jusqu'à des valeurs bien supérieures, pouvant aller jusqu'à 2 MPa en situation hydrique très sévère.

Les tensiomètres ont été utilisés depuis plusieurs années pour mesurer le potentiel hydrique du sol dans le but de piloter l'irrigation (Campbell and Mulla, 1990; Young and Sisson, 2002). Cependant les tensiomètres possèdent des limites d'ordre technique nécessitant un entretien et une maintenance (Cassel and Klute, 1986; Young and Sisson, 2002), et ne fonctionnent que dans les limites de 0 à 80 kPa (Cassel and Klute, 1986; Young and Sisson, 2002).

Un tensiomètre mesure la tension de l'eau du sol qui est liée à la teneur en eau du sol et fournit des informations relatives au besoin en eau d'irrigation (Krüger et al., 1999; Wang et al., 2007; Merot et al., 2008).

Le tensiomètre permet de mesurer la charge hydraulique du sol (Tron et al., 2000). Il est constitué d'une bougie en céramique poreuse fixée à l'extrémité d'un tube et d'un manomètre à dépression gradué en centibars. Le tube et la bougie sont remplis d'eau dégazée et l'ensemble

est enfoncé dans le sol à la profondeur de mesure voulue. Cette bougie tend à restituer de l'eau au sol lorsque celui-ci se dessèche, il se produit une dépression mesurée par le manomètre du tensiomètre, sa partie supérieure est hermétiquement fermée par un bouchon. Le tensiomètre permet de mesurer l'évolution du potentiel de l'eau du sol (Mathieu et al., 2007). Lorsque le sol est à sa capacité de rétention, la force de succion est faible (Chossat, 2005). Parmi les inconvénients de ces appareils, leur sensibilité au gel, ce qui peut constituer un problème majeur lors des gelées printanières.

II. 4. 1. 2 Mesure du potentiel hydrique du sol

Outre les tensiomètres classiques pour lesquels chaque appareil est équipé d'un organe de mesure à lecture directe, d'autres sondes plus performantes apparaissent et les tensiomètres sont souvent remplacés par les Watermark[®] en raison de leurs performances (Trillot et al., 2002). Ainsi, d'après (Peyremorte et al., 1990) lorsque le sol est saturé, le potentiel hydrique du sol est nul, de 7 à 10 cbar; la disponibilité en eau correspond au maximum de la teneur en eau du sol. Un confort hydrique (RFU) est au voisinage de 7 à 50 cbar (Gendrier et al., 1999). Les Watermark[®] sont des capteurs servant à la mesure précise du potentiel hydrique du sol indirectement en utilisant une résistance électrique, représentative de la teneur en eau (Eldredge et al., 1993; Scanlon et al., 2002; Shock, 2004). La résistivité électrique est convertie en unité de succion, le centibar. L'état hydrique du sol est mesuré en tension dans une plage comprise entre 0 et 200 cbar, ce qui augmente considérablement la plage de mesure du tensiomètre (max 80 cbar). Les sondes Watermarks[®] sont constituées d'une part de sondes proprement dites placées dans le sol et d'autre part, d'un boîtier de mesure qui offre l'avantage de stocker les données, qui peuvent ensuite être extraites par voie informatique.

L'utilisation du potentiel hydrique du sol pour le pilotage de l'irrigation est plus simple que la teneur en eau du sol (Campbell and Campbell, 1982; Thompson et al., 2007a). Cependant, les sondes Watermarks[®] possèdent des limites techniques quand le sol est très sec (Campbell and Campbell, 1982; Thompson et al., 2006).

II. 4. 2 Teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol est un facteur fondamental du régime d'infiltration car les forces de succion sont aussi fonctions du taux d'humidité du sol. Le régime d'infiltration évolue différemment selon que le sol est sec ou humide. L'humidité d'un sol est mesurée de plusieurs façons, soit par des méthodes directes qui consiste à peser des échantillons avant et après

étuvage ou par des méthodes indirectes non destructives telles que les sondes à neutrons ou les sondes capacitives (Musy and Higy, 2004). Afin de suivre l'évolution dans le temps de la teneur en eau, il est indispensable de recourir aux méthodes non destructives telles que, les mesures neutroniques, les mesures de la conductivité électrique ou de la constante diélectrique dans le sol (TDR, sondes capacitives) (Musy and Higy, 2004).

II. 4. 2. 1 Méthode détermination de la teneur en eau du sol

Les mesures de la teneur en eau permettent de caractériser le degré d'assèchement du profil de sol par le pommier en plein champ. Le profil racinaire est synonyme d'un vrai réservoir d'alimentation et renvoie à la notion de réserve utile disponible pour l'alimentation hydrique et minérale des plantes. La mesure de la teneur en eau du sol à différentes profondeurs par différentes sondes ont été utilisées pour le suivi de l'irrigation (Starr and Paltineanu, 2002; Fares and Polyakov, 2006).

Plusieurs études décrivent leurs applications pour le pilotage de l'irrigation (Roberson et al., 1996; Fares and Alva, 2000; Hanson et al., 2000; Fares and Polyakov, 2006). Les seuils limites de la teneur en eau du sol déterminés au laboratoire (Fares and Alva, 2000) et en plein champ (Cassel and Nielsen, 1986; Starr and Paltineanu, 1998a) ont été utilisés pour le pilotage de l'irrigation.

II. 4. 2. 1. 1 Mesure de la teneur en eau du sol par les sondes capacitives

Les sondes capacitives (Paltineanu and Starr, 1997) permettent de fournir les données de la teneur en eau du sol sur n'importe quelle profondeur toutes les quelques minutes, permettant ainsi la connaissance de l'état hydrique des arbres fruitiers, ce qui conduit aux futures possibilités de programmations des apports d'eau à la plante.

Il existe différentes marques de sondes capacitives (Campbell, Decagon, Imko, Aquaflex, Sentek, Aquapro, Delta ...) et différents types: sondes simples, tubes fixes pour mesures à différentes profondeurs, tubes mobiles etc. Les sondes Aquapro émettent soit une impulsion électrique à haute fréquence (TDR) soit une fréquence radio (FDR) dans le sol. Le signal est influencé par la teneur en eau. L'avantage est leur capacité à mesurer de grandes variations. Leur inconvénient est l'interprétation des valeurs en termes de disponibilité de l'eau pour la plante, qui diffère selon le type de sol, la présence de cailloux, de poches d'air, etc.

II. 5 Matériels et méthodes:

II. 5. 1 Caractéristiques pédologique de la parcelle

La parcelle d'étude se situe au domaine expérimental de recherche de Conthey en Suisse ayant une superficie de 1949 m². Les caractéristiques physico-chimiques du sol de la parcelle expérimentale ont été établies sur la base de quinze prélèvements du sol à quatre profondeurs (0.25, 0.5, 0.75 et 1 m) que nous avons effectuées dans différents endroits de la parcelle, les échantillons ont été analysés au laboratoire des sols de Changins (Suisse) (Tab. II. 1). Le sol est de texture limoneuse avec une teneur en argile de 24 % et une profondeur limitée par une couche d'alluvions grossières située entre 1,0 m et 1,6 m de profondeur.

Tableau II. 1: Caractéristiques du sol de la parcelle expérimentale à quatre profondeurs

Profondeurs (m)	Paramètres	Granulométrie					Fertilité			
	Matière organique %	pH	CaCO ₃ total	Argile %	Limon %	Sable %	K %	Ca %	Mg %	Na %
0,00-0,25	3,7	8	31	24,2	40,4	35,3	1,70	79,60	13,60	1,00
0,25-0,50	3,3	8	31	23,5	41,6	35	1,60	81,90	13,30	1,20
0,50-0,75	2	8	32	22,4	43,5	34,1	0,80	87,10	11,00	1,20
0,75-1,00	2,4	8	31	23,9	43,2	32,9	1,10	85,40	12,20	1,30

Cependant, pour répondre à la demande en éléments nutritifs du pommier, nous avons effectué des apports d'engrais sur la parcelle d'essai, qui sont de trois types d'engrais minéraux et à différentes phases de croissance des fruits.

En date du 17/03/2010, la phase préfloral, nous avons utilisé (Nitrate de potasse granulé 13.0.45 à raison de 27.3 kg et du super triple 48 % à raison de 7.8 kg)

En date du 11/05/2010, la phase postfloral, nous avons utilisé (Nitrate d'ammoniaque 27% sans Mg à raison de 14.6 kg).

II. 5. 2 Caractérisation du système racinaire et réserve en eau du sol

II. 5. 2. 1 Profil racinaire

Le profil pédologique du sol de la parcelle d'essai a été creusé parallèlement au rang des arbres fruitiers et divisé en tranches de 10 cm sur une profondeur totale de 120 cm (Fig. II. 2). Des comptages de racines sont réalisés sur le profil ouvert, et permettent de dresser un profil racinaire basé sur la taille ainsi que le nombre des racines comptées. Ils sont effectués selon un protocole simple et rapide selon (Letessier and Fermond, 2004):

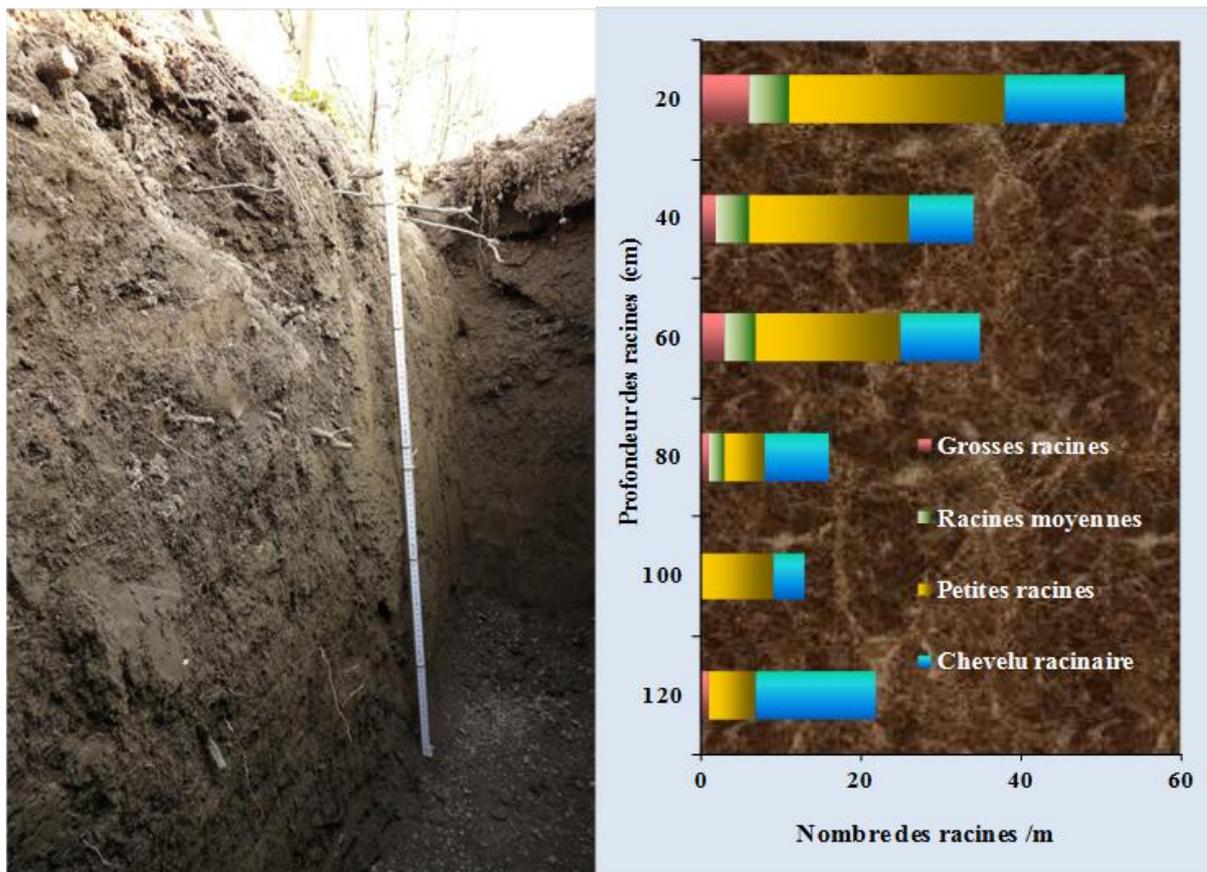


Figure II. 2. Profil pédologique de la parcelle expérimentale.

Figure II. 3. Profil racinaire de la parcelle expérimentale.

Le profil de 120 cm de profondeur et 300 cm de largeur (Fig. III. 3) est divisé en maille, les dimensions des racines caractérisées par leurs diamètres (ϕ RAC) selon la méthode de (Letessier and Fermond, 2004).

Les descriptions ont été faites par horizon, les racines sont évoquées selon leurs tailles et leurs densités de colonisation. A cet effet, apparaissent sur le profil de la parcelle expérimentale à 1.2 m de profondeur les différentes catégories de racines (Fig. II. 3).

Grosses racines: racines dont le diamètre est supérieur à 5 mm, ($\phi RAC_m > 5$ mm)

Racines moyennes: racines dont le diamètre est compris entre 1 et 5 mm,

$1 < \phi RAC_m < 1.5$ mm

Petites racines: racines dont le diamètre est inférieur à 1, ($\phi RAC_m < 1$ mm)

Chevelus

II. 5. 3 Conditions de l'expérimentation

La présente étude a été conduite dans un verger de pommier (Gala), localisé dans le canton du Valais à la station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW à Conthey Suisse (Latitude 46°12'N, Longitude 7°18'E, Altitude 480 m). Le climat est continental, la moyenne annuelle des précipitations est de 600 mm. Ainsi au cours de l'application de l'IDR, la pluie peut influencer l'application des différentes stratégies aux arbres fruitiers. C'est pourquoi nous jugeons utile de mettre des bâches sur la parcelle expérimentale qui sera complètement couverte d'une bâche de plastique transparent, environ deux à trois semaines après la pleine floraison afin d'exclure l'influence des précipitations. La bâche est elle-même recouverte d'un textile vert pour la protéger de la circulation des machines et éviter une modification trop importante du microclimat lumineux.

La légère pente naturelle du terrain permet à la pluie qui tombe de ne pas stagner au dessus des bâches. Le déficit pluviométrique calculé pour la période de végétation de la variété de référence Golden est d'environ 300 mm (275 mm pour Gala). Les besoins en eau du pommier ont été déterminés suivant la méthode de Penman-Monteith très recommandée par la FAO (Allen et al., 1998; méthode FAO-56), suivant (Bonany and Camps, 1998) les coefficients culturaux des arbres fruitiers sont respectivement: Avril-Mai (0.7), Juin (0.85), Juillet-10 Août (1) et 10 Août-Sept. (0.7). Cependant, nous disposons à partir de la station météorologique située à 1 km du centre de recherche de Conthey de toutes les données climatiques (le rayonnement solaire, la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et la pluviométrie).

II. 5. 4 Matériel végétal

Le verger, planté en automne 2002, est constitué de pommier Gala sur porte-greffe M9 clone FL56 (vigueur -20 % par rapport à EMLA). Les arbres sont plantés à une densité de 1800 arbres/ha (4,0 x 1,4 m) sur une surface de 1949 m² et ayant comme pollinisateurs Everest et

Golden Gem. La hauteur des arbres est de 4 m, avec un diamètre moyen des troncs de 65 mm. L'orientation des lignes d'arbres est nord-sud. Le 27 Avril 2010 est la date de la pleine floraison de la variété Gala à Conthey.

II. 5. 5 Différentes stratégies d'irrigation

Les quatre traitements d'irrigation appliqués (Tab. II. 2) sont basés sur les différentes périodes de croissance du fruit (PCF), selon le nombre de jours après la pleine floraison (JAPF): PCF I (1 JAPF-64 JAPF) correspondant à la division cellulaire du fruit ; PCF II (65 JAPF-104 JAPF) au grossissement cellulaire du fruit ; PCF III (105 JAPF-128 JAPF) au grossissement et à la maturité du fruit.

Le 1^{er} Traitement T1 est le non irrigué de la pleine floraison jusqu'à la récolte, le 2^{ème} traitement T2 est un traitement de confort, géré à 0.03 MPa par le potentiel hydrique du sol mesuré à 30 cm de profondeur Ψ_{S30} et, ce, durant PCF I. Cependant durant PCF II et PCF III ce seuil passera à 0.05 MPa selon les travaux de (Thalheimer and Paoli, 2004).

Tableau II. 2: Différentes stratégies d'irrigation en fonction des différentes périodes de croissances des fruits (PCF)

Traitements	Période de croissance des fruits		
	Période I	Période II	Période III
	1 JAPF-----64 JAPF	65 JAPF-----105 JAPF	106 JAPF----128 JAPF
T1	Non-irrigué	Non-irrigué	Non-irrigué
T2	Confort	Confort	Confort
T3	Confort	Non-irrigué	Confort
T4	Confort	RDI	Confort

Le traitement T3 est similaire à T2, à l'exception de PCF II où on arrête complètement l'apport d'eau au pommier. Le traitement T4 est similaire aussi à T2 à l'exception de PCF II où on applique l'irrigation déficitaire régulée IDR gérée par le potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_X , maintenu à -1.2 MPa.

II. 5. 6 Technique d'irrigation

L'irrigation en goutte à goutte avec des gaines enterrées est celle utilisée dans notre expérimentation. Le système d'irrigation consiste en deux tubes à goutteurs intégrés, le modèle choisi est de type Uniram fabriqué par Netafim Ltd. Le système est composé d'un tube

en polyéthylène de haute qualité intégrant un véritable goutteur autorégulant et anti-siphon. La gamme de la pression de fonctionnement est de 0.05 à 0.4 MPa et la dépression est assurée par un système de labyrinthe Turbonet. En cas d'arrêt des apports d'eau, ces derniers arrêtent l'alimentation aux systèmes racinaires, à cet effet, les apports d'eau au pommier seront apportés d'une manière exacte comparativement aux autres types de goutteurs qui peuvent alimenter les arbres fruitiers se trouvant à l'extrémité de la gaine suite à l'arrêt de l'irrigation des arbres fruitiers; car pendant l'arrêt, la gaine se vidange et se vide par le biais des goutteurs se trouvant à l'extrémité de la gaine.

II. 5. 7 Station de tête et réseau d'irrigation

II. 5. 7. 1 Programmateur d'arrosage

L'utilisation d'une automatisation des irrigations en goutte à goutte est indispensable, la fréquence élevée des besoins en eau d'irrigation en période de pointe exige une programmation du temps d'arrosage. Le modèle utilisé pour l'essai est le MiraclePlus, fabriqué par Netafim. Ce programmateur peut commander jusqu'à neuf vannes et permet d'effectuer quatre démarrages par jour et par vanne. Son fonctionnement est simple, une pile lui suffit sans recourir à une source d'alimentation électrique extérieure. Pour notre expérimentation, les consignes d'arrosage sont données chaque semaine en fonction de l'évolution des sondes Watermark®. Le programmateur d'arrosage est équipé: d'un manomètre qui sert à indiquer la pression manométrique disponible dans le réseau, dans notre cas elle est de dix bars, toutefois cette pression est tellement très élevée par rapport à notre parcelle d'expérimentation, nous avons jugé utile d'intégrer juste après le manomètre, un régulateur de pression étalonné à une pression allant de 1 à 4 bars situé juste après le manomètre.

L'une des conditions de l'irrigation en goutte à goutte est la qualité de l'eau afin d'éviter l'obstruction des goutteurs, quoique l'eau utilisée pour l'irrigation dans notre essai est une eau provenant de la conduite d'alimentation en eau potable de la commune de Conthey (Suisse) qui est une eau de bonne qualité et répondant aux normes internationales de potabilité. Cependant, nous avons jugé à des fins utiles de prévoir un filtre placé après le manomètre surtout que les gaines équipées de goutteurs sont enterrées. L'ensemble est lié à un programmeur qui commande les quatre vannes alimentant les quatre secteurs, l'heure de démarrage des vannes, le temps d'arrosage et le débit sont programmés au départ, les vannes démarrent suivant chaque procédé en quelques secondes l'une après l'autre. A la sortie du

circuit de commande quatre vannes programmables se trouvent dans le coté refoulement alimentant chacune chaque secteur suivant les traitements définis dans le protocole expérimental.

II. 5. 7. 2 Réseau d'irrigation

Le réseau est équipé de conduites secondaires servant chacune à l'alimentation des parcelles élémentaires qui sont au nombre de vingt quatre (Tab. II. 3).

L'ensemble du réseau est équipé aussi de la pièce spéciale servant à la jonction entre les différents tronçons. Les caractéristiques des goutteurs et des conduites d'alimentation du réseau de la parcelle sont dimensionnés suivant le débit et la pression nominale de service.

La gaine est équipée de goutteurs de 1,6 l/h chacun, espacés de 0,3 m les uns des autres. Chaque ligne d'arbre est équipée de deux gaines placées à 20 cm de profondeur passant parallèlement et symétriquement à 0.5 m par rapport à la ligne des arbres.

Tableau II. 3: Caractéristiques des goutteurs et des conduites d'alimentation de la parcelle expérimentale

Goutteurs :		Conduites d'alimentation :
Caractéristiques hydrauliques	Caractéristiques géométriques	Caractéristiques géométriques
Débit: 1.6 l/h	Type: Uniram	Type: Polyéthylène
Pression: 1 à 4 bars	Distance entre les goutteurs: 30 cm	Nombre de conduites primaires: 4
Caractéristique principale du goutteur:	Distance entre les gaines enterrées: 1m	Nombre de conduites secondaires aériennes: 18
Auto-régulateur	Profondeur de la gaine: 20 cm	Diamètre des conduites primaires: 25 mm
	Diamètre de la gaine: 16 mm	Diamètre des conduites secondaires: 20 mm

Cependant, nous disposons au total de 16667 de goutteurs par hectare et neuf goutteurs par arbre. La station de tête de la parcelle expérimentale est équipée d'une vanne principale, filtre, manomètre et quatre vannes programmables reliées à un programmeur. Le réseau employé est un réseau sous pression enterré, l'alimentation de la parcelle expérimentale se fait de la manière suivante:

A partir de la station de tête du réseau, sur les six micro-parcelles de pommier, chacune a deux gaines de départ alimentant la première parcelle élémentaire, trois conduites secondaires partent aussi en parallèles alimentant les trois parcelles élémentaires se trouvant sur cette

même ligne, afin de répondre au quatre procédés du protocole expérimental, les conduites secondaires sont codées par différentes couleurs.

Notre système d'alimentation des parcelles est composé respectivement: d'une station de tête, de quatre conduites primaires alimentant chacune six micro-parcelles. Les gaines utilisées sont des gaines enterrées Uniram 50 / 1.6 soit deux longueurs par parcelle élémentaire de l'ordre de 15 m de longueur chacune soit au total 30 m, pour les quatre procédés définis, la longueur totale des conduites primaires est de 720 m.

II. 5. 8 Planning des irrigations

La programmation des irrigations est faite suivant les trois périodes de croissance du pommier (Gala). Nous avons programmé plusieurs apports par jour (Tab. II. 4). Cette stratégie s'inscrit dans une conception moderne de la gestion de l'irrigation dans le but de limiter les pertes par percolation profonde et maintenir les éléments inorganiques se trouvant dans le sol. L'eau est apportée directement dans l'environnement des racines, grâce à l'utilisation de gaines enterrées. Cette technique vise à limiter les pertes par évaporation et de cibler l'apport d'eau juste au niveau des racines.

Cette pratique est rendue possible grâce à l'automatisation des apports et à l'utilisation de goutteurs à bas débit. Durant la première période de croissance du fruit PCF I, Le seuil de déclenchement des irrigations est de 30 cbar, maintenant ainsi les arbres en situation de confort hydrique. Nous avons effectué plusieurs apports par jour afin de répondre aux objectifs de la thèse.

Au cours de la deuxième première période de croissance du fruit PCF III, le seuil de déclenchement des irrigations passera à un seuil de 50 cbar ([Thalheimer and Paoli, 2004](#)) correspondant à un stress hydrique modéré de la plante, sans conséquence pour le calibre des fruits. Durant la deuxième phase de croissance du fruit PCF II nous avons effectué quatre apports d'arrosage de 10 mn chacun pour le traitement de confort et deux apports d'arrosage à raison de 8 mn chacun pour l'irrigation déficitaire régulée. Cependant, pour le traitement 3 et durant PCF II, nous avons arrêté l'irrigation des arbres fruitiers.

Tableau II. 4: Programme journalier des séquences d'irrigation du pommier (Gala) pour les différents traitements TRT : T1, arbres non irrigués; T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).

TRT	PCF	Départ des irrigations (h)				Durée d'arrosage pour chaque apport (mn)	Apport d'eau journalier (mm)
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄		
T1		Non-irrigué					
	I	7h	19h			5	0,44
T2	II	2h	8h	15h	20h	8	1,42
	III	2 h	8h	15h	20h	10	1,78
	I	7h 05 mn	19h 05 mn			5	0,44
T3	II	Non-irrigué					
	III	2h 10 mn	8h 10 mn	15h 10 mn	20h 10 mn	10	1,78
	I	7h 10 mn	19h 10 mn			5	0,44
T4	II	2h 08 mn	8h 08 mn			8	0,18
	III	2h 20 mn	8h 20 mn	15h 20 mn	20h 20 mn	10	1,78

Le régime d'irrigation de la troisième période de croissance du fruit PCF III est caractérisé par un retour progressif au régime de confort similaire au traitement T2. Le régime de confort en PCF III évite qu'un processus de maturation accéléré par la sécheresse ne provoque une irrégularité de maturité des fruits et une mauvaise conservation. Durant cette période quatre apports ont été effectués à raison de 10 mn chacun soit un total de 1.78 mm.

II. 5. 9 Mesure du statut hydrique du sol

Au cours de l'expérimentation, nous avons utilisé deux méthodes pour le suivi du statut hydrique du sol à savoir les Watermarks® qui permettent des mesures du potentiel hydrique du sol en cbar et les sondes Aquapro qui mesurent la teneur en eau du sol jusqu'à 1.2 m de profondeur.

II. 5. 9. 1 Potentiel hydrique du sol

Nous avons utilisé les sondes Watermarks® monitor (Model 900M, Irrrometer, Inc. Riverside, CA) pour mesurer le potentiel hydrique du sol à 30 et 60 cm de profondeur (Ψ_{S30} et Ψ_{S60}) (figure II. 4). Les sondes Watermarks® doivent être utilisées avec soin pour s'assurer d'un bon contact avec le sol. Les sondes sont immergées quelques heures dans l'eau. Après cette

période les valeurs de tension doivent se situer entre 0 et 6 cbar (De Parceveaux and Huber, 2007) correspondant à une situation de saturation.

Nous avons foré un trou à la tarière et à la profondeur adéquate (30 et 60 cm), le diamètre de la tarière doit être égal ou légèrement supérieur à celui de la sonde, puis nous avons rempli le trou avec de la boue liquide (mélange eau plus de la terre fine tamisée, terre provenant de la parcelle expérimentale), juste avant la mise en place de la sonde. La sonde Watermark® est mise dans le trou en laissant les fils rattachés au dessus de la surface du sol, la terre est remplacée au dessus de l'appareil puis tassée fermement en place (fig. II. 4).

Cependant, ayant assuré la mise en place des sondes, l'ensemble des fils seront reliés soit au boîtier de l'enregistrement du Watermarks® qui sert à stocker les données et qui peuvent ensuite être extraites par voie informatique, ou bien à un lecteur numérique à main pour lire les résultats.



Figure II. 4. Positionnement des sondes Watermarks® et Aquapro dans la parcelle expérimentale

Les sondes Watermarks® doivent être placées dans l'environnement du bulbe d'irrigation (Tron et al., 2000). La sonde de profondeur doit se situer à la limite inférieure du développement racinaire (Rieul and Ruelle, 2003). Pour chaque traitement, nous avons employé douze Watermarks®, six sondes par parcelle élémentaire dont trois placées à 0.3 m

du sol et à 0.2 m de la gaine des goutteurs et trois sondes placées à 0.6 m de profondeur et à 0.10 m de la gaine des goutteurs (fig. II. 4).

Cependant, afin d'éviter l'influence de l'irrigation sur les valeurs mesurées par la sonde, la lecture des Watermarks® est faite entre 10-11 h juste avant l'irrigation. Nous avons jugé utile d'effectuer les mesures chaque jour pour voir s'il ya des différences en terme d'évolution du potentiel hydrique du sol. Durant la campagne de mesures par la sonde c'est la valeur médiane qui est ensuite retenue pour le pilotage de l'irrigation.

II. 5. 9. 2 Mesure de la teneur en eau du sol par la sonde Aquapro

La sonde Aquapro-Sensor permet, grâce à l'émission d'ondes radio, de mesurer la teneur en eau du sol (% vol.). La précision de mesure est de l'ordre de +/- 2%. La sonde est constituée d'une canne de mesure graduée, permettant d'effectuer les lectures à différentes profondeurs, respectivement 0.15, 0.25, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75 et 0.9 m (fig. II. 4). Nous avons utilisé les sondes capacitives (Aquapro Sensors, Ducor, model 1200-A California) pour suivre la dynamique de la teneur en eau du sol TES à différentes profondeurs (0.15, 0.25, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75 et 0.9 m).

Cependant, la sonde Aquapro nécessite un calibrage avant toute mesure de la TES. Le calibrage de la sonde est fonction des caractéristiques physiques du sol de la parcelle expérimentale, dans ce contexte, avant nos essais expérimentaux nous avons calibré notre sonde en fonction de notre sol, nous avons saturé notre sol jusqu'à sa capacité au champ, puis la valeur correspondante à cette teneur en eau prise par la sonde Aquapro est équivalente à une TES de 100 % valeur qui sera enregistrée dans l'ordinateur de poche de la sonde et qui nous servira de seuil de référence pour tous nos essais.

Un calibrage mensuel de la sonde est conseillé afin de valider ou de confirmer la première valeur de la teneur en eau du sol. Dans ce contexte afin de s'assurer de la stationnarité de cette valeur (100 %) nous avons répété cette mesure tous les quinze jours durant tous nos essais expérimentaux. Nous avons utilisé pour chaque traitement quatre sondes Aquapro espacée de 0.2 m l'une de l'autre et à 0.4 m de l'axe des arbres fruitiers et à 0.4 m de la gaine des goutteurs. L'utilisation de la sonde exige l'installation des tubes en plastique qui devront être placé au départ. A cet effet nous avons exécuté à la tarière des trous afin de placer les tubes en plastique. La sonde est reliée à l'ordinateur de poche qui permet la lecture immédiate des valeurs ainsi que le stockage des données sur une longue période. Celles-ci peuvent ensuite être traitées de manière informatique. Nous avons commencé les mesures de la TES le 17 JAPF, et ainsi tous les trois jours jusqu'à la récolte.

II. 6 Résultats et discussion

II. 6. 1 Caractéristiques physico-chimiques du sol et régime d'irrigation

L'analyse physico-chimique du sol (Tab. II.1) est un outil qui permet d'apporter des éléments de réponse à la nature du sol et à la disponibilité des éléments nutritifs aux arbres fruitiers. Les analyses chimiques constituent un moyen utile pour déterminer la nature et les quantités relatives des différents éléments essentiels nécessaires à la croissance normale et aux développements des plantes (Raven et al., 2003). Suivant l'analyse granulométrique du sol de la parcelle d'essai et suivant le triangle des textures (USDA, 1999), le sol de la parcelle expérimentale est de type limono-sablo-argileux.

Sur les deux premières profondeurs du profil pédologique, le sol est classé équilibré et ayant de la matière organique (MO) satisfaisante (Bertschinger et al., 2003). Le sol est faiblement alcalin, riche en MO et en calcium sur l'ensemble des profondeurs, la présence de l'argile en quantité suffisante combinée avec la MO (Tab. II.1) constitue le complexe adsorbant du sol (CAS), un vrai réservoir d'alimentation en éléments nutritifs aux arbres fruitiers. La surface externe du CAS chargée négativement attire les ions chargés positivement présents dans l'eau tels que: le potassium (K^+), le calcium (Ca^{++}), hydrogène (H^+), le sodium (Na^+) et le magnésium (Mg^{++}) et qui seront disponible aux arbres fruitiers. Additionnellement au CAS, la matière organique MO se trouvant dans le sol MO (Tab. III.1) a des effets positifs sur la capacité de rétention du sol, ainsi, selon les travaux effectués par (Bauer and Black, 1992), la MO a un impact positif sur la capacité de rétention du sol; d'autres travaux effectués par (Letessier and Fermond, 2004) ont montré que les sols riches en matière organique augmentent la réserve utile maximale.

Cependant, le sol qui est non seulement un support physique doit fournir en permanence les éléments nutritifs appropriés convenant au système racinaire. La présence des macroéléments: le potassium, le calcium, le magnésium joue un rôle important dans le développement des arbres fruitiers, le sol (Tab. II.1) est très faible en K, le potassium qui a un rôle fondamental dans la transpiration des arbres fruitiers est le principal facteur des mouvements d'ouvertures ou de fermetures des cellules de garde des stomates (Hopkins and Evard, 2003), il est impératif de faire des amendements en potassium, sinon les feuilles des arbres fruitiers auront les signes de chloroses. Contrairement au K, le sol de la parcelle est riche en Ca et moyennement en Mg, le calcium qui a un effet positif sur les arbres fruitiers surtout durant la 1ere phase PCF I joue un rôle important dans les cellules en division, quand au Mg qui joue

un rôle important dans la constitution de la chlorophylle, l'apport de ce dernier à la parcelle n'est pas nécessaire.

Les différents types d'engrais recommandés pour la parcelle d'essai à savoir engrais 1, engrais 2 et engrais 5 sont fonctions d'une part, de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol (Tab. II.1) d'autre part des exigences des arbres fruitiers (Gala) pour leur développement, car si le pommier est mal alimenté en éléments nutritifs, les bourgeons et la croissance des fruits souffriront puis la croissance des pousses (Fallahi and al., 2001), la mal nutrition du pommier pénalise aussi le rendement et la qualité des fruits de l'année en cours (Fallahi et al., 2001).

Cependant, la connaissance des prélèvements des éléments fertilisants par les arbres fruitiers (pommier) et leurs répartitions dans les différents organes est un outil important qui permet de déterminer d'une part l'apport plus ou moins exact des éléments nutritifs du sol et ceci par complément; d'autre part de choisir le moment efficace pour effectuer les amendements, des études effectuées sur le pommier (Batjer al., 1952) ont montré que les exigences en (N, P₂O₅, K₂O, Ca et Mg) ne sont pas les mêmes dans les différents organes des arbres fruitiers (bois, chute de fruit, branches, tronc, racines, feuille et fruit).

Le pommier a une large capacité d'adaptation à des conditions de sols de température et de pluviométrie très variable. Il demande toutefois une période en froid qui permet ensuite une bonne synchronisation pour la reprise de la végétation au printemps (Lespinasse and Leterme, 2005). Les besoins en eau du pommier varient de 1 JAPF à la récolte.

L'évolution des apports d'eau cumulés suivant les différentes PCF (I, II et III) d'irrigation durant les périodes de croissance du fruit du pommier (Gala) est présentée sur le graphique (II. 5). Les valeurs journalières maximales se situent durant la 2^{ème} période de croissance des fruits atteignant le seuil de 5.8 mm/j.

Ainsi durant la période de 3-4 JAPF nous avons enregistré durant la nuit la formation du gel printanier qui peut causer des dommages aux arbres fruitiers se traduisant par des chutes de rendements d'autant plus qu'il se produit au début du cycle végétatif des arbres fruitiers.

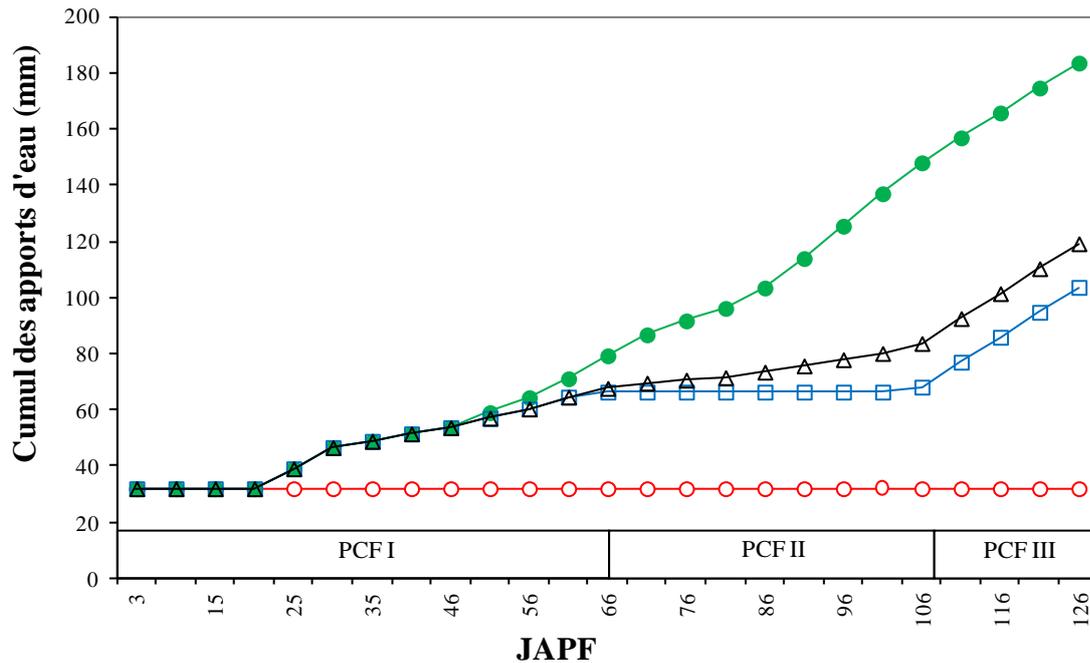


Figure II. 5. Evolution des apports d'eau cumulés suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).

Afin de protéger les arbres fruitiers qui étaient en pleine floraison contre le gel nous avons utilisé 32 mm par aspersion. Les quantités d'eau appliquées par variante durant toute la saison sont de 149 mm pour le régime de confort T2, 72 mm pour le traitement T3 et 82 mm pour l'irrigation déficitaire régulée (Fig. II. 5).

II. 6. 2 Evapotranspiration potentielle et déficit de pression de vapeur

La figure II. 6 nous montre la dynamique journalière de l'évapotranspiration potentielle du pommier et du déficit de pression de vapeur depuis la pleine floraison jusqu'à la récolte. L'évolution de l'ETP durant la première phase PCF I est caractérisée par une moyenne de l'ETP de l'ordre de 3 mm/j, la valeur minimale de 4.8 mm/j est observée le 8 JAPF alors que la maximale est observée le 4 JAPF et 40 JAPF ces valeurs qui dépendent du climat de la culture et particulièrement du déficit de pression de vapeur.

Durant cette première phase et le 4 PCF l'ETP atteint son maximum 4.8 puis diminue brusquement jusqu'à atteindre 1 mm/j, ceci s'explique par le fait que durant cette période le déficit de pression DPV a atteint aussi sa valeur minimale 0.1 kPa. Ainsi, la transpiration qui est la composante principale de l'ETP est considérablement influencé par le DPV, une

réduction du DPV induit une diminution du taux de transpiration et par la suite l'évapotranspiration potentiel suite à l'existence du gradient de pression entre les feuilles et l'atmosphère. La transpiration est un paramètre essentiel du transport de l'eau et des éléments minéraux dans la plante. La variation de l'ETP paramètre très complexe ne dépend pas uniquement du DPV mais dépend de d'autres paramètres (rayonnement net, température moyenne quotidienne de l'air, tension de vapeur saturante, humidité relative de l'air etc.).

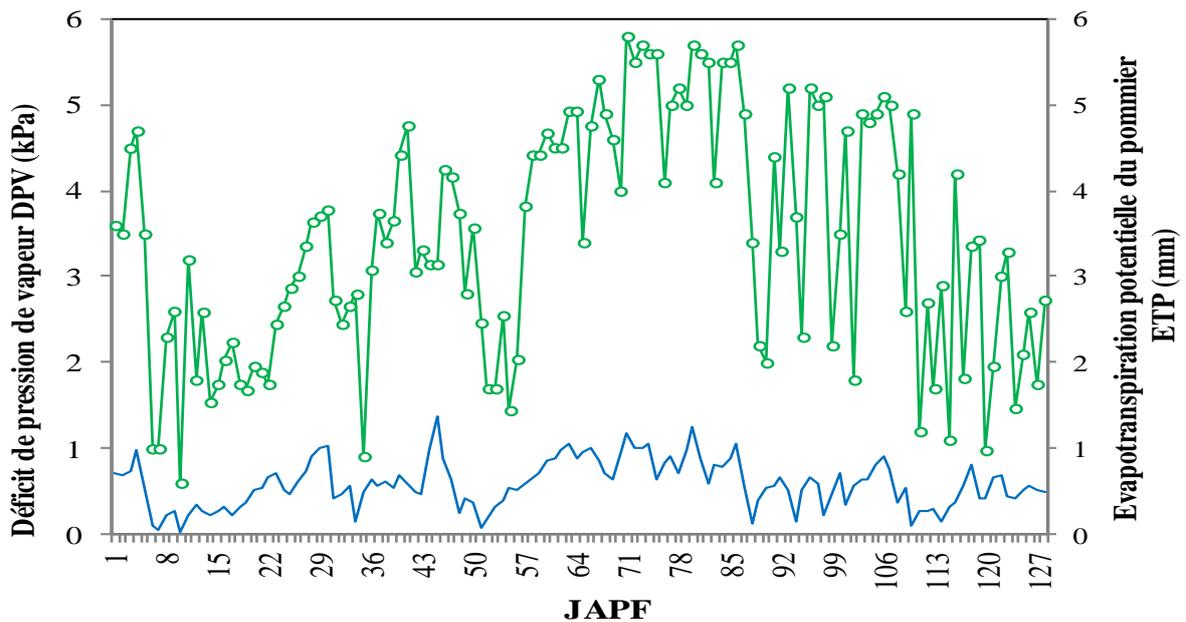


Figure II. 6. Evolution journalière du déficit de pression de vapeur (DPV en mm par jour), (-) et de l'évapotranspiration potentielle journalière du pommier (ETP en mm par jour) (O) partir du premier jour de la pleine floraison (JAPF).

La deuxième phase PCF II est caractérisée par les valeurs les plus élevées de l'ETP atteignant 5.8 mm/j liées beaucoup plus aux températures du Valais (Suisse) atteignant les 34°C. Durant la dernière phase PCF III, nous avons enregistré une chute de l'ETP comparativement à l'ETP en PCF II. Durant cette période la température dans le Valais commence à chuter ce qui influe l'ETP du pommier (fig. II. 6).

Durant cette période PCF II, le déficit de pression de vapeur est très élevé atteignant les 1.1 kPa, la valeur maximale enregistrée est de 1.3 kPa correspondant à la date du 45 JAPF. Cette étude a permis de montrer que le DPV est un paramètre important qui peut considérablement influencer non seulement l'ETP mais le transport de l'eau et des éléments minéraux depuis le sol jusqu'aux feuilles des arbres fruitiers et particulièrement le pommier (Gala).

II. 6. 3 Déficit pluviométrique cumulé

Le but principal du bilan hydrique est de mettre en évidence le déficit hydrique durant la période de calcul. Il est essentiellement basé sur l'évapotranspiration réelle et les précipitations efficaces. Dans la pratique, il est nécessaire d'éliminer toute pluie inférieure à 10 mm, ou tout épisode où la somme sur trois jours n'atteint pas 15 mm; de même de très grand volumes stockés hors des horizons accessibles aux racines ne peuvent être comptabilisés (Tiercelin and Vidal, 2006).

La figure II. 7 montrant l'évolution du déficit pluviométrique cumulé des deux années 2010 et 2011 et ce depuis la pleine floraison jusqu'à un mois après la récolte.

Sur le graphique on constate deux phases :

En 2010, la première phase qui s'étale depuis 1 JAPF-45 JAPF caractérisée par un déficit pluviométrique presque nul et la seconde phase qui se situe entre 45 JAPF-180 JAPF est caractérisé par un DP de 373 mm suite à la demande climatique qui pépasse le DP.

Durant l'année 2011, la première phase qui s'étale depuis 1 JAPF-28 JAPF est caractérisée par un déficit pluviométrique presque nul (absence de la contrainte hydrique), par contre la seconde phase qui se trouve entre 28 JAPF-180 JAPF est marquée par un DP de 422 mm.

Durant cette période l'ETP du pommier est supérieur au DP. La différence entre les deux années d'expérimentation (2010 et 2011) en terme de déficit pluviométriques depuis 1 JAPF-180 JAPF est de 49 mm.

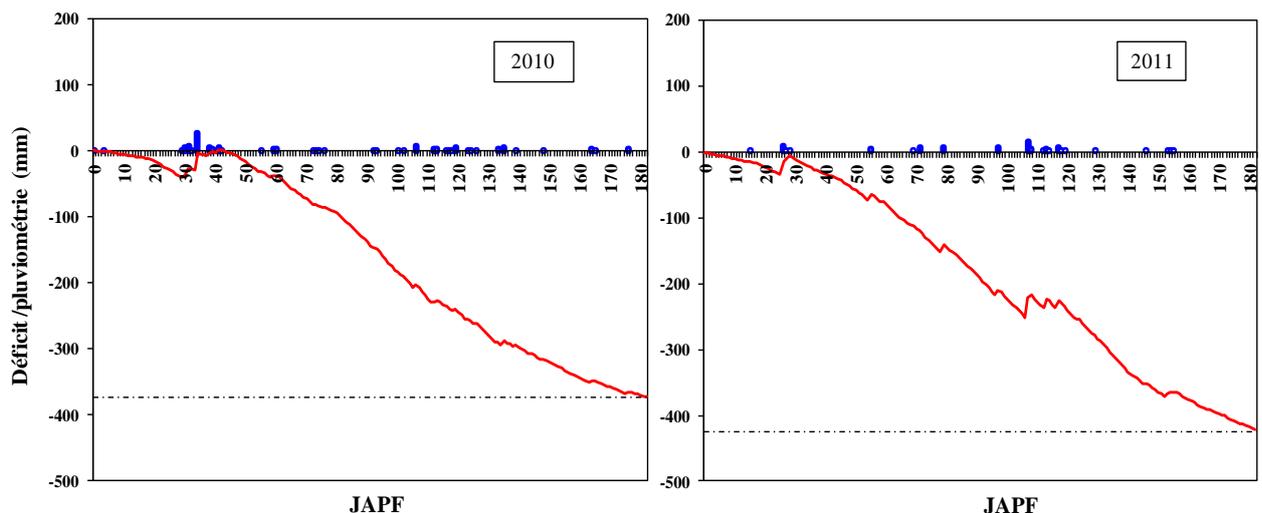


Figure II. 7. Déficit pluviométrique cumulé (mm), (-); précipitations (mm), (■) depuis la pleine floraison jusqu'a 1 mois après la récolte, JAPF: jour après la pleine floraison, années (2010 et 2011).

II. 6. 4 Statut hydrique du sol

II. 6. 4. 1 Potentiel hydrique du sol

Les mesures ont débuté le 16 JAPF, suivant la dynamique du statut hydrique du sol (Fig. II. 8), la valeur initiale du potentiel hydrique du sol sur les profondeurs 30 et 60 cm Ψ_{S30} et Ψ_{S60} est la même pour les quatre traitements atteignant les 0 MPa, à ce moment le sol était à sa capacité au champ (De Parceveaux and Huber, 2007).

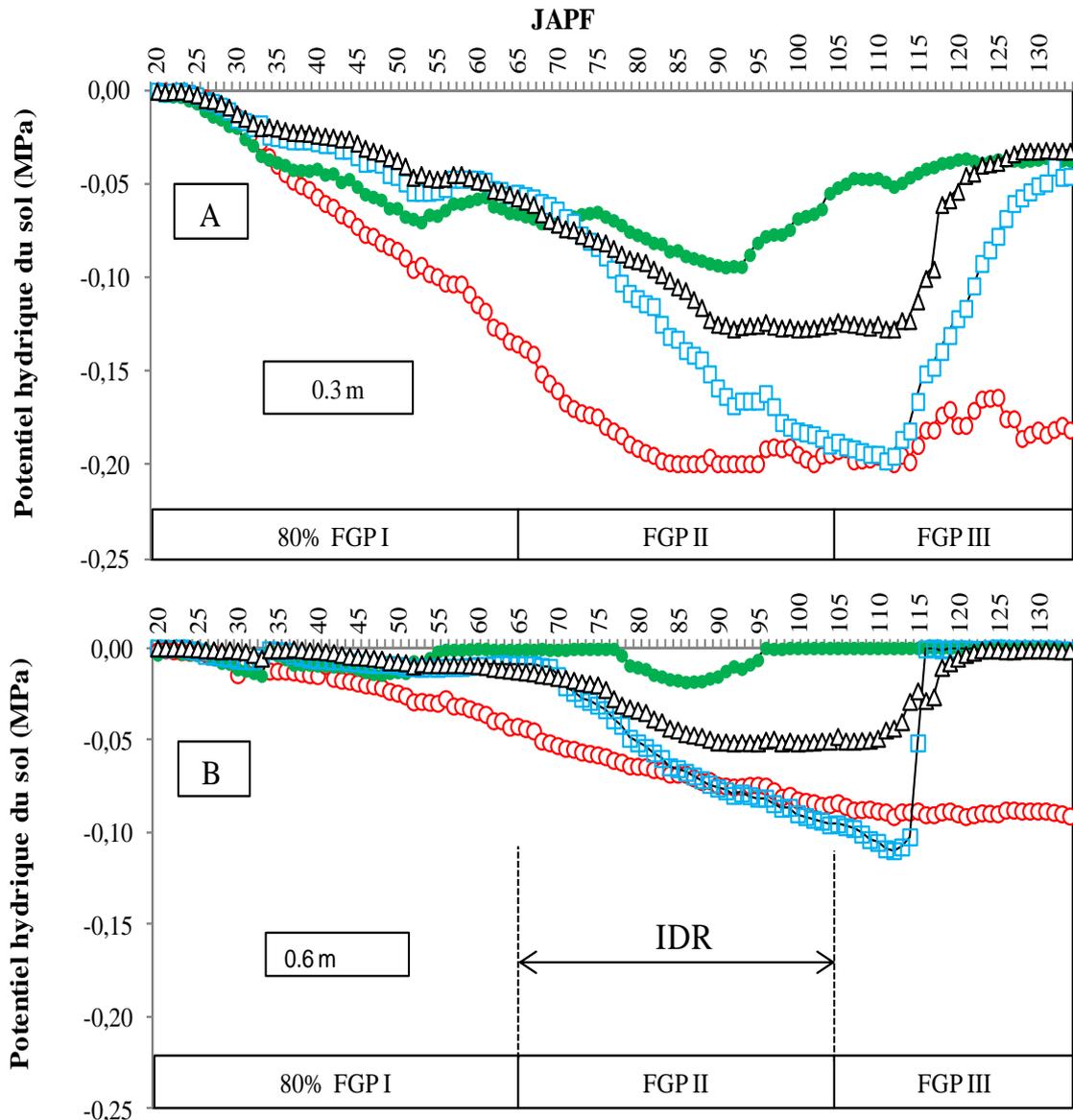


Figure II. 8. Medians du potentiel hydrique du sol à 0.3 m (fig. A) et 0.6 m (fig. B) de profondeur suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point est la moyenne de six mesures.

L'arrêt total de l'irrigation durant toute la saison végétative du pommier (de la pleine floraison à la récolte) a conduit de classer le traitement T1 d'être le régime le plus sévère possédant ainsi les valeurs plus faibles du potentiel hydrique du sol Ψ_{S30} et Ψ_{S60} comparativement aux autres traitements.

Le Ψ_{S30} et Ψ_{S60} du traitement T1 atteignent à la fin de PCF I -0.15 et -0.05 MPa respectivement, le dessèchement du sol à 30 cm de profondeur a conduit le sol à atteindre le point de flétrissement permanent, suivant les travaux effectués par (Raven et al., 2000), Lorsque la teneur en eau du sol atteint le point de flétrissement permanent le potentiel hydrique du sol correspondant est au voisinage de -1.5 MPa, alors que d'autres auteurs prévoient le seuil de 1.2 à -2 MPa (De Parceveaux and Huber, 2007).

Le gradient élevé du potentiel hydrique du sol met en évidence le dessèchement rapide du sol suite à l'arrêt de l'apport d'eau, Ψ_{S30} et Ψ_{S60} continuent à descendre plus bas, atteignant ainsi en moyenne, à la fin de PCF II les seuils de -0.2 et -0.09 MPa respectivement. Durant PCF III, nous avons enregistré les mêmes seuils du potentiel hydrique du sol aux deux profondeurs obtenues en PCF II.

Au cours du régime de confort correspondant au traitement T2 nous avons enregistré les valeurs les plus élevées du Ψ_{S30} et Ψ_{S60} , allant de -0,06 à -0.01 MPa pendant toute la période de croissance du fruit, valeurs similaires obtenues par (De Parceveaux and Huber, 2007) la teneur en eau du sol au point de rétention.

L'application du régime très sévère durant PCF II au traitement T3 par un arrêt total des apports d'eau a conduit ce traitement d'atteindre les mêmes valeurs du Ψ_{S30} et Ψ_{S60} correspondant au traitement T1 atteignant ainsi à la fin de PCF II de -0.2 et -0.09 MPa respectivement. Cependant, durant PCF II, en appliquant l'irrigation déficitaire régulée IDR, les Ψ_{S30} et Ψ_{S60} sont entre les seuils de T2 et T3 atteignant -0.12 et -0.05 MPa respectivement.

La troisième période de croissance du fruit PCF III des deux traitements caractérisée par un régime de confort similaire à T2 a montré que la reprise des irrigations de T3 et T4 avec les mêmes fréquences de T2 a conduit leurs potentiels Ψ_{S30} et Ψ_{S60} de monter graduellement et d'atteindre en fin de PCF III les mêmes seuils de T2 respectivement -0.04 MPa et 0 MPa. Ce que nous avons observé, c'est que l'intervalle de temps qui est d'environ 10 jours est le même lors de la descente ou de la montée de la courbe du potentiel hydrique du sol ce qui montre la réponse rapide des sondes Watermarks® au stress hydrique.

Le dessèchement rapide de la couche proche du sol a été influencé surtout par l'absence des précipitations. Cependant le profil racinaire réalisé (Fig. II. 3) montre que la plus grande concentration des petites racines se trouve sur les premières profondeurs du sol jusqu'à 0.45 m, comme l'absorption de l'eau par les plantes se fait par le biais des poils absorbants des racines, la concentration des racines du profil justifie le dessèchement rapide du sol sur les premières profondeurs; ce qui justifier le gradient élevé de la courbe de descente du potentiel hydrique du traitement T3 durant PCF II. Des résultats similaires ont été obtenus par (Lehmann, 2003).

La densité des racines dans un sol est un bon indicateur du potentiel d'absorption de l'eau par les arbres fruitiers (Green and Clothier, 1995). Cependant la région active d'absorption par les racines correspond à la région active des poils absorbants (Hopkins et al., 2003). Nos expériences ont montré que le dessèchement du sol commence à partir des horizons supérieurs jusqu'à la profondeur de 0.60 m, des résultats similaires ont été trouvés par (Stern et al., 1998).

Le traitement de confort aussi a été marqué par des potentiels hydriques à 30 cm plus faible que des potentiels hydriques du sol à 60 cm. De ce fait, la connaissance du profil racinaire sur plusieurs profondeurs est un outil inévitable pour le pilotage de l'irrigation en goutte à goutte souterraine des arbres fruitiers et notamment le pommier. La réponse rapide des sondes Watermarks® aux différents régimes d'irrigation met en évidence la sensibilité du pommier au stress hydrique.

II. 6. 4. 2 Teneur en eau du sol

Le profil pédologique de la parcelle expérimentale sur une profondeur de 1.10 m nous a permis de dresser un profil racinaire basé sur la taille ainsi que le nombre des racines comptés. L'analyse du profil (Fig. II. 3) a montré que la concentration des petites racines se trouve jusqu'à 40 cm du niveau naturel du sol.

La densité racinaire du sol de la parcelle expérimentale est un outil permettant d'interpréter les résultats obtenus par du suivi de l'état hydrique du sol. (Green and Clothier, 1995) ont montré dans leurs études que la densité des racines dans un sol est un bon indicateur du potentiel d'absorption de l'eau par les arbres fruitiers. En outre, (Shi and Kang, 2000; Han and Kang, 2002) ont reporté dans leurs études, que la capacité des racines à absorber les éléments nutritifs est également améliorée lorsque la zone racinaire est partiellement arrosée. Ce qui

conduit en perspective à conclure que l'IGGS est une méthode prometteuse servant à améliorer la capacité d'absorption des racines.

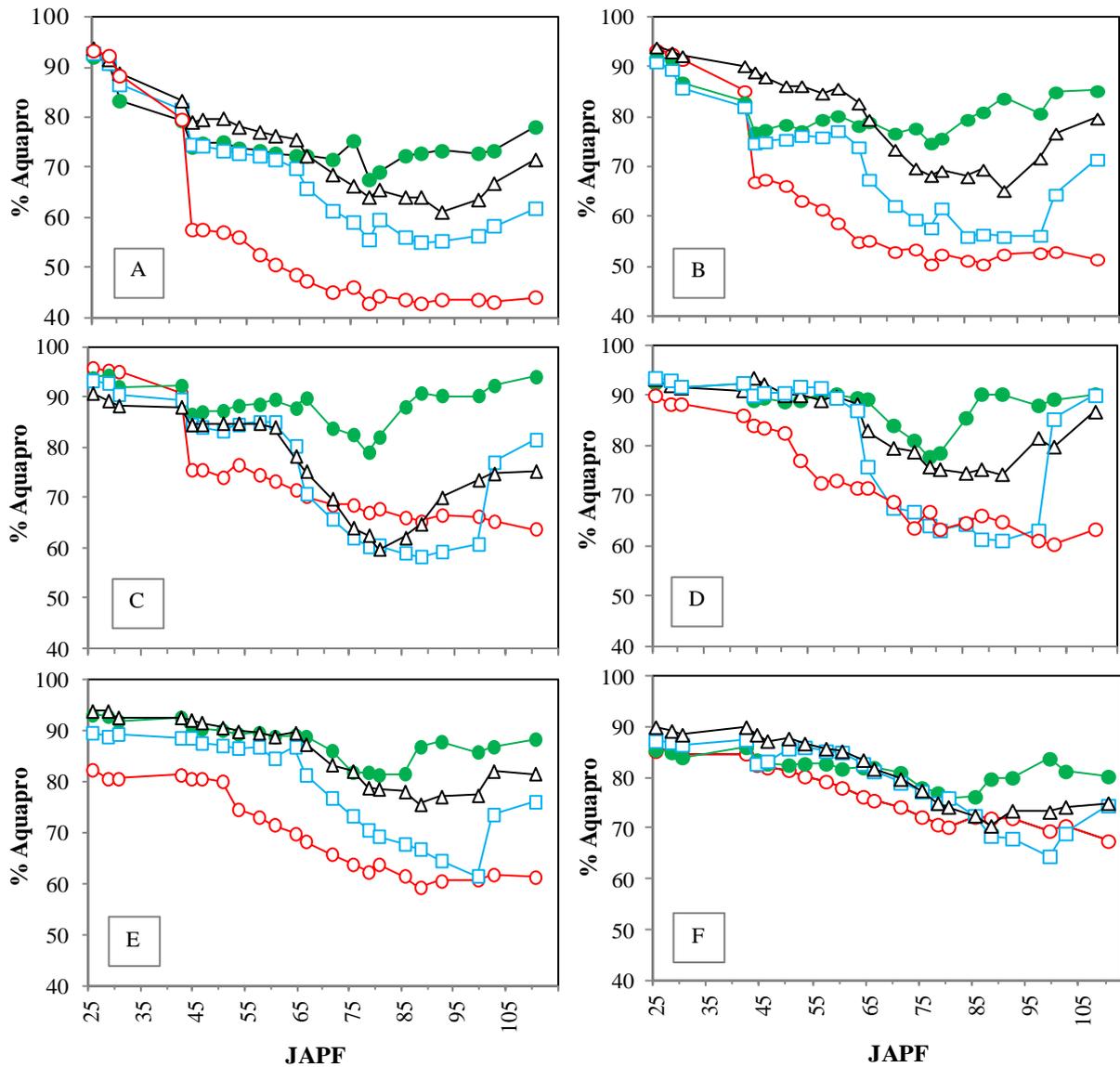


Figure II. 9. Teneur en eau du sol exprimée en %Aquapro (avec la valeur de 100% à la capacité de rétention et 40% humidité au point de flétrissement) à différentes profondeurs du sol (A: 0.15, B: 0.3, C: 0.45, D:0.6, E: 0.75 and F: 0.9 m) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point est la moyenne de quatre mesures. Jours après la pleine floraison (JAPF): 6-36 correspond au mois de Mai, 37-66, Juin, 67-97 le mois de Juillet et 98-128 le mois d'Août.

Cependant, la dynamique de suivi de la teneur en eau du sol TES par la sonde Aquapro dans la parcelle expérimentale (Fig. II. 9) a montré que la TES est minimale jusqu'à 0.4 m et ceci sur l'ensemble des traitements.

Ainsi, en situation de stress hydrique, le dessèchement du sol commence par les horizons supérieurs où la densité racinaire est maximale et l'eau disponible pour les plantes est restreinte aux horizons profonds, où la quantité des racines est minimale (Green and Clothier, 1995) ont obtenu des résultats similaires sur des arbres fruitiers. L'absorption d'eau du sol est une fonction cruciale du système racinaire et détermine largement le statut hydrique de la plante (Cockerham and Leinauer, 2011). La capacité d'absorption de l'eau du sol dépend des caractéristiques morphologiques des racines ainsi que de leurs densités et leurs longueurs (Cockerham and Leinauer, 2011).

La concentration des racines sur les premières profondeurs est aussi la région active des poils absorbant (Hopkins et al., 2003). La densité des racines dans un sol est un bon indicateur du potentiel d'absorption de l'eau par les arbres fruitiers (Green and Clothier, 1995).

Ainsi nous voyons la manière dans se dessèche le sol rapidement aux horizons superficiels à 23 et 30 cm avec un gradient de teneur en eau élevé atteignant durant 63 JAPF 48 % à 23 cm et 54 % à 30 cm.

Cependant, ces deux horizons ont continué à se dessécher jusqu'à atteindre les seuils de 40 % à 23 cm et 50 % à 30 cm, pour le même traitement à la date de 63 JAPF, nous avons observé une TES de 70 % sur les horizons 45, 60, et 75 cm et 77 % à 90 cm. Il en est de même pour les autres régimes qui ont été affectés par la réduction rapide de la teneur en eau du sol TES à 23 et 30 cm, les autres régimes n'ont pas été affectés par cette diminution.

Durant 64 JAPF-105 JAPF la TES en T3 atteindra 60 % en moyenne, de 23 cm à 75 cm nous avons observé une trajectoire de dessèchement du sol ayant un gradient très élevé. le seuil de la TES de l'irrigation déficitaire régulée T4 est légèrement différent de T3. La période PCF III de T3 et T4 caractérisée par un retour au régime de confort a conduit leurs TES d'atteindre plus ou moins la TES du régime de confort, certaines profondeurs était un peu loin du régime de confort et notamment sur les premières profondeurs ceci est probablement due d'une part à la densité racinaire maximale sur ces profondeurs d'autre part la durée de PCF II est vraiment courte certainement le sol mettra du temps pour emmagasiner la même réserve d'eau similaire au régime de confort.

Cet effet, le suivi de la dynamique de la TES en goutte à goutte souterrain a montré que la sonde Aquapro est sensible aux variations de TES. A la fin de PCF I, la TES du traitement le

plus sévère atteint le point de flétrissement correspondant ainsi à une TES de 52 % (valeur conforme à la sonde Acaper). L'arrêt total des apports d'eau aux traitements T1 (durant toute la saison) et T3 (durant PCF II) a conduit la TES de descendre plus bas, des résultats similaires ont montré que lorsque le sol est sec la teneur en eau du sol diminue progressivement et atteint des valeurs minimales (Starr and Paltineanu, 1998a; Starr and Paltineanu, 1998b; Goldhamer et al., 1999; Girona et al., 2002).

Des travaux effectués par (Starr and Paltineanu, 1998a; Starr and Paltineanu, 1998b; Thompson et al., 2007) ont montré que le suivi de la dynamique de la teneur en eau du sol en situation de stress hydrique sévère possède un appréciable potentiel de pilotage de l'irrigation par le biais des seuils limites de la teneur en eau du sol.

II. 6. 4. 3 Relation entre le potentiel hydrique du sol (Ψ_{soil}) et la teneur en eau du sol (TES)

Dans cette présente étude nous avons trouvé une corrélation entre le potentiel hydrique du sol et la teneur en eau du sol TES à 0.3 et 0.6 (fig. II. 10) avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0.91$).

La réponse des différentes sondes Aquapro et Watermark® au stress hydrique et les coefficients de corrélation trouvés dans cette études ($R^2=0.91$) montre clairement que ces sondes sont des outils efficaces pour le pilotage de l'irrigation en goutte à goutte souterraine IGGS des arbres fruitiers et notamment le pommier. Des résultats similaires ont été trouvés sur l'abricotier (Pérez-Pastor et al., 2009).

Le profil du sol de la parcelle expérimentale à 1.1 m de profondeur nous a permis de développer un profil basé sur la taille des racines et le comptage des racines et montre clairement la concentration des petites racines sur les premières profondeurs. Les résultats de suivi de la teneur en eau du sol montrent que le dessèchement du sol commence par les premiers horizons où la densité racinaire est maximale. Ainsi, dans les conditions de stress hydrique, la TES et le potentiel hydrique atteignent les valeurs minimales où la densité des racines est maximale (Fig. II. 2 et II. 3).

Le système racinaire du pommier est explorative (Gandar et Hughes, 1988), la zone à haute densité racinaire leur permet d'exploiter un volume important du sol (Green et al., 1997), ce qui leur permet d'exploiter de l'eau disponible se trouvant proche des goutteurs. La réponse et la réaction rapide des sondes Aquapro et Watermark® au stress hydrique montrent clairement la zone à haute absorption par les racines, la réponse aussi des racines sur les premières

profondeurs montre que cette région est la plus active et représente une vraie résistance majeure à l'absorption de l'eau par le système racinaire, des résultats similaires ont été obtenus sur le pommier (Green et al., 19997).

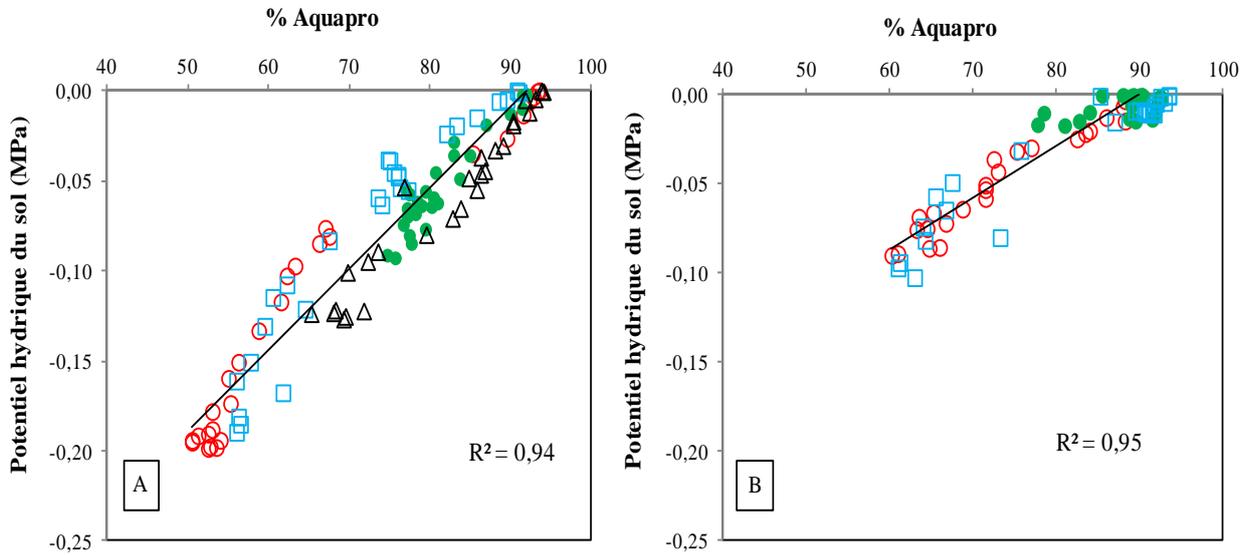


Figure II. 10. Relations entre le potentiel hydrique du sol (Ψ_{soil}) et la teneur en eau du sol exprimée en % Aquapro (avec la valeur de 100% à la capacité de rétention et 40% humidité au point de flétrissement) à 0.30 m de profondeurs (A) et 0.60 m (B) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).

Les équations obtenues par une régression linéaire sont comme suit :

$$\Psi_{S30} = 0,0044TES_{30} - 0.4084 \quad \text{Avec : } R^2 = 0.91 \quad (\text{II. 2})$$

$$\Psi_{S60} = 0,0027TES_{60} - 0.906 \quad \text{Avec : } R^2 = 0.91 \quad (\text{II. 3})$$

Ψ_{S30} et Ψ_{S60} : Potentiel hydrique du sol à 0.3 et 0.6 m en MPa.

TES_{30} et TES_{60} : Teneur en eau du sol à 0.3 et 0.6 m en %.

Cependant, le goutte-à-goutte souterrain qui est basé sur la faculté de l'arbre à prélever la quantité d'eau dont il a besoin avec une partie partielle de son système racinaire a permis de réaliser des économies d'eau appréciables. Ainsi, les économies d'eaux réalisées dans notre étude par rapport à l'irrigation de confort appliquée durant toute la saison sont de l'ordre de 52 % pour T3 et 47 % pour l'IDR. Ce gain de 47% apporté par l'irrigation déficitaire régulé est

levier majeur pour le développement socio-économique dans les pays où les ressources en eau sont limitées.

Dans les vergers irrigués en goutte à goutte souterrain, les arbres développent, en plus de leur réseau de racines «naturel» qui exploite pratiquement toute la réserve en eau disponible dans le sol, un réseau plus restreint mais très ramifié, limité à la zone arrosée par les goutteurs (Monney, 2011). Des résultats similaires ont été obtenus dans plusieurs études décrivant le potentiel économique de l'irrigation en goutte à goutte souterraine IGGS (Thompson et al., 2009; Lamm et al. 2006; Lamm and Camp, 2007). Ainsi, (Bonachela et al., 2001) a trouvé dans son étude des économies d'eau de l'ordre de 58 mm sur une culture d'olivier en Espagne (Bonachela et al., 2001), d'autres études effectuées par (Alam et al., 2002) ont montré que 22 % est le gain des apports d'eau obtenus par l'IGGS comparativement à l'irrigation par aspersion avec une augmentation de 7 % du rendement des cultures.

Les économies d'eau réalisées par l'IGGS s'expliquent par les avantages qu'offre cette technique, l'évaporation à la surface du sol est nulle, d'autre part, l'eau est livrée directement à la profondeur voulue aux systèmes racinaires des arbres fruitiers, les hautes fréquences journalières appliquées aux arbres fruitiers donnent l'avantage à leurs systèmes racinaires d'exploiter les apports d'eau d'une manière rationnelle et efficace, ce qui tend à réduire considérablement les infiltrations profondes.

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt du suivi de la teneur en eau et du potentiel hydrique du sol afin de mieux gérer l'irrigation contrairement au bilan hydrique. La gestion de l'irrigation par le bilan hydrique est assez complexe car la réserve utile est difficile à déterminer, elle dépend de la profondeur des racines contribuant à l'alimentation des cultures et peut varier en profondeur c'est le cas de notre étude. La profondeur des racines, elle-même, est difficile à estimer, par conséquent, la réserve facilement utilisable devient aussi difficile à évaluer.

Le bilan hydrique, rigoureux dans son principe, pose d'énormes problèmes dans son application, et particulièrement lorsqu'il s'agit de l'irrigation en goutte à goutte à haute fréquence qui demande des mesures quotidiennes ce qui complique et rend difficile la programmation des irrigations des arbres fruitiers.

Les sondes Watermark® et Aquapro utilisées dans notre étude sont des outils fiables indispensables pour la planification et l'optimisation des irrigations et peuvent remédier à

toute contrainte posée. Le suivi de la teneur en eau du sol par la sonde Aquapro sur sept profondeurs nous a permis de voir l'évolution de cette teneur depuis les horizons de surface jusqu'à 1 m de profondeur.

Cette présente étude a montré qu'en situation de stress hydrique, le commencement du dessèchement du sol se fait dans la zone où la densité racinaire est maximale. De ce fait la densité des racines dans un sol est un bon indicateur du potentiel d'absorption de l'eau par les arbres fruitiers.

Cependant le suivi de la dynamique de la TES en goutte à goutte souterrain a montré que la sonde Aquapro est sensible aux variations de TES.

La réponse des arbres fruitiers soumis aux différents stress ont été marqués par diminution progressivement de la TES jusqu'à atteindre les valeurs minimales.

Le suivi de la dynamique de la teneur en eau du sol en situation de confort ou de stress hydrique possède un appréciable potentiel de pilotage de l'irrigation.

Cependant, la sonde Aquapro qui est reliée à un Data-Logger servant aux stockages des données ne permet pas une automatisation du système d'irrigation qui pose un problème lors du suivi de la teneur en eau du sol sur le verger.

Contrairement à la sonde Aquapro, la sonde Watermark® est un outil plus fiable et pratique pour le pilotage des irrigations.

Dans la présente étude la réponse des arbres fruitiers soumis à une contrainte hydrique a été marquée par une chute du potentiel hydrique du sol atteignant les -0.2 MPa pour les arbres non irrigués. Les relations trouvées par une régression linéaire entre la TES et Ψ_s avec des coefficients de corrélation très élevés permettent le suivi et la programmation des irrigations des arbres fruitiers par la sonde Watermark®. Les seuils limite du potentiel hydrique du sol sont trouvés dans notre étude sont comme suit:

-0.9 MPa pour l'irrigation de confort et -0.12 MPa pour l'IDR

-0.02 MPa irrigation de confort et -0.04 MPa pour l'IDR

La réponse des arbres fruitiers au stress hydrique ne nécessite pas uniquement des mesures de la teneur en eau du sol et du potentiel hydrique mais nécessite et particulièrement par la connaissance du statut hydrique de la plante qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III Statut hydrique de la plante

III. 1 État hydrique de la plante

Le transport de l'eau à partir des racines jusqu'au système de la plante est assuré par la transpiration qui diminue le potentiel hydrique au niveau de la plante. Ceci résulte à la création d'un gradient de potentiel hydrique entre le sol et les feuilles qui provoque un flux d'eau. Le concept du potentiel hydrique est la mesure la plus apte pour exprimer l'état énergétique de l'eau dans la plante. L'état hydrique instantané des plantes est défini par le potentiel hydrique. L'avantage de l'utilisation du potentiel hydrique est qu'il permet de faire la connexion avec le flux d'eau existant dans la plante puisque ce dernier est toujours la résultante d'un gradient de potentiel (toujours vers le potentiel inférieur). Ce flux d'eau, résultante de la demande évaporatoire dans les feuilles, est régi par la loi de la tension-cohésion dans le continuum sol- plante-atmosphère (Dixon and Joly, 1895; Philippe, 1966; Wei et al., 1999; Tyree and Cochard, 2003).

III. 2 Potentiel hydrique du xylème du tronc du pommier

Il existe de nombreux critères pour évaluer l'état hydrique du pommier. Parmi les indicateurs physiologiques de l'état hydrique du pommier figure la mesure des potentiels hydriques foliaires. Le potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_B) indique l'état hydrique du pommier en fin de nuit et en obscurité totale à ce stade la transpiration est presque complètement arrêtée ce qui conduit à un équilibre entre le statut hydrique de la plante est celui du sol. Le suivi du potentiel hydrique de base, réalisé avec une chambre à pression, permet d'estimer la force avec laquelle l'eau est retenue dans les feuilles. Plus les valeurs enregistrées sont négatives, plus l'eau est retenue fortement à l'intérieur de la plante et traduit une contrainte hydrique élevée.

Le xylème est le principal tissu conducteur de l'eau chez les plantes. Cependant la connaissance de la pression hydrostatique qui règne à l'intérieur du xylème du tronc du pommier nous renseigne sur la capacité de l'arbre à conduire de l'eau depuis les poils absorbants jusqu'aux feuilles du pommier. Le potentiel hydrique du xylème du tronc des arbres fruitiers renseigne sur la capacité de la plante à conduire l'eau du sol à l'atmosphère, le Ψ_X est un bon indicateur du stress hydrique et servant aussi à la gestion de l'irrigation en plein champ (Shackel et al., 1997; Stern et al., 1998; Naor, 2000).

D'autres auteurs considèrent que le potentiel hydrique foliaire (Peretz et al. 1984) et le potentiel hydrique de base (Améglio et al. 1999) sont de bons indices du statut hydrique de la plante. Le potentiel hydrique du xylème du tronc est un bon indicateur de la capacité de la plante à conduire l'eau depuis le sol jusqu'à l'atmosphère. L'application du Ψ_X comme indicateur en situation de stress hydrique a été largement utilisée dans les arbres fruitiers comme les vignes (Liu et al., 1978; Greenspan et al., 1996) et pruniers (MacCutchan and Shackel, 1992).

Le comportement physiologique du pommier et son régime hydrique en particulier est évalué au moyen d'indicateurs physiologiques particulièrement le potentiel hydrique foliaire (O'Connell Goodwin, 2007; Talluto et al., 2008; Naor et al., 2008; Naor et al., 2009; Swaef et al., 2009). Différents auteurs ont montré que le premier indicateur sensible du stress hydrique de la plante est le potentiel hydrique du xylème Ψ_X mesuré à midi solaire, chez les arbres fruitiers (Naor, 2000), pommier (Naor, 2003; Naor and Cohen, 2003; Naor, 2008; Naor and Cohen, 2008; Swaef et al., 2009), pêcher (Girona et al., 2005), vigne (Girona, 2006; Zufferey et al., 2006), prunier (McCutchan and Shackel, 1992; Lampinen et al., 2001), grenadier (Rodríguez et al., 2012), les agrumes (García-Tajero et al., 2010) et l'amandier (Romero et al., 2006). Dans ce sens, de nombreux auteurs ont affirmé que Ψ_X est un indicateur approprié non seulement pour le suivi du statut hydrique de la plante mais permet aussi d'optimiser les apports d'eau aux cultures (García-Tejero et al., 2010). Le potentiel hydrique du xylème du tronc des vignes était l'indicateur le plus discriminant pour les régimes hydrique sévères et modérés (Choné et al., 2001), il permet aussi de détecter le début du stress hydrique (Choné et al., 2001).

III. 3 Matériels et méthodes

III. 3. 1 Site de l'expérimentation

L'expérimentation a été conduite en Suisse au Centre de recherche de Conthey d'Agroscope, dans le canton du Valais (altitude 480 m). Le climat régional est de type continental, marqué par des précipitations annuelles de l'ordre de 630 mm et une température annuelle moyenne de 9,9 °C (1978–2007). Le déficit pluviométrique calculé pour la période de végétation du pommier de la variété de référence Golden est d'environ 300 mm (275 mm pour le pommier de la variété Gala).

III. 3. 2 Matériel végétal et type de sol

Le verger, planté en automne 2002, est constitué de pommier Gala sur porte-greffe M9 clone FL56 (vigueur -20 % par rapport à EMLA). Les arbres sont plantés à une densité de 1800 arbres/ha (4,0 x 1,4 m) sur une surface de 1949 m² et ayant comme pollinisateurs Everest et Golden Gem. La hauteur des arbres est de 4 m, avec un diamètre moyen des troncs de 65 mm. Le sol est de texture limoneuse avec une teneur en argile de 24 % et une profondeur limitée par une couche d'alluvions grossières située entre 1,0 m et 1,6 m de profondeur. L'essentiel du système racinaire est concentré entre 20 et 70 cm avec des racelles explorant au moins jusqu'à 1,4 m, là où la profondeur utile est la plus importante. L'orientation des lignes d'arbres est nord-sud. Le 27 Avril 2010 est la date de la pleine floraison de la variété Gala à Conthey.

III. 3. 3 Éclaircissage des arbres fruitiers

Afin d'empêcher l'alternance, d'améliorer le rendement des arbres fruitiers et la qualité interne et externe des fruits, nous avons utilisé deux types d'éclaircissage à savoir l'éclaircissage chimique et l'éclaircissage manuel.

Cependant, l'éclaircissage chimique a été réalisé en deux temps suivant différentes périodes de croissance des fruits:

1. Le premier éclaircissage a été réalisé au stade de chute des pétales correspondant à la date du 26 Avril 2010. Le produit utilisé est un mélange du Geramid-neu (2 l/ha) et de l'Ethéphon (0.3 l/ha), sous des conditions de température de l'air variant de 18-22°C (Widmer et al., 2012).

2. A la date du 18 Mai 2010, correspondant à un diamètre des fruits entre 8-12 mm, nous avons effectué un deuxième éclaircissage chimique (Widmer et al., 2012) avec un produit chimique autre que le premier, le produit utilisé est un mélange de Maxcel (5 l/ha) et Dirager S (1 l/ha) sous des conditions de température de l'air variant de 18-22°C. Le 06 juin 2010 est la date correspondante à la chute des pommes sous l'effet de l'éclaircissage chimique.

Un dernier passage avec l'éclaircissage manuel a été réalisé le 29 Juin 2010. Chez les rosacés, les principaux agents de pollinisation sont les insectes, dans notre parcelle expérimentale les abeilles qui sont le vecteur de la pollinisation, cette dernière s'effectue sous des températures de l'air supérieur à 15 °C.

Les opérations d'éclaircissage sont des moments privilégiés pour faire de la prophylaxie et retirer les organes malades ou bien fruits piqués (Lamine and Bellon, 2009).

III. 3. 4 Mesure des paramètres physiologiques

III. 3. 4. 1 Potentiel hydrique du xylème du tronc des arbres fruitiers

Les indicateurs physiologiques constituent une autre approche qui évalue l'état hydrique de la plante elle-même. Parmi ces indicateurs, la mesure du potentiel hydrique du feuillage des arbres fruitiers permet d'estimer la disponibilité en eau pour la plante. Cette opération, effectuée au moyen d'une chambre à pression, permet de mesurer la force avec laquelle l'eau est retenue dans le végétal. Plus les valeurs enregistrées sont basses ou négatives, plus l'eau est retenue fortement à l'intérieur de la plante (Zufferey et al., 2006).

Afin de déterminer le statut hydrique du pommier, nous avons procédé par un suivi de mesure du potentiel hydrique foliaire de base Ψ_B et celui du xylème du tronc Ψ_X à l'aide de la chambre à pression dite bombe de Schölander (model 600; PMS Instrument Company U.S.A), (Schölander et al., 1965) selon la procédure décrite par (Turner, 1981; Naor et al., 2008).

Les mesures ont été effectuées sur douze feuilles par traitement (deux feuilles proches du tronc de l'arbre). Les mesures du Ψ_B ont été faites entre 3h et 5h du matin à l'obscurité totale (la transpiration des feuilles est presque arrêtée complètement, les stomates étant fermées) à cet instant le potentiel hydrique foliaire de base Ψ_B reflète réellement l'évolution des disponibilités de l'eau dans le sol. Après la pleine floraison, nous avons effectué cinq mesures du potentiel hydrique de base et ce, durant toute la saison végétative (68 JAPF, 86 JAPF, 103 JAPF, 107 JAPF, 117 JAPF).

Les mesures ont été effectuées sur des feuilles proche du tronc des arbres fruitiers, la feuille prise de l'arbre coupée du pétiole par un cutteur et mise immédiatement dans la chambre à pression puis on exerce une pression progressive jusqu'à apparition de la sève au niveau du pétiole, la prise de la mesure de la pression correspondante est faite juste au moment de l'apparition de la sève en surface, le manomètre enregistré à ce stade la pression correspondante qui est le potentiel de base mais en signe négatif.

Quand au potentiel hydrique du xylème du tronc du pommier Ψ_X qui exprime la capacité de conduire la sève brute le long du xylème en partant des racines, les mesures ont été effectuées tous les trois jours à midi solaire entre 12h30 et 13h30 quand l'évapotranspiration est maximale (Naor et al., 2003). Les feuilles ont été placées à l'intérieur d'un sachet en plastique recouvert à l'aide du papier en aluminium, les mesures débutent une heure après dans le but d'avoir un équilibre entre le Ψ_X et le potentiel hydrique des feuilles du pommier (Naor and Cohen, 2003).

La partie centrale (bloc B) servant pour les mesures expérimentales. La pleine floraison des arbres fruitiers a eu lieu le 27 avril 2010, date qui marque le déclenchement des irrigations (1JAPF : premier jour après la pleine floraison). La chute physiologique des fruits du pommier (Gala) de la parcelle expérimentale a été observée la fin du mois de juin, date qui marque la fin de la deuxième période de croissance des fruits du pommier.

III. 5 Suivi du grossissement du diamètre du tronc des arbres fruitiers

Le suivi de l'évolution du grossissement du diamètre du tronc des arbres fruitiers a été fait au début de la campagne des irrigations sur 48 arbres codés, les mesures sont toujours effectuées sur les mêmes arbres codés afin de mesurer le même diamètre. Les mesures ont été effectuées sur les deux années d'expérimentation afin de déterminer l'impact des différentes stratégies de l'irrigation déficitaire sur la variation du diamètre du tronc des arbres fruitiers.

II. 6 Différentes stratégies d'irrigation

Les quatre traitements d'irrigation appliqués sont basés sur les différentes périodes de croissance du fruit (PCF), selon le nombre de jours après la pleine floraison (JAPF): PCF I (1 JAPF-64 JAPF) correspondant à la division cellulaire du fruit ; PCF II (65 JAPF-104 JAPF) au grossissement cellulaire du fruit ; PCF III (105 JAPF-128 JAPF) au grossissement et à la maturité du fruit. Le premier traitement T1, non irrigué durant PCF (I, II et III). T2, irrigation de confort durant PCF (I, II et III), T3 similaire à T2 sauf non irrigué en PCF II, T4 similaire en T2 sauf application de l'irrigation déficitaire régulée en PCF II.

III. 7 Analyse des données

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide XLSTAT 2010. Pour comparer l'influence des différents traitements, les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) et les différences significatives ont été analysées avec le test de Tukey à un niveau de 95% ($P < 0,05$). Les deux systèmes de forme de l'arbre ont été mis en commun, car aucune interaction significative n'a été trouvée entre eux et les traitements d'irrigation. Les relations entre les facteurs ont été analysés par la régression linéaire et du coefficient de détermination (R^2).

III. 8 Résultats et discussion

III. 8. 1 Statut hydrique de la plante

L'arrêt de l'arrosage a eu des effets négatifs sur l'état hydrique de la plante (réduction du potentiel hydrique du xylème et de base). La mesure du potentiel hydrique foliaire effectuée

au moyen d'une chambre à pression permet d'évaluer la force avec laquelle l'eau est retenue dans le végétal (Spring and Zufferey, 2011) ainsi, que la pression hydrostatique régnant dans le xylème du tronc.

Le suivi de la dynamique du potentiel hydrique de base Ψ_B (Tab. III.1) permet d'évaluer durant les différentes périodes de croissance du fruit PCF I, II et III, la réponse des arbres fruitiers aux différentes stratégies d'irrigation. Pendant PCF II et III, comparativement aux traitements T1, T2 et T3, le traitement le plus sévère T1 possède les valeurs les plus faibles de Ψ_B variant de -0,23 à -0,18 MPa respectivement.

Tableau III. 1: Statistiques descriptives des moyennes du potentiel hydrique de base (MPa) des différentes stratégies d'irrigation (TRT) du pommier (Gala). Les lettres différentes de la même colonne indiquent des différences significatives entre les traitements d'irrigation (Tukey, $P < 0,05$).

JAPF	Les différents traitements (TRT)			
	T1	T2	T3	T4
68	-0.19 a	-0.09 b	-0.09 b	-0.09 b
86	-0.23 a	-0.12 b	-0.18 ab	-0.14 b
103	-0.21 a	-0.12 b	-0.16 ab	-0.13 b
107	-0.21 a	-0.10 b	-0.19 a	-0.15 a
117	-0.18 a	-0.08 b	-0.11 bc	-0.10 b

Cependant durant ces mêmes périodes, le traitement T1 possède aussi les valeurs minimales du potentiel hydrique du sol variant de -0,2 MPa à 0.3 m et de -0,08 MPa à 0.60 m. Par contre le régime de confort T2 possède les valeurs les plus élevées du potentiel hydrique de base Ψ_B variant de -0,12 MPa à -0,08 MPa et ce, pendant les deux périodes de croissance du fruit. Cependant, T2 possède durant les mêmes périodes PCF II et III les valeurs les plus élevées de la teneur en eau du sol TES et du potentiel hydrique du sol Ψ_s , ceci s'explique par le fait que Ψ_B est étroitement lié au potentiel hydrique de base et exprime réellement la disponibilité de l'eau dans le sol.

Le traitement sévère appliqué au traitement T3 durant PCF II a causé une diminution rapide du Ψ_B , atteignant à la fin de PCF II presque le même seuil du Ψ_B de T1 qui est de -0.2 MPa, aucune différence significative n'a été enregistrée entre T1 et T2.

Cependant, le changement du régime d'irrigation du traitement T3 de PCF I à PCF II et de PCF II à PCF III a été marqué par la réponse rapide du potentiel hydrique de base au stress hydrique. Le passage du régime de confort du traitement T4 appliqué durant la phase de la

division cellulaire PCF I à l'irrigation déficitaire régulée IDR appliquée pendant PCF II a été marqué par un potentiel hydrique de base Ψ_B significativement plus faible que celui du traitement T2, atteignant à la fin de PCF II le seuil de -0,15 MPa (Tab. III. 1). À la date de mesure du 107 JAPF, nous n'avons enregistré aucune différence significative entre l'IDR et les traitements T1 et T3, par contre il y a des différences significatives entre T2 et les autres traitements (T1, T3 et T4).

La période PCF III des traitements T3 et T4 caractérisée par un retour au régime de confort similaire à T2 a été marquée par une augmentation du potentiel hydrique de base en signe négatif atteignant à la date de mesure -0.08 MPa pour T2, -0.11 MPa pour T3 et -0.10 MPa pour T4, par contre aucune différence significative n'a été observée entre ces trois traitements. Les résultats montrent que le potentiel hydrique de base est très sensible au dessèchement du sol et aux variations de la teneur en eau du sol mesurée par les sondes Aquapro et Watermarks exprimé, des résultats similaires ont été observés avec le grenadier (Rodríguez et al., 2012). Parallèlement au cours de FGP II, les traitements T3 et T4 ont des faibles Ψ_{S30} et Ψ_{S60} par rapport au traitement T2 ce qui justifie la sensibilité de Ψ_B au stress hydrique. Nos résultats montrent que le potentiel hydrique de base est un indicateur robuste qui caractérise l'état d'équilibre de l'eau entre le sol et la plante. Pendant la nuit, quand les stomates sont fermés la transpiration est presque nulle, Ψ_B s'équilibre avec le potentiel hydrique du sol. Le seuil critique du Ψ_B obtenu durant nos essais est de -0.23 MPa. Quand nous avons repris l'irrigation le potentiel de base des traitements T3 et T4 atteignent le même seuil que celui de traitement de confort, des résultats similaires ont été obtenus avec le grenadier (Rodríguez et al., 2012) et le citronnier (Ruiz-Sánchez et al., 1997; Ortuño et al., 2006).

Le suivi du potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_X du pommier (fig. III. 2) montre clairement l'influence des différentes stratégies du pommier sur le statut hydrique des arbres fruitiers. Les mesures du Ψ_X ont débuté le 43 JAPF date où les feuilles du pommier sont bien développées permettant ainsi des mesures adéquates à l'aide de la chambre à pression.

Le suivi de la dynamique du Ψ_X (Fig. III. 2) montre que la valeur initiale en début des mesures de tous les traitements est au voisinage de -1,08 à -0,88 MPa. Le traitement le plus sévère T1 possède les valeurs les plus basses du Ψ_X par rapport aux autres traitements durant toute la période de croissance du fruit. L'arrêt total des apports d'eau aux arbres fruitiers a conduit le Ψ_X à descendre plus bas atteignant à la fin de PCF I le seuil de -1.16 MPa.

La 2^{ème} phase de grossissement des fruits a été caractérisée par un abaissement continu du Ψ_X jusqu'à atteindre à la date 106 JAPF le seuil de -1.48 MPa, toutefois, cette valeur s'est

stabilisée avec de légères variations durant PCF III période de grossissement des fruits qui est la plus courte comparativement aux autres périodes PCF II et III, la valeur finale du Ψ_x du traitement T1 est de 1.47 MPa, alors que la valeur maximale enregistrée durant toute la saison des arbres fruitiers non irrigués est de -1.51 MPa valeur qui exprime la force maximale disponible au niveau du xylème du tronc du pommier caractérisant le pouvoir de transfert de la sève brute depuis le sol en passant par le tronc jusqu'aux feuilles des arbres fruitiers, des résultats similaires ont été trouvés sur le pommier (Naor and Cohen, 2003).

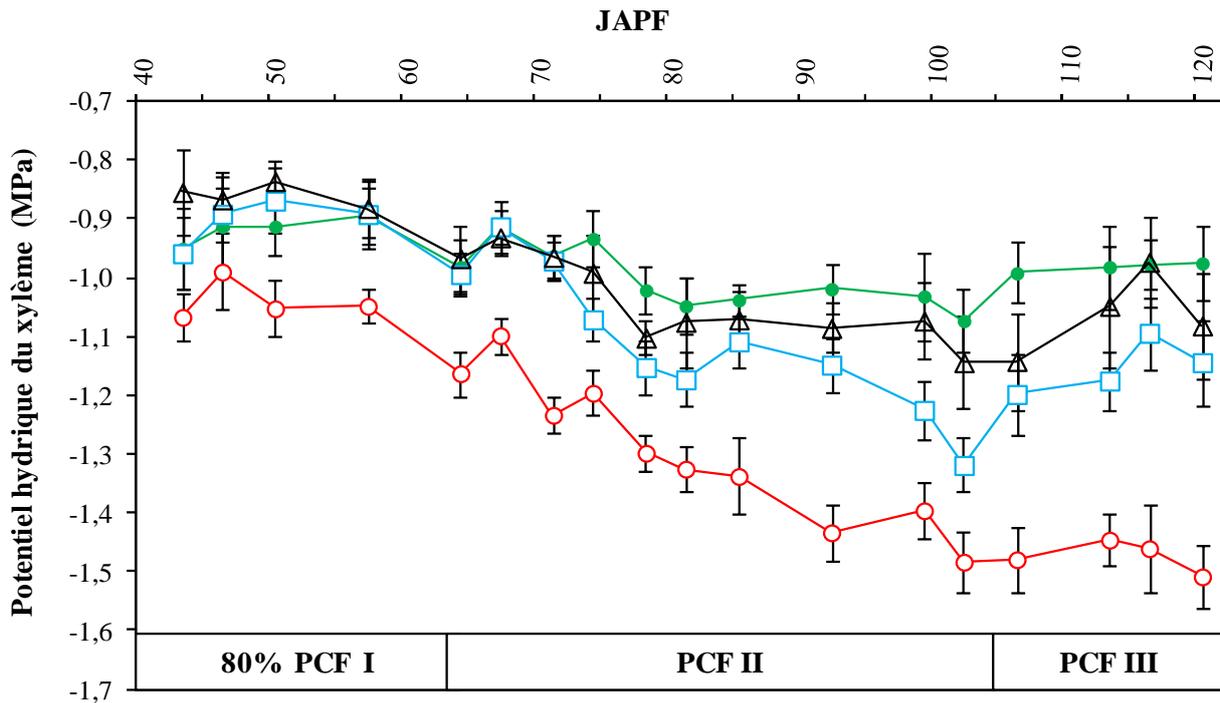


Figure III. 2. Potentiel hydrique du xylème (Ψ_x) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1, (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point correspond à la moyenne de 12 mesures. Jours après la pleine floraison (JAPF): 6-36 correspond au mois de Mai, 37-66, Juin, 67-97 le mois de Juillet et 98-128 le mois d'Août.

L'analyse des résultats du traitement T1 montre clairement la sensibilité du potentiel hydrique du tronc au stress hydrique. En effet, la réponse rapide du Ψ_x au stress hydrique offre des informations sur la force de rétention disponible au niveau des arbres fruitiers de manière à conduire l'eau du sol vers l'atmosphère, elle permet la connaissance de l'état hydrique des arbres fruitiers durant la journée. Durant toute la saison de croissance du fruit et comparativement aux trois traitements, le régime de confort T2 possède les valeurs les plus élevées du Ψ_x variant de -1.07 MPa à -0.89 MPa respectivement. L'abaissement du potentiel

hydrique du xylème des traitements soumis à une contrainte hydrique T1 et T3 est principalement lié à la demande climatique (éclairage intense, température élevée, diminution de l'hygrométrie de l'air...) et du transfert hydrique entre le sol la plante et l'atmosphère (transpiration).

Le Ψ_X , durant la première période PCF I des traitements T3 et T4 est similaire à celui de T2. Le traitement sévère appliqué à T3 par un arrêt total des apports d'eau aux arbres fruitiers a eu pour effet la descente du Ψ_X plus bas atteignant à la fin de PCF II le seuil de -1.32 MPa.

L'arrêt soudain de l'approvisionnement en eau au traitement T3 a causé une perte soudaine de la pression hydrostatique, en signe négatif dans le xylème du tronc du pommier qui est le principal conducteur de la sève brute. Ainsi, durant PCF II et en situation de confort, nous pouvons aller jusqu'à la valeur limite de -1.07 MPa pour déclencher les irrigations. Nous pouvons retenir à cet effet ce seuil de -1.07 MPa comme seuil de référence pour la gestion de l'irrigation en situation de confort hydrique.

L'application de l'irrigation déficitaire régulée IDR durant PCF II a été marquée par des Ψ_X légèrement inférieurs à ceux de T2 atteignant à la fin de PCF II -1.14 MPa. Cependant, dix jours après la reprise de l'irrigation le Ψ_X en T3 et T4 remonte progressivement atteignant à la fin de PCF III -1.15 MPa en T3 et -0.97 MPa en T4 alors que celui de T2 est de -1.07 MPa. Plusieurs auteurs indiquent que le potentiel du xylème du tronc est un indicateur très sensible au stress hydrique des plantes pour la programmation de l'irrigation du pommier ([Swaeef et al., 2009](#)) et des agrumes ([García-Tajero et al., 2010](#)).

Cependant, durant PCF III le moment où nous avons aligné les traitements T3 et T4 au régime de confort leurs Ψ_X rejoint les mêmes valeurs du traitement de confort en espace de 15 jours au environ, nos résultats sont similaires à ceux trouvés avec le citronnier ([Ruiz-Sánchez et al., 1997](#); [Ortuño et al., 2006](#)).

Le potentiel de tronc Ψ_X est donc un indicateur fiable du stress hydrique du pommier pour la gestion de l'irrigation déficitaire, comme le précise plusieurs études sur des espèces fruitières de la zone méditerranéenne et tempérée tes que les agrumes ([Ortuño et al., 2006](#)), le pêcher ([Garnier and Berger, 1985](#)), l'amandier ([Shackel et al., 1997](#)), le pommier ([Naor et al., 1995](#)) et le cerisier ([Livellara et al., 2011](#)). L'application du stress sévère des arbres fruitiers non irrigués caractérisée d'une part des restrictions hydriques dans le sol et, d'autre part, de l'augmentation de la demande évaporative a conduit le Ψ_X d'atteindre un seuil maximal de l'ordre de -1.51 MPa, le potentiel hydrique atteint à son tour -0.2 MPa, alors que la teneur en

eau du sol variant de 40 % à 60 % sur les premières profondeurs de 25 cm à 75 cm, les différentes variations journalières du Ψ_X dépendent des variations du DPV durant la journée (Swaef et al., 2009), ceci s'explique par le fait que le potentiel hydrique du xylème du tronc dépend d'une part du statut hydrique du sol et, d'autre part, de l'environnement extérieur des arbres fruitiers notamment le déficit de pression de vapeur de l'air DPV.

III. 8. 2 Relation entre le déficit de pression de vapeur et l'ETP

Il existe à cet effet une relation linéaire entre le DPV et l'ETP (Fig. III. 3) avec un coefficient de corrélation $R^2=0.41$, l'ETP augmente avec le DPV. Les valeurs élevées du DPV résultant d'une faible humidité de l'air et de la température élevée de l'air conduisent à la fermeture des stomates dans de nombreuses plantes (El Sharkawy et al., 1984).

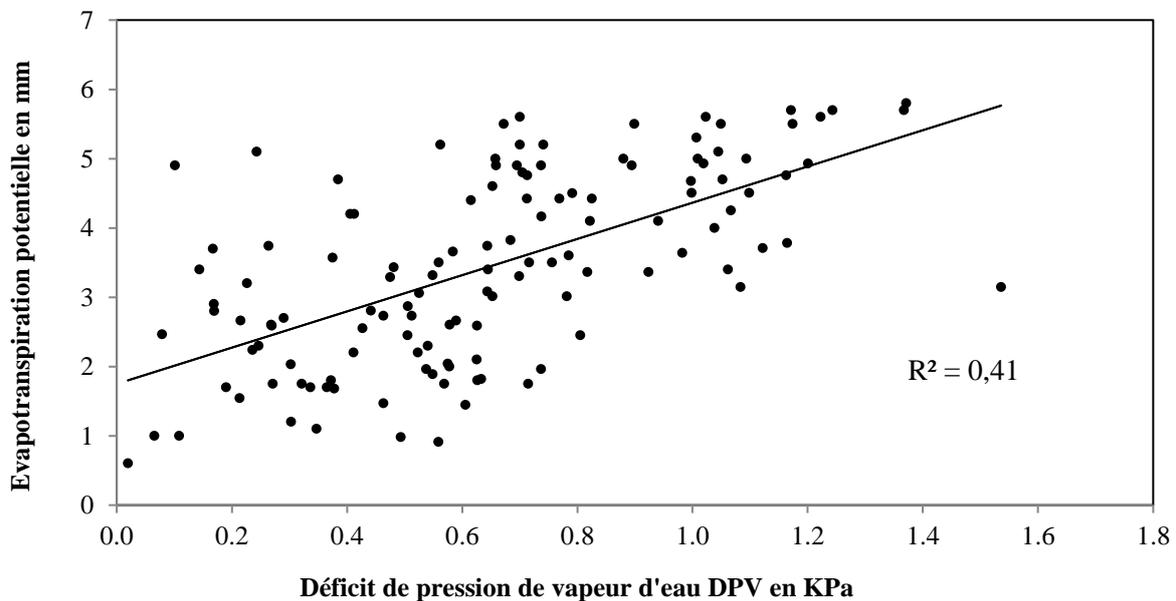


Figure III. 3. Relation entre l'évapotranspiration potentielle du pommier en mm et le déficit de pression de vapeur d'eau DPV en kPa.

L'équation à partir une régression linéaire est comme suit :

$$\mathbf{ETP = 2,6149DPV + 1,7494 , R^2 = 0,41 \quad (III. 1)}$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle du pommier en mm ;

DPV : déficit de pression de vapeur en kPa.

L'équation ci-dessus montre clairement que l'évapotranspiration potentielle dépend du déficit de pression de vapeur d'eau, ainsi lorsque le DPV est faible et l'air environnant tend vers un état de saturation, la transpiration des arbres fruitiers via les feuilles sera conditionnée par le gradient de concentration de vapeur d'eau, induisant une ouverture stomatique (Ferreira and Katerji., 1990). Ainsi la réduction du déficit de pression de vapeur d'eau fait réduire à la fois l'ETP, et en conséquence la demande atmosphérique à proximité des feuilles, et fait réduire la valeur absolue de la pression hydrostatique du xylème du tronc du pommier, c'est à dire, le potentiel hydrique normalement négatif va s'approcher de zéro.

Le transfert de l'eau et les éléments minéraux dans les arbres fruitiers commence par les racines (poils absorbants), à travers l'absorption racinaire, traversant le xylème du tronc du pommier vers la feuille puis, sous forme de vapeur, vers l'atmosphère. Entre la feuille et les racines existe un gradient de potentiel hydrique, le vecteur de la circulation de la sève, ce qui fait que une relation étroite s'établie entre les différents gradients de potentiel et les flux dans le continuum sol-plante-atmosphère.

III. 8. 3 Relation entre le potentiel hydrique du xylème du tronc et le déficit de pression de vapeur d'eau

Il existe une relation entre le potentiel hydrique du xylème Ψ_X et le déficit de pression de vapeur DPV, la figure III. 4 montre l'influence du DPV sur Ψ_X durant la deuxième phase de croissance du fruit. Les résultats sont obtenus durant la période de l'application de la contrainte hydrique aux deux traitements T1 et T4 (IDR), des résultats similaires ont été obtenus avec les arbres fruitiers tel que le pommier (O'Connell et al., 2007) et le pistachier (Mimi et al., 2016).

Il a été constaté que lors de l'évaluation de la disponibilité de l'eau du sol pour une plante, il est nécessaire de prendre en considération le déficit de pression de vapeur qui affecte remarquablement la relation entre l'humidité du sol et le potentiel hydrique des feuilles (Huzulák and Matejka, 1983). Bien que Ψ_X a été montré comme un bon indicateur de l'état hydrique de la plante, les résultats peuvent être affectés par des facteurs environnementaux et particulièrement le déficit de pression de vapeur DPV (fig. III. 4).

Le potentiel hydrique du xylème du tronc a montré son efficacité dans plusieurs arbres fruitiers reste toutefois dépendant de d'autres facteurs liés au climat et notamment le DPV. La figure II. 4 avec les équations de régression linéaire obtenus montrent que le Ψ_X dépend du DPV. Ainsi lorsque le DPV croît le potentiel hydrique du xylème diminue ceci s'explique par le fait que lorsque le DPV est élevé la demande évaporative est élevée suite à la température

élevée qui fait croître le processus de la transpiration. Le coefficient de corrélation élevé ($R^2=0.75$) du traitement T1 correspondant aux arbres non irrigués montre la réponse rapide du potentiel hydrique du xylème à la contrainte hydrique sévère.

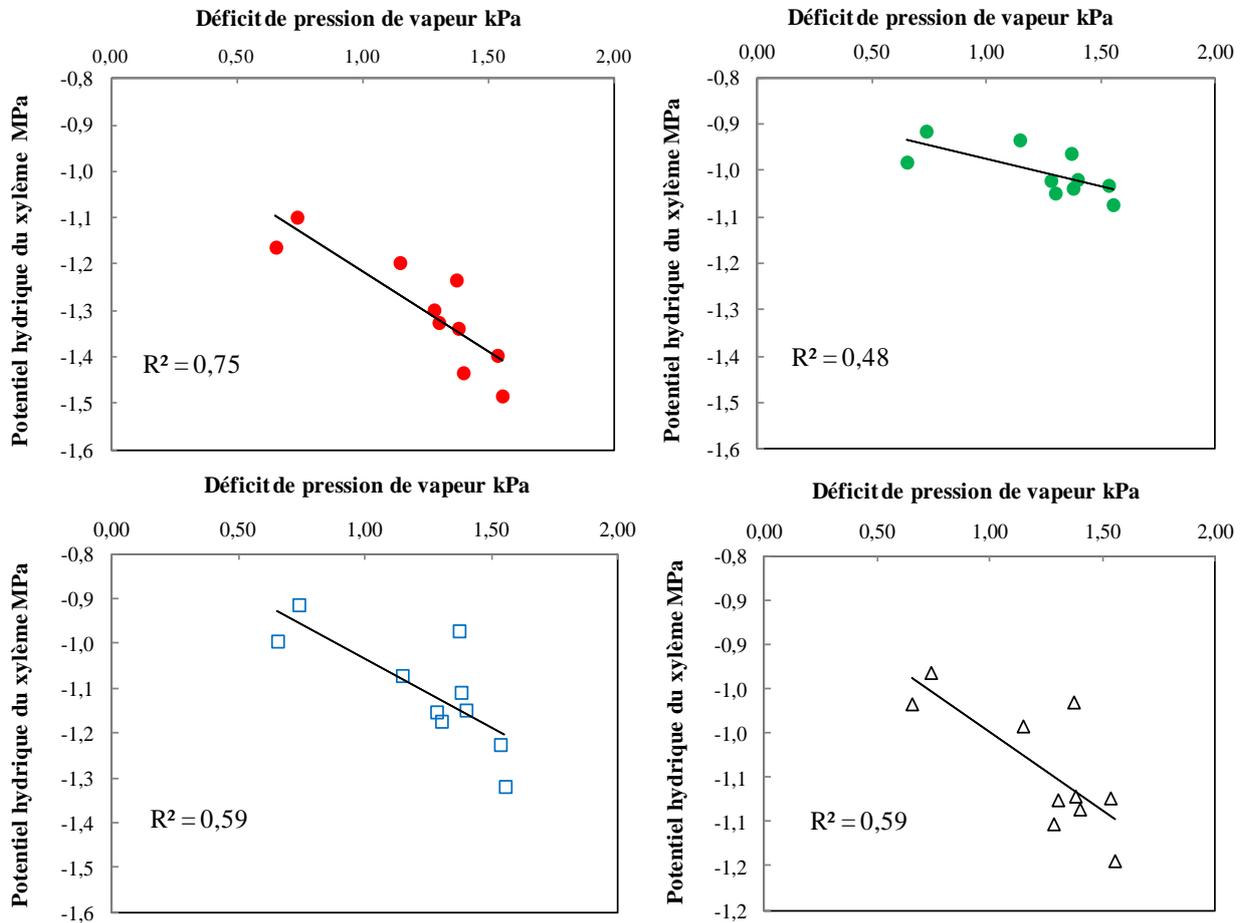


Figure III. 4. Relation entre le potentiel hydrique du xylème (Ψ_x) et le déficit de pression de vapeur (DPV) durant la deuxième phase de croissance du fruit suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1, (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point correspond à la moyenne de 12 mesures. Jours après la pleine floraison (JAPF): 6-36 correspond au mois de Mai, 37-66, Juin, 67-97 le mois de Juillet et 98-128 le mois d'Août.

Les équations obtenues pour les différents traitements par une régression linéaire sont indiquées ci-dessous:

$$\text{Le traitement T1: } \Psi_x = -0.3456\text{DPV} - 0,8692, \quad (R^2=0.75) \quad (\text{III. 2})$$

$$\text{Le traitement T2 : } \Psi_x = -0.1159\text{DPV} - 0,8589, \quad (R^2=0.48) \quad (\text{III. 3})$$

$$\text{Le traitement T3 : } \Psi_X = -0.3071\text{DPV} - 0.5895, \quad (R^2=0.59) \quad (\text{III. 4})$$

$$\text{Le traitement T4 : } \Psi_X = -0.1758\text{DPV} - 0.8233, \quad (R^2=0.59) \quad (\text{III. 5})$$

Avec :

DPV : déficit de pression de vapeur en kPa ;

Ψ_X : potentiel hydrique du xylème du tronc en MPa.

Lorsque les plantes peuvent facilement extraire l'eau du sol, des exigences élevées par évaporation à un déficit de pression de vapeur élevé induisent des taux élevés de transpiration des feuilles. Lorsque, au contraire, la contrainte hydrique sévère est imposée, la plante ferme ses stomates pour empêcher les pertes d'eau et en évitant ainsi une chute de son potentiel hydrique (Schultz and Matthews, 1988). La réponse des vignes au déficit hydrique est influencé par le climat, notamment le DPV, l'intensité et la durée de la contrainte hydrique (Chaves et al., 2010).

III. 8. 4 Relations entre la teneur en eau du sol, le potentiel hydrique du sol et le potentiel hydrique de base

Cependant, la dynamique de suivi du statut hydrique du sol et de la plante nous a permis de déterminer les relations entre le potentiel hydrique de base et la teneur en eau du sol à 0.3 et 0.6 m de profondeur (Fig. III. 5, A et B) avec des coefficients de régression de ($R^2=0.80$ et $R^2=0.73$) et entre Ψ_P et le potentiel hydrique du sol à 0.3 et 0.6 m de profondeur (Fig. III. 5, C et D) avec des coefficients de régression ($R^2=0.87$ et $R^2=0.76$).

Les valeurs très élevées des coefficients de corrélations ($R^2=0.80$ et $R^2=0.87$) sur les premières profondeurs de 0.3 m justifient la sensibilité du potentiel hydrique de base au stress hydrique. Des résultats similaires ont été observés avec les pêchers (Girona et al., 1993), vignes (Van Z, 1987; William et al., 2002; Rodríguez et al., 2012) et les amonduiers (Pascual et al., 2004).

Ces résultats montrent que le potentiel hydrique foliaire de base Ψ_B est un bon indicateur de la disponibilité de l'eau dans le sol mais son application en plein champ est peu compliquée. Différents auteurs ont montré que Ψ_B est un indicateur fiable de l'état hydrique du sol chez les pêchers (Girona et al., 1993), citronniers (González et al., 1999) et les abricotiers (Pérez-Pastor et al., 2009).

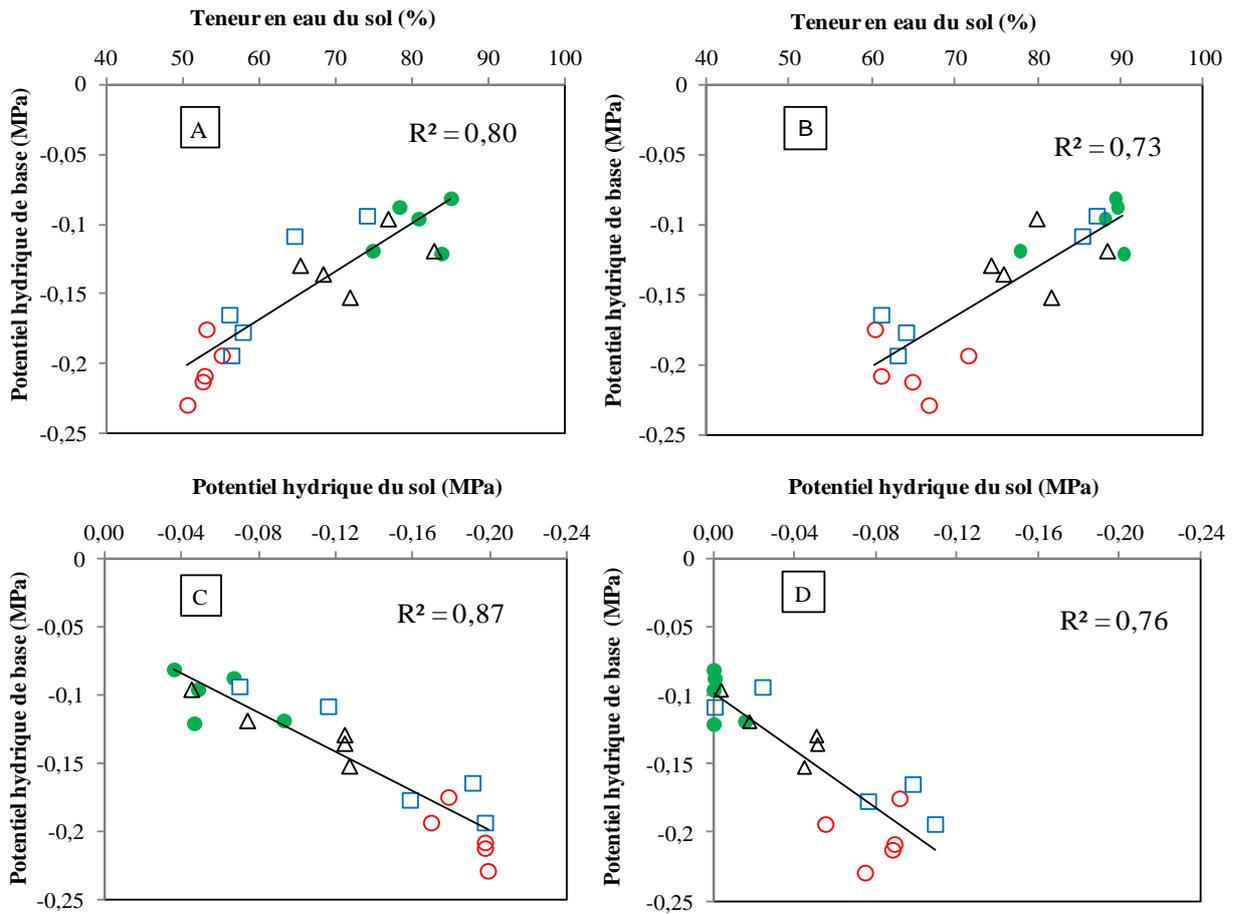


Figure III. 5. Relations entre le potentiel foliaire hydrique de base (Ψ_b) et la teneur en eau du sol à 0.30 m de profondeurs (A) et 0.60 m (B); Relations entre le potentiel foliaire hydrique de base (Ψ_b) et le potentiel hydrique du sol (Ψ_{soil}) à 0.30 m de profondeurs (C) et 0.60 m (D) suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués; T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).

Les équations obtenues à partir d'une regression linéaire entre le potentiel hydrique foliaire de base et le potentiel hydrique du sol à 30 et 60 cm du sol et entre le potentiel hydrique foliaire de base et la teneur en eau à 30 et 60 cm du sol sont comme suit:

$$\Psi_B = 0.0035TES_{30} - 0.3757, \quad (R^2=0.80) \quad \text{(III. 6)}$$

$$\Psi_B = 0.0036TES_{60} - 0.4165, \quad (R^2=0.73) \quad \text{(III. 7)}$$

$$\Psi_B = 0.7262\Psi_{S30} - 0.0552, \quad (R^2=0.87) \quad \text{(III. 8)}$$

$$\Psi_B = 1.0474\Psi_{S60} - 0.0981, \quad (R^2=0.76) \quad \text{(III. 9)}$$

Avec :

Ψ_B : Potentiel hydrique foliaire de base en MPa

TES₃₀ et TES₆₀ : Teneur en eau du sol à 30 et 60 cm en %

Ψ_{S30} et Ψ_{S60} : Potentiel hydrique du sol à 30 et 60 cm en MPa

Les valeurs élevée des coefficients de corrélation obtenus à 30 et 60 cm de profondeur ($R^2=0.80$, $R^2=0.73$, $R^2=0.87$ et $R^2=0.73$) montrent que le potentiel hydrique foliaire de base Ψ_b est un bon indicateur de l'évolution de la disponibilité de l'eau dans le sol et traduit le potentiel d'équilibre avec le potentiel hydrique du sol. Des résultats similaires ont été trouvés par (Zufferey et al. 2006). Ceci s'explique par le fait que lors des mesures du potentiel de base enfin de nuit les stomates sont presque fermés et il y a un arrêt presque total de la transpiration

III. 8. 5 Relation entre la teneur en eau du sol, le potentiel hydrique du sol et le potentiel hydrique du xylème

Le potentiel hydrique du xylème du tronc est corrélable avec le potentiel hydrique du sol à 0.3 et 0.6 m de profondeur (Fig. III. 6, E et F), nous avons trouvé ainsi des coefficients de corrélations de l'ordre de ($R^2=0.79$ et $R^2=0.72$), des résultats similaires ont été trouvés avec les pruniers (Intrigliolo and Caste, 2005).

$$\Psi_X = 2.9843\Psi_{S30} - 0.759 \quad (R^2=0.88) \quad \text{(III. 10)}$$

$$\Psi_X = 4.5549\Psi_{S60} - 0.9202 \quad (R^2=0.73) \quad \text{(III. 11)}$$

Ou: Ψ_{S30} et Ψ_{S60} : Potentiel hydrique du sol à 30 et 60 cm du sol en MPa

Dans cette présente étude (Fig. III. 6, G et H), nous avons trouvé une bonne corrélation entre le potentiel hydrique du xylème du tronc et la teneur en eau du sol à 0.3 et 0.6 m de profondeur avec des coefficients de corrélation ($R^2=0.79$ et $R^2=0.73$) ce qui justifie la sensibilité du Ψ_X au manque de l'eau dans le sol. Des résultats similaires ont été obtenus avec les vignes ($R^2=0.69$, William et al., 2002) et le prunier (Intrigliolo and Caste, 2004) avec ($R^2=0.79$).

$$\Psi_X = -0.0004(\text{TES}_{30})^2 + 0.0677\text{TES}_{30} - 3.7778, \quad (R^2=0.79) \quad \text{(III. 12)}$$

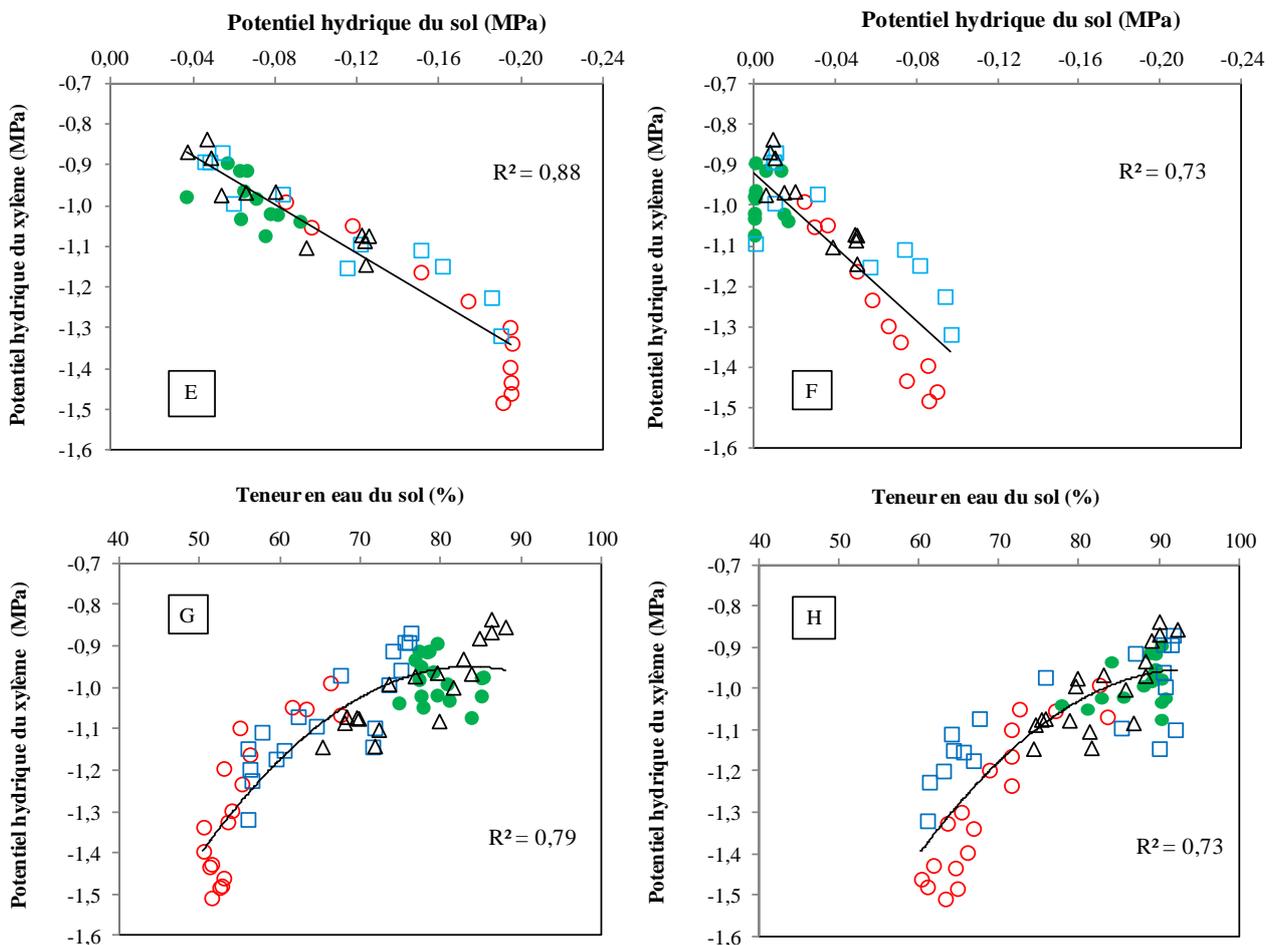
$$\Psi_X = -0.0004(\text{TES}_{60})^2 + 0.0726\text{TES}_{60} - 4.3684, \quad (R^2=0.73) \quad \text{(III. 13)}$$

Ψ_X : Potentiel hydrique du xylème du tronc en MPa

Ψ_{S30} et Ψ_{S60} : Potentiel hydrique du sol à 30 et 60 cm en MPa

TES₃₀ et TES₆₀ : Teneur en eau du sol à 30 et 60 cm en %

Figure III. 6. Relation entre le potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_X et le potentiel hydrique du sol Ψ_S à 0.30 m et 0.60 m de profondeur (Fig. E et F); relation entre le potentiel hydrique du xylème du tronc Ψ_X et la teneur en eau du sol TES à 0.30 m et 0.60 m de profondeur (Fig. G et H), suivant les différentes stratégies d'irrigation: T1 (○), arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2 (●), arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3 (□), arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4 (△), arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).



Les corrélations obtenues entre le potentiel hydrique du xylème du tronc et la teneur en eau du sol montrent que l'un des facteurs affectant directement la pression hydrostatique du xylème est la teneur en eau du sol. Les valeurs très élevées des coefficients de corrélations ($R^2=0.79$) sur les premières profondeurs 0.3 m où la concentration des racines est maximale (Fig. III.3) justifie la réponse rapide du potentiel hydrique du xylème du tronc au stress hydrique.

L'absorption de la solution du sol par le pommier est maximale dans cette zone ce qui justifie les valeurs les plus basses de la teneur en eau du sol sur ces profondeurs.

Ces bonnes corrélations obtenues entre la teneur en eau, le potentiel hydrique du sol et potentiel hydrique du xylème du tronc montre que ce dernier est très sensible au stress hydrique. Des résultats similaires ont été obtenus avec les arbres fruitiers (Naor, 2000), pommier (Naor, 2003; Swaef et al., 2009), vignes (Girona et al., 2006), prunier (McCutchan and Shackel, 1992; Lampinen et al., 2001), citronnier (García-Tajero et al., 2010) et les amonides (Romero et al., 2004).

Conclusion

La gestion de l'irrigation par le biais du potentiel hydrique du xylème du tronc a montré sa pertinence dans notre présente étude. Le pommier s'est montré très sensible au stress hydrique particulièrement dans le traitement T1 sans irrigation ou la pression hydrostatique à chuter jusqu'à atteindre -1.5 MPa alors que celle du traitement T2 (irrigation de confort) s'est maintenue entre -0.8 et -0.9 MPa durant les trois périodes de croissance du fruit. L'irrigation déficitaire régulée à -1.2 MPa durant PCF II a maintenue la qualité physico-chimique des pommes. Des résultats similaires obtenus sur l'irrigation de confort par différents auteurs indiquant le seuil de seuil référence du Ψ_x pour la planification des irrigations (-0.5-1.0 MPa) pour le prunier et les arbres fruitiers. Par contre un seuil de -1.3 pour l'irrigation de confort trouvé par, ce seuil est plus bas que celui trouvé dans notre étude -0.9 MPa ceci s'explique par le fait que les arbres fruitiers répondent différemment au stress hydrique.

A la lumière de l'étude du présent chapitre nous pouvons conclure ce qui suit :

- Les résultats de la présente étude sur Ψ_x montre que ce dernier est un indicateur physiologique fondamental du stress hydrique confirment celles trouvées sur le pommier, le pêcher et le prunier,
- Le suivi du stress hydrique par des mesures du potentiel hydrique de base et celui du xylème durant les période de croissance du fruit nous a permis de connaître le comportement physiologique du pommier,
- Les relations obtenues entre le Ψ_{base} (mesurée en fin de nuit) et la TES avec des coefficients de corrélation élevés reflète bien l'évolution de la disponibilité de l'eau dans le sol,

- Le potentiel hydrique du xylème ne dépend pas uniquement de la teneur en eau du sol mais aussi du déficit de pression de vapeur,
- La gestion de l'irrigation par la chambre à pression a montré son efficacité mais très complexe en plein champ à grande échelle, les équations obtenues dans la présente étude par une régression linéaire entre Ψ_X et le potentiel hydrique du sol peuvent remédier à cette problématique
- Le suivi de l'irrigation déficitaire régulée à -1.2 MPa correspondant à un stress modéré
- Notre étude a permis d'une part : d'obtenir 47 % d'économie en eau comparativement à l'irrigation de confort. La gestion de l'irrigation déficitaire du pommier (Gala) durant PCF II a -1.2 MP du potentiel hydrique du xylème est une stratégie utile. D'autre part, le potentiel hydrique du xylème du tronc s'est montré non seulement comme indicateur pertinent du stress hydrique mais un indicateur servant à l'optimisation de l'irrigation.

De nos jours les consommateurs sont de plus en plus exigeant sur la qualité des pommes. Il est important et fondamentale de déterminer l'impact des différentes stratégies d'irrigation particulièrement l'irrigation déficitaire du pommier (Gala) vis-à-vis de la qualité physico-chimique avant et après stockage surtout que la pomme un fruit de santé par excellence se consomme à longueur d'année. Cette partie fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV Qualités physico-chimiques du fruit

IV. 1 Différentes qualités physico-chimiques du fruit

Le succès de la variété Gala auprès des consommateurs a naturellement incité les producteurs à planter massivement cette variété depuis une quinzaine d'années (Siegrist and Cotter, 2011). Il existe deux manières de parler de la qualité des pommes: une qualité physico-chimique des pommes qui est une qualité interne définie par les différents éléments, tels que la fermeté, la jutosité, l'acidité ou la sucrosité et une qualité externe définie par l'absence de défauts, la forme, le calibre ou la coloration (Kellerhals et al., 2003).

IV. 2 Effets de l'irrigation déficitaire régulée sur la qualité physico-chimique des pommes

La qualité nutritionnelle des fruits dépend de leur génétique et de l'environnement, le sol la température, la lumière (Génard and Baret, 1994) et le gaz carbonique sont les facteurs fondamentaux de la qualité productive (Shivashankara et al., 2013). Le déficit hydrique augmente la teneur en sucre (Shivashankara et al., 2013) par contre il diminue la qualité des fruits obtenus. L'irrigation déficitaire régulée augmente la concentration de la teneur en sucre TS du fruit du pommier (Mpelasoka et al., 2001) ainsi que celui du prunier (Intrigliolo and Castel, 2010) par contre l'ID a peu d'influence sur l'acidité. Par contre d'autres études effectuées sur des arbres fruitiers ont montré que le déficit hydrique augmente à la fois la teneur en sucre et l'acidité chez vignes (Bielorai, 1982), les agrumes (Kuriyama et al., 1981; Pérez- Pérez, J.G et al., 2009).

Une autre étude sur les pêchers a montré que comparativement du régime modéré au traitement de confort, le rendement et la qualité du fruit obtenus sont presque les mêmes (Mercier et al., 2009) alors que le stress élevé augmente la teneur en sucre TS (Mercier et al., 2009). Cependant (Maotani and Machida, 1977; Romero et al., 2006) ont trouvé dans leurs études que les résultats obtenus en situation de stress élevé sont marqués d'une part: par l'acidité des fruits plus élevée que la teneur en sucre dans les fruits obtenus d'autre part une réduction du rendement.

La croissance du pommier sous irrigation déficitaire possède une teneur en sucre élevé (Mills et al., 1994). Ce pendant les différents auteurs Ebel et al., 1993 et Proebsting et al., 1984 indiquent que l'irrigation déficitaire n'a aucune influence sur la couleur des pommes. Les auteurs Drake et al., 1981) indiquent aussi qu'il n'y a aucune différence significative sur l'acidité des pommes. Par contre des études effectuées par (Ebel et al., 1993) ont montré que la teneur en acide est la plus basse en irrigation déficitaire.

L'impact de l'irrigation déficitaire régulée sur la qualité des fruits a été étudié sur plusieurs espèces de fruits. Dans de nombreux cas, l'irrigation déficitaire a un effet positif sur la qualité des fruits par l'augmentation de la teneur en sucre et la fermeté (Bussakorn et al., 2000; Motilva et al., 2000; Pickering et al., 2002; Mpelasoka et al., 2001), toutefois ces deux paramètres ne sont pas suffisant pour justifier la qualité d'un fruit. La qualité interne du fruit doit regrouper à la fois: la fermeté, la jutosité, l'acidité et la teneur en sucre.

L'application de l'irrigation déficitaire régulée sur le néflier n'a eu aucun effet négatif sur la qualité et le rendement du néflier (Cuevas et al., 2007). Certains auteurs indiquent que l'IDR pourrait améliorer les caractéristiques physico-chimiques des fruits (Liu et al., 2001; Verreyne et al., 2001). L'irrigation déficitaire appliquée aux arbres fruitiers tels que les vignes améliore la qualité des baies et le goût (dos Santos et al., 2007).

Des études effectuées sur les pêchers ont montré que le déficit hydrique augmente la matière sèche ainsi que la teneur en sucre des fruits (Cheng et al., 2012). Le stress hydrique appliqué durant la période de grossissement des fruits réduit l'acidité des fruits des pêchers (Cheng et al., 2012).

La mesure de la teneur en sucres des fruits (TSS) est un paramètre important pour l'évaluation de la qualité des fruits (do Rêgo et al., 2009).

Ainsi (Dorji et al., 2005; Ma et al., 2006; Shao et al., 2008; Shao et al., 2010; Zeng et al., 2009) ont trouvé dans leurs études que la teneur en sucre des fruits à la récolte en irrigation déficitaire est élevée par comparaison au régime de confort.

Le déficit hydrique appliqué durant la période de grossissement des fruits a un impact négatif sur la calibre des fruits tels que le pommier (Mills et al., 1 997; Mills et al., 1 996; Kili et al., 1 996c) et le poirier (Behboudian et al., 1 994).

IV. 3 Influence de l'irrigation déficitaire régulée sur la fermeté, la teneur en sucre, l'acidité et la couleur du fruit

IV. 3. 1 Fermeté des fruits

Des études effectuées sur pommier ont montré que les fruits de petite taille sont plus fermes que les fruits de gros diamètre (Ebel et al., 1993), Les fruits obtenus sous irrigation déficitaire sont plus fermes que ceux obtenus en régime de confort hydrique (Guelfat'Reich et al., 1974; Assaf et al., 1975; Kilili et al., 1996a).

IV. 3. 2 Teneur en sucre du fruit

Plusieurs études ont montré que le déficit hydrique augmente la teneur en sucre (TSS) chez le pommier (Ebel et al., 1993; Mills et al., 1994; Kilili et al., 1996a; Mills et al., 1996), le poirier (Raese et al., 1982), le pêcher (Crisosto et al., 1994; Gelly et al., 2004) et l'abricotier (Pérez-Pastor et al., 2007). Cependant la période d'application de la RDI a une grande influence sur la teneur en sucre (TS), des exemples sur plusieurs cultures ont été observés chez le pommier (Kilili et al., 1996a; Mills, 1996) ainsi que le poirier (Behboudian and Lawes, 1994; Caspari et al., 1996).

IV. 3. 3 Acidité du fruit

Par l'irrigation déficitaire n'a eu aucune influence sur l'acidité des fruits (Irving and Drost, 1987), parallèlement d'autres auteurs ont observés dans leurs études une diminution de l'acidité en régime de stress hydrique (Drake et al., 1981; Mills et al., 1994). Plusieurs auteurs indiquent que l'irrigation déficitaire n'a aucune influence sur la couleur des pommes obtenus à la récolte (Proebsting et al., 1984; et Ebel et al., 1993), poirier (Caspari et al., 1996). Cependant d'autres études indiquent que la couleur des fruits obtenus à la récolte chez le pommier de la variété "Braeburn" en irrigation déficitaire à été améliorée (Mills et al., 1994; Kilili et al., 1996a) et les vignes (Matthews and Anderson, 1988).

L'effet de l'irrigation déficitaire régulée IDR de conserver l'eau le rendement des fruitiers des arbres fruitiers a longtemps été utilisée depuis 1980 (Dong et al., 2006). Depuis 1990 des études se sont penchées vers l'impact de l'IDR sur la qualité des fruits (Shi et al., 1998). Certains auteurs ont montré dans leurs études que l'IDR conserve la qualité des fruits chez les fraisiers (Liu et al., 2001), les clémentiniers (Verreyne et al., 2001) et les vignes (dos Santos et al., 2007). Le déficit hydrique augmente la matière sèche (Leib et al., 2006; Peng and Rabe, 1998) et augmente aussi la teneur en sucre des fruits durant différentes périodes de

croissance des fraises (Liu et al., 2001). Certains auteurs ont montré que l'IDR augmente la maturité des fruits avant même la récolte (Cuevas et al., 2007; Marsal et al., 2004).

La qualité du fruit du citronnier a été affectée par le stress hydrique due au changement de qualité physico-chimique de son jus tel que l'augmentation à la fois de la teneur en sucre et de l'acidité (Chartzoulakis et al., 1999; Crisosto et al., 1994; Girona et al., 2003; Mills et al., 1994). La réponse de l'IDR dépend du moment de son application et de degré du stress hydrique appliqué (Girona et al., 2003; Marsal and Girona, 1997).

IV. 4 Détermination des dates de cueillettes

IV. 4. 1 Maturation du fruit

De nombreux facteurs interviennent dans la maturation des fruits, en conséquence dans le choix dans la date de cueillette : climat de l'année, condition de milieu, variété et porte greffe, etc. Chez les pommes, on distingue deux stades de maturité (Gautier, 1987).

La maturité de cueillette qui correspond au moment où le fruit doit être cueilli pour évoluer harmonieusement et développer ses qualités gustatives.

La maturité de consommation qui est atteinte après une période plus ou moins longue selon les variétés et les conditions de conservation des fruits. Plusieurs méthodes ou tests peuvent être utilisés pour cerner la maturation de cueillette, à savoir l'échelle de végétation, la coloration de l'épiderme du fruit, la régression de l'amidon et la fermeté du fruit (Gautier, 1987).

IV. 4. 2 Phase de maturation du fruit

L'analyse des échantillons au test d'amidon des différents traitements devront être au même stade de maturité préalablement défini. Pour assurer l'homogénéité des échantillons, il est indispensable de bien choisir les lots qui offrent le maximum de garantie de stockage aux entrepositaires. Le tri peut être réalisé sur le stade de maturité par les codes de la couleur, le calibre et la mesure du poids ou par des caractéristiques intrinsèques telles que la fermeté, la teneur en sucre, la régression de l'amidon et l'indice de maturité (selon Streif).

La pomme fait partie des fruits climactériques, on parle d'un stade climactérique: un stade de minimum d'activité respiratoire sert de base à l'évaluation de la date de cueillette (Bondoux, 1992) et on dit que ces fruits sont climatériques comme les pommes (les fruits dont la maturation est graduelle sont non-climatériques). Dans les fruits climactériques, ces processus de maturations sont précédés par une augmentation de la synthèse de l'éthylène qui est souvent à leur origine (Raven et al., 2000). L'éthylène est un gaz produit en quantité

importante par les fleurs à la floraison et par les fruits à la maturation il provoque la chute des feuilles et active la maturation (Charonnat et al., 2005). La détermination de la date optimale de maturité des pommes pour la récolte est une étape fondamentale si l'on prévoit une durée maximale pour la conservation et la qualité physico-chimique des fruits. Le début de la maturation caractérise le moment où les réserves en sucre sont maximales (Isabelle, 2004). La date de la cueillette des fruits est basée sur des tests portant sur la concentration interne d'éthylène du fruit.

IV. 5 Matériels et méthodes

IV. 5. 1 Evaluation de la maturité du fruit par le test amidon (pré-récolte)

Le test amidon à la récolte permet de connaître la maturité des fruits ainsi prévoir la date de la récolte (Siegrist and Cotter, 2011). Le test amidon se révèle être le meilleur indicateur de maturité pour la variété Gala (Siegrist and Cotter, 2011). Ce test permet aussi de déterminer le potentiel de conservation des pommes Gala (Siegrist and Cotter, 2011). Des études effectuées par (Siegrist and Cotter, 2011) sur le stade optimal de récolte des pommes Gala basées sur un bilan de onze ans d'expérimentation de conservation ont montré que les valeurs optimales du test amidon seront modifiées: dès 2011, elles seront de 4 à 6 au lieu de 5 à 7.

A la date du 125 JAPF et 131 JAPF, une analyse des fruits basée sur le test d'amidon (Fig. IV. 1) a été effectuée sur 20 fruits par traitement avec six répétitions, au total, nous avons 120 fruits. L'échantillon composé de fruits est destiné aux analyses de maturité à la récolte.



Figure IV. 1. Prévion de la récolte par le test de maturité des pommes (Gala)



Figure IV. 2. Mesure des paramètres physico-chimiques des pommes (Gala) à l'aide de l'automate (Robot Pimprenelle, Setop-Giraud Setop Giraud Technology, France).

Les résultats obtenus sont la teneur en sucre exprimée en % °Brix et la fermeté en kg/cm² (fig. IV. 2). Les dix fruits restants servent à réaliser le test amidon évalué visuellement à partir d'un code de dix images de référence et de notes de 1 à 10 établies par le CTIFL (Planton, 1995). Les valeurs analysées sont comparées aux valeurs de la fenêtre optimale de maturité de récolte recommandées pour Gala: sucre 10 à 12 % °Brix, fermeté 7,5 à 9 kg/cm², amidon notes 4 à 6 et indice de maturité 0,089 à 0,180 (Siegrist and Cotter, 2011).

A la date du 125 JAPF, une analyse des fruits basée sur le test d'amidon a été effectuée sur 20 fruits par traitement avec six répétitions, au total, nous avons 120 fruits. La valeur moyenne de l'indice Streif est de 0,09. A cette date, l'apparition de l'amidon n'a pas encore commencé, les fruits ne sont pas prêts à être récoltés.

A la date du 131 JAPF une autre analyse a été effectuée, l'indice de régression moyen pour l'ensemble des traitements est de 4.35. La fenêtre optimale de récolte correspond à un indice de régression compris entre 5 et 6 (Siegrist et Gasser, 2008). Les fruits sont donc récoltés à un stade se situant légèrement au dessous de la fenêtre optimale, dans le but d'améliorer leur potentiel de conservation.

IV. 5. 2 Qualité physico chimique du fruit

La totalité des fruits des quatre traitements a été analysée dans le but de déterminer qualité commerciale sur une calibreuse automatique (Greefa, 4196 Tricht, NL) et regroupés selon 9 catégories de calibre (50 mm à 90 mm) et 4 catégories de couleur (Coloration 1(0-10 %); Coloration 2 (10-33 %); Coloration 3(33-50 %) et Coloration 4(>50 %)). Les critères jugés déterminants pour la qualité commerciale sont le poids moyen, le % de fruits de 1^e choix selon les normes en vigueur en Suisse, la production totale par arbre ainsi que la production par arbre de 1^e choix.

L'analyse des fruits avant stockage a eu lieu le 148 JAPF, après la date de la récolte correspondant à 131 JAPF. 25 fruits ont été prélevés à la récolte et analysés séparément. Les propriétés physico-chimiques des fruits (Les résultats obtenus sont la teneur en sucre exprimée en % Brix, la fermeté en kg/cm², poids moyen (g), indice réfractométrique, l'acidité et l'indice de jutosité des pommes) ont été mesurées à l'aide de l'automate Pimprenelle (Robot Pimprenelle, Setop-Giraud Technologie, 84300 Cavailon, France) (Fig. IV. 2). Les valeurs obtenues sont le poids, la teneur en sucres totaux (°Brix) et la fermeté (kg/cm²).

Cependant, dans le but d'assurer un approvisionnement au consommateur durant près de dix mois, une autre analyse physico-chimique des pommes a été prévue après stockage. A cet

effet et un échantillon d'une centaine de fruits par procédé a été réservé à l'entreposage en atmosphère contrôlée ULO (Ultra Low Oxygen): température 0,5 °C, humidité relative 92-94 %, gaz carbonique (CO₂) 3 % et oxygène (O₂) 1%.

La vitamine C a été analysée sur un seul échantillon pour les deux arbres de chaque parcelle élémentaire par HPLC-UV (d'après une méthode de [Odrizola-Serrano et al. 2007](#)) et quantifiée avec une référence externe.

IV. 5. 3 Suivi du grossissement du fruit

Le suivi de l'évolution du grossissement du fruit est réalisé par des mesures du diamètre de la pomme effectuée à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de l'ordre du dixième de mm. Ce suivi s'applique à tous les arbres de l'essai, à raison de deux fruits par arbre (un pour chaque face). Deux pommes par arbre de la partie médiane de la couronne ont été codé à raison de trois répétitions avec deux systèmes de conduite soit au total un suivi sur 48 fruits (codés). Les mesures de diamètre sont toujours effectuées sur les mêmes pommes codées afin de mesurer le même diamètre. Les pommes choisies pour les mesures sont portés par des bois de deux ans ([Marguery, 1992](#)). Les mesures sont effectuées une fois par semaine et chaque samedi entre 14 h et 17 h et ce depuis 53 JAPF jusqu'au 130 JAPF (fin de la récolte).

IV. 5. 4 Rendement des arbres fruitiers (Gala) des différents traitements

La totalité des fruits a été analysée pour chaque traitement afin d'évaluer la qualité commerciale sur une calibreuse automatique (Greefa, 4196 Tricht, NL) et regroupés selon 9 catégories de calibre (50 mm à 90 mm) et 4 catégories de couleur. Les critères jugés déterminants pour la qualité commerciale sont le poids moyen, le % de fruits de 1^e choix selon les normes en vigueur en Suisse, la production totale par arbre ainsi que la production par arbre de 1^e choix.

IV. 6 Résultats et discussions

IV. 6. 1 Suivi du grossissement du fruit

La dynamique de suivi du grossissement du fruit du pommier montre son évolution durant les différentes périodes de croissance du fruit PCF (Table. IV. 1). A la première mesure, le diamètre moyen des fruits des quatre traitements est de 36,2 mm et à la dernière de 74.1 mm.

Tableau IV. 1. Effet des différents traitements (TRT) sur le grossissement des fruits : T1, arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Chaque point est l'ensemble de six mesures. Les moyennes obtenues dans les colonnes suivies par les différentes lettres. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements d'irrigation

TRT	JAPF											
	53	60	67	74	81	88	95	102	109	116	123	130
T1	35,2a	38,9a	43,0a	47,3a	50,4a	53.8b	57,6a	60.3b	63.1ab	66,0a	68,0a	69,3a
T2	36,6a	40,3a	44,5a	49,3a	52,3a	56.4a	60,0a	63.4a	66.1a	68,4a	69,7a	71,1a
T3	35,5a	38,8a	42,7a	47,4a	51,2a	54.0ab	57,3a	59.9b	62.7b	65,1a	66,9a	67,6a
T4	35,8a	39,1a	43,5a	48,1a	51,2a	54.8ab	58,7a	62.3ab	64.4ab	66,3a	68,6a	69,3a

Les différents traitements n'ont pas eu d'effets sur le grossissement des fruits, aucune différence significative de calibre entre les différentes stratégies d'irrigation, des résultats similaires sur le pommier de la variété Gala ont été trouvés par (Bianco and Francaviglia, 2012). Le diamètre des fruits n'est donc pas influencé par les différents procédés d'irrigation. Au regard de ces résultats, tous les arbres ont pu approvisionner normalement leurs fruits en eau. En termes de qualité commerciale, les fruits provenant de toutes les variantes répondent aux exigences de calibre. La catégorie « extra » est définie par des fruits de diamètre supérieur à 60 mm. Des résultats similaires ont été obtenus sur des arbres fruitiers tel que le pistachier (Gijón et al., 2009). Ainsi l'irrigation déficitaire n'a pas eu d'influence sur le grossissement du fruit.

Aucune différence significative n'a été observée entre les quatre traitements durant toute la saison exceptionnellement la deuxième phase de croissance du fruit PCF II (88 JAPF, 102 JAPF et 109 JAPF) ou nous avons observé des différences significatives entre l'irrigation de confort T2 et les autres traitements (T1, T3 et T4). Par contre aucune différence significative n'a été observée entre les traitements soumis à une contrainte hydrique (T1, T2 et T3).

IV. 6. 2 Evaluation de la maturité du fruit

Les résultats obtenus à partir du test d'amidon (Tab. IV.1) montrent clairement que la récolte de tous les traitements était aux normes recommandées de la teneur en sucres (10 à 12 °Brix), la fermeté (7.5 à 9 kg/cm²) et la régression de l'amidon de 4 à 6. Il est important de souligner

que la récolte se fait le plus souvent en deux temps car les fruits d'un même arbre ne sont pas au même stade de maturité.

Tableau IV. 2. Résultats des essais de la maturité des fruits de la variété (Gala) suivant les différents traitements (TRT) : T1, arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II).

Traitement 1					
Poids total	Poids moyen	Teneur en sucre	Fermeté moyenne	Acidité moyenne.	indice de maturité
g	g	°Brix	kg/cm2	g/l	selon Streif
3606	164	11.8	10.1	5,5	0,2
Minimum	129	10.4	8.1		
Maximum	194	13.2	12,9		
Ecart Type	20	0.77	11.22		
Amidon			3,7		
Traitement 2					
Poids total	Poids moyen	Teneur en sucre	Fermeté moyenne	Acidité moyenne.	indice de maturité
g	g	°Brix	kg/cm2	g/l	selon Streif
3767	171	11.6	10	5,6	0,2
Minimum	134	10.3	8.7		
Maximum	225	13.8	12,7		
Ecart Type	26	0.8	1.2		
Amidon			4,4		
Traitement 3					
Poids total	Poids moyen	Teneur en sucre	Fermeté moyenne	Acidité moyenne.	indice de maturité
g	g	°Brix	kg/cm2	g/l	selon Streif
3553	162	12.2	10.1	6,1	0,2
Minimum	122	10.5	8.1		
Maximum	265	13.7	11.7		
Ecart Type	31	0.88	0.84		
Amidon			4,2		
Traitement 4					
Poids total	Poids moyen	Teneur en sucre	Fermeté moyenne	Acidité moyenne.	indice de maturité
g	g	°Brix	kg/cm2	g/l	selon Streif
3709	169	11.6	9.6	5,7	0,16
Minimum	139	10.4	7.7		
Maximum	215	12.9	13.4		
Ecart Type	20	0.78	1.47		
Amidon			5.1		

L'indice de régression moyen pour l'ensemble des traitements est de 4.35, alors que l'indice de maturité est 0.2 ces deux paramètres montrent que les pommes sont au stade de maturité et que les réserves en sucre sont maximales (Isabelle, 2004).

Cependant de nouvelles recherches effectuées par (Siegrist et Gasser, 2008) ont montré que l'indice de régression qui était de 5 à 6 est passé à (4 à 6) dans le but de commencer les récoltes plus tôt afin d'améliorer la qualité et de réduire les pertes. La date optimale pour la récolte est fondamentale dans le but de prévoir une durée maximale pour la conservation et la qualité physico-chimique des fruits.

Les résultats obtenus montrent que la récolte a eu lieu bien au stade de maturité approprié, ainsi nous pouvons maximiser la durée de conservation ainsi que la période de mise en marché. Cependant, l'indice régression IR est plus élevé en irrigation déficitaire régulée T4 avec 5.1, puis 4.4 en régime de confort T2, les valeurs les plus basses se trouvent chez les arbres fruitiers non irrigués durant toute la saison T1 avec 3.7 et chez les arbres fruitiers non irrigué durant PCF II avec 4.2.

L'effet des différents traitements sur le pommier a été marqué par des teneurs en sucre plus élevées chez les arbres sévèrement stressés T1 et T3 comparativement au régime de confort T2 et à l'irrigation déficitaire régulée IDR T4; par contre l'indice de régression est plus faible chez T1 et T3; plus élevé chez T2 et T4. Les valeurs de l'indice de régression chez les arbres sévèrement stressés aura pour conséquence une cueillette un peu tardive des pommes qui aura pour influence la réduction de la durée de conservation.

IV. 6. 3 Qualité physico-chimique du fruit à la récolte

IV. 6. 3. 1 Qualité physico chimique du fruit à la récolte

Les récoltes se sont déroulées sur une semaine entre le 27 août et le 5 septembre la première année 2010 et du 23 août et le 4 septembre 2011. La récolte s'est faite sur presque 10 jours durant les deux années car les arbres fruitiers n'ont pas atteint les seuils recommandés pour la récolte à savoir : la teneur en sucre 11.0 % °Brix et la fermeté de 7.3 à 8.6 kg/cm².

L'analyse des fruits a eu lieu les 25 et 30 JAPR (jour après la pleine récolte), à la suite de la récolte des pommes. Les paramètres physico-chimiques avant stockage des fruits sont le poids, fermeté, acidité, indice de jutosité et la teneur en sucre déterminés à l'aide de l'automate Pimprenelle (Tab. IV.3).

Tableau IV. 3: Statistiques descriptives des moyennes de la qualité physico-chimique des fruits avant et après stockage des différents traitements du pommier (Gala). T1, arbres non irrigués (PCF I, II et III); T2, arbres irrigués au confort (PCF I, II et III); T3, arbres irrigués au confort (PCF I et III), arbres non irrigués (PCF II); T4, arbres irrigués au confort (PCF I et III) et irrigation déficitaire régulée (PCF II). Les différentes lettres de la même colonne indiquent des différences significatives entre les traitements d'irrigation (Tukey, $P < 0,05$).

Paramètres	Unités	Traitements							
		T1		T2		T3		T4	
		Avant stockage	Après stockage						
Poids	g	146.1 bc	123.9 c	160.3 a	143.4 a	145 c	133 b	155 ab	142.1 a
Fermeté	kg/cm ²	9.5 a	8.1 a	9.1b	7.6 c	9.5 a	8.1 ab	9.1 b	7.9b c
Acidité	g/kg	4.7 ab	4 a	4.6b	3.8 b	4.8 a	3.9 a	4.5 c	3.8b
Jutosité	g/kg	11.4 a	10.4 c	12.9 a	11.2 a	12.1 b	10.8b	11.7 c	10.6 c
Teneur en sucre	°Brix	12.6 a	14 a	12.1b	12.9 c	12.4 a	13.6b	12 b	13 c
Vitamine C	mg/100g	4.7 a	3.9 a	4.2b	4 a	4.8 a	4 a	4.2 b	3.9 a

Les différentes stratégies d'irrigation en goutte à goutte avec la double gaine enterrée ont eu une influence sur la qualité physico-chimique avant stockage (Tab. IV.3), en terme de poids les arbres fruitiers soumis à un régime de confort T2 possèdent les valeurs les plus élevées avec 160.3 g, les arbres non irrigués T1 et les arbres sévèrement stressés durant PCF II T3 possèdent les valeurs les faibles 146.1 et 145.1 g respectivement. L'application de l'irrigation déficitaire régulée IDR durant PCF II appliquée au traitement T4 n'a eu aucun impact sur le

poinds, aucune différence significative n'a été observée entre les deux traitements T2 et T4, des résultats similaires ont été observés chez le pêcher (Girona, 2002).

Cependant les arbres soumis à un stress sévère T1 et T3 ont été marqués par un taux de fermeté vraiment élevé avec 9.5 g/cm² chacun par comparaison aux traitements T2 et T4 (9.1 g/cm²), des résultats similaires ont été observés chez le pommier (Leib et al., 2006), par contre, des différences significatives ont été observées entre les arbres stressés (T1 et T3) et les deux autres traitements (régime de confort T2 et irrigation déficitaire régulée IDR T4), par contre aucune différence de signification n'a été enregistrée entre T1 et T3.

Les résultats sur la fermeté montrent que l'irrigation déficitaire influe à la fois sur le calibre des fruits et la fermeté, ainsi des études effectuées sur le pommier ont montré que les fruits de petites tailles sont plus fermes que les fruits de gros diamètres (Ebel et al., 1993).

Les arbres soumis à un stress sévère T3 et très sévère T1 ont été marqués par un taux élevé de la teneur en sucre TES respectivement 12.6 °Brix pour T1 et 12.4 °Brix pour T3, aucune différence significative n'a été observée entre ces deux traitements. Par contre les deux traitements T2 et T4 possèdent les valeurs les plus faibles de la teneur en sucre comparativement aux arbres stressés avec 12.1 °Brix pour T2 et 12 °Brix pour T4 (IDR), aucune différence significative n'a été observée entre ces deux traitements. Par contre des différences significatives ont été observées entre les traitements (T1 et T3) et les traitements (T2 et T4). L'application de l'irrigation déficitaire avec une contrainte plus forte a été marquée par une augmentation très élevée de la teneur en sucre dans le fruit, ceci s'explique d'une part : par le fait que les sucres sont concentrés dans le fruit par diminution des teneurs en eau et de d'autre part : l'arrêt précoce de la croissance des rameaux, avec une réduction de l'activité photosynthétique par fermeture partielle des stomates.

Plusieurs études ont montré que le déficit hydrique augmente la teneur en sucre TS chez le pommier (Ebel et al., 1993; Mills et al., 1994; Kilili et al., 1996; Mills et al., 1996) et le pêcher (Crisosto et al., 1994). D'autres études ont montré que les fruits obtenus sous irrigation déficitaire sont plus fermes que ceux obtenus en régime de confort hydrique (Guelfat'Reich et al., 1974; Assaf et al., 1975; Kilili et al., 1996).

Ainsi, une étude sur le poirier (Ma et al., 2006) a montré que la teneur en sucre des fruits à la récolte en irrigation déficitaire est élevée par comparaison au régime de confort.

Le déficit hydrique appliqué durant la période de grossissement des fruits a un impact négatif sur la taille des fruits tels que le pommier (Mills et al., 1997; Mills et al., 1996; Kilili et al., 1996) et le poirier (Behboudian et al., 1994).

Cependant, la période d'application de l'irrigation déficitaire régulée IDR à une grande influence sur la teneur en sucre (TSS). Des exemples sur plusieurs arbres fruitiers ont été observé chez le pommier (Kilili et al., 1996; Mills, 1996) ainsi que le poirier (Behboudian and Lawes, 1994; Caspari et al., 1996).

Cependant, l'irrigation déficitaire a eu peu d'influence sur l'acidité, le traitement le plus sévère possède 4.7 g/l, le traitement de confort 4.6 g/l, 4.8 g/l pour T3 et 4.5 g/l pour l'irrigation déficitaire régulée. Aucune différence significative entre les arbres sévèrement stressés et les arbres en régime de confort. Par contre l'IDR possède les valeurs les plus faibles en acidité, des différences significatives ont été observées entre l'IDR et les trois autres traitements. Parallèlement d'autres auteurs ont observé dans leurs études une diminution de l'acidité chez le pommier en régime de stress hydrique (Mills et al., 1994).

Par contre l'irrigation déficitaire n'a eu aucune influence sur l'acidité des fruits (Irving and Drost, 1987), parallèlement d'autres auteurs ont observé dans leurs études une diminution de l'acidité en régime de stress hydrique (Drake et al., 1981; Mills et al., 1994).

Le peu d'étude sur les différentes périodes d'application de l'irrigation déficitaire régulée du pommier et notamment en goutte souterraine est une contrainte de pouvoir faire une étude comparative. La réponse de l'IDR du pommier sur la qualité physico-chimique est très complexe car elle dépend de la variété du végétal et du moment d'application de l'IDR et de la gravité des déficits hydrique imposé (Marsal and Gérone, 1997).

Les résultats obtenus montrent que la qualité physico-chimique des fruits du pommier a été affectée par le stress hydrique dû aux changements dans les paramètres intrinsèques du jus des fruits tels que l'augmentation d'acidité et la TES dans les propriétés de jus, tels que l'augmentation des concentrations de sucre et d'acidité (Chartzoulakis et al., 1999). Les fruits du pommier possédant des teneurs en sucre élevées montrent que les arbres fruitiers soumis à un stress hydrique sévère ont des mécanismes de défense aux situations du manque d'eau. Au point de vue pratique, concernant la relation sucres - sécheresse, on peut dire qu'un stress hydrique réduit le calibre des pommes mais considéré comme élément majeur qui permet d'obtenir des fruits potentiellement plus concentrés en sucre.

L'application de l'IDR n'a eu finalement pas d'influence sur la qualité physico-chimique du fruit du pommier Gala, il ressort que le maintien d'un niveau modéré de stress hydrique dans un verger peut être un outil efficace pour économiser de l'eau sans nuire à la qualité des fruits (Mills et al., 1996; Behboudian and Millas, 1997).

IV. 6. 3. 2 Qualité physico chimique du fruit après stockage

Les résultats obtenus à partir des analyses physico-chimiques des pommes après stockage du mois de Février (Tab. IV. 3) surtout en termes de teneur en sucre et en fermeté montrent qu'elles sont dans les normes de la consommation. Nous avons ainsi: 14.2 °Brix et 8.1 g/cm² pour les arbres non irrigués T1, 12.9 °Brix et 7.6 g/cm² pour le traitement de confort T2, 13.6 °Brix et 8.1 g/cm² pour T3 et 13.1 °Brix et 7.9 g/cm² pour l'irrigation déficitaire régulée IDR. Ces résultats sont conformes aux exigences commerciales qui doivent être supérieur à 11,4 % Brix pour la teneur en sucre et supérieur à 5,4 kg/cm² pour la fermeté (Siegrist and Cotter, 2011). Cela signifie que durant les six premiers mois de conservation et de consommation, la qualité des fruits est en général bonne et dans les normes (Siegrist and Cotter., 2011).

IV. 6. 3. 3 Qualité gustative du fruit

L'irrigation n'a eu qu'une faible incidence sur la qualité gustative des fruits (Tab. IV. 3). Des différences non significatives apparaissent dans les deux variantes extrêmes T1 et T3, vraisemblablement dues au moindre calibre des fruits. L'IDR T4 ne s'est pas démarquée de l'irrigation de confort T2 tandis que les traitements T1 et T3, qui obtiennent de meilleurs résultats à la récolte, maintiennent cet avantage après plus de cinq mois de conservation en atmosphère contrôlée AC. L'amélioration significative de la qualité des fruits par l'IDR, mentionnée dans certaines études, a parfois été obtenue malgré une perte de calibre relativement faible, comme dans l'exemple de Pink Lady (Wan Zaliha and Singh, 2010). Dans notre cas, l'apparition d'un stress de -1,3 à -1,4 MPa assez tôt en saison a fait diminuer le calibre de 15 %. La diminution du calibre des fruits est plus élevée en régime de confort (11 %) qu'en IDR (8 %). Cependant, avec la variété Gala qui produit des fruits d'un calibre inférieur à la moyenne, la diminution obtenue en régime de confort est une perte économique de fruits classés 1er choix, comparativement des résultats obtenus de la qualité physico-chimique en régime de confort et devant les économies d'eau obtenus (47%) en régime de stress modéré, l'irrigation du pommier Gala doit passer impérativement par l'irrigation déficitaire régulée IDR. Nos résultats montrent que si l'on veut augmenter la durée de conservation des pommes, il est impératif de faire la récolte avant que les pommes arrivent à leurs maturité complète, ainsi, des études effectuées par (Siegrist and Cotter, 2011) sur du pommier Gala qui montre que seuls les lots récoltés tôt seront conservés longtemps. Très peu de travaux sont consacrés à la qualité physico-chimique des fruits après stockage et particulièrement les pommes de la variété « Gala » ce qui nous a pas permis de faire une

étude comparative entre nos résultats et d'autres études. Devant le manque de données dans la littérature notre seule étude qui montre que l'irrigation déficitaire du pommier de la variété « Gala » n'a aucun impact négatif sur la qualité physico-chimique des pommes après stockage.

IV. 6. 4 Rendement des arbres fruitiers (Gala) des différents traitements

Les résultats obtenus sur l'impact des différents traitements sur les différents rendements (Tableau IV. 5) des arbres fruitiers, montrent clairement que les arbres fruitiers soumis à un stress sévère possèdent les rendements les plus faibles avec 17 et 18 kg /arbre (année 2010) et 32 et 37 kg/arbre (année 2011) comparativement au traitement de confort T2 25 kg/arbre (année 2010) et 38 kg/arbre en 2011 (Tab. IV. 4), l'application de l'irrigation déficitaire régulée IDR T4 n'a eu aucun effet sur le rendement des arbres fruitiers.

Durant les deux années 2010 et 2011, aucune différence significative n'a été observée entre l'irrigation de confort T2 et l'irrigation déficitaire régulée IDR, des résultats similaires ont été observés sur des arbres fruitiers notamment le pêcher ([Girona, 2002](#)) et le néflier ([Cuevas et al., 2007](#)).

Cependant, les quatre traitements T1, T2, T3 et T4 n'ont aucun effet sur le nombre de fruit par arbre pour un diamètre des fruits inférieur à 70 mm, aucune différence significative n'a été observée sur le nombre de fruits entre les quatre traitements. Par contre des différences significatives ont été observées entre le traitement de confort T2 et les arbres sévèrement stressés (T1 et T3), des résultats similaires ont été trouvés chez le pommier ([Mills et al., 1996](#)), alors que pour des calibres de fruit se situant entre 70-80 mm aucune différence significative entre l'irrigation de confort T2 et l'irrigation déficitaire régulée IDR. Ces résultats confirment les résultats de ([Naor et al., 2008](#)) selon lesquels, dès que le potentiel hydrique du xylème du tronc atteint -1,3 à -1,4 MPa, le calibre des fruits à la récolte diminue.

La qualité commerciale de la variante T4 IDR est pratiquement similaire à la variante T2 avec irrigation de confort. Cependant, le stress hydrique soumis aux arbres fruitiers n'a eu aucun effet sur la coloration des pommes et ce jusqu'à 50 % (Col. 1, 2 et 3), aucune différence significative n'a été observée sur les quatre traitements, par contre des différences significatives entre T2 et (T1 et T3) ont été observées sur la coloration 4, >50 % mais aucune différence significative entre T2 et l'IDR.

Plusieurs auteurs indiquent que l'irrigation déficitaire n'a aucune influence sur la couleur des pommes obtenus à la récolte ([Proebsting et al., 1984](#); et [Ebel et al., 1993](#)) sans toutefois

préciser les différentes colorations en %. L'irrigation déficitaire a amélioré légèrement la coloration des pommes des trois premières catégories (Col. 1, 2 et 3), d'autres études indiquent que la couleur des fruits obtenus à la récolte chez le pommier de la variété "Braeburn" en irrigation déficitaire a été améliorée (Mills et al., 1994; Kilili et al., 1996). Aucune étude sur le pommier n'indique le nombre de pomme obtenu par taille et par couleur. Devant le manque de données dans la littérature, il nous a été difficile de comparer nos résultats avec d'autres travaux sur cet aspect.

Tableau IV. 4. Effet des différentes stratégies d'irrigation (TRT) sur le rendement, nombre et poids de fruit et diamètre du tronc du pommier (Gala). "Col.": signifie les différentes colorations des pommes: 1 (0-10 %), 2 (10-33 %), 3 (33-50 %), 4 (> 50 %). Les moyennes obtenues dans les colonnes suivies par les différentes lettres. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre traitement d'irrigation (Tukey, $P < 0.05$).

TRT	Rendement (kg / arbre)		Poids par fruit en g	Nombre de pommes par calibre			Nombre de pommes par couleur				Diamètre du tronc (mm)				
	2010	2011		< 60	< 70	< 80	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	2010	2011	2010-2011	% T ₂	
															Nombre de fruit par arbre
T1	132a	17b	32a	122b	59a	69a	5b	10a	29a	28a	66b	54.0a	6.9a	2.9 a	51
T2	175a	25a	38b	139a	47a	107a	22a	14a	30a	32a	101a	57.0a	62.7a	5.7 b	100
T3	136a	18ab	37b	129ab	54a	76a	7b	11a	28a	30a	68b	57.9a	62.1a	4.2ab	74
T4	171a	24ab	37.2b	139 a	49a	108a	14ab	15a	35a	35a	86ab	8.7 a	4.0a	5.3 b	93

Les mesures de la variation du tronc des arbres fruitiers durant les deux années 2010-2011 (Tab. IV.5) montrent clairement que les traitements T1 et T3 ont eu une influence sur la diminution du tronc, à cet effet, comparativement au traitement de confort nous avons enregistré durant la 2^{ème} année une réduction du diamètre du tronc du pommier de l'ordre de 49 % en T1, 26 % en T3 et 7 % en IDR. Des résultats similaires sur l'IDR ont été obtenus sur le pêcher (Girona et al., 2005), prunier (Intrigliolo and Castel, 2005) et l'amandier (Romero et al., 2004). Aucune différence significative n'a été observée entre le régime de confort et

l'irrigation déficitaire régulée IDR sur la variation du diamètre du tronc des résultats semblables sur les agrumes (Pérez-Pastor et al., 2009) et l'abricotier (Torrecillas et al., 2000).

Conclusion

Le présent chapitre a montré que l'application de l'irrigation déficitaire régulée IDR durant (PCF II) pourrait être utilisée comme un outil de gestion de l'irrigation pour améliorer la qualité des pommes dans le verger. L'étude statistique a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre l'irrigation de confort et l'IDR en termes de qualité physico-chimique mesurée avant et après stockage particulièrement sur la fermeté, la teneur en sucre, la jutosité et la vitamine C. De légères différences sont apparues entre l'irrigation de confort et l'IDR en termes d'acidité et de jutosité de l'ordre de 0.1 g/l pour la jutosité et 1.2 mg de jus libéré par g de fruit.

Cependant, nous avons enregistré une réduction de poids des pommes après stockage, les valeurs les plus élevées se retrouvent chez les arbres les plus stressés avec 22.2 g de réduction. Durant PCF II l'arrêt total de l'irrigation du traitement T3 aux arbres fruitiers a causé une réduction du poids des pommes de l'ordre 12 g et 12.9 g pour l'IDR. Par contre la teneur en sucre du fruit du traitement T3 est supérieur à celui de l'IDR soit 1.2 °Brix pour T3 et 1°Brix pour l'IDR. Ces résultats montrent que la qualité physico-chimique des pommes après stockage provenant des arbres fruitiers soumis au stress hydrique sévère perd un peu de leurs qualités notamment (réduction du poids du fruit, augmentation de la teneur en sucre du fruit). L'application de l'irrigation déficitaire régulée maintient l'avantage de garder la qualité des pommes au même titre que l'irrigation de confort.

En termes de coloration des pommes, différentes études sur le pommier effectuées par différents chercheurs qui n'arrivent pas à conclure définitivement sur cet aspect. Certaines études ont montré que l'IDR ne modifie pas la couleur de la pomme sans citer le calibre et le pourcentage de coloration des pommes tandis que d'autres indiquent que les pommes des arbres fruitiers soumis à l'IDR possèdent une couleur qui tend vers le rouge. Notre étude montre que l'IDR a un impact sur la couleur des pommes qui dépend du calibre du fruit. Nous n'avons enregistré aucune différence significative en termes de couleur des pommes entre tous les traitements sur des pommes ayant un diamètre (<70 mm. Par contre des différences significatives en termes de couleur des pommes (>50%) ont été observées entre l'irrigation de confort et l'IDR. L'irrigation n'a pas d'effet sur la couleur des pommes (<70 mm)

En termes de calibre des pommes l'IDR n'a eu aucun impact sur les pommes dont le diamètre est (<70 mm), nous n'avons enregistré aucune différence significative tous les traitements sur des pommes (<70 mm). Par contre, des différences significatives en termes de couleur des pommes (<70 mm) ont été observées entre l'irrigation de confort et l'IDR.

Notre étude a montré aussi que le stress hydrique n'a aucun effet sur l'évolution du grossissement des pommes durant PCF (I, II et III). Par le stress sévère à un effet sur le diamètre du tronc. Durant la deuxième année d'expérience nous avons enregistré (49 % et 49 %) de réduction comparativement à l'irrigation de confort par contre aucune différence significative entre l'irrigation de confort et l'irrigation déficitaire régulée.

Durant les deux années d'expérimentations l'IDR n'a eu aucun n'impact sur le poids du fruit ainsi que sur le rendement des arbres fruitiers à l'hectare.

Conclusion générale

L'étude de l'influence de l'irrigation sur la qualité de la pomme cv. Gala, avec l'application de quatre variantes sur deux systèmes de conduite sur deux années d'expérimentation nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Une concurrence accrue pour l'eau est prévue et il est urgent d'appliquer des stratégies d'irrigation qui visent à accroître l'utilisation efficace des ressources en eau, ainsi que pour réduire au minimum la pollution des eaux souterraines. L'irrigation déficitaire pourrait être une telle stratégie.

L'irrigation déficitaire régulée IDR, selon les critères définis pour cette expérimentation (réduction des irrigations dès 60 jours après la pleine floraison jusqu'à 4 semaines avant la récolte et seuil de potentiel de tronc à -1,2 MPa) a permis de réaliser une économie d'eau de 47% par rapport à une irrigation de confort appliquée durant toute la saison.

L'irrigation déficitaire (RDI) n'a eu aucun impact sur le rendement et la qualité des fruits de deux récoltes consécutives en comparaison avec une irrigation de confort. Aucune influence significative n'a été observée sur le calibre, la coloration, la teneur en sucres totaux, l'acidité totale, la fermeté, ainsi que les teneurs en vitamine C des fruits.

Le maintien d'un niveau modéré de stress hydrique dans un verger peut être un outil efficace pour économiser de l'eau sans nuire à la qualité des fruits

Dans les conditions de l'essai, la variété Gala s'est montrée sensible au stress hydrique, avec des réactions mesurables en termes de qualité de la récolte à partir d'un potentiel de tronc de -1,3 à -1,4 MPa observé principalement dans la variante sans irrigation.

Le potentiel hydrique du xylème sépare très clairement les quatre traitements d'irrigation dans cette expérience. La pertinence du seuil du Ψ_x à -1.2 MPa comme un seuil suffisant pour la planification de l'irrigation déficitaire, en dépit des expériences dans différentes climatiques et pédologique (à savoir l'Espagne), confirme sa grande aptitude pour les cultivars avec le comportement spécifié (Naor, 2006; Gerona et al., 2010).

Cependant, la mesure de Ψ_x est très longue et demande beaucoup de précision et jusqu'à présent il n'y a pas eu de système disponible pour mesurer le potentiel hydrique de la feuille des arbres fruitiers par voie électronique. Etant donné la bonne relation trouvée avec des coefficients dans la présente étude entre Ψ_x mesuré par la bombe Scholander et Ψ_{soil} mesuré par la sonde Watermark® en particulier à 0,3 m de profondeur.

Pour la programmation de l'irrigation déficitaire IDR avec la double gaine enterrée dans le verger les seuils retenus du potentiel hydrique de sol Ψ_{soil} sont de -0,15 et -0,08 MPa respectivement pour 0,30 m et 0,60 m de profondeur.

Pour la qualité physico-chimique le stress hydrique appliqué aux arbres fruitiers a réduit considérablement la jutosité par contre nous avons remarqué une augmentation de la teneur en sucre et de la fermeté comparativement aux arbres fruitiers mis en régime de confort. L'application de l'IDR sur les arbres fruitiers n'a montré aucune différence significative sur la qualité physico-chimique comparativement à l'irrigation de confort, aucune différence significative n'a été enregistrée sur la fermeté, la jutosité et la teneur en sucre.

Le maintien d'un niveau modéré de stress hydrique dans un verger peut être un outil efficace pour économiser de l'eau sans nuire à la qualité des fruits.

Les fruits obtenus à la récolte varient considérablement en fonction de l'arbre (cette variabilité est associée à d'autres facteurs tels que l'interception de la lumière et les stratégies d'irrigation).

Des économies d'eau de l'ordre de 40% obtenu comparativement à l'irrigation, comme l'eau est un facteur limitant aux cultures et notamment les arbres fruitiers l'IDR est une stratégie prometteuse et utile pour le pommier.

Les différents traitements n'ont pas eu d'effets sur le grossissement des fruits, aucune différence significative n'a été observée en calibre du fruit entre les différentes stratégies d'irrigation durant PCF (I, II et III). Le diamètre des fruits n'est donc pas influencé par les différents procédés d'irrigation. Au regard de ces résultats, tous les arbres ont pu approvisionner normalement leurs fruits en eau. En termes de qualité commerciale, les fruits provenant de toutes les variantes répondent aux exigences de calibre. La catégorie « extra » est définie par des fruits de diamètre supérieur à 60 mm.

Par contre des différences significatives en termes de couleur des pommes (>50%) ont été observées entre l'irrigation de confort et l'IDR. L'irrigation n'a pas d'effet sur la couleur des pommes (<70 mm)

En termes de calibre des pommes l'IDR n'a eu aucun impact sur les pommes dont le diamètre est (<70 mm), nous n'avons enregistré aucune différence significative tous les traitements sur des pommes (<70 mm). Par contre, des différences significatives en termes de couleur des pommes (<70 mm) ont été observées entre l'irrigation de confort et l'IDR.

Le degré du stress hydrique appliqué aux arbres fruitiers a un effet sur l'évolution du diamètre du tronc des arbres fruitiers. Ainsi durant la deuxième année d'expérience nous avons enregistré respectivement une réduction du diamètre du tronc de (49 %) pour un stress sévère et (26 %) pour un stress moyen comparativement à l'irrigation de confort. Par contre aucune différence significative n'a été enregistrée entre l'irrigation de confort et l'IDR.

Durant les deux années d'expérimentations l'IDR n'a eu aucun impact sur le poids du fruit ainsi que sur le rendement des arbres fruitiers à l'hectare.

Perspectives de recherches

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude constituent essentiellement une phase préliminaire ayant permis de dégager des pistes explicatives qui restent à approfondir.

Les conséquences d'un déficit hydrique sur l'activité physiologique des arbres fruitiers pourraient être abordées par le biais de mesures de la variation journalière du diamètre du tronc des arbres fruitiers et de la surface foliaire des feuilles indispensable pour estimer l'activité photosynthétique de l'arbre. La réponse au stress hydrique du pommier par des mesures des échanges gazeux et de la conductance stomatique sont indispensables ces mesures doivent s'effectuer le matin-midi solaire et l'après midi.

Les mesures de la qualité chimique doivent faire l'objet d'un suivi de mesures des différents paramètres teneur en sucre, l'acidité et la jutosité des fruits durant les trois phases de croissance des arbres fruitiers.

Cette étude doit être complétée par des mesures des différentes concentrations dans le fruit tels que le calcium le phosphore et le potassium.

Faire d'autres études sur l'irrigation déficitaire régulée dans d'autres climats en faisant inclure d'autres variétés les plus consommées tels que : Golden, Gala et Granny Smith.

L'option d'un déficit contrôlé appliqué tardivement (p. ex 100 jours après la pleine floraison jusqu'à la récolte) est à tester avec un seuil de potentiel de tronc plus bas, dans le but d'obtenir une hausse plus substantielle de la qualité gustative et nutritionnelle sans diminution significative du calibre des fruits mais c'est une hypothèse à vérifier sur en plein champ.

Bibliographie

- Abrisqueta, I., Veraa, J., Tapiab, L.M., Abrisqueta, J.M., & Ruiz-Sánchez, M.C. (2012).** Soil water content criteria for peach trees water stress detection during the postharvest period. *Agric. Water Manage.* 104, 62-67.
- Ackermann, J., Fischer, M., & Amado, R. (1992).** Changes in sugars, acids and amino acids during ripening and storage of apples (cv. Glockenapfel). *J. Agric. Food Chem.* 40, 1131-1134.
- Aeppli, A., Gremminger, U., Rapillard, Ch., & Rothlisberger, K. (1983).** 100 Variétés de fruits. Zollikofen: *Edition LmZ, Centrale des moyens d'enseignement agricole* 3052, 249 p.
- Ahmed, C.B., Rouina, B.B., & Boukhris, M. (2007).** Effect of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia. *Sci.Hortic.* 113, 267-277.
- Akram, N.M. (2007).** Relationship of photosynthetic capacity and proline accumulation with the growth of differently adapted populations of two potential grasses (*Cynodon dactylon* (L.) Pers. and *Cenchrus ciliaris* L.) to drought stress. *Pakistan J. Bot.* 39, 777-786.
- Aksoy, U., Kara, S., Misirli, A., Can, H.Z & Seferoglu, G. (1995).** Effect of potassium nitrate and hydrogen cyanamide on apricot. *Acta Hort.*, pp 384.
- Alam, M., Trooien, T.P., Dumler, T.J., & Rogers, T.H. (2002).** Using subsurface drip irrigation for alfalfa. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 38, 1715-1721.
- Allen, R.G., Clemmens, A.J., Burt, C.M., Solomon, K. & O'Halloran, T. (2005).** Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 131, 24-36
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998).** Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No. 56, FAO, Rome.
- Améglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F.A., Dayau, S., & Cruiziat, P. (1999).** Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant Soil*, 207, 155-167.
- Anderson, J., Chung, F., Anderson, M., Brekke, L., Easton, D., Ejeta, M., Peterson, R., & Snyder, R. (2008).** Progress on incorporating climate change into management of California's water resources. *Clim. Chang.* 87, 91-108.

- Aprifel. (2008).** Site internet de l'agence des fruits et des légumes frais. Fiches nutritionnelles par produits : la pomme. <http://www.aprifel.com/fiches,produits>.
- Arnoux, N. (1990).** Le marché mondial de la pomme, *Arboric. Fruit.* 433, 73-77.
- Ashraf, M. (2010).** Inducing drought tolerance in plants. *Recent advances. Biotechnol. Adv.* 28, 169-183.
- Assaf, R., I. Levin and B. Bravdo. (1975).** Effect of irrigation regimes on trunk and fruit growth rates, quality and yield of apple trees. *J. Hort. Sci.* 50, 481-493.
- Ayars, J.P. (1999).** Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric. Water Manag.* 42, 1-27.
- Azevedo, D.C.S and Rodrigues, A.E. (2000).** Obtainment of high-fructose solutions from cashew (*Anacardium occidentale* L.) apple juice by SMB chromatography. *Separ. Sci. Technol.* 35, 2561-2581.
- Batjer, L.P., Roger, B.L., & Thompson, A.H. (1952).** Fertilizer applications as related to utilisation by apple trees. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 60, 1-6.
- Bauer, A., & Black, A.L. (1992).** Organic carbon effects on available water capacity of three textural groups. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 248-254.
- Behboudian, M.H, Graves, W.R, Walsh, C.S, & Korcak, R.F. (1994).** Water relations, mineral nutrition, growth, and ^{13}C discrimination in two apple cultivars under daily episodes of high root-medium temperature. *Plant and Soil.* 162. 125-133.
- Behboudian, M.H and Lawes. G.S. (1994).** Fruit quality in 'Nijisseiki' Asian pear under deficit irrigation: physical attributes, sugar and mineral content, and development of flesh spot decay. *N.Z. J. Crop Hort. Sci.* 22, 393-400.
- Behboudian, M.H and Mills, T.M. (1997).** Deficit irrigation in deciduous orchards. *Hort. Rev.* 21, 105-131.
- Benson, N.R., and Covey R.P, Jr. (1979).** Phosphorus nutrition of young 'Golden Delicious' apple trees growing in gravel culture. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 104, 682-685.
- Bloesch, B and Viret, O. (2013).** Stades phénologiques repères des fruits à pépins (pommier et poirier). *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* | V 128 ol. 45 (2): 128–131, 2013.
- Bertschinger, L., Gysi, C., Häseli, A., Neuweiler, R., Pfammatter, W., Ryser, J.P., Schmid, A., & Weibel, F. (2003).** Données de base pour la fumure en arboriculture fruitière: Fruits à pépins, fruits à noyau, kiwis, baies d'arbustes. Edition: *Eidgenössische Forschungsanstalt, Postfach 185, CH-8820 Wädenswil, Suisse.* 15, 1-48.

- Berüter, J. (1989).** Carbohydrate partitioning and changes in water relations of growing apple fruit. *J. Plant Physiol.* 135, 583-587.
- Berüter, J., Studer Feusi, M.E & Rüedi, P. (1997).** Sorbitol and sucrose partitioning in growing apple fruit. *J. Plant Physiolog.* 151, 269-276.
- Bianco, R.L and Francaviglia, D. (2012).** Comparative response of ‘Gala’ and ‘Fuji’ apple trees to deficit irrigation: placement versus volume effects. *Plant and Soil.* 357, 41-58.
- Bielorai, H. (1982).** The effect of partial wetting of the root zone on yield and water use efficiency in drip and sprinkler mature grapefruit grove. *Irrig. Sci.* 3, 89-100.
- Bloesch, B and Viret, O. (2013).** Stades phénologiques repères des fruits à pépins (pommier et poirier). *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 45(2), 128-131.
- Boland, A., Ziehri, A & Beaumont, J. (2002).** Guide to Best Practice in Water Management: Orchard Crops, Murray-Darling Basin Commission, State of Victoria, *Department of Natural Resources and Environment, Melbourne.* 118p.
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F.J & Fereres, E. (2001).** Soil evaporation from dripirrigated olive orchards. *Irrig. Sci.* 20, 65-71.
- Bonany, J and Camps, F. (1998).** Effects of different irrigation levels on apple fruit quality. *ISHS, Acta Hort.* 466, 47-52.
- Bonet, L., Ferrer, P., Castel, J.R & Intrigliolo, D.S. (2010).** Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards? *Spanish J. Agric. Res.* 8, 852-865.
- Bretauudeau. (1975).** Atlas d’arboriculture fruitière, volume 1, *Edition J.-B. Baillière, 1975.*
- Bussakorn, S.M., Behboudian, M.H., Dixon, J., Neal, S.M & Caspari, H.W. (2000).** Improvement of fruit quality and storage potential of ‘Braeburn’ apple through deficit irrigation. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 615-621.
- Cai, X & Rosegrant, M.W. (2003).** World water productivity: current situation and future options. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka,* p 163-178.
- Calzadilla, A., Rehdanz, K & Tol, R.S.J. (2010).** The economic impact of more sustainable water use in agriculture: A computable general equilibrium analysis. *J. Hydrol.* 384, 292-305.
- Chaves, M.M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J.M., Santos, T., Regalado, A.P., Rodrigues, M.L & Lopes, C.M. (2010).** Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Ann Bot,* 105, 661-676.

- Campbell, G.S and Campbell, M.D. (1982).** Irrigation scheduling using soil moisture measurements: Theory and practice, In: D. Hillel (ed.). *Advances in irrigation*. vol 1. Academic, New York. p. 25-42.
- Campbell, G.S & Mulla D.J. (1990).** Measurement of soil water content and potential. In: Stewart BA, Nielsen DR (eds) *Irrigation of agricultural crops. American society of agronomy, Madison, USA, pp 127-142.*
- Camp, C.R., Lamm, F.R., Evans, R.G & Phene, C.J. (2000).** Subsurface drip irrigation-past, present and future. *In National Irrigation Symposium, November 14-16., (S. 363-372.).* Phoenix, Arizona.
- Caspari, H. W., Behboudian, M. H & Chalmers, D. J. (1994).** Water Use, Growth, and Fruit Yield of 'Housi' Asian Pears under Deficit Irrigation. *J. Amer. Soc. Sci.* 119, 383-388.
- Caspari, H.W., Neal, S & Alspach, P. (2004).** Partial rootzone drying- a new deficit irrigation strategy for apple? *Acta Hort.* 646, 93-100.
- Cassel D.K and Klute A. (1986).** Physical and mineralogical methods. *American society of agronomy, Madison, USA* , pp 563-596.
- Cassel, D.K and & Klute, A. (1986).** Water potential: tensiometry. Physical and mineralogical methods . USA: *In: Klute A (ed), part 1. American soc. of agronomy, Madison,* pp 563-596.
- Cassel, D. K and Nielsen, D. R. (1986).** Field capacity and available water capacity. In: A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods- Agronomy Monograph No. 9 (2nd Edition). American Soc. of Agronomy - Soil Science Soc. of America, Madison, WI.* pp. 901-926.
- Cattivelli, L., Rizza, F., Badeck, F.W., Mazzucotelli, E & Mastrangelo., A.M. (2008).** Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Res.* 105, 1-14.
- Chalmers, D. (1989).** A physiological examination of regulated deficit irrigation. *New Zealand J. Agric. Sci.* 23, 44-48.
- Chalmers, D. J., Burge, G., Jerie, P. H & Mitchell, P.D. (1986).** The Mechanism of Regulation of 'Bartlett' Pear Fruit and Vegetative Growth by Irrigation Withholding and Regulated Deficit Irrigation. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 111, 904-907.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D & van Heek, L. (1981).** Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 106, 307-312.

- Chartzoulakis, K., Michelakis, N & Stefanoudaki, E. (1999).** Water use, growth, yield and fruit quality of ‘Bonanza’ oranges under different soil water regimes. *Adv. Hortic. Sci.* 13, 6-11.
- Chatzitheodorou, I.T., Sotiropoulos, T.E & Mouhtaridou, G.I. (2004).** Effect of nitrogen, phosphorus, potassium fertilization and manure on fruit yield and fruit quality of the peach cultivars spring time and Red Haven. *Agronomy Research*, 2, 135-143.
- Chenafi, A., Monney, P., Christen, D., Boudoukha, A & Carlen. C. (2013).** Influence de l’irrigation déficitaire sur le rendement, la qualité de pommes ‘Gala’ et l’économie en eau. *Rev. suisse vitic. arboric. Hortic.* 45, 92-101.
- Cheng F., Sun H., Shi H., Zhao Zh., Wang Q & Zhang J. (2012).** Effects of regulated deficit irrigation on the vegetative and generative properties of the pear cultivar ‘Yali’, *J. Agric. Sci. Tech.* 14, 183-194.
- Choné, X., Van leeuwen, C., Dubourdiou D. D & Gaudillere, J.P. (2001).** Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Ann. Bot.* 87, 477-483.
- Chossat, J. (2005).** La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols, choix des méthodes. *Paris: Lavoisier.* 720 p.
- Cockerham, S.T and Leinauner, B. (2011).** Turfgrass water conservation. *Edition: Richmond, CA: University of California, Agriculture and Natural Resources, Communication Services*, 164 p.
- Costa, J.M., Ortuno, M.F & Chaves, M.M. (2007).** Deficit Irrigation as a Strategy to Save Water: Physiology and Potential Application to Horticulture. *J. Integr. Plant Biol.* 49, 1421-1434.
- Coutanceau, M. (1962).** Arboriculture fruitière. Technique et économie des cultures de rosacées fruitières ligneuse. *Baillère et fils eds, Paris*, 46-47.
- Crisosto, C.H., Johnson, R.S., Luza, J.G & Crisosto, G.M. (1994).** Irrigation regimes affect fruit soluble solids concentration and rate of water loss of ‘O’Henry’ peaches. *HortScience.* 29, 1169-1171.
- CSD., C.O. (2002).** *World Summit on Sustainable Development.* Johannesburg, South Africa.
- Cui, N., Du, T., Li, F., Tong, L., Kang, S., Wanga, M., Liu, X & Li, Z. (2009).** Response of vegetative growth and fruit development to regulated deficit irrigation at different growth stages of pear-jujube tree. *Agric. Water Manage.* 96, 1237-1246.
- Cuevas, J., Cañete, M.L., Pinillos, V., Zapata, A.J., Fernandez, M.D., González, M & Huesto, J.J. (2007).** Optimal dates for regulated deficit irrigation in ‘Algerie’ loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) cultivated in Southeast Spain. *Agric. Water Manag.* 89, 131-136.

- De Fraiture, C., and Wichelns, D. (2010).** Satisfying future water demands for agriculture. *Agric. Water Manage.* 97, 502-511.
- De Langhe, J.E., Delvosalle, L., Duvigneaud, J., Lambinon, J & Vanden Berghen, C. (1983).** Nouvelle flore de la Belgique, du grand duché du Luxembourg, du nord de la France et des régions voisines. *Ed. du Patrimoine du Jardin botanique national de Belgique, 3e Ed. Meise*, 1015 p.
- Deng, X.P., Shan, L., Zhang, H & Turner, N.C. (2006).** Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. *Agric. Water Manage.* 80, 23-40.
- Denne, M.P. (1960).** The growth of apple fruitlets, and the effect of early thinning on fruit development. *Ann. Bot., Land. n.s.* 24: 597-406.
- De Parceveaux, S and Huber, L. (2007).** Bioclimatologie, édition: Versailles, Quae, 324 p
- Dixon, H.H and, Joly, J. (1895).** On the ascent of sap. Philosophical Transaction of the Royal Society of London - *Serie B Biological Science*, 186, 563-576.
- Dorigoni A., Lezzer P., Micheli F., Dalla betta N., & Pasqualini J. (2010).** Diradare il melo a macchina: cosa sapere per farlo bene. *L'Informatore agrario*, 66, (22): 63-67.
- Dorji, K., Behboudian, M.H & Zegbe-Dominguez, J.A. (2005).** Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. *Sci. Hortic.* 104, 137-149.
- Dos Santos, T., Lopes, C.M., Rodrigues, M.L., Souza, C.R., Maroco, J., Pereira, J.S., Silva, J.R & Chaves, M.M. (2007).** Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of 'Moscatel' field-grown grapevines. *Sci Hortic.* 112, 321-330.
- Dragoni, D., Lakso, A.N & Piccioni, R.M. (2004).** Transpiration of an apple orchard in a cool humid climate: measurement and modeling. *Acta Horticulturae* 664: 175–180.
- Drake, S.R., Proebsting, E.L., Mahan, M.O & Thompson, B. (1981).** Influence of trickle and sprinkle irrigation on 'Golden Delicious' apple quality. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106, 255-258.
- Durán Zuazo V.H., Rodríguez Pleguezuelo C.R & Tarifa D.F. (2011).** Impact of sustained-deficit irrigation on tree growth, mineral nutrition, fruit yield and quality of mango in Spain, *Fruits*, 66, 257-268.
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L & Patterson, M.E. (1993).** Regulated deficit irrigation may alter apple maturity, quality, and storage life. *Horticultural Science*, 28, 141-143.

- Ebel, R.C., Proebsting, E.L & Evans, R.G. (1995).** Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience*, 3, 1229-1232.
- Eberhardt, M.V., Lee, C.Y & Liu, R.H. (2000).** Antioxidant activity of fresh apples. *Nature*, 405, 903-904.
- Einhorn, T and Caspari, H.W. (2004).** Partial rootzone drying and deficit irrigation of “Gala” apples in semi-arid climate. *Acta Hort.* 664: 197-204.
- Eldredge, E.P, Shock, C.C & Stieber, T.D. (1993).** Calibration of granular matrix sensors for irrigation management. *Agron. J.* 85, 1228-1232.
- El Sharkawy, M.A., Cock, J.H & Held, K.A.A. (1984).** Water use efficiency in cassava. II. Differing sensitivity of stomata to air humidity in cassava and other warm-climate species. *Crop Sci.* 24, 503-507.
- Eric, Lichtfouse. (2013).** *Sustainable Agriculture Reviews. Editor*, Volume 15, 415 p
- Evenhuis, A., and Alblas, J. (2002). Irrigation of strawberries by the use of decision support systems. *ISHS Acta Hort.* 567, 475-478.
- Fallahi, E., Colt, W. M., Fallahi, B & Chun, I. J., (2001).** Influence of different rates of nitrogen on fruit quality, yield photosynthesis of ‘Fuju’ apple. *Acta Hort.* 564:261-268.
- FAO, (2009).** Agriculture indices (FAOSTAT). <http://faostat.fao>.
- FAO, Food and Agriculture Organization. (1999).** Soil physical constraints to plant growth and crop production. *Land and Water Development Division, Rome.* 83p.
- Fares, A and Alva, A.K. (2000).** Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrig. Sci.* 19, 57-64.
- Fares, A and Polyakov, V. (2006).** Advances in crop water management using capacitance sensors. *Adv. Agron.* 90, 43-77.
- Fereres, E and Evans, R.G. (2006).** Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrig. Sci.* 24, 55-57.
- Fernández , J.E., Palomo, M.J., Díaz -Espejo A, Clothier BE, Green SR, Girón, IF & Moreno, F. (2001).** Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow, and diagnostics of water stress. *Agric. Water Manage.* 51, 99-123.
- Ferrara, G and Flore, J.A. (2003).** Comparison between different methods of measuring transpiration in potted apple trees. *Biol. Plantarum*, 46, 41-47.
- Ferree, D.C and Warrington, I.J. (2003).** Apples: botany, production, and uses. *CABI publishing, CAB international, UK.* 672 p.

- Ferreira, M.I and Katerji, N. (1992).** Is stomatal control in a tomato crop controlled by soil or atmosphere? *Oecologia*. 92, 104-107.
- Fleckinger, J. (1948).** Les stades végétatifs des arbres fruitiers en rapport avec les traitements. *Rapport général du Congrès Pomologique de France, Angers*, pp. 81-91.
- Fuleki, T., Pelayo E & Palabay, R.B. (1994).** Sugar composition of varietal juices produced from fresh and stored apples. *J. Agric. Food Chem.* 42, 1266-1275.
- Gallais, A and Bannerot, H. (1992).** Amélioration des espèces végétales cultivées : objectifs et critères de sélection, *Editions Quae*, 768 p.
- Gamo, M. (1999).** Classification of arid regions by climate and vegetation. *J. Arid Land Stud.* 1, 9-17.
- Gandar, P. W and Hughes, K. A. (1988).** Kiwifruit root systems I. Root-length densities. *New Zealand journal of experimental agriculture.* 16, 35-46.
- García-Tejero, I., Durán, Z.V.H., Muriel, F.J.L., Martínez, G.G & Jiménez, B.J.A. (2011).** Benefits of low-frequency irrigation in citrus orchards. *Agronomy Sust. Developm.* 31, 779-791.
- García-Tejero, I., Jiménez-Bocanegra, J.A., Martínez, G., Romero, R., Durán-Zuazo, V.H & Muriel-Fernández, J.L. (2010a).** Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit-quality in a commercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, cv. Salustiano] . *Agric. Water Manage.* 97, 614-622.
- García-Tejero, I., Romero, V.R., Jiménez, B.J.A., Martínez, G.G., Durán, Z.V.H & Muriel, F.J.L. (2010b).** Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality and water productivity. *Agric. Water Manage.* 97, 689-699.
- Garnier, E and Berger, A. (1985).** Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *J. Hort. Sci.* 60, 47-56.
- Gautier, M. (1993).** La culture fruitière: L'arbre fruitier. *Ed. et TEC et DOC*. Paris 148p
- Gautier Michel, (1987).** La culture fruitière. Volume 1, L'arbre fruitier, *edition, Lavoisier*, 492p.
- Génard, M and Baret, F., (1994).** Spatial and temporal variation of light inside peach trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 119, 669-677.
- Gendrier, J.P., Lichou, J., Baudry, O., Orts, R., Rondeau, S., Soing, P & Mandrin, J.F. (1999).** Outils de pilotage-bonnes pratiques en arboriculture fruitière. *Paris: Ctifl*. 200 p.
- Gillaspy G., Ben-David H., Gruissem W. (1993). Fruits: A developmental perspective. *Plant Cell* 5, 1439–1451.

- Gijón, M.C., Guerrero, J., Couceiro, J.F & Moriana, A. (2009).** Deficit irrigation without reducing yield or nut splitting in pistachio (*Pistacia vera* cv Kerman on *Pistacia terebinthus* L.). *Agric. Water Manage.*, Amsterdam, 96, 12-22.
- Ginestar C and Castel J.R., (1996).** Response of young ‘Clementine’ in citrus trees to water stress during different phenological periods. *J. Hort. Sci.* 71, 551-559.
- Girona, J.M. (2006).** The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci.* 24, 115-127.
- Girona, J., Behboudian, M.H., Mata, M., Del Campo. J & Marsal, J. (2010).** Exploring six reduced irrigation options under water shortage for ‘Golden Smoothie’ apple: Responses of yield components over three years. *Agric. Water Manage.* 98, 370-375.
- Girona, J., Del Campo, J., Bonsatre, N., Paris, C., Mata, M., Arbones, A & Marsal, J. (2009).** Evaluation of different irrigation strategies on Apple (*Malus domestica*). Physiological and productive results. *VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops.* November 2-6, Vina del Mar, Chile.
- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J & Marsal, J. (2005).** Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agric. Water Manage.* 72, 97-108.
- Girona, J., Mata, M., del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E & Marsal, J. (2006).** The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci.* 24, 115-127.
- Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A & Cohen, M. (2002).** Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agric. Water Manage.* 54, 107-122.
- Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Alegre, S., Rufat, J & Marsal, J. (2003).** Productive and vegetative peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 128, 432-440.
- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S & DeJong, T.J. (1993).** Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 118, 580-586.
- Gobat, J.M., Aragno, M & Matthey, W. (2010).** Le sol vivant - Bases de pédologie, Biologie des sols, 3^{ème} édition revue et augmentée. *Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes*, 817 p.
- Goldhamer, D.A and Beede R.H. (2004).** Regulated deficit irrigation effects on yield, nut quality and water-use efficiency of mature pistachio trees. *J. Hort. Sci. Biotech.* 79, 538-545.

- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J & Cohen, M. (1999).** Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 124, 437-444.
- Goldhamer, D.A and Salinas, M. (2000a).** Evaluation of regulated deficit irrigation on mature orange trees grown under high evaporative demand. *Proceedings of the International Society of Citriculture, IX Congress*, (S. ISC, 227-231). Orlando.
- Goldhamer, D.A and Viveros, M. (2000b).** Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrig. Sci.* 19, 125-131.
- Goldhamer, D.A., Viveros, M & Salinas, M. (2006).** Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrig. Sci.* 24, 101-114.
- González-Altozano, P and Castel, J.L. (1999).** Regulated deficit irrigation in ‘Clementina de Nules’ citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *J. Hort. Sci. Biotech.* 74, 706-713.
- González-Altozano, P and Castel, J.L. (2000).** Effect of regulated deficit irrigation on clementina de nules. citrus trees growth, yield and fruit quality. *Acta hort.* 537, 749-758.
- Goodwin, I and Boland, A.M. (2002).** Deficit irrigation practices: *Water reports*, 22, 109 p.
- Green, S.R and Clothier, B.E. (1988).** Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *J. Exp. Bot.* 39, 115-123.
- Green, S.R and Clothier, B.E. (1995).** Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and Soil*, 173, 317-328.
- Greenspan, M., Schultz, H & Matthews, M.A. (1996).** Field evaluation of water transport in grape berries during water deficits. *Physiol. Plant.* 97, 55-62.
- Green, S.R., Clothier, .B.E & Leod .M.C. (1997).** The response of sap flow in apple roots to localised irrigation. *Agric. Water Manage.* 31, 63-78.
- Guelfat’Reich, S., Assaf,R., Bravdo, B.A & Levin, I. (1974).** The keeping quality of apples in storage as affected by different irrigation regimes. *J. Hort. Sci.* 49, 217-225.
- Hanson, B.R., Orloff, S & Peters, D. (2000).** Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *Calif. Agric.*, 54 (3), 38-42.
- Hanson, B.R., Schwankl, L.J & Fulton, A. (1999).** Scheduling irrigations: when and how much water to apply. University of California, Davis.: Division of agriculture and natural resources publication 3396. *University of California Irrigation Program.* 202 p.
- Han., Y.L and Kang, S.Z. (2002).** Effects of the controlled partial rootzone irrigation on root nutrition uptake of maize (*Zea mays*). *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* 18, 57-59.

- Hoffman, G.J and Martin, D.L. (1993).** Engineering systems to enhance irrigation performance. *Irrigation Science*. 14, 53-63.
- Hopkins, W.G and Evrard, C.M. (2003).** Physiologie végétale. *Edition: De Boeck Bruxelles*, 514 p.
- Howell, T.A. (2001).** Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93, 281-289,
- Hullé, M. (1998).** Les pucerons des arbres fruitiers: cycles biologiques et activités de vol, *Agraphid. Paris, ACTA, INRA*, 80 p.
- Huzulák, J and Matejka, F. (1983).** Relationship between soil moisture and leaf water potential of three forest tree species. *Biologia Plantarum*, 25, 462-467.
- Iglesias, A., Avis, K., Benzie, M., Fisher, P., Harley, M., Hodgson, N., Horrocks, L., Moneo, M & Webb, J. (2007).** Adaptation to Climate Change in the Agricultural Sector. AGRI-2006-G4-05. *AEA Energy & Environment and Universidad de Politécnica de Madrid*, 245 p.
- Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F & Villalobos, F.J. (2009).** The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *Eur. J. Agron.* 30, 258-265.
- Intrigliolo, D.S and Castel, J.R. (2004).** Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrig. Sci.* 23, 93-102.
- Intrigliolo, D.S and Caste, J.R. (2005).** Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees. *Tree Physiol.* 26, 303-311.
- Intrigliolo, D.S and Castel, J.R. (2009).** Response of *Vitis vinifera* cv. ‘Tempranillo’ to partial rootzone drying in the field: water relations, growth, yield and fruit and wine quality. *Agric. Water Manage.* 96, 282-292.
- Intrigliolo, D.S and Castel, J.R. (2010).** Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: tree growth, yield and fruit quality. *Irrig. Sci.* 28, 525-534.
- Intrigliolo D.S and Castel J.R. (2006).** Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agric. Water. Manage.* 83, 173-180.
- I.P.C.C. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007).** Climate change: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment. *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge, University Press.* 13p.

- Irving, D.E and Drost, J.H. (1987).** Effects of water deficit on vegetative growth, fruit growth and fruit quality in Cox's Orange Pippin Apple. *J. Hort. Sci.* 62: 427-432.
- Isabelle, T. (2004).** Influence des conditions pédoclimatiques du terroir sur le comportement du pommier et la composition des pommes à cidre dans le Pays d'Auge. *Thèse de doctorat de l'université de CAEN*, France, 124p.
- Jackson, J.E. (2003).** *Biology of apples and pears* (1), Cambridge University Press, ISBN 0521-38018-9, Cambridge.
- Jones, H.G. (1992).** Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology, vol. 2. Cambridge University Press., 428p.
- Kang, S.Z and Zhang, J.H., (2004).** Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *J. Exp. Bot.* 55, 2437-2446.
- Kellerhals, M. (2008).** Quoi de neuf dans l'arboriculture suisse? *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 40 (6), 329.
- Kilili, AW., Behboudian, M.H & Mills, T.M. (1996).** Composition and quality of 'Braeburn' apples under reduced irrigation. *Sci. Hortic.* 67, 1-11.
- Kirnak, H., Kaya, C., Higgs, D., Bolar, I., Simsek, M & Ikinici, A. (2003).** Effects of preharvest drip-irrigation scheduling on strawberry yield, quality and growth. *Aust. J. Exp. Agr.* 43, 105-111.
- Kotzé, W.A.G. (2001).** Voeding van bladwisselende vrugtebome, bessies, neuter 18 en ander gematigde klimaat gewasse in Suid-Afrika. *Agricultural Research 19 Council Infruitec-Nietvoorbij, Stellenbosch*, pp. 35-36.
- Krüger, E., Schmidt, G & Brückner, U. (1999).** Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Sci. Hortic.* 81, Issue 4, 409-424.
- Kuriyama, T., Shimoosako, M., Yoshida, M & Shiraishi, S. (1981).** The effect of soil moisture on the fruit quality of Satsuma mandarin (Citrus unshiu Marc). *Proceedings of the International Society of Citriculture. (Tokyo)*, 2, 524-527.
- Lakatos, T. (2004).** Effects of crop load on tree water use in apple (*Malus x domestica* Borkh). *Acta Hortic.* 646, 55-61.
- Lamine, C and Bellon, S. (2009).** Transitions vers l'agriculture biologique Versailles: Pratiques et accompagnements pour des systèmes innovants, *Edition Quae; Dijon, Educagri, cop.* pp 315.
- Lamm, F.R and Camp. C.R. (2007).** Subsurface drip irrigation. *Developments in Agricultural Engineering.* 13, 473-551.

- Lamm, F.R, Ayars, J & Nakayama, F. (2006).** Microirrigation for crop production: design, operation, and management. *Edition Burlington: Elsevier*, 643 p
- Lampinen, B.D., Shackel, K.A., Southwick, S.M & Olson, W.H. (2001).** Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune. *Irrig. Sci.* 20, 47-54.
- Lehmann, J. (2003).** Subsoil root activity in tree-based cropping systems. *Plant and Soil*, 255, 319-331.
- Leib, B.G., Caspari, H.W., Andrews, P.K., Redulla, C.A., Jabro, J.D & Strausz, D. A. (2004).** Deficit irrigation and partial rootzone drying compared in fuji apples: Fruit yield, fruit quality and soil moisture trends. *Proceedings of the ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa, Ontario, Canada, August 1-4.*
- Leib, B.G., Caspari, H.W., Redulla, C.A., Andrews, P.K & Jabro, J.J. (2006).** Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semiarid climate. *Irrig. Sci.* 24, 85-99.
- Leib, B.G., Jabro., J.D & Matthews, G.R. (2003).** Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil sci.* 168, 396-408.
- Lemarchand, P and Radi, L. (1996).** Israël/Palestine demain : atlas prospectif. *Éditeur Bruxelles : Edition Complexe*, 143p.
- Lespinasse, J.M and Leterme, E. (2005).** De la taille à la conduite des arbres fruitiers. : *Edition: Éducagri éd. Rodez: Édition du Rouergue, Dijon*, 254 p.
- Letessier, I and Fermond, C. (2004).** Étude des terroirs viticoles vaudois. Caractérisation des sols. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 36, 4 4-10.
- Li, S-H., Huguet, J-G., Schoch, P.G & Orlando, P. (1989).** Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development. *J. Hort. Sci.* 64, 541-552.
- Liu, M.C., Kojima, T., Tanaka, M & Chen, H., (2001).** Effect of soil moisture on plant growth and fruit properties of strawberry. *Acta Hortic. Sin.* 28 (4), 307-311.
- Liu, W.T., Wenkart W, Allen, L.H & Lemon, E.R. (1978).** Soil-plant-water relations in a New York vineyard: resistances to water movement. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 103, 226-230.
- Livellara, N., Saavedra, F & Salgado, E. (2011).** Plant based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees. *Agric. Water Manage.* 98, 684-690.
- Lombardini, L., Caspari, H.W., Elfving, D.C., Auvil, T.D & McFerson, J.R. (2004).** Gas exchange and water relations in "Fuji" apple trees grown under deficit irrigation. *Acta Hortic.* 636, 43-50.

- Ma, F., Kang, S., Wang, M., Pang, X., Wang, J & Li, Z. (2006).** Effect of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of pear-jujube tree in greenhouse. *Trans. CSAE*, 22, 37-43.
- Mac arthur, M and Wetmore, R.H. (1941).** Developmental studies of apple fruit in varieties Mac Intosh, Red and Wagener. *Can. J. res.* C19, 371-382.
- Maotani, T and Machida, Y. (1977).** Studies on leaf water stress in fruit trees. VII. Effects of summer water potential on Satsuma mandarin trees on fruit characteristics at harvest time. *J. JPN. Soc. Hortic. Sci.* 46, 145-152.
- Marguery, P. (1992).** Contribution à l'étude et à l'amélioration de la croissance du fruit chez le pommier (*Malus domestica* Dork. cv Golden delicious). *Université d'Amiens: Thèse de doctorat*, 177 p.
- Marsal, J and Girona, J. (1997).** Relationship between Leaf Water Potential and Gas Exchange Activity at Different Phenological Stages and Fruit Loads in Peach Trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 122, 415-421.
- Marsal, J., Mata, M., del Campo, J., Arbones, A., Vallaverdu, X., Girona, J., Olivo, N. (2008).** Evaluation of partial root-zone drying for potential field use as a deficit irrigation technique in commercial vineyards according to two different pipeline layouts. *Irrig. Sci.* 26, 347-356.
- Marschner, P. (2012).** Marschner's mineral nutrition mineral nutrition of higher plants. Academic, London, p 651
- Martín-Vertedor, A., Pérez-Rodríguez, J.M., Prieto, H & Fereres, E. (2011).** Interactive responses to water deficits and crop load in olive (*Olea europaea* L. cv. Morisca) I. Growth and water relations. *Agric. Water Manage.* 98, 941-949.
- Masseron, A. (1989).** Les porte-greffe pommier, poirier et nashi. CTIFL, 112-174.
- Massonnet, C., Costes, E; Rambal, S., Dreyer, E & Regnard, J.L. (2007).** Stomatal Regulation of Photosynthesis in Apple Leaves: Evidence for Different Water-use Strategies between Two Cultivars. *Annals of Botany* 100: 1347–1356, 2007
- Mathieu, C., Audoye, P & Chossat, J.C. (2007).** Bases techniques de l'irrigation par aspersion. *Paris: Lavoisier.* 474 p.
- McCann, I.R and Starr, J.L. (2007).** Use of multisensor capacitance probes as irrigation management tool in humid areas: Case studies and experiments from the mid-atlantic region. *App. Eng. Agric.* 23, 475-483.

- McCutchan, H and Shackel, K.A. (1992).** Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv French). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117, 607-611.
- Mehinagic, E. (2004).** Recherche de descripteurs objectifs de la qualité sensorielle des pommes (*malus domestica*). *Thèse de doctorat, Université de Nantes Faculté des Sciences et Techniques*, 301 p.
- Memmi, H., Couceiro, J.F., Gijón, C & David Pérez-López, D. (2016).** Impacts of water stress, environment and rootstock on the diurnal behaviour of stem water potential and leaf conductance in pistachio (*Pistacia vera* L.). *Span. J. Agric. Res.* Vol14, n:°2.
- Mercier, V., Bussi, C., Lescourret, F & Gérard, M. (2009).** Effects of different irrigation regimes applied during the final stage of rapid growth on an early maturing peach cultivar. *Irrig. Sci.* 27, 297-306.
- Merot, A; Wery, J; Isbérie, C & Charron F. (2008).** Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *Eur. J. Agron.* 28, 8-18.
- Mills, T.M., Behboudian, M.H & Clothier, B.E. (1996).** Water relations, growth, and the composition of 'Braeburn' apple fruit under deficit irrigation. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 121, 286-291.
- Mills, T.M., Behboudian, M.H., Tan, P.Y & Clothier, B.E. (1994).** Plant water status and fruit quality in Braeburn apples. *Hortscience*, 29 (11), 1274-1278.
- Mitchell, P.D., Jerie, P.H & Chalmers, D.J. (1984).** The effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth, and yield. *J. Am. Soc. Hortic. Sc.* 109, 604-606.
- Mitchell, P.D and Chalmers, D.J. (1982).** The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107: 853-56
- Modlibowska, I. (1945).** Pollen tube growth and embryo-sac development in apples and pears. *Pomol.* 21, 57-89.
- Molden, D. (2007).** Water for Food Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. *International Water Management Institute, Battaramulla, Sri Lanka*, p 688.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R & Makin, I. (2003).** A Water-productivity Framework for Understanding and Action. *In: Kijen, J. W., Barker., R., Molden, D. (Eds.), Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvemen*, 1-18.
- Monney, P. (2011).** Fiche technique: Pratique de l'irrigation des vergers. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 43, 98-102.

- Monney, P and Henrio, C. (2004).** Effet de la lumière sur la teneur en sucres des pommes. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 36 (3), 177-182.
- Monney, P and Riesen, W. (1996).** Porte-greffe du pommier. Résultats intermédiaires des essais alémaniques et romans. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 28, 319-324.
- Moriana, A., Giron, I., Martín-Palomo, M.J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Torrecillas A., & Moreno, F. (2010).** New approach for olive trees irrigation scheduling using trunk diameter sensors. *Agric. Water Manage.* 97, 1822-1828.
- Moriana, A., Orgaz, F., Fereres, E & Pastor, M. (2003).** Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 425-431.
- Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H., Dixon, J., Neal, S.M & Caspari, H.W. (2000).** Improvement of fruit quality and storage potential of 'Braeburn' apple through deficit irrigation. *J. Hort. Sci. Biotech.* 75, 615-621.
- Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H & Mills, T.M. (2001).** Effect of deficit irrigation on fruit maturity and quality of 'Braeburn' apple. *Sci. Hortic.* 90, 279-290.
- Musy, A and Higy, C. (2004).** Hydrologie: Une science de la nature. *Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes*, 348 p.
- Naor, A. (2000).** Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Hortic.* 537, 447-454.
- Naor, A. (2006).** Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Hortic. Rev.* 32, 111-116.
- Naor, A and Cohen, S. (2003).** Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *Hortscience*, 38, 547-551.
- Naor, A., Gal, Y & Peres, M. (2006).** The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the variability of a leaf-selection procedure for water potential measurements. *Irrig. Sci.* 24, 129-135.
- Naor, A., Klein, I & Doron I. (1995).** Stem water potential and apple size. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 120, 577-582.
- Naor, A., Naschitz, S., Peres, M & Gal, Y. (2008).** Responses of apple fruit size to tree water status and crop load. *Tree Physiol.* 28, 1255-1261.
- Nemeskéri, E. (2007).** Water relations of apple and influence on fruit quality. *Int. J. Hort.Sci.* 13 (3), 59-63.

- North, N., Kljun, N., Kasser, F., Heldstab, J., Maibach, M., Reutimann, J & Guyer, M. (2007).** Changements climatiques en Suisse. Indicateurs des causes, des effets et des mesures. *Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne*, 77 p.
- O'Connell, M.G and Goodwin, I. (2007).** Responses of 'Pink Lady' apple to deficit irrigation and partial rootzone drying: physiology, growth, yield, and fruit quality. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 1068-1076.
- Odriozola-Serrano, I., Hernandez-Jover, T & Martin-Belloso, O. (2007).** Comparative evaluation of UV-HPLC methods and reducing agents to determine vitamin C in fruits. *Food Chem.* 105, 1151-1158.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E & Torrecillas, A. (2005).** Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and rewatering. *Environ. Exp. Bot.* 54, 155-162.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcó, J.J & Torrecillas, A. (2006).** Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees*, 20, 1-8.
- Ostrowska, K & Chelpinski, P. (2003).** The effect of drip-irrigation on the yield and content of organic compounds in fruits of three strawberry cultivars. *Folia Hort.* 15, 159-166.
- Paltineau, I.C & Starr, J.L. (1997).** Real-time soil water dynamics using multisensory capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 61, 1576-1585.
- Paly, M and Zell, A. (2009).** Optimal irrigation scheduling with evolutionary algorithms. *In: Giacobini M, et al (eds) EvoWorkshps, LNCS*, 5484, 141-151.
- Penman, H.L. (1948).** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, A193, 120-146.
- Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Torrecillas, A & Ruiz-Sánchez, M.C. (2009).** Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. *Irrig. Sci.* 27, 231-242.
- Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Martínez, J.A., Nortes, P.A., Artes, F & Domingo, R. (2007).** Effect of deficit irrigation on apricot fruit quality at harvest and during storage. *J. Sci. Food Agric.* 87, 2409-2415.
- Pérez-Pérez, J.G., Robles, J.M & Botía, P. (2009).** Influence of deficit irrigation in phase III of fruit growth on fruit quality in 'lane late' sweet orange. *Agric. Water Manage.* 96, 969-974.
- Pesson, P and Louveaux, J. (1984).** Pollinisation et productions végétales. *Paris, INRA*, 663 p.

- Perez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Mounzer, O., Alarcon, J & Nicolas, E. (2010).** Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. *Span. J. Agric. Res.* 8, 86-94.
- Peyremorte, P., Soing, P., & Vaysse, P. (1990).** L'irrigation des arbres fruitiers. *Edition: CTIFL.* 252 p.
- Phene, C.J., Davis, K.R., Hutmacher, R.B., Mead, R.M., Ayars, J.E & Schoneman, R.A. (1993).** Maximizing water-use efficiency with subsurface drip irrigation. *Irrig. J.* 8-13.
- Philip, J. (1966).** Plant water relations: some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Phys.* 17, 245-268.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, S., Poon, E., Abbett, E & Nandagopal, S., (2004).** *Water resources: agricultural and environmental issues. Bioscience*, 54, 909-918.
- Postel, S (1998).** Water for food production: will there be enough in 2025? *Bioscience*, 48, 629-637.
- Prekic, R., (1994).** The effect of different nitrogen rates on peach yield and quality. CAB. Abstract, 1996-7. pp: 970
- Proebsting, E.L., Drake, S.R & Evans, R.G. (1984).** Irrigation management, fruit quality, and storage life of apple. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 109, 229-232.
- Raven, P.H., Evert, R.F., Eichhorn, S.E., Bouharmont, J Evard, C.M. (2000).** Biologie végétale. Paris France: *Iére Edition, De Boeck université*, 944 p.
- Raven, P,H., Evert, R.F., & Eichhorn, S.E. (2003).** Biologie végétale. *Edition: De Boeck Supérieur, USA*, 968 p.
- Rieul, L and Ruelle, P. (2003).** Irrigation-Guide pratique. 3^{ème} Edition. *Cemagref* 344 p.
- Rijsberman, F.R. (2006). Water scarcity: fact or fiction? *Agric. Water Manage.* 80, 5-22.
- Ro, H.M. (2001).** Water use of young 'Fuji' apple trees at three soil moisture regimes in drainage lysimeters. *Agric. Water Manage.* 50, 185-196.
- Ro, H.M. (2001).** Water use of young 'Fuji' apple trees at three soil moisture regimes in drainage lysimeters. *Agric. Water. Manage.* 50, 185-196.
- Roberson, M., Fulton, A., Laosheng, W., Handley, D., Buss, P & Oster, J. (1996).** Evapotranspiration, Irrigation Scheduling. Capacitance probes used for cotton irrigation scheduling. *In: Camp, C.R., Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds.). ASAE, St. Joseph, MI, USA*, pp. 1109-1114.
- Roche, L., Codarin, S & Mathieu, V. (2009).** L'éclaircissage mécanique du pommier Perspectives pour demain. *Infos-Ctifl*, 251, 32-36.

- Rodríguez, P., Mellisho, C.D., Conejero, W., Cruz, Z.N., Ortuño, M.F., Galindo, A & Torrecillas, A. (2012).** Plant water relations of leaves of pomegranate trees under different irrigation conditions. *Environ. Exp. Bot.* 77, 19-24.
- Rodríguez-Díaz, J., Weatherhead, E., Knox, J & Camacho, E. (2007).** Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Reg. Environ. Change*, 7, 149-159.
- Romero, P., Botia, P & Garcia, F. (2004).** Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees. *Plant Soil*, 260, 155-168.
- Romero, P., Botia, P & Garcia, F. (2004a).** Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almonds. *Plant Soil*, 260, 169-181.
- Romero, P., Navarro, J.M., García, F & Ordaz, P. (2004b).** Effects of regulated deficit irrigation during the pre-harvest period on gas exchange, leaf development and crop yield of mature almond trees. *Tree Physiol.* 24, 303-312.
- Romero, P., Navarro, J.M., Pérez- Pérez, J.G., García-Sánchez, F., Gómez-Gómez, A., Porrás, I., Martínez, V & Botía, P., (2006).** Deficit irrigation and rootstock: their effects on water relations vegetative development, yield, fruit quality and mineral nutrition of Clemenules mandarin. *Tree Physiol.* 26, 1537-1548.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Savé, R., Biel, C & Torrecillas, A. (1997).** Effects of water stress and rewatering on leaf water relations of lemon plants. *Biol. Plant.* 39, 623-631.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A & Domingo, R. (2000).** Regulated deficit irrigation in apricot trees. *Acta Hort.* 537, 759-766.
- Scanlon, B.R., Andraski, B.J & Bilskie, J. (2002).** Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. Methods of soil analysis, part 4-Physical methods. USA: In: Dane JH, Topp GC (eds) . *Am. Agron. Soc. Madison, USA*, pp 643-670.
- Scholander, P.F., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A & Hammel, H.T. (1965).** Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148, 339-346.
- Schultz, H.R and Matthews, M.A. (1988).** Resistance to water transport in shoots of *Vitis vinifera* L. *Plant Physiol*, 88,718-724.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B & Lampinen, B. (1997).** Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7, 23-29.

- Shao, H.B., Chu, L.Y. Shao, M.A., Jaleel C.A and Hong-Mei, M. (2008).** Higher plant antioxidants and redox signaling under environmental stresses. *Comptes Rendus Soc. de Biol.* 331, 433-441.
- Shi, Y., Yu, Z. W., Wei, D. B & Yu, S. L. (1998).** Effects of soil water stress on the senescence of root system and flag leaves in wheat. *Acta Botany Boreal-Occident Sinica*, 18, 196-201 (In Chinese).
- Shi, W.J & Kang, S.Z. (2000).** Mechanisms and effects of the controlled alternate partial rootzone irrigation in soil vertical profile for water-saving. *Tran. Chin. Soc. Agric. Eng.* 16, 11-15.
- Shivashankara, K.S., Srinivasa Rao, N.K & Geetha, G.A. (2013).** Impact of Climate Change on Fruit and Vegetable Quality. *Climate-Resilient Horticulture: Adaptation and Mitigation Strategies*, 237-244.
- Shock, C. (2004).** Granular matrix sensors. Retrieved from <http://www.cropinfo.net/granular.htm>.
- Siegrist, J.P and Gasser, F. (2008).** Recommandation 2008-2009 aux entrepositaires de fruits et légumes. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 40(5), 303-307.
- Siegrist, J.P and Cotter, P.Y. (2011).** Stade optimal de récolte des pommes Gala: bilan de onze ans d'expérimentation de conservation. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 43(2), 124-131.
- Silva, C.R., Folegatti, M.V., Silva, T.J.A., Alves junior, J., Souza, F.C & Ribeiro, R.V. (2005).** Water relations and photosynthesis as criteria for adequate irrigation management in 'Tahiti' lime trees. *Sci. Agr.* 62, 415-422.
- Spaans, E.J.A and Baker, J.M. (1992).** Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matrix potential and temperature. *Plant Soil*, 143,213-217.
- Spreer, W., Nagle, M., Neidhart, S., Carle, R., Ongpraset, S & Müller, J. (2007).** Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on the quality of mango fruits (*Mangifera indica* L. cv. "Chok Anan"). *Agric. Water Manage.* 88, 173-180.
- Spring, J.L and Zufferey, V. (2011).** Irrigation: comportement de la vigne et qualité des vins de cépages blancs dans le Valais central. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 43 (3), 162-171.
- Starr, J.L and Paltineanu, I.C. (2002).** Capacitance devices. Methods of Soil Analysis. USA: In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, pp. 463-474.
- Starr, J.L and Paltineanu, I.C. (1998a).** Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. *Soil Till. Res.* 47, 43-49.

- Starr, J.L and Paltineanu, I.C. (1998b).** Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am.* 62, 115-122.
- Steffen, W. (2008).** Working Groupe 1 report of IPCC Fourth assesement-An editorial, *Glob Environment Change. Part B - Environmental Hazards*, 18, 1-3.
- Stern, R.A., Meron, M., Naor, A. Wallach, R., Bravdo, B & Gazit, S. (1998).** Effect of fall irrigation level in “Mauritius” and “Floridian” lychee on soil and plant wa-ter status, flowering maturity, and yield. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 123, 150-155.
- Strauß, R., Bleiholder, H., Bomm van den, T., Buhr, L., Hack, H., Heß, M., Klose, R., Meier, U and Weber, E. (1994).** Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien monound dikotyler Pflanzen. *Erweiterte BBCH-Skala, Basel*, 27 pp.
- Sturmo, K and Stamparo, F. (1999).** Seasonal Variation of Sugars and Organic Acids in Apple (*Malus domestica* Borkh.) in Different growing systems. *Phyton (Austria) Special issue, "Plant Physiology"*, 39, 91-96.
- Swafel, T.D., Steppe, K & Raoul, L. (2009).** Determining reference values for stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in young apple trees based on plant responses to water deficit. *Agric. Water Manage.* 96, 541-550.
- Talluto, G., Farina, V., Volpe, G & Lo Bianco, R. (2008).** Effects of partial rootzone drying and rootstock vigour on growth and fruit quality of “*Pink Lady*” apple trees in Mediterranean environments. *Aust. J. Agr. Res.* 59, 785-794.
- Taylor, B.K. and Goubran. F.H. (1975).** The phosphorus nutrition of the apple tree. I. Influence of rate of application of superphosphate on the performance of young trees. *Aust. J. Agr. Res.* 26, 843-853.
- Tejero, I.G., Vicente, R.R., Bocanegra, J.A., García, G.M., Zuazo, V.H.D & Fernández, J.L.M. (2010).** Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality, and water productivity. *Agric. Water Manage.* 97, 689-699.
- Thalheimer, M and Paoli, N. (2004).** Zur Bewässerung in Obstbau. *Obstbau Weinbau*, 5, 162-165.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Agüera, T., Valdez, L.C & Fernández, M.D. (2006).** Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrig. Sci.* 24, 185-202.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C & Fernández, M.D. (2007a).** Using plant water status to define soil water thresholds for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agric. Water Manage.* 88, 147-158.

- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C & Fernández, M.D. (2007).** Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Agric. Water Manage.* 92, 13-28.
- Thompson, T.L., Pang, H.C & Li, Y.Y. (2009).** The Potential Contribution of Subsurface Drip Irrigation to Water-Saving Agriculture in the Western USA. *Agric. Sci. Ch.* 8, 850-854.
- Thomson, S.J and Armstrong, C.F. (1987).** Calibration of the Watermark model 200 soil moisture sensor. *Appl. Eng. Agric.* , 3, 186-189.
- Tiercelin, J.R and Vidal, A. (2006).** Traité d'irrigation, 2^{ème} édition, Lavoisier, 1262p.
- Tonelli, N and Gallouin, F. (2013).** Des fruits et des graines comestibles du monde entier. *Lavoisier, 15 oct.* 736p.
- Torrecillas, A., Domingo, Galego, R & Ruiz-Sánchez, M.C. (2000).** Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Sci. Hortic.* 85, 201-215.
- Trillot, M., Masseron, A., Mathieu, V., Bergougnoux, F., Hutin, C & Lespinasse, Y. (2002).** Le pommier. *Ctifl. Paris.* 287 p.
- Tromp-van Meerveld, H.J., and McDonnell, J.J. (2000).** Assessment of multi-frequency electromagnetic induction for determining. *J. Hydrol.* 368, 56-67.
- Tron, G., Isbérie, C & Chol, P. (2000).** La tensiométrie pour piloter l'irrigation. *Dijon: Educagri.* 247 p.
- Trubat, R., Cortina, J & Vilagrosa, A. (2006).** Plant morphology and root hydraulics are altered by nutrient deficiency in *Pistacia lentiscus* L. *Trees*, 20, 334-339. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-005-0045-z>
- Tukey, H.B., & Young, J.O. (1942).** Growth morphology and histology of developing fruit of the apple. *Botanical Gazette* , 100, 723-749.
- Turner, N. (1981).** Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil*, 58, 339-366.
- Tyree, M.T & Cochard, H. (2003).** Vessel contents of leaves after excision: a test of the Scholander assumption. *J. Exp. Bot.* 54, 2133-2139.
- USDA. (1995).** Soil taxonomy. Agriculture handbook Nr 436, Soil survey staff, *U.S. Washington: Departement of agriculture.*
- Vachaud, G., Dancette, C., Sonko, M. & Thony J.L. (1978).** Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé: application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Annales Agronomiques*, 29, 1-36.
- Van Hoojdonk, B.M., Dorji, K & Behboudian, M.H. (2004).** Responses of 'Pacific Rose' apple to partial rootzone drying and deficit irrigation. *Eur. J. Hort. Sci.* 69, 104-110.

- Van Schilfgaarde, J. (1994).** Irrigation-a blessing or a curse. *Agric. Water Manage.* 25, 203-219.
- Van Zyl, J.L. (1987).** Diurnal Variation in Grapevine Water Stress as a Function of Changing Soil Water Status and Meteorological Conditions. *Afr. J. Enol. Vitic.* 8 (2), 45-52.
- Verreynne, J.S., Rabe, F & Theron, K.I. (2001).** The effect of combined deficit irrigation and summer trunk girdling on the internal fruit quality of “Marisol” Clementines. *Sci. Hort.* 91, 25-37.
- Wang, F., Kang, Y., Liu, S & Hou, X. (2007).** Effects of soil matric potential on potato growth under drip irrigation in the North China Plain. *Agric. Water Manage.* 88, 34-42.
- Wan Zaliha, W. S and Singh Z., (2010).** Impact of regulated deficit irrigation on fruit quality and postharvest storage performance of ‘Cripps Pink’ apple. *Acta Hort. (ISHS)* 877,155-162. Accès: http://www.actahort.org/books/877/877_13.htm [17 janvier 2013].
- Wei, C., Tyree, M.T & Steudle, E. (1999).** Direct measurement of xylem pressure in leaves of intact maize plants. A test of the cohesion-tension theory taking hydraulic architecture into consideration. *Plant Physiol.* 121, 1191-1205.
- Wertheim, S.J. (1997).** Chemical thinning of deciduous fruit trees. Proc. 8th Symposium plant bioregulators. ISHS, Acta Hort. 463, 445-462.
- Widmer, A., Gölles, M., Kockerols, K., Stadler, W & Christen, D. (2008).** Possibilités et stratégies d’éclaircissage du pommier à l’éthéphon. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* Vol. 40 (2), 87-93.
- Widmer, A., Gölles, M & Leumann, R. (2012).** Eclaircissage mécanique en arboriculture. Fiche technique, *Editeur: Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW*, 1-4.
- Williams, L.E and Araujo, F.J. (2002).** Correlation among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 127, 448-454.
- Young, M.H and Sisson, J.Y. (2002).** Tensiometry, . In: J. Dane and C. Topp (eds.). *Methods of soil analysis, Part 4. Soil Sci. Soc. Amer. Book Ser. 5. Amer. Soc. Agron. Madison, WI.* p. 575-609.
- Zegbe, J.A., Behboudian, M.H & Clothier, B.E. (2007).** Reduced irrigation maintains photosynthesis, growth, yield, and fruit quality in ‘Pacific Rose™’ apple. *J. Sustain. Agr.* 30, 125-136.
- Zegbe, J.A., Behboudian, M.H., Clothier, B.E & Lang, A. (2008).** Postharvest performance of “Pacific Rose” apple grown under partial rootzone drying. *Hortscience*, 43, 952-954.

- Zegbe, J.A and Serna-Pérez, A. (2011).** Partial rootzone drying maintains fruit quality of “Golden Delicious” apple at harvest and postharvest. *Sci. Hortic.* 127, 455-459.
- Zeng, C.Z., Bie, L.Z and Yuan, Z.B. (2009).** Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse. *Agric. Water. Manage.* 96, 595-602.
- Zhang, S.Y., Zhang, G.C., Gu, S.Y., Xia, J.B & Zhao, J.K. (2010).** Critical responses of photosynthetic efficiency of goldspur apple tree to soil water variation in semiarid loess hilly area. *Photosynthetica*, 8, 589-595.
- Zufferey, V and Murisier, F. (2006).** Terroirs viticoles vaudois et alimentation hydrique de la vigne. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 38, 283-287.